

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AÇIK DENİZ YAPILARININ  
SIVILAŞABİLEN TABAKALAR ÜZERİNDEKİ DAVRANIŞI**

**MURAT ERGENOKON SELÇUK**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
GEOTEKNİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF.DR KUTAY ÖZAYDIN  
DOÇ.DR.MEHMET BERİLGİN**

**İSTANBUL, 2011**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK DENİZ YAPILARININ  
SIVILAŞABİLEN TABAKALAR ÜZERİNDEKİ DAVRANIŞI**

Murat Ergenokon SELÇUK tarafından hazırlanan tez çalışması 14.11.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman**

Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

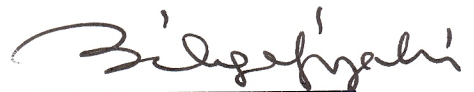
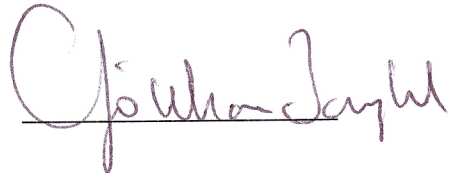
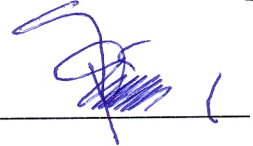
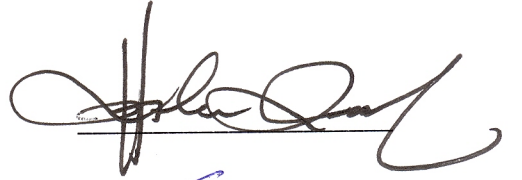
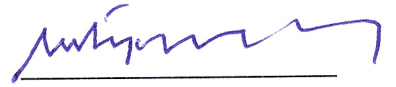
Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. ATILLA ANSAL  
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM  
Yıldız Teknik Üniversitesi (Emekli)

Prof. Dr. Gökhan BAYKAL  
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge SİYAHİ  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü



## ÖNSÖZ

---

Ülkemiz jeolojik yerleşimi sebebiyle büyük depremlerle sarsılmış ve büyük kayıplar vermiştir. Depremlerin yaratacağı zararlar, yapılaşmanın mühendislik kriterlerine uygun olma derecesiyle yakından ilgilidir. Bu kapsamda yapıların üzerinde yer aldığı zeminlerin deprem sırasında yapacağı davranışın incelenmesi önem kazanmaktadır. Deprem sarsıntısı altında zeminlerde görülen en önemli problemlerden birisi de sıvılaşma olgusudur. Sıvılaşma problemleri 1999 Kocaeli depreminde ülkemizde yaygınca görülmüştür. Yaşanan üzücü deprem sonrası büyük miktarda can ve mal kayıpları oluşmuş, ülke ekonomisine de büyük etkileri olmuştur. Beklenen Marmara depreminde de depremlere hazır olma derecemize bağlı olarak kayıplar oluşacaktır. Üç tarafı denizlerle çevirili ülkemizde liman yapıları da ekonomimiz için büyük öneme sahiptir. Liman yapılarının bir deprem sonrası işlevine devam etmesi hem ekonomiyi destekleyecek hem de olası yardımların ülkemize ulaşmasında büyük sorumluluk taşıyacaktır. Bu nedenle liman yapılarını koruyan dalgakıranların deprem sonrasında görevini yerine getirebiliyor olması çok önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında sıvılaşabilen zeminler üzerine inşa edilmiş dalgakıranların deprem etkileri altındaki davranışı araştırılmıştır.

Doktora tez çalışmam boyunca bilgi ve desteğini esirgemeyen, attığımız her adımda sabırla yol gösteren, değerli vaktini bizler için harcayan ve çok kıymetli Hocam Sayın Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim. Tez çalışmam süresince ilgisi ve bilimsel görüşleri ile yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Doç.Dr. Mehmet BERİLGİN'e, ilgisi ve bilgisi ile her zaman yanımda olan, moral desteğini her koşulda sunmaktan çekinmeyen, bizlere sahip çıkan değerli Hocam Prof.Dr. Mustafa YILDIRIM'a, bilimsel görüşleriyle bizleri donatan, yakınlığını hiç esirgemeyen bizleri cesaretlendiren değerli Hocam Prof.Dr.Sönmez YILDIRIM'a, bilgisini ve değerli zamanını hiç bir zaman eksik etmeyen Prof.Dr. Atilla ANSAL'a, bilimsel görüş ve tavsiyelerini esirgemediğim ve deneylerimi gerçekleştirebilmem için hidrolik laboratuvarının kapılarını sonuna kadar açan değerli Hocam Prof.Dr. Yalçın YÜKSEL'e, moral katkılarını her zaman hissettiğim değerli Hocalarım Yrd.Doç.Dr. Şükrü ÖZÇOBAN'a, Yrd.Doç.Dr. Havvanur KILIÇ'a, Yrd.Doç.Dr. Saadet Arzu BERİLGİN'e, sağladığı katkılar ve moral desteği için değerli hocam ve arkadaşım Yrd.Doç.Dr.Pelin Özener'e, akademik hayatım boyunca sürekli olarak desteğini ve önderliğini esirgemeyen, hakkını asla ödeyemeyeceğim Dr.İnş.Müh. Murat TONAROĞLU'na, manevi olarak her zaman yanımda hissettiğim, sınırsız desteğiyle hakkı ödenmez dostum Dr.İnş.Müh Niyazi Terzi'ye, tez çalışmalarımızın her anını paylaştığımız, muhabbet ve moral desteğiyle hep yanımda olan dostum çalışma arkadaşım Dr.İnş.

Müh.Tayfun ŞENGÜL'e, en zor zamanlarımda yanımda olarak deneylerimin gerçekleşmesini sağlayan dostum Dr.İnş.Müh.Doğan ÇETİN'e, laboratuvar çalışmalarım sırasında elinden gelen yardımları esirgemeyen, deneysel çalışmanın her anında moral desteğiyle her zaman desteklerini esirgemeyen, Dr.İnş.Müh Kubilay CİHAN'a, yardımlarından dolayı Sayın Ali YÜKSEL'e, yardımları ve muhabbetiyle yanımda olan Dr.İnş.Müh.Cem AKGÜNER ve İnş.Yük.Müh Çiğdem ÖZÇELİK'e, deneylerimin her anında desteğini esirgemeyen Tekn.Gazi KURT'a, yardımlarından ötürü dostum Dep.Yük.Müh.Ali Y.SALKIN'a, Jeol.Müh. Serpen Demir'e, İnş.Müh. Lale Öner'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Yaşanan tüm zorlukları aşarken hep yanımda olan, koşulsuz sevgileriyle saran, haklarını nasıl ödeyeceğimi bilemediğim canım Anneme, canım Babama ve canım kardeşim Yük.Mimar Mehmet Fatih SELÇUK'a, sabrı ve kocaman sevgisiyle hep yanımda olan eşim Oya SELÇUK'a ve sayesinde kazandığım yeni aileme desteklerinden ötürü en derin ve en içten sevgilerimi, teşekkürlerimi sunmayı bir görev bilirim

Kasım, 2011

Murat Ergenokon SELÇUK

## İÇİNDEKİLER

---

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTIMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xv
ÖZET .....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	20
1.1    Literatür Özeti .....	21
1.2    Tezin Amacı .....	29
1.3    Hipotez .....	31
<b>BÖLÜM 2</b>	
SUYA DOYGUN ZEMİNLERİN ÇEVİRİMSEL GERİLMELER ALTINDAKİ DAVRANIŞI .....	32
2.1    Giriş .....	32
2.2    Kumların Statik ve Dinamik Yükler Altındaki Davranışı.....	32
2.3    Çevrimsel Gerilme .....	37
2.4    Deprem Dalgaları ve Deniz Dalgalarının Karşılaştırılması .....	38
<b>BÖLÜM 3</b>	
MATERYAL ve YÖNTEM.....	40
3.1    Giriş .....	40
3.2    Zeminlerin İndeks Özellikleri.....	40
3.3    Üç Eksenli Basınç Deneyleri .....	42
3.4    Hiperbolik Model .....	47
3.5    Direkt Kesme Deneyleri .....	50

3.6	Basit Kesme Deneyleri .....	51	
3.7	Çevrimli Basit Kesme Deneyleri .....	56	
<b>BÖLÜM 4</b>			
<b>MODEL DENEY SİSTEMİ..... 61</b>			
4.1	Sarsma Tankı ve Yağmurlama Sistemi .....	61	
4.2	Sıklık Tayini.....	65	
4.3	Su altında Numune Hazırlama .....	66	
4.4	Ölçüm Sensörleri.....	66	
4.5	Veri Toplama Sistemi .....	67	
<b>BÖLÜM 5</b>			
<b>MODEL DENEYLER..... 69</b>			
5.1	Giriş .....	69	
5.2	Birinci Aşama Deneyler .....	70	
5.2.1	Deney sonuçları .....	71	
5.3	İkinci Aşama Deneyler.....	84	
5.4	Model Deneylerde Gözlemlenen Dinamik Davranış.....	91	
5.4.1	İvmeler ve Boşluk Suyu Basıncı Artışları .....	91	
5.4.2	Dalgakıran Kesitinde Oluşan Şekil Değişiklikleri.....	158	
5.4.3	Dalgakıran Kesitinde Oluşan Deplasmanların İrdelenmesi .....	193	
5.4.4	Hasar Oranı Çevrim Sayısı İlişkisi .....	198	
<b>BÖLÜM 6</b>			
<b>SAYISAL ANALİZLER .....</b>			<b>204</b>
6.1	Giriş .....	204	
6.2	Elastik Analizler .....	204	
6.2.1	Özdeğer Analizi:.....	206	
6.3	Dinamik Analiz .....	212	
6.3.1	Nonlineer Analiz .....	212	
6.3.2	Sıvılaşma Analizi.....	214	
<b>BÖLÜM 7</b>			
<b>SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>			<b>236</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>			<b>252</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>			<b>258</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

a,b	Malzeme Parametresi
Acc	İvme Ölçer
a(g)	En büyük yatay ivme
B	Efektif Gerilmenin Rijitliğe Katkı Parametresi
c	Kohezyon
C <sub>1</sub>	Sıvılaşma Parametresi
Dr	Rölatif Sıklık
dWs	Kayma İşindeki Artış
e	Boşluk Oranı
e <sub>max</sub>	Maksimum Boşluk Oranı
e <sub>min</sub>	Minimum Boşluk Oranı
E	Elastisite Modülü,
E <sub>i</sub>	Başlangıç Tanjant Modülü
Eur	Yükleme Boşaltma Modülü
expN	Gerilme Şekil Değiştirme Üstel Fonksiyonu
expM	Yükleme Boşaltma Üstel Fonksiyonu
Etmin	Minimum Tanjant Modülü
FAS	Fourier Genlik Spektrumu
G <sub>s</sub>	Özgül Yoğunluk
G	Sekant Kayma Modülü
G <sub>MAX</sub>	Maksimum Başlangıç Kayma Modülü
G <sub>0</sub>	Başlangıç Kayma Modülü
g	Yerçekimi İvmesi
K	Elastik Rijitlik Katsayısı
Ko	Sükunetteki İtki Katsayısı
Kref	Referans Efektif Gerilmedeki Hacim Modülü
K <sub>2max</sub>	Kayma Modülü İçin Katsayı
M	Magnitüd
m <sub>v</sub>	Hacimsel Sıkışma Katsayısı
n	Sabit Katsayı
n	Porozite
N <sub>eq</sub>	Eşdeğer Çevrim Sayısı
P	Deviatorik Ortalama Normal Gerilme
p' <sub>ref</sub>	İncelenen Derinlikteki Düşey Efektif Gerilme
P <sub>1</sub>	Sıvılaşma Parametresi

PP	Boşluksuyu Basıncı Ölçer
PVD	Prefabrik Düşey Dren
$P_2$	Sıvılaşma Parametresi
$Q_v$	Nomalizasyon Parametresi
$Q_i$	Kayma Gerilmesi
$q'$	Deviatorik Kayma Gerilmesi
$r$	Deviatorik Gerilme Oranı
$r_u$	Boşluksuyu Basıncı Oranı
$R_f$	Kırılma Oranı
S	Efektif Ortalama Gerilme Oranı
$Sc_{min}$	Minimum Basınç Gerilmesi
$S_o$	Kayma İşinin Fonksiyonu
$S_1$	Sıvılaşma Parametresi
SPT-N	SPT Deneyi Darbe Adedi
V	Başlangıç Hacmi
W	Normalize Kayma Şekil Değiştirmesi İş
$W_1$	Sıvılaşma Parametresi
$\varepsilon_a$	Eksenel Şekil Değiştirme
$\varepsilon_p$	Plastik Hacimsel Şekil Değiştirme
$\varepsilon_v$	Hacimsel Şekil Değiştirme
$\Delta t$	Örnekleme Aralığı
$\Delta U$	Artık Boşluksuyu Basıncı
$\Delta V$	Hacim Değişimi
$\phi$	İçsel Sürtünme Açısı
$\phi_p$	Faz Dönüşüm Açısı
$\gamma$	Kayma Şekil Değiştirmesi
$\gamma_d$	Suya Doygun Birim Hacim Ağırlığı
$\gamma_{kmin}$	Minumum Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\gamma_{kmax}$	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\gamma_w$	Suyun Birim Hacim Ağırlığı
$\xi$	Normalize Virtuel Kayma Şekil Değiştirmesi
$\eta$	Normalize Virtuel Kayma Gerilmesi
$\sigma$	Toplam Gerilme
$\sigma'_o$	Ortalama Efektif Gerilme
$\sigma_{xx}$	Xx Düzleminde Toplam Gerilme
$\sigma_{yy}$	Yy Yönünde Toplam Gerilme
$\sigma_{xy}$	Xy Düzleminde Yönünde Toplam Gerilme
$\sigma_v$	Düşey Gerilme
$\sigma_1$	En Büyük Asal Gerilme
$\sigma_3$	En Küçük Asal Gerilme, Çevre Basıncı
$\sigma_1 - \sigma_3$	Deviatorik Gerilme
$\sigma'_{ref}$	Referans Efektif Gerilme
$\psi$	Pekleşme Açısı
$\tau$	Kayma Gerilmesi
$\tau_m$	kayma Gerilmesi



$\tau_{\max}$	Maksimum Kayma Gerilmesi
$\theta$	Asal Gerilme Rotasyonu
$\nu$	Poisson Oranı
$1-\Delta V/V$	Hasar Oranı

## KISALTMA LİSTESİ

---

PIANC The Permanent International Association for Navigation Congresses  
LIMAS Liquefaction Around Marine Structures  
USACE The Corps of Engineers,USA

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Sıvılaşma Örnekleri a) Dayanma yapısındaki göçme ve yanal yayılma, Kobe1995 b) Rıhtım yapısının yanal ötelenmesi, Port Island, Kobe 1995 [4].	21
Şekil 1.2 Derince Limanı Kocaeli Depremi 1999 Sıvılaşma nedeniyle oluşan deformasyon [25] .....	23
Şekil 1.3 İzmit Marina. Kocaeli Depremi(1999). Sıvılaşma nedeniyle oluşan oturma[25].....	23
Şekil 1.4 Santrifüj deney prototipi [43].....	25
Şekil 1.5 Santrifüj deney sonuçları. boşluksuyu basınç dağılımları[44] .....	26
Şekil 1.6 Dalgakıran modelleri a) sert zemin üzerinde b) yumuşak zemin üzerinde[45].....	28
Şekil 1.7 Dalgakıran kesiti için ivme-hakim periyot ilişkisi [45].....	28
Şekil 1.8 Deforme olmuş Dalgakıran kesiti[45].....	29
Şekil 2.1 Gevşek ve sıkı zeminler için kritik boşluk oranı [55].....	33
Şekil 2.2 Kararlı durum çizigisi ve yükleme ilişkileri [57].....	34
Şekil 2.3 a)Akma yüzeyi b)akma sıvılaşması [55] .....	35
Şekil 2.4 $r_u - m_v$ ilişkisi a) [58] b) [59] .....	36
Şekil 2.5 Sıvılaşmaya karşı güvenlik ve sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme[62].....	37
Şekil 2.6 Deprem büyüklüğü ve eşdeğer çevrim sayısı ilişkisi [59] .....	38
Şekil 2.7 Sismik dalgaların yayılımının şematik gösterimi [52] .....	39
Şekil 2.8 Sıvılaşma mekanizması [52].....	39
Şekil 2.9 a)2011- Van Deprem Kaydı b) Tipik Dalga yüksekliği-zaman kaydı .....	39
Şekil 3.1 Kum malzemesine ilişkin elek analizi.....	41
Şekil 3.2 Çakıl malzemesine ilişkin elek analizi.....	41
Şekil 3.3 Kum zemini için % 45 sıklıktaki gerilme şekil değiştirme eğrisi .....	43
Şekil 3.4 Kum zemini için % 45 sıklıktaki içsel sürtünme açısı.....	44
Şekil 3.5 Kum zemini için % 60 sıklıktaki gerilme şekil değiştirme eğrisi .....	44
Şekil 3.6 Kum zemini için % 60 sıklıktaki içsel sürtünme açısı.....	45
Şekil 3.7 Kum zemini için % 75 sıklıktaki gerilme şekil değiştirme eğrisi .....	45
Şekil 3.8 Kum zemini için % 75 sıklıktaki içsel sürtünme açısı.....	45
Şekil 3.9 Kum zemini için % 85 sıklıktaki gerilme şekil değiştirme eğrisi .....	46
Şekil 3.10 Kum zemini için % 85 sıklıktaki içsel sürtünme açısı.....	46
Şekil 3.11 Hiperbolik modelde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	48
Şekil 3.12 Hiperbolik modelde a ve b değişkenlerinin gösterimi.....	48

Şekil 3.13	Dr=% 70 için direkt kesme deneyine ait içsel sürtünme açısı sonuçları .....	50
Şekil 3.14	Dr=% 50 için direkt kesme deneyine ait içsel sürtünme açısı sonuçları .....	50
Şekil 3.15	Basit kesme deneyi içsel sürtünme açısı sonuçları .....	52
Şekil 3.16	Basit kesme deneyi sonuçları (Dr%50) .....	53
Şekil 3.17	Basit kesme deneyi sonuçları Dr%70 .....	54
Şekil 3.18	Dr=%70 için kayma modülü-şekil değiştirme .....	55
Şekil 3.19	Dr=%50 için kayma modülü-şekil değiştirme .....	55
Şekil 3.20	Kayma gerilmesi kayma şekil değiştirmesi ilişkisi[67] .....	57
Şekil 3.21	Her çevrim için kayma modülü elde edilmesi.....	59
Şekil 3.22	Kuru numunelerde gerilme oranı – göçmeye yolaçan çevrim sayısı ilişkisi (Dr=%50) .....	60
Şekil 3.23	Suya doymunelerde gerilme oranı - göçmeye yolaçan çevrim sayısı ilişkisi (Dr=%50).....	60
Şekil 4.1	Model deney sistemi- sarsma tankı ve yağmurlama sistemi.....	62
Şekil 4.2	Model deney sistemi ve ölçüm noktaları .....	63
Şekil 4.3	Model deney sistemi-yandan görünüş .....	64
Şekil 5.1	Sensör yerleşimi.....	70
Şekil 5.2	Kum tabakasında ölçülen ivme değerleri (deney A1).....	73
Şekil 5.3	Kum tabakasında ölçülen artık boşluksuyu basınçları (deney A1) .....	74
Şekil 5.4	$r_u$ -zaman davranışı (deney A1).....	75
Şekil 5.5	$r_u$ – zaman davranışı (deney A1).....	76
Şekil 5.6	Kum tabakasında ölçülen ivme değerleri (deney A2).....	77
Şekil 5.7	Kum tabakasında ölçülen artık boşluksuyu basınçları (deney A2) .....	78
Şekil 5.8	$r_u$ -zaman davranışı (deney A2).....	79
Şekil 5.9	$r_u$ – zaman davranışı (deney A2).....	80
Şekil 5.10	Kum tabakasında ölçülen ivme değerleri (deney A3).....	81
Şekil 5.11	Kum tabakasında ölçülen boşluksuyu basınç değerleri (deney A3) .....	82
Şekil 5.12	$r_u$ - zaman davranışı (deney A3).....	83
Şekil 5.13	$r_u$ – zaman davranışı (deney A3).....	84
Şekil 5.14	Sıvılaşılabilen tabaka ve dalgakıran kesiti.....	85
Şekil 5.15	Model deney sistemi ve ölçüm noktaları .....	86
Şekil 5.16	Deney sonunda sıvılaştıran tabaka üzerinde deforme olmuş dalgakıran modeli .....	91
Şekil 5.17	Filtrelenmiş ivme kaydı ve frekans içeriği örneği .....	92
Şekil 5.18	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (Deney -1a - filtrelenmiş) .....	93
Şekil 5.19	Ölçülen boşluksuyu basınçları (deney -1a) .....	94
Şekil 5.20	$r_u$ - zaman grafiği (deney-1a) .....	95
Şekil 5.21	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (Deney 1b - filtrelenmiş) .....	96
Şekil 5.22	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney-1b) .....	97
Şekil 5.23	$r_u$ - Zaman grafiği (deney-1b) .....	98
Şekil 5.24	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 1c - filtrelenmiş) .....	99
Şekil 5.25	Boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (deney - 1c ) .....	100
Şekil 5.26	$r_u$ - zaman grafiği (deney -1c) .....	101
Şekil 5.27	Kum temel tabakasına uygulanan ivme değerleri (deney2a - filtrelenmiş).....	102
Şekil 5.28	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2a).....	103
Şekil 5.29	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 2a) .....	104

Şekil 5.30	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (Deney 2b - filtrelenmiş) .....	105
Şekil 5.31	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2b).....	106
Şekil 5.32	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 2b) .....	107
Şekil 5.33	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 2c - filtrelenmiş) .....	108
Şekil 5.34	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney- 2c ) .....	109
Şekil 5.35	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 2c).....	110
Şekil 5.36	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 2d- filtrelenmiş) .....	111
Şekil 5.37	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2d).....	112
Şekil 5.38	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 2d) .....	113
Şekil 5.39	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 2e - filtrelenmiş).....	114
Şekil 5.40	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2e).....	115
Şekil 5.41	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 2e ) .....	116
Şekil 5.42	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 3a - filtrelenmiş).....	117
Şekil 5.43	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 3a).....	118
Şekil 5.44	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 3a) .....	119
Şekil 5.45	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 3b- filtrelenmiş) .....	120
Şekil 5.46	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney- 3b) .....	121
Şekil 5.47	$r_u$ - zaman grafiği (deney- 3b ) .....	122
Şekil 5.48	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 3c - filtrelenmiş).....	123
Şekil 5.49	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney -3c).....	124
Şekil 5.50	$r_u$ - zaman grafiği (deney-3c ) .....	125
Şekil 5.51	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 4 - filtrelenmiş).....	126
Şekil 5.52	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney-4) .....	127
Şekil 5.53	$r_u$ - zaman grafiği (deney- 4) .....	128
Şekil 5.54	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 5a - filtrelenmiş).....	129
Şekil 5.55	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney -5a).....	130
Şekil 5.56	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 5a ) .....	131
Şekil 5.57	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 5b - filtrelenmiş) .....	132
Şekil 5.58	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 5b).....	133
Şekil 5.59	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 5b ) .....	134
Şekil 5.60	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6a - filtrelenmiş).....	135
Şekil 5.61	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 6a).....	136
Şekil 5.62	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 6a ) .....	137
Şekil 5.63	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6b - filtrelenmiş) .....	138
Şekil 5.64	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney – 6b).....	139
Şekil 5.65	$r_u$ - zaman grafiği (deney – 6b ).....	140
Şekil 5.66	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6c - filtrelenmiş).....	141
Şekil 5.67	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 6c).....	142
Şekil 5.68	$r_u$ - zaman grafiği (deney – 6c ) .....	143
Şekil 5.69	Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6d - filtrelenmiş) .....	144
Şekil 5.70	Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 6d).....	145
Şekil 5.71	$r_u$ - zaman grafiği (deney - 6d ) .....	146
Şekil 5.72	Derinlik Boyunca Maksimum ivme değişimi.....	148
Şekil 5.73	Derinlik boyunca ivme büyütme.....	149
Şekil 5.74	İvme büyütme - ivme dağılımı .....	150
Şekil 5.75	Temel zemininde PVD'ler olmasının ivme büyütmesi üzerindeki etkisi.....	151

Şekil 5.76	Yükseklik boyunca artık boşluksuyu basıncı dağılımı .....	155
Şekil 5.77	Yükseklik boyunca $r_u$ dağılımı .....	156
Şekil 5.78	Yükseklik boyunca $r_u$ dağılımı .....	157
Şekil 5.79	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1a) .....	159
Şekil 5.80	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1a) .....	160
Şekil 5.81	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1b) .....	161
Şekil 5.82	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1b) .....	162
Şekil 5.83	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1c) .....	163
Şekil 5.84	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1c) .....	164
Şekil 5.85	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2b) .....	165
Şekil 5.86	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2b) .....	166
Şekil 5.87	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2c) .....	167
Şekil 5.88	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2c) .....	168
Şekil 5.89	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2d) .....	169
Şekil 5.90	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2d) .....	170
Şekil 5.91	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2e) .....	171
Şekil 5.92	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2e) .....	172
Şekil 5.93	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-3a) .....	173
Şekil 5.94	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-3a) .....	174
Şekil 5.95	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-3b) .....	175
Şekil 5.96	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-3b) .....	176
Şekil 5.98	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-3c) .....	178
Şekil 5.99	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney durumu-4) .....	179
Şekil 5.100	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-4) .....	180
Şekil 5.101	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5a) .....	181
Şekil 5.102	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5a) .....	182
Şekil 5.103	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5b) .....	183
Şekil 5.104	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5b) .....	184
Şekil 5.105	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6a) .....	185
Şekil 5.106	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6a) .....	186
Şekil 5.107	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6b) .....	187
Şekil 5.108	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6b) .....	188
Şekil 5.109	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6c) .....	189
Şekil 5.110	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6c) .....	190
Şekil 5.111	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6d) .....	191
Şekil 5.112	Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6d) .....	192
Şekil 5.113	Model 1 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiştirme .....	194
Şekil 5.114	Model 2 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiştirme .....	194
Şekil 5.115	Model 3 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiştirmeler .....	195
Şekil 5.116	Model 4 ve Model 5 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiştirmeler .....	196

Şekil 5.117	Model 6 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiş-tirmeler.....	197
Şekil 5.118	Orjinal dalgakıran kesitinde farklı şiddette dinamik yüklemeler etkisinde oluşan hacimsel şekil değiş-tirmelerin karşılaştırılması.....	198
Şekil 5.119	Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model1) .....	199
Şekil 5.120	Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 2).....	199
Şekil 5.121	Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 3).....	200
Şekil 5.122	Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 4 ve 5).....	201
Şekil 5.123	Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 6).....	202
Şekil 5.124	Dalgakıran kesitinde hasar başlangıç eğrisi .....	202
Şekil 5.125	İvmeye bağlı hasar oranı - çevrim sayısı ilişkisi.....	203
Şekil 6.1	Kuru hal durumu için statatik durumda düşey deformasyon dağılımı .....	205
Şekil 6.2	Su altında statik durumda düşey deformasyon dağılımı .....	206
Şekil 6.3	Kuru haldeki sistemin ilk 10 moduna ait şekiller .....	208
Şekil 6.4	Su-yapı etkileşimli durum için ilk 10 moda ait şekiller .....	209
Şekil 6.5	Rijit temel durumunda ilk 10 moda ait şekiller .....	210
Şekil 6.6	Modal yatay deplasman tepkisi- frekans a)kuru durumda b) su altındaki durumda.....	211
Şekil 6.7	10s. sonunda oluşan deplasmanlar .....	213
Şekil 6.8	Çevrimli basit kesme deneyinde elde edilen $r_u$ -zaman .....	220
Şekil 6.9	C1 değişimine göre $r_u$ -zaman ilişkisi .....	222
Şekil 6.10	W1 değişimine göre $r_u$ -zaman ilişkisi.....	222
Şekil 6.11	P1 değişimine göre $r_u$ -zaman ilişkisi .....	223
Şekil 6.12	P2 değişimine göre $r_u$ -zaman ilişkisi .....	223
Şekil 6.13	S1 değişimine göre $r_u$ -zaman ilişkisi.....	224
Şekil 6.14	Nümerik analizler de kullanılan sonlu elemanlar ağı.....	225
Şekil 6.15	Nümerik analiz sonuçları (deney 1a) .....	228
Şekil 6.16	Nümerik analiz sonuçları (deney 1a) .....	229
Şekil 6.17	Nümerik analiz sonuçları (deney 3a) .....	230
Şekil 6.18	Nümerik analiz sonuçları (deney 3a) .....	231
Şekil 6.19	Nümerik analiz sonuçları (deney 4) .....	232
Şekil 6.20	Nümerik analiz sonuçları (deney 4) .....	233
Şekil 6.21	Nümerik analiz sonuçları (deney 5a) .....	234
Şekil 6.22	Nümerik analiz sonuçları (deney 5a) .....	235

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Kum malzemesinin indeks özellikleri .....	42
Çizelge 3.2	Çakıl malzemesinin indeks özellikleri.....	42
Çizelge 3.3	Kum zemine ilişkin sıklık boşluk oranı ilişkisi .....	43
Çizelge 3.4	Kum malzemesinin sıklık- içsel sürtünme açıları .....	47
Çizelge 3.5	Üç eksenli deneylerinden elde edilen kum zeminin mekanik parametreleri .....	49
Çizelge 4.1	Boşluksuyu basınç sensörüne ait teknik özellikler(Druck- Pdcr81 tipi) .....	67
Çizelge 4.2	İvme sensörlerine ait teknik özellikler .....	67
Çizelge 5.1	Ölçüm cihazları isim ve yerleri .....	87
Çizelge 5.2	Model deneyler.....	90
Çizelge 6.1	Malzeme Parametreleri(elastik statik analiz) .....	205
Çizelge 6.2	Özdeğer analizinde kullanılan modelde kullanılan malzeme parametreleri .....	206
Çizelge 6.3	İlk 10 moda ait hakim frekanslar(kuru durumda).....	207
Çizelge 6.4	İlk 10 moda ait hakim frekanslar .....	207
Çizelge 6.5	Rijit temele sahip sistemin ilk 10 moduna ait hakim frekanslar (su altında) .....	207
Çizelge 6.6	Nümerik modelde kullanılan dalgakıran kesitine ait malzeme özellikleri	213
Çizelge 6.7	Nümerik modelde kullanılan malzeme özellikleri(Çev.Bas.Kes.Deneyi) .	221
Çizelge 6.8	Nümerik modelde kullanılan kum tabakasına ait malzeme özellikleri .....	225
Çizelge 6.9	Nümerik modelde kullanılan dalgakıran kesitine ait malzeme özellikleri	226
Çizelge 7.1	Model deneylerde kum temel zemini tabakasında oluşan maksimum boşluksuyu basıncı oranı(ru) değerleri .....	244
Çizelge 7.2	Model deneylerde gözlenen kret düşey deplasmanı ve hasar oranı değerleri .....	248



**AÇIK DENİZ YAPILARININ SIVILAŞABİLEN TABAKALAR ÜZERİNDEKİ  
DAVRANIŞI**

Murat Ergenokon SELÇUK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

Eş Danışman: Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN

Depremler, mevcut yerleşim şartlarına da bağlı olarak büyük can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Modern kentlerin deprem etkilerine karşı dayanıklı yapılarla donatılması gereği açıktır. Liman yapılarının bir deprem sonrası sahip olduğu ekonomik değeri devam ettirebilmesi ve deprem sonrası yardımların kentlere ulaştırılabilmesindeki görevini yerine getirebilmesi için depreme karşı da dayanıklı yapılar olması gereklidir. Beklenen bu performansı sağlayabilmesi için, normal koşullarda dalgaların etkilerini sınırlamak için oluşturulan dalgakıranlar, deprem etkilerine de dayanacak şekilde tasarlanmalıdır.

Taş dolgu dalgakıranlar esnek deniz yapılarıdır. Dolgu tipi bir ağırlık yapısı olmaları nedeniyle toprak barajlara kısmen benzemektedirler. Aralarındaki en önemli farklar: barajların geçirimsiz olması ve barajların tek taraflı olarak su tutmasıdır. Barajların gövde şevlerinde genellikle taş kaplama kullanılmakta, dalgakıranlarda ise farklı geometrilere sahip beton bloklar da kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, laboratuvar ortamında oluşturulan büyük bir sarsma tankı yardımı ile 1g ölçekli model deneyler gerçekleştirilmiştir. Model deneylerde sivilaştırılabilir bir kum temel zemini üzerinde oluşturulan dalgakıran kesiti tabanında çevrimli yatay yerdeğiştirmeler uygulanmıştır.

Model deneylerde kullanılacak kum zemine ait mühendislik parametreleri elde etmek için laboratuvarında statik ve dinamik deneyler yapılmış, ardından model deneyler gerçekleştirilmiştir. İki ana aşamada yapılan model deneylerin birinci aşamasında deniz tabanında yer alan kum çökellerinin, ikinci aşamada ise sıvılaştırılan kum tabaka üzerine inşa edilen dalgakıranların dinamik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, 40 cm kalınlığında  $D_r=40\%$  rölatif sıkılıkta temel zemini teşkil edecek kum tabakası üzerine 1:2 şev eğiminde 40 cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesiti oluşturularak, dalgasız ortamda deprem etkisindeki temel zemininin sıvılaşma davranışı ve bunun dalgakıran üzerindeki etkisi incelenmiştir. Uygulanan tekrarlı gerilmelerin şiddeti arttıkça temel zemini içinde boşluksuyu basıncının ilk çevrimlerden itibaren hızla artmakta olduğu ve başlangıç efektif gerilme seviyelerine ulaştığı görülmüş, buna bağlı olarak da sıvılaştırılan kum zemin üzerine inşa edilen dalgakıran kesitinde büyük oranda deformasyonlar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Dinamik (çevrimsel) yüklemeler maruz kalmış bir dalgakıran kesiti üzerinde tekrarlanan çevrimsel yüklemeler altında boşluksuyu basıncı artışlarının çok daha sınırlı kaldığı, hasar gören kesitler onarıldıktan sonra yeniden çevrimsel gerilmelere maruz bırakıldığında dalgakıran kesitinde meydana gelen deformasyonların azaldığı gözlemlenmiştir. Dinamik davranışta meydana gözlenen bu iyileşmenin, gevşek kum temel zeminin daha önceki çevrimsel yüklemeler altında sıkışması sonucu sıvılaşma direncinin artmasına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Model deneylerinde gözlenen davranışı analitik olarak incelemek amacı ile DIANA sonlu elemanlar programı kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Dalgakıran davranışı hakkında ön bilgilere ulaşmak için gerçekleştirilen statik elastik analizler sonucunda kendi ağırlığı altında oturumların elastik seviyelerde kaldığı sonucuna ulaşılmış, özdeğer analizleriyle sistemin kuru haldeki ve su altındaki hakim frekansları elde edilmiştir. Ortamdaki suyun sistem kütesine dinamik katkısı olduğundan hakim frekansdaki değişim ortaya çıkarılmıştır. Sonlu elemanlar programında sıvılaşma analizleri için kullanılan Towhata-lai bünye için sıvılaşma malzeme parametreleri, daha önce laboratuvarında gerçekleştirilen çevrimli basit kesme deneyi sonuçları modellenerek elde edilmiştir. Sıvılaşma analizleri sonucunda elde edilen boşluksuyu basıncı oranlarının ölçüm sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Model deney, sıvılaşma, dalgakıran, deprem,

**BEHAVIOUR OF OFFSHORE STRUCTURES SEATED ON LIQUEFIABLE SOILS**

Murat Ergenokon SELÇUK

Department of Civil Engineering

Ph.D. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

Co-Advisor: Assoc.Prof. Dr. Mehmet BERİLGİN

Earthquakes can cause great life and property loss depending on settlement conditions. It is obvious that modern cities should be equipped with structures that can resist earthquake effects. Port structures should be earthquake resistant in order to sustain their economic values and also for post earthquake aid to reach cities. To achieve the expected performance, breakwaters which are built to limit the effects of waves must also be to withstand earthquakes.

Rubble mound breakwaters are flexible sea structures. Since these are gravity structures they are similar to earth dams. The most important differences between rubble mound breakwaters and earth dams are; dams are non permeable and hold water on one side. Only cover stones are generally used on slopes of dam bodies, as for breakwaters concrete blocks of different geometry can also be used.

For this thesis work, laboratory tests are carried out on a 1g model built in a tank moundated on shaking base. The breakwater model is built on a liquefiable sand deposit andonde dimensional cyclic horizontal movement is applied at the base of the model.

Static and dynamic laboratory experiments are performed to obtain engineering properties of sand used for the base layer and then model experiments are carried out. The model experiments are carried out in two stages. At first the dynamic

behaviour of a loose sand deposit at the sea base and then the dynamic behaviour of a breakwater built on such a deposit are investigated

For the model tests a 40 cm high breakwater section with  $\frac{1}{2}$  side slopes on a 40 cm thick sand layer is constructed. The dynamic behaviour sand foundation layer and the breakwater in a waveless medium are investigated under the influence of a cyclic base motion. Pore water pressures in the sand layer are observed to increase starting from first cycles of loading and under strong cyclic motions reach the initial vertical effective stress causing large deformations in the breakwater constructed on liquefying sand. When the damaged cross sections are repaired and subjected to repeated cyclic loading it is observed that the increase in porewater pressures are limited and deformations occurring in breakwater are decreased. Improvement in the dynamic behaviour of breakwater is believed to be mainly due to increase in liquefaction resistance as a result of densification in foundation layer.

Numerical analysis are also carried out using DIANA finite element program to investigate the behaviour of model breakwaters. The static analyses have shown that displacements of breakwater under gravity load is in elastic range. Eigenvalue analysis, are performed to obtain fundamental frequency of breakwater model in dry condition and under water conditions. Because the presence of water in model experiments has a dynamic contribution on system mass, changes in frequency of fundamental period of structure are observed. Liquefaction analysis in the finite element program used utilizes Towhata-lai constitutive model. The liquefaction parameters in the material model are estimated from cyclic simple shear experiments carried out in laboratory. As a result of liquefaction analyses, It is observed that the computed porewater pressure ratio values are in rather good agreement with the measurements values in model experiments.

**Key words:** Model experiments, liquefaction, breakwater, earthquake

## BÖLÜM 1

---

### GİRİŞ

Büyük depremler oluşması ender olaylar olmalarına karşın, endüstrileşme ile birlikte artan nüfus ve yerleşim nedeniyle can kaybının yanında ekonomik olarak da büyük zararlar vermektedir. Bu nedenle, depremlerin yarattığı zararları azaltmak ve deprem performanslı yapılar inşa etmek için tüm dünya genelinde çalışmalar yürütülmekte, tasarım şartnameleri hazırlanmaktadır. Sıvılaşma ile ilgili ilk çalışmalar 1964 Alaska Depremi ve 1964 Niagata Depremleri sonrasında başlamıştır.

Sıvılaşma, zeminlerin deprem gibi tekrarlı yükler altında boşluksuyu basıncının artışları sonucu efektif gerilmenin sıfır değerine yaklaşmasıyla viskoz sıvı gibi davranması olayına denir. Tekrarlı yükleri tanımlamak gerekirse depremler, patlama ve şevlerin ani geçmesi anında oluşacak şok titreşim etkileri, dalga etkileri sayılabilir. Bu yüklere maruz kalacak zeminlerde büyük deformasyonlar, şev stabilitesi kayıpları, sıvılaşma, gömülü yapılarda artan eğilme momentleri gibi değişik problemler ile karşılaşmaktadır[1],[2]. Zeminin sıvılaşmasıyla boru hatları yüzeye doğru çıkması, liman yapılarının deniz tabanına batması durumları ortaya çıkabilmektedir. Kum kaynamaları, zemin fissürleri ve yanal ötelenmeler sıvılaşma kanıtlarıdır[3].

Sıvılaşma, suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerde olduğundan, deniz yapıları sıvılaşmaya hassas bölgelerde yer almakta olup geçmiş depremlerde sıvılaşma kaynaklı hasarlar görülmüştür. Liman yapılarında ve temellerinde artan boşluksuyu basıncı nedeniyle taşıma gücü aşılma, zeminlerde büyük oturmalar gözlemlenmektedir. 1995 Hyogo-ken Nanbu depreminde de deniz yapılarında büyük hasarlar gözlemlenmiştir( Şekil 1.1)



A

B

Şekil 1.1 Sıvılaşma Örnekleri a) Dayanma yapısındaki göçme ve yanal yayılma, Kobe1995 b) Rihtım yapısının yanal ötelenmesi, Port Island, Kobe 1995 [4]

### 1.1 Literatür Özeti

Deniz yapılarının ve özel olarak dalgakıranların deprem performanslarına ve sıvılaşma ile ilişkisi konularında çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Dalgakıranların gösterdiği hasarlar iki nedenle oluşmaktadır: Birincisi hidrodinamik kuvvetler, ikincisi ise sismik kuvvetler. Ancak dalgakıranların tasarımlarında sismik kuvvetler dikkate alınmadan stabilite analizleri yapılmaktadır. Geri dönüşüm periyotlarına göre dalga yüksekliği tahmini sonrasında izin verilecek hasar seviyesine göre stabilite katsayısı ve ona bağlı olarak da kullanılacak taş, xbloc, coreloc vs malzeme büyüklükleri hesap edilmektedir. Dalga etkileri nedeniyle zamana bağlı hasarlar oluşabilmekte, gelişen hasar boyutuna göre dalgakıran üzerine yeni taşlar konarak hasar giderilmektedir. Bu nedenle, sismik etkiler altında gösterdiği davranış hakkında detaylı araştırmalar yapılmamıştır. Bu duruma karşın, toprak dolgular ve barajlar gibi benzer yapıların sismik davranışları ise daha iyi bilinmektedir. Dalgakıranlar ile barajlar arasındaki en önemli fark, barajların sert zemin veya iyileştirilmiş zemin üzerine inşa edilmeleri, dalgakıranların ise yumuşak deniz tabanı üzerine inşa edilmeleridir [5].

Barajlara gelen hidrodinamik kuvvetlerin tahmininde Westergaard tarafından [6] 'te dalgakıran yüzeyini saran suyun neden olacağı ek bir kütle tahmini yapılmaktadır. Depremlerin barajlara olan etkileri Zangar[7], Chopra [8] ve Wang[9] tarafından

incelenmiştir. Toprak dolgular ve barajların sismik davranışlarının santrfüj deneyleri ile araştırılması Adalier[10], [11], [12], Elgamal, vd.[13],Yang vd. [14] çalışmalarında yer almıştır.

Deniz yapılarında deprem kaynaklı sıvılaşma ile ilgili çalışmalar ise ülkelere göre Wyllie, vd.[15],Şili; lai ve Kameoka[16]; lai, vd.[17], Japonya; Hall [18], Amerika; Sugano, vd. [19], Taiwan; Boulanger, vd [20], Türkiye; Sumer, vd [21], Katopodi ve Iosifidou[22] Yunanistan olarak sıralanabilir.

Deniz yapıları etrafında görülen deprem kaynaklı sıvılaşma ile ilgili geniş değerlendirme çalışmaları Sümer, vd. tarafından[23] 'de açıklanmıştır. Deniz yapıları ile ilgilenen geoteknik mühendisi olmayan profesyoneller için sıvılaşma altyapısı oluşturmak amacı ile Groot vd. tarafından [24]'te tanımlamalar yapılmıştır.

2001-2004 yılları arasında Avrupa Birliği 5. Çerçeve Programı kapsamında gerçekleştirilen LIMAS(Liquefaction Around Marine Structures)[25] isimli çalışmada sunulan deniz yapıları etrafındaki sıvılaşmaya ilişkin araştırmalar yedi Avrupa ülkesinden on akademisyen ve endüstriden katılımcı tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada deniz yapıları etrafında gerçekleştirilecek sıvılaşmanın araştırılması ve elde edilecek bulgulara göre tasarımcılara yönelik önerilerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sıvılaşma çalışmalarında öncelikle dalga etkisinde sıvılaşma incelenmiş ve bir bölüm olarak da 1999 yılımızda ülkemizde gerçekleşen deprem etkilerine özel referansla deprem etkisinde deniz yapıları altında gerçekleştirilecek sıvılaşma konusu araştırılmıştır.

On farklı çalışma grubu oluşturularak yapılan bu çalışma kapsamında, deprem kaynaklı boşluksuyu basıncı oluşumunun matematik modellenmesi ve 1999 Kocaeli depreminin deniz yapıları üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 1.2ve Şekil 1.3).



Şekil 1.2 Derince Limanı Kocaeli Depremi 1999 Sıvılaşma nedeniyle oluşan deformasyon [25]



Şekil 1.3 İzmit Marina. Kocaeli Depremi(1999). Sıvılaşma nedeniyle oluşan oturma[25]

Yüksel vd. tarafından [26] da 1999 Kocaeli Depreminde Körfez bölgesindeki tüm deniz yapılarının oluşan hasar sınıflaması gösterilmiştir. Dalgakıranlarda ise sıvılaşma nedeniyle oturmalar gözlemlenmiş, dalgakıran şevinin topuk bölgesinde ise sıvılaşma kaynaklı şev stabilitesi kaybı nedeniyle hasarlar tespit edilmiştir. Ayrıca Yalçiner, vd. tarafından yapılan [27] çalışmasında da 1999 Kocaeli depreminin yarattığı hasarların geoteknik nedenleri için



dolgu materyallerinde ve tabanda sıvılaşma nedeniyle oluşan mukavemet kaybı ve ona bağlı deformasyonlardan bahsedilmektedir.

Sumer, vd. tarafından yapılan [21] çalışmasında ise, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde 24 kıyı liman yapısında oluşan hasarlara ilişkin bir inceleme yayınıdır. Özellikle sıvılaşmanın deniz yapıları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Rıhtım yapılarında sıvılaşma ve buna bağlı deplasmanlar olduğu gözlemlenmiştir. Deniz tabanında oturmalar ve dalgakıranlarda ise çok az hasarın olduğu tespit edilmiştir.

1999 Kocaeli depremin  $M_w=7.4$  büyüklüğünde olup  $0.407g$  maksimum yatay ivme gözlemlenmiştir[28]. Yıkıcı etkileri yalnız bina tarzı yapılarda olmamış, deniz yapılarında da hasarlar görülmüştür. Earthquake Spectra dergisinin Kocaeli depremi ile ilgili özel sayısında Boulanger vd. tarafından [20] da deniz yapılarında gözlemlenen hasarlar ve deniz yapıların deprem davranışları incelenmiştir. Kocaeli bölgesinde gözlemlenen hasarlar ile ilgili ayrıntılı tespit çalışmaları Günbak, vd.tarafından [29] çalışmasında ortaya konmuştur. Bu çalışmada, rıhtım duvarlarının arkasındaki dolgu zeminlerde sıvılaşma görüldüğü ve rıhtım duvarlarının denize doğru deplasman yaptığı belirtilmektedir. Rota Denizcilik, Tüpraş Rafinerisi, Petrol Ofisi ve Shell Petrol sahalarında ise deniz tabanında sıvılaşma nedeniyle çökmeler gözlemlenmiştir.

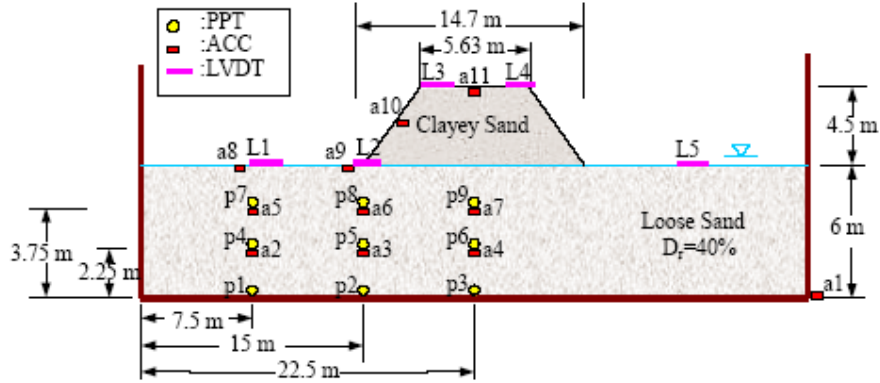
İlk etapta araştırmacılar tarafından deniz tabanındaki çökmelerin deniz dalgaları nedeniyle gerçekleşmiş olabileceği yazarlar tarafında düşünülmüştür. Deniz dalgaları etkisinde iki türlü sıvılaşma tanımlanmıştır[19]; birincisi residual sıvılaşma, ikincisi ise ani sıvılaşmadır. Bölgeye ait 50 yıllık rüzgar dataları ve dalga yükseklikleri çalışması [30] incelendiğinde, deniz dalgalarının sıvılaşmaya yol açmış olmasının mümkün gözükmediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca depremin  $M_w=7.4$  büyüklüğünde olması ve süresini 42 s gibi uzun olması neticesinde sıvılaşmanın 17 Ağustos 1999 depremi sırasında olduğu sonucuna varılmıştır.

Toprak dolgu barajların dinamik davranışının santrifüj deneylerle araştırılması Elgamel vd.[13] çalışmasında yer almıştır. Toprak dolgu barajlar, yol dolguları gibizemin yapılarının geçmişteki büyük depremlerde hasar aldıkları görülmüştür. Görülen bu hasarlar genellikle dolguların ya da oturdukları temel zeminin sıvılaşması sebebiyle olmuştur [31], [32], [33]. Büyük deformasyonlar genellikle gevşek kohezyonsuz temel zeminlerinde oturmalar, yanal yayılmalar şeklinde görülmektedir[31],[34]. Dolguların sıvılaşması ile ilgili bilgiler ilk olarak

1960 Alaska depremi McCulloch and Bonilla [35] ve Seed[32] de, 1964 Niagata depremi Kawakami and Asada, [36] da, 1983 Nipponkai-Chubu, Japonya depremi Tani [34] de ve diğer çalışmalarda yer almıştır. 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) depreminde yaklaşık 1200 toprak dolguda çeşitli seviyelerde hasar tespit edilmiştir[37], [33].

Günümüzde deprem nedeniyle zemin yapılarında oluşan sıvılaşma kaynaklı hasarları araştırmak için santrifuj deneyleri yapılmaktadır[38], [39], [40]. Ayrıca deneylerden elde edilen datalar numerik çalışmaların kalibrasyonu için de kullanılmaktadır[41], [42].

Bu teknikte küçük ölçekli bir model büyük ölçekli santrifuj kuvvetine maruz bırakılmaktadır (Şekil 1.4). Adalier[43] çalışmasında kullanılan model 75 g altında test edilmiş olduğundan 75 kat büyük bir gerçek modeli temsil etmektedir. Daha önce Adalier[43] ve Adalier vd [10] çalışmalarında yapılan santrifuj deneylerinin numerik modelleme çalışmaları Adalier vd. tarafından [21],[22] de sunulmaktadır. Dolgularda sıvılaşma öncesi ve sonrası tepki davranışları incelenmiştir.



Şekil 1.4 Santrifuj Deney Prototipi [43]

6m kalınlığında temel zemini için sıklık oranı  $D_r=40\%$  ve permeabilitesi  $5.5 \times 10^{-4}$  m/s olan Nevada kum karışımı kullanılmıştır. Dolgu için 4,5 m kalınlığında yoğunluğu  $1900 \text{ kg/m}^3$  olan 1:1 kenar şev eğimli kaolin kil kullanılmıştır.

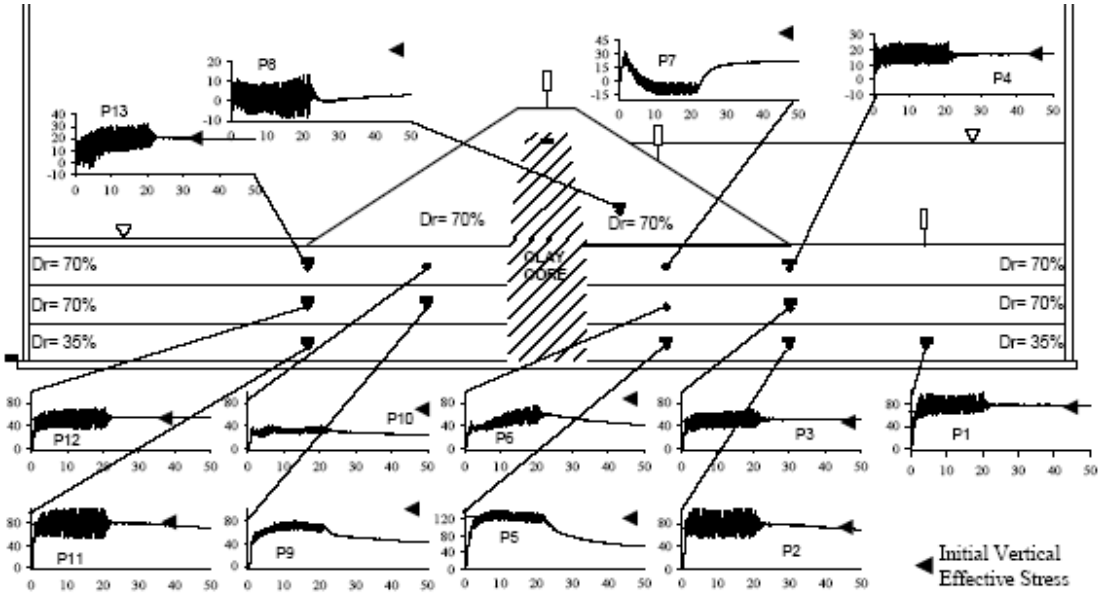
Bu çalışmada, ivme, oturma ve boşluk suyu basınçları kayıtları dolgu altında, topuk altında ve dolgudan uzak bir nokta için olmak üzere üç farklı nokta için gösterilmiştir. Topuk bölgesinde ise %6 mertebesinde kalıcı yatay deformasyon gözlemlenmiştir. Topuk bölgesinde dolgu nedeniyle efektif normal gerilme az olduğundan ilk üç çevrim sonrasında kayma

mukavemetindeki azalma oluşmuş ve her çevrim neticesinde deformasyonların arttığı görülmüştür.

Dolgu altında gelişen bir kayma mukavemeti kaybı ise gözlemlenmemiştir. Üzerindeki dolgu ağırlığı nedeniyle oluşan ortalama normal gerilmenin, boşluksuyu basıncı oranının sıvılaşma seviyesine gelmesine engel olmuş olduğu görülmüştür.

Farklı bir deney setinde ise gevşek zemin tabakası yerine  $D_r=90\%$  olan  $\phi=38^\circ$  olan zemin yerleştirilerek deney tekrarlanmıştır. Temel zeminin sıklığının oldukça yüksek olması nedeni ile, zeminde dilatasyon davranışından kaynaklanan boşluk suyu basınçlarında ani düşmeler gözlemlenmiştir.

USACE (The Corps of Engineers) de sıvılaşan zeminler üzerinde yeralan barajların davranışı hakkında yeni bir yönetmelik için yapılan santrifüj deneylerinden bir örnek Sharp tarafından [44] de verilmiştir. Kil çekirdekli bir baraj kesitinin sıvılaşan tabakalar üzerindeki davranışının sonuçları Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5 Santrifüj deney sonuçları. Boşluksuyu basınç dağılımları[44]

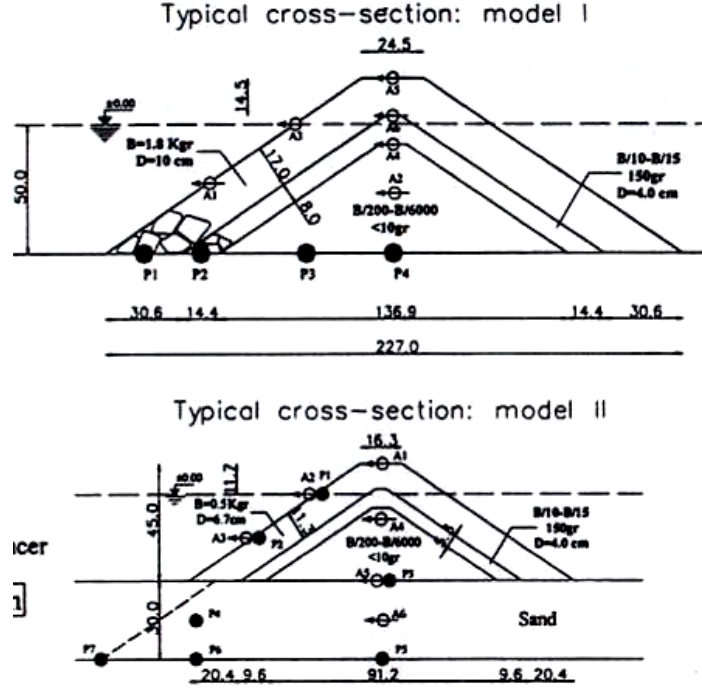
Memos, vd. tarafından [5] de dalgakıranların sismik davranışı ile ilgili deneysel çalışmanın sonuçlarını sunmuşlardır. Yunanistan'ın batısında bir liman şehri olan Patras' da yeralan dalgakıranların sismik performansı araştırılmıştır. 1984 yılında meydana gelen en büyüğü  $M=4,5$  olan depremler sonrasında körfezdeki dalgakıranın yeni eklenen uzantılarında 3,5-4 m

mertebede oturma gözlemlenmesi nedeniyle dalgakıranların sismik davranışları analiz edilmiştir.

Hidrodinamik kuvvetlerin tahmininde, dalgakıran yüzeyini saran suyun neden olacağı ek bir kütle tahmini yapılmaktadır. İlk çalışmalar Westergaard [6] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Zangar[7] ve Wang[9] ile uyumlu sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Yapılan nümerik analiz sonuçlarına göre hidrodinamik kuvvetlerin sismik atalet kuvvetleri yanında ihmal edilebilir seviyede olduğu sonucuna varılmıştır.

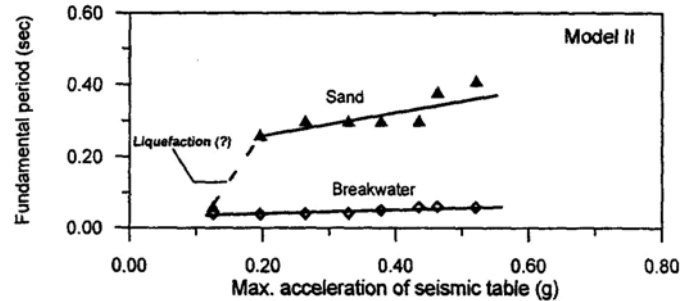
Bölgedeki dalgakıran kesitleri, yumuşak kil tabakaları üzerine inşaa edilmiştir. Arazide yapılan deney sonuçları kullanılarak zemin profilinin Bishop yöntemine göre şev analizi yapılmış, ardından bölgede beklenen deprem hareketinde bir boyutlu eşdeğer lineer analiz yöntemine göre hesaplanan ivme büyütmesi dikkate alınarak şev stabilitesi incelenmiştir. Beklenen deprem yer ivmesi 0.02 g civarında olmasına karşın yumuşak zemin üzerinde 2- 2.5 kat büyüme olduğu görülmüştür. Küçük ivme değerlerine rağmen şevin kaymaya karşı güvenlik sayısının 1.15 den 0.75 e düştüğü görülmüştür.

Memos vd. tarafından [45] de yapılan çalışmada, sarsma tankı üzerinde iki farklı dalgakıran modeli oluşturularak (Şekil 1.6) dalgakıranların sismik etkiler altındaki davranış incelenmiştir. Birinci modelde sert bir zemin üzerine oturan dalgakıran modellenmiş, ikinci modelde ise yumuşak bir zemin üzerine oturan dalgakıran modellenmiştir.



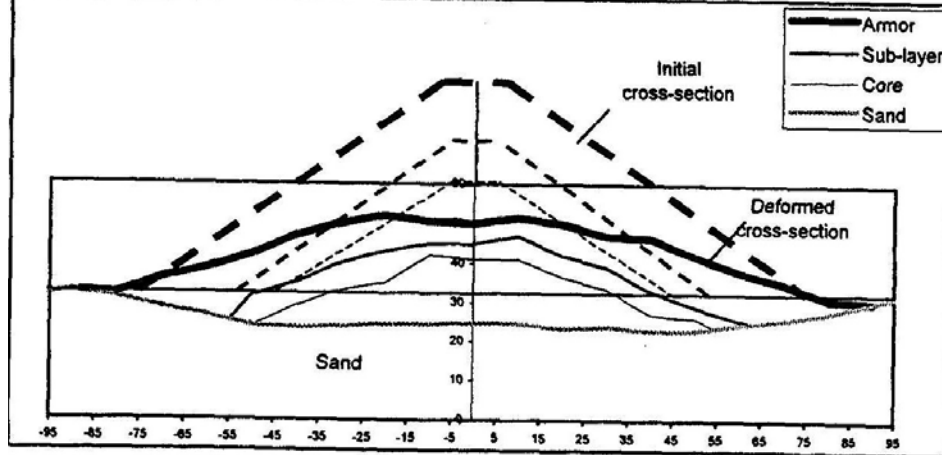
Şekil 1.6 Dalgakıran Modelleri a) sert zemin üzerinde b) yumuşak zemin üzerinde[45]

Dalgakıran modelleri üzerine  $a_{max} = 0.157g - 1.571g$  arasında değişen ivmeler uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Yumuşak tabakalı zeminde oluşacak büyütme QUAD4M programı kullanılarak bulunmuştur. Hidrodinamik etkiler ise Westergaard[6] ek kütle yöntemiyle eklenmiştir. Uygulanan ivmeler altında dalgakıran tepesinde ölçülen ivmelere göre tepki spektrumları çıkarılmış, taban tepki spektrumu ile oranlanarak kesite air doğal hakim periyotları çıkarılmıştır. Benzer şekilde yumuşak zemin üzerindeki kesit için de taban ve kum zemin üstü tepki spektrumları oranlanarak hakim periyotlar çıkarılmıştır(Şekil 1.7). Kum tabaka üzerinde ölçülen hakim periyotların büyüdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca düşük ivmeler altında kum tabakasında büyütme gözlenirken, büyük ivme değerlerinde ( $a > 0.25g$ ) sıvılaşma kaynaklı azalma olduğu belirtilmektedir.



Şekil 1.7 Dalgakıran Kesiti için İvme-Hakim Periyot İlişkisi [45]

Deney sonucunda ölçülen deforme olmuş kesit ve deney başındaki kesit Şekil 1.8’de gösterilmektedir. Dalgakıran yüksekliğinde %17.5 azalma gözlemlenmiş, bunun da sıvılaşma kaynaklı olduğu öne sürülmüştür.



Şekil 1.8 Deforme olmuş dalgakıran kesiti[45]

Sert zemin üzerinde inşa edilen dalgakıranların depremler sırasında davranışının incelenmesi amacı ile model deneyler Cihan tarafından [46], [47] çalışmalarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında oluşturulan taş dolgu, xblock vb bloklu koruma tabakasına sahip dalgakıran modellerinin davranışı, tabanda uygulanan farklı ivme büyüklüklerine sahip tek yönlü çevrimli yükler etkisi altında araştırılmıştır.

Özener tarafından[48], [49] çalışmalarında gerçekleştirilen laboratuvar model deneyleri ile silt ara tabakalı kum çökellerinin sıvılaşma davranışı incelenmiştir. Silt ara tabakasının kum tabakası içinde farklı seviyelerde bulunmasının sıvılaşma davranışı üzerinde etkileri, model tabanında farklı ivme büyüklüklerine sahip dinamik yükler uygulanarak araştırılmıştır.

Tonaroğlu tarafından [50], [51] çalışmalarında kalın bir kum tabakasında farklı seviyelerde silt ara tabakaları bulunmasının sıvılaşma davranışı üzerinde etkilerinin sayısal analizlerle araştırılmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

Dalgakıranlar genel olarak liman operasyonlarının elverişli biçimde yapılması amacıyla dalgalara karşı korunaklı bir deniz kıyısı sağlanması için inşa edilen yapılardır. Ticari faaliyetlerin büyük olduğu limanlarda dalgakıran tasarımı önemli olmakta ve yapım maliyeti de yüksek olmaktadır. Taş dolgu dalgakıranların tasarımında yaygın olan uygulama, sismik

yüklemeyi gözönüne almaksızın, dalgalara ve kendi ağırlığı altında göçmelere karşı yapının stabilitesini sağlamaktır. Dalga etkisinde oluşan dalgakıran hasarları genellikle yerel olmakta ve kesite blok eklenmesi ile hasar giderilebilmektedir. Oysa ülkemizin de içinde bulunduğu oldukça büyük bir coğrafya sismik aktivite içinde bulunmakta ve özellikle gevşek / yumuşak zemin tabakaları üzerinde inşa olunan dalgakıranlarda deprem sırasında önemli problemler ortaya çıkabilmektedir.

Dalgakıranların büyük depremlerde fonksiyonunu yitirmesi halinde, gerekli onarımın yapılması uzun süre alacak ve bu süre içerisinde korumakta olduğu yapıların dalgaların etkilerine maruz kalması sonucu büyük maddi kayıplar oluşabilecektir. Bu nedenle, dalgakıranların deprem etkileri altındaki davranışının analiz edilmesi ve tanımlanması önemlidir. Dalgakıranların oturduğu temel zemini özelliklerine göre farklı tepkiler göstereceği açıktır.

Kohezyonsuz zeminlerin deprem etkisi altında sıvılaşabildiği ve taşıma gücünü kaybedebileceği bilinmektedir. Zeminin sıklık derecesi ve üzerine etkiyen ortalama efektif gerilme(çevre basıncı) sıvılaşma potansiyelini etkileyen önemli faktörlerdir. Dalgakıranların, kohezyonsuz bir zemin üzerine oturması halinde, kesitin merkezi altında efektif normal gerilme değeri ve sıvılaşma direncinin yüksek olması beklenirken, topuk bölgesi altında ise çevre basıncı düşük ve sıvılaşma potansiyeli daha yüksek olacaktır. Su altındaki kum tabakası yüzeyinde ise efektif gerilme değeri yaklaşık sıfır değerinde olacaktır. Oluşacak farklı durumlar için sıvılaşma potansiyeli ve yaratacağı deformasyonları incelemek, gerçek yerinde davranışı öngörebilmek için gereklidir.

Deprem etkileri altında temel zemininde sıvılaşma oluşması durumunda dalgakıranlarda büyük deformasyonlar ve deplasmanlar ortaya çıkabilmektedir. Sismik etkiler altında, zemin cinsine göre oluşabilecek büyük kalıcı oturmalar, dalgakıran şev stabilitesinin bozulması veya düşük kenetlenme özelliğine sahip blokların kesiti terk etmesi şeklinde oluşan hasar durumlarında dalgakıranlar tamamen işlevsiz kalabilmekte ve hasarın giderilmesi yüksek bir maliyete sebep olabilmektedir. Dalgakıranların sismik etkiler altındaki davranışlarının incelenmesi ile güvenli tasarım kriterlerine ulaşmak mümkün olabilecektir.

Depremlerin yıkıcı etkilerinin biliniyor olmasına rağmen deniz yapıları ile ilgili sismik etkilere dayalı şartname çalışmaları 1997 yılında International Navigation Association çalışma grubu

tarafından başlatılmıştır. 'Seismic Design Guidelines for Port Structures'adlı bir yayın çıkarılmıştır[52].

### 1.3 Hipotez

Depremler sırasında su altında olan gevşek kum tabakalarında sıvılaşma gözlenmektedir. Sıvılaşabilen zeminler üzerine inşa edilen yapılarda deprem sırasında büyük oranda şekil değiştirmeler ve ahsarlar ortaya çıkabilmektedir. Deniz yapılarının ekonomik önemi nedeniyle deprem sırasında ve sonrasında fonksiyonunu devam ettirmesi beklenmektedir. Liman yapılarını koruma görevi olan dalgakıranların sıvılaşabilen bir zemin üzerine inşa edilmesi halinde deprem etkileri altında büyük şekil değiştirmeler yapması ve işlevini yitirmesi riski bulunmaktadır. Sıvılaşabilen tabakalar üzerinde yer alan tabakaların deprem etkileri altındaki davranışının araştırılmasının olası kayıpların en az indirilmesine katkı sağlaması beklenilmektedir

Bu tez kapsamında dalgakıranların sıvılaşabilen tabakalar üzerindeki dinamik davranışı model deneyler ile incelenmiştir. Laboratuvar ortamında 1g ölçekli hazırlanan altı farklı modele, tabanda farklı ivme büyüklüklerine sahip yatay çevrimli yer değiştirme hareketleri uygulanarak toplam 18 adet model deney gerçekleştirilmiştir. Dalgakıran modeli tabanında uygulanan tekrarlı yükler etkisinde, kum temel zemininde oluşan boşluk basıncı artışları, dalgakıran gövdesi üzerinde oluşan ivme büyüklükleri ve dalgakıran kesitinde meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Model deneylerinin kısıtları çerçevesinde, depremler sırasında dalgakıranların olası davranışlarının gözlemleneceği bu çalışmanın sonuçlarının dalgakıranların daha güvenli tasarımına da ışık tutması amaçlanmıştır. Ancak, ince bir kum tabakası üzerinde inşa edilen dalgakıran modeli üzerinde uygulanan oldukça şiddetli ve uzun süreli sinusoidal yüklerin etkisi altında gözlenen davranış ile arazi zemin koşullarında ve gerçek deprem yükleri altında ortaya çıkabilecek davranış arasında önemli farklılıklar oluşabileceği gözden uzak tutulmamalıdır. Dalgakıranların sismik tasarıma yönelik sonuçlar elde edilebilmesi için laboratuvar model deney sonuçlarının depremler sırasında gözlenen arazi davranışı ve sayısal modelleme çalışmaları ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, dalgakıran modellerinin dinamik davranışı sayısal analizlerle incelenmiş, sonlu elemanla analizi ile sıvılaşma davranışının modellenmesi ve dalgakıran gözlenen hasarların tasarım aşamasında öngörülebilmesi olasılığı araştırılmıştır.



### SUYA DOYGUN ZEMİNLERİN ÇEVİRİMSSEL GERİLMELER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

#### 2.1 Giriş

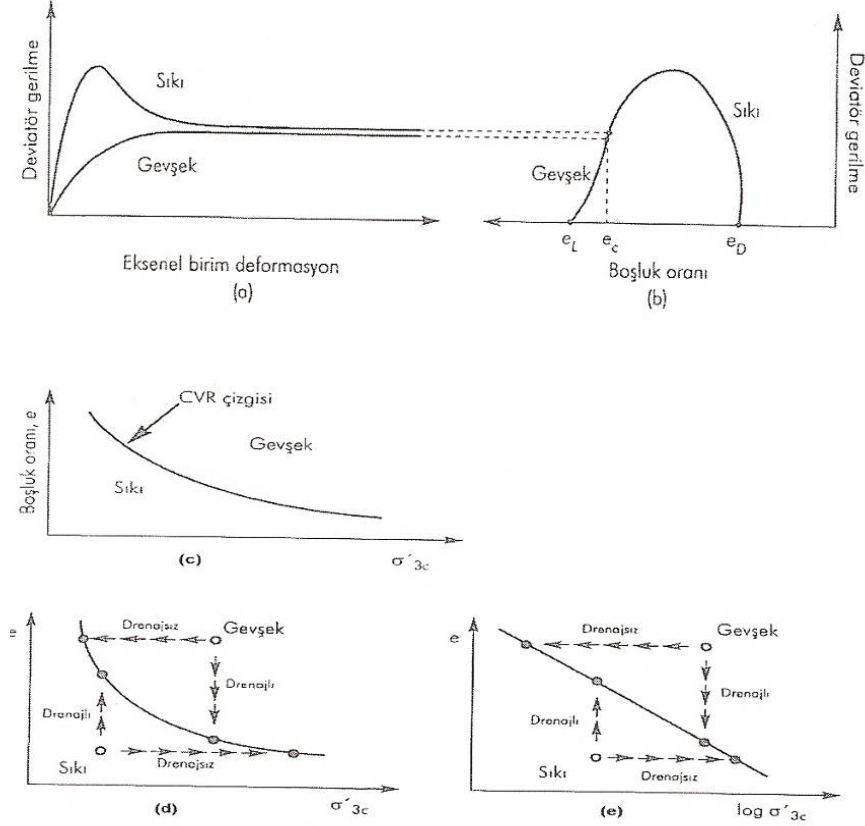
Suya doygun kohezyonsuz zeminlerde tekrarlı yüklemeler altında boşluksuyu basıncının efektif gerilme seviyesine yükselerek zeminin kayma mukavemetinin kaybolmasına yol açması olayı sıvılaşıma olarak tanımlanmaktadır. Bu mekanizma özellikle suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerde görülmektedir. Çevrimsel gerilmeler nedeniyle gevşek zeminlerin boşluk oranındaki azalma eğilimi boşluksuyu basınçlarında artış meydana getirecek, oluşan bu artışa karşın drenajın sağlanamaması efektif gerilmelerin zamanla azalarak sınırlanmasına yol açacaktır.

#### 2.2 Kumların Statik ve Dinamik Yükler Altındaki Davranışı

Kumların yüklemeler altındaki davranışını etkileyen en önemli faktör boşluk oranı ve buna bağlı olarak hesaplanan göreceli sıkılık oranıdır. Sıkılık oranlarına göre kumlar üç ana sınıfta değerlendirilebilir.  $Dr \leq 40$  gevşek,  $41 < Dr < 70$  orta sıkı,  $Dr \geq 71$  ise sıkı olarak sınıflandırılmaktadır.

Boşluk oranı ile ilgili diğer önemli kavram ise kritik boşluk oranıdır. Cassangrande tarafından yapılan [53] çalışmasında aynı çevre basıncına sahip sıkı ve gevşek kum numuneler üzerinde yaptığı drenajlı üç eksenli deney sonuçlarına göre, yüklemeye devam edildiğinde iki numunenin de aynı boşluk oranına ulaşip sabit deformasyona uğradıklarını gözlemiştir. Bu durumda oluşan boşluk oranı kritik boşluk oranı olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.1). Daha sonra yapılan Roscoe [54] çalışmasında kritik durum teorisi geliştirilmiştir. Kil numuneler üzerinde yapılan drenajlı üç eksenli yükleme koşullarında, zeminin sabit efektif gerilme

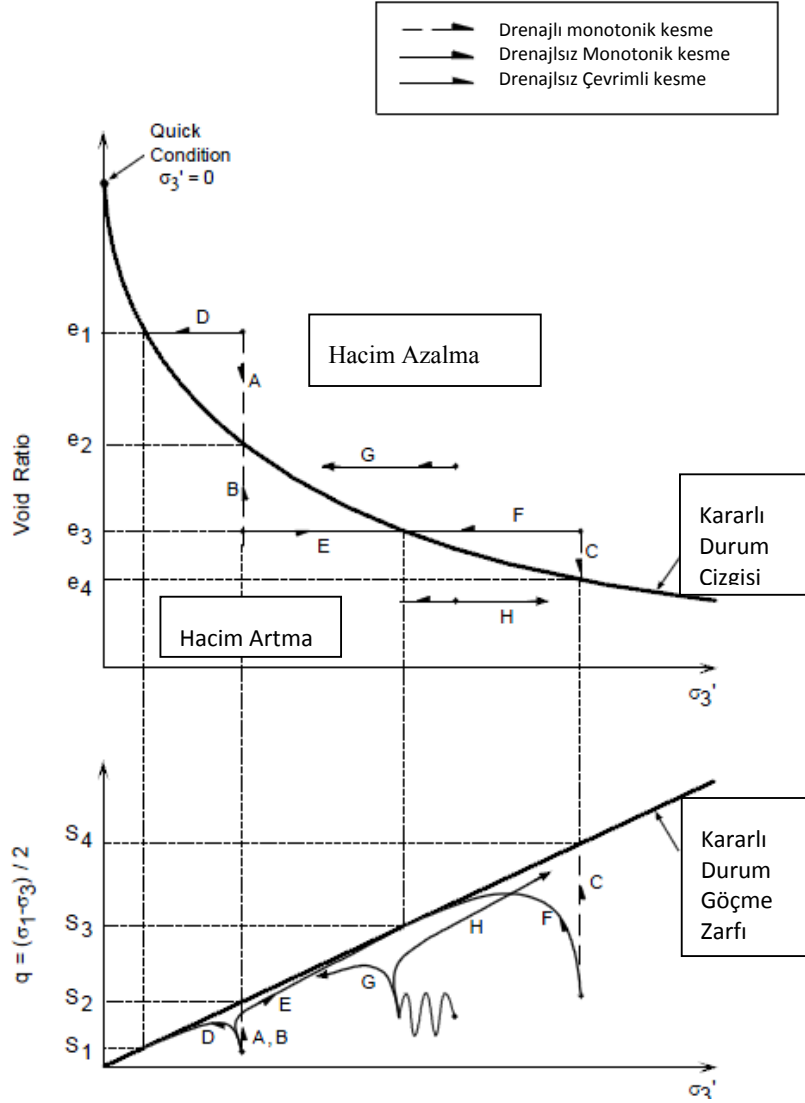
altında sabit hacimde kayma deformasyonu gösterdiği durumu tanımlanmıştır. p-q-e uzayında zeminin gerilme izinden bağımsız olarak tek bir nihai göçme yüzeyine ulaştığı ortaya konmuştur.



Şekil 2.1 Gevşek ve sıkı zeminler için kritik boşluk oranı [55]

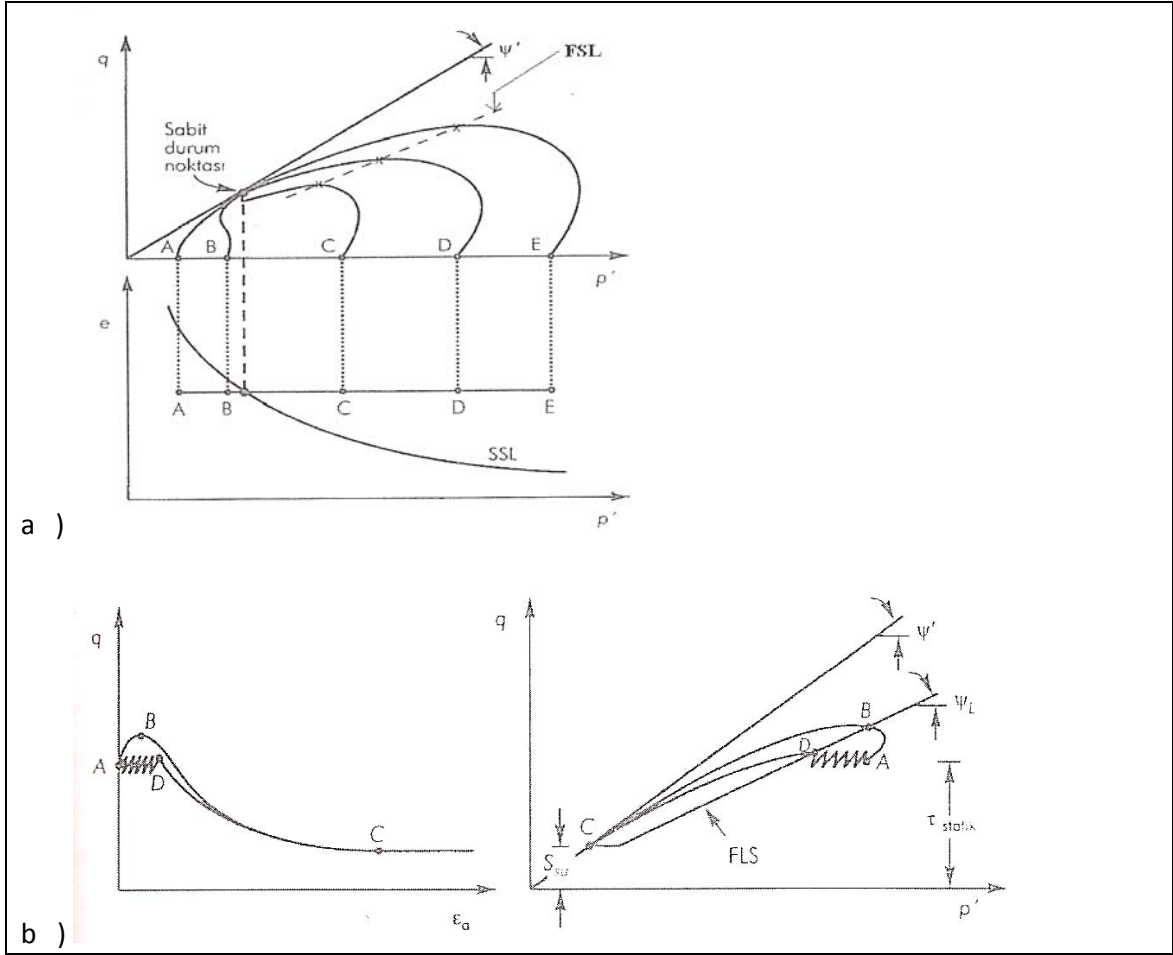
Poulos [56] de kritik durum teorisini geliştirerek kararlı durum teorisini ortaya koymuştur. Bu teoriye göre bir zeminde meydana gelen kayma birim deformasyonları sabit boşluk oranında sabit gerilme altında sabit şekil değiştirme hızında meydana geliyorsa bu zeminin kararlı duruma ulaştığı ifade edilmektedir. Zeminlerin dinamik ve statik yüklemeler altında kararlı duruma gelmeleri Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Statik kesme deneylerinde aynı boşluk oranına sahip iki zeminden ( B ve C), daha yüksek çevre gerilmesine sahip olan zeminin daha yüksek kayma mukavemetinde kararlı duruma ulaştığı görülmektedir. Dinamik yüklemelerde ise kararlı durum çizgisinin altındaki H numunesinde hacim artışı beklenmesi gerekirken, çevrimsel hareketlilik gözlemlenmektedir. Buna karşın kararlı durum çizgisinin üzerindeki zeminler çevrimsel yüklendiğinde kayma gerilmesi daha düşük değer almaktadır. Bu durum akma sıvılaşması olarak adlandırılmaktadır[55].

Zeminlerin sıvılaşma durumları için Kramer tarafından yapılan[55] çalışmasında iki farklı tanımlama yapılmıştır. Akma sıvılaşması, suya doymun kohezyonsuz gevşek zeminlerin başlangıçta kararlı durum çizgisinin üzerinde olması halinde tekrarlı yüklemeler sonucunda zeminin sıvılaşma şekli olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.2 Kararlı durum çizgisi ve yükleme ilişkileri [57]

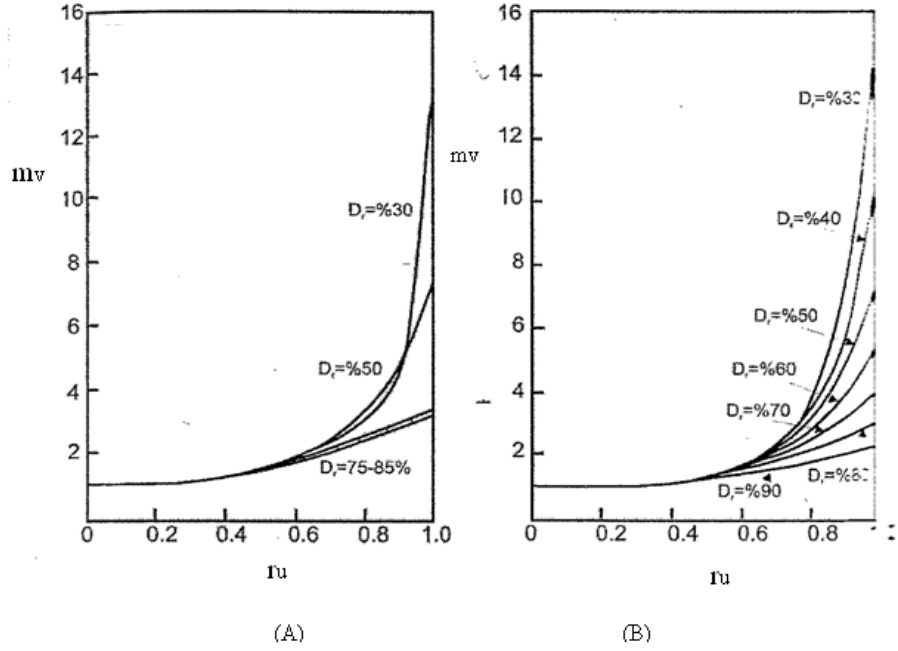
Akma sıvılaşması yüzeyi, kritik durum çizgisinin üzerinde yer alan C, D ve E numunelerinin maksimum gerilme izini ulaştığı noktaların birleştirilmesiyle oluşmaktadır (Şekil 2.3a). Gerilme izi akma sıvılaşması yüzeyine ulaşan zeminda akma sıvılaşması oluşmakta ve zeminin kayma mukavemeti residual değerine inmektedir (Şekil 2.3b).



Şekil 2.3 a) Akma yüzeyi b) akma sıvılaşması [55]

Çevrimsel hareketlilik ise tekrarlı gerilmelere maruz kalan gevşek veya sıkı zeminlerde görülmektedir. Başlangıç statik gerilmesinin zeminin sıvılaşma sonrası sahip olduğu kayma gerilmesinden büyük olduğu durum çevrimsel hareketlilik olarak tanımlanmaktadır.

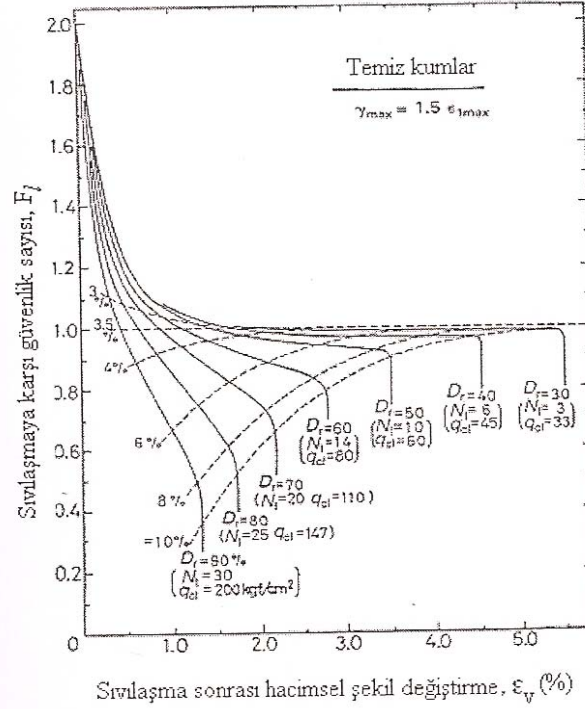
Tekrarlı yüklere maruz kalan suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerde oluşan oturmalar ile ilgili Lee vd. [58], Seed [59] çalışmalarında çevrimli yükleme ile artık boşluksuyu basıncının gelişmesi ve buna bağlı olarak oluşan hacimsel sıkışma ilişkilerine yer verilmiştir (Şekil 2.4). Seed [59] da, artık boşluksuyu basıncı oranı  $r_u$ 'nun 0.9 olduğu durumlarda rölatif sıkılığın artması ile hacimsel sıkışma katsayısı  $m_v$ , büyük artış göstermektedir.



Şekil 2.4  $r_u - m_v$  ilişkisi a) [58] b) [59]

Depremlerden sonra suya doymun zeminlerde meydana gelen oturmalar, artık boşluksuyu basıncını sönmelenmesi neticesinde oluşan konsolidasyon oturmaları sonucu meydana gelmektedir. Sıvılaşma sonrası oturmalara yolaçan parametrelerin ise laboratuarda gerçekleştirilen tekrarlı basit kesme deney sonuçlarına göre, yükleme frekansı ve tekrarlı kayma genliği ile orantılı olduğu Ozaydın tarafından [60] da gösterilmiştir. Ayrıca sıvılaşmaya bağlı hacimsel şekil değiştirmelerin tekrarlı yüklemeler nedeniyle oluşan kayma şekil değiştirmelere bağlı olduğu Nagase ve Ishihara tarafından [61] de ortaya konmuştur.

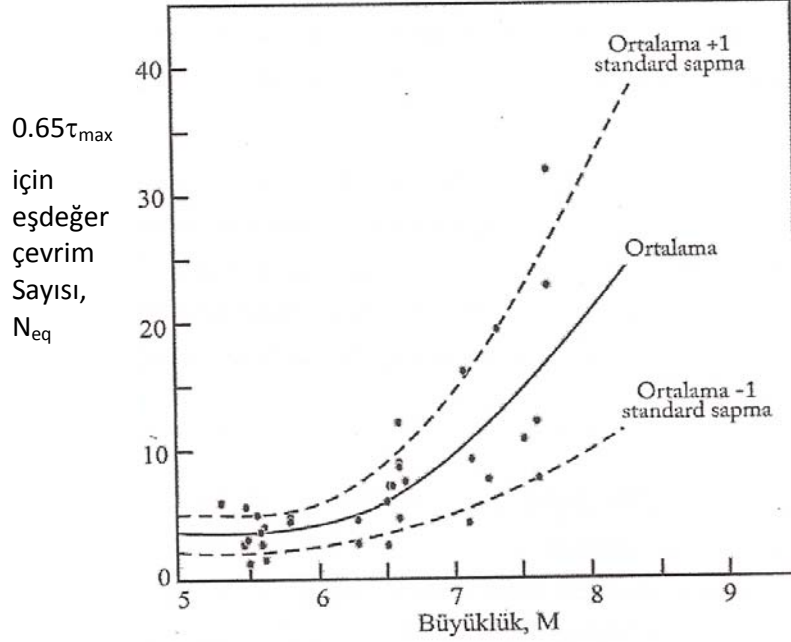
Sıvılaşmaya karşı güvenlik ve farklı sıklık oranlarındaki kumların hacimsel şekil değiştirmelerini veren ilişki Ishihara tarafından [62] de verilmektedir(Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Sıvılaşmaya karşı güvenlik ve sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme[62]

### 2.3 Çevrimsel Gerilme

Sıvılaşma oluşmasına yol açan fakörler, tekrarlı gerilmelerin genliği ve oluşturduğu kayma şekil değiştirmelerden oluşmaktadır. Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde deprem etkileri uniform çevrimsel gerilmeler şeklinde uygulanmaktadır. Seed tarafından yapılan[59] çalışmasında, deprem etkilerinin yolaçağı artık boşluksuyu basınçlarını oluşturabilecek uniform çevrimsel gerilme  $\tau = 0.65 \tau_{max}$  olarak tanımlamış, bu gerilme seviyesini oluşturabilecek eşdeğer çevrim sayısını deprem büyüklüğüne göre ilişkilendirmiştir (Şekil 2.6).

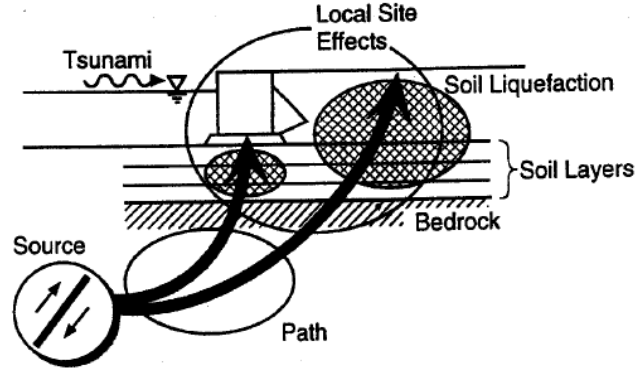


Şekil 2.6 Deprem büyüklüğü ve eşdeğer çevrim sayısı ilişkisi [59]

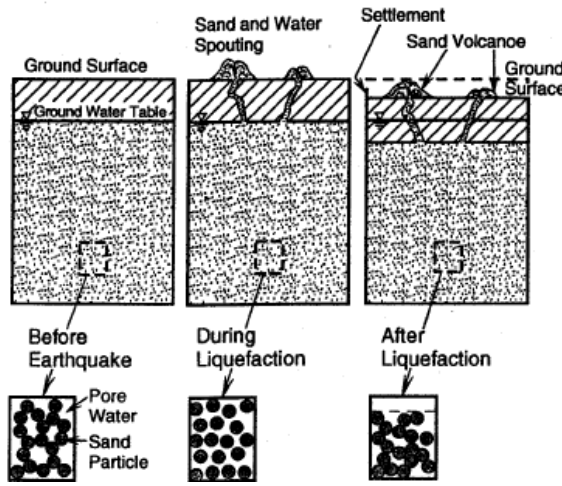
#### 2.4 Deprem Dalgaları ve Deniz Dalgalarının Karşılaştırılması

Deniz yapılarının performansında, taşıma gücü kaybı nedeniyle temelde oluşacak büyük oturmalar ve deniz tabanında sıvılaşma nedeniyle oluşacak stabilite kaybı nedeniyle zeminlerin dinamik tepkileri önemli olmaktadır.

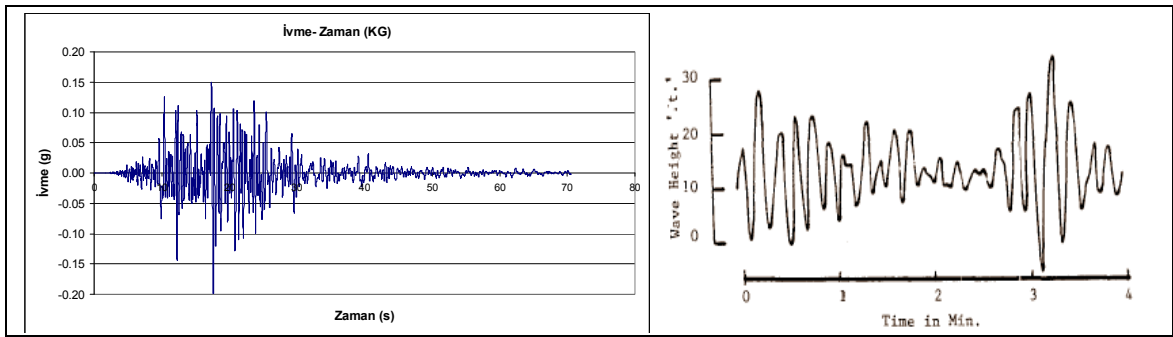
Deprem etkileri, dalga etkilerinden farklı olarak enerji dalgaları şeklinde yapının temeline etkiyerek yapıların da bu etkiye karşı tepki vermesi şeklinde ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.7, Şekil 2.8). Deniz dalgalarında fırtına şartlarında dalga periyodu 5 ila 20 saniye arasında yer alırken deprem dalgalarının periyotları ise 0.1 ila 2 saniye arasında yer almaktadır. Süre açısından incelendiğinde ise fırtına süresi saatler mertebesinde olurken deprem dalgalarının etkiye süresi ise birkaç dakika olmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.7 Sismik dalgaların yayılımının şematik gösterimi [52]



Şekil 2.8 Sıvılaşma Mekanizması [52]



Şekil 2.9 a)2011- Van Deprem Kaydı b) Tipik dalga yüksekliği-zaman kaydı



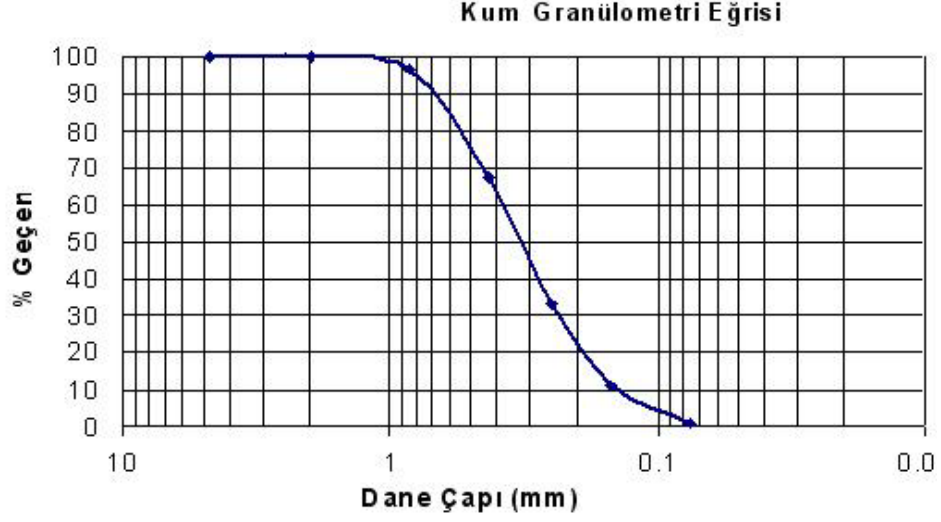
### MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1 Giriş

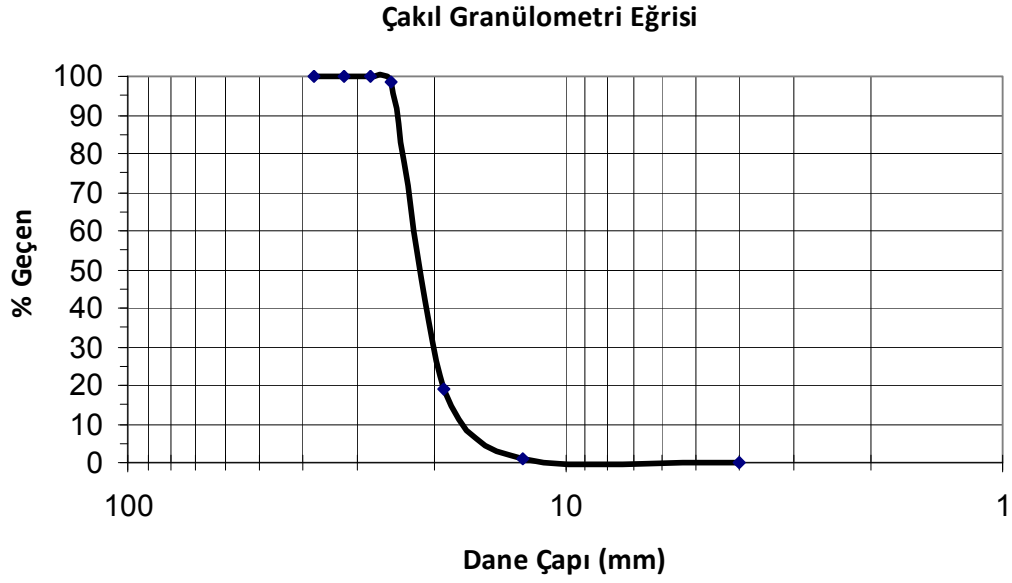
Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemelere ait mühendislik parametrelerinin elde edilmesi ile ilgili çalışmalar ve deney sisteminin detayları aktarılacaktır. Deneysel çalışmalarda kullanılan zemine ait mühendislik parametrelerini elde etmek için granülometri, piknometre, direkt kesme, üç eksenli basınç ve basit kesme deneyleri yapılmıştır.

#### 3.2 Zeminlerin İndeks Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan kum Şile yöresinden temin edilmiştir. İndeks özelliklerinin belirlenebilmesi için zemin örnekleri üzerinde elek analizleri ve özgül yoğunluk deneyleri yapılmıştır. Temel tabakası oluşturmak için kullanılan kum zemine ait Elek analizi sonuçları Şekil 3.1'de ve dalgakıran oluşturmak için kullanılan çakıl malzemesi için ise Şekil 3.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Kum malzemesine ilişkin elek analizi



Şekil 3.2 Çakıl malzemesine ilişkin elek analizi

Elek analizi sonuçlarından görüleceği üzere, deneysel çalışmalarda kullanılan kum ve çakıl zeminler USC Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre; kötü derecelendirilmiş kum (SP) ve kaba çakıldır.

Kullanılan zeminlerin en büyük ve en küçük boşluk oranı değerlerini belirleyebilmek için Adalier tarafından [63] de kullanılan yöntemden faydalanılmıştır. İç çapı 152 mm ve derinliği

117 mm olan, 2123 cm<sup>3</sup> hacmindeki Proktor kabı içerisine etüvde kurutulmuş olan kum ve çakıl malzemeleri 10 tabaka halinde yerleştirilmiş ve Proktor kabına yanlardan çekiçle vurularak her bir tabakanın sıkışması sağlanarak en küçük boşluk oranı elde edilmiştir. En büyük boşluk oranı ise malzemenin aynı Proktor kabı içerisine ASTM standartlarında boyutları verilen bir huni yardımı ile düşük bir mesafeden dökülmesi sonucu elde edilmiştir. Zeminlerin en küçük ve en büyük boşluk oranı değerleri Çizelge 3. 1 ve Çizelge 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3. 1 Kum malzemesinin indeks özellikleri

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP
Özgül Yoğunluk, $G_s$	2.65
En Büyük Boşluk Oranı, $e_{max}$	0.87
En Küçük Boşluk Oranı, $e_{min}$	0.52

Çizelge 3.2 Çakıl malzemesinin indeks özellikleri

İri Çakıl	%81.04
Çakıl	%18.96
$\gamma_{kmin}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	1.406
$\gamma_{kmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	1.704
En Büyük Boşluk Oranı, $e_{max}$	0.48
En Küçük Boşluk Oranı, $e_{min}$	0.37
Özgül Yoğunluk, $G_s$	2.68

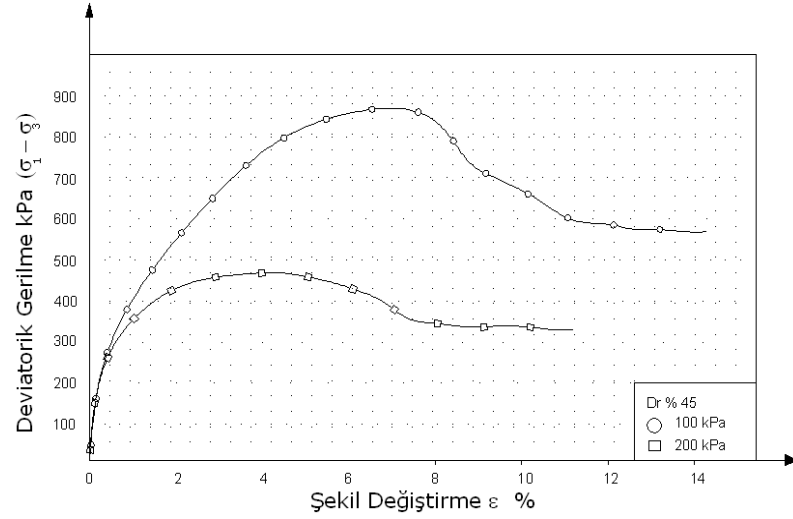
### 3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Kum malzemesinin kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla bir dizi üç eksenli basınç deneyi yapılmış, değişik göreceli sıklık derecelerinde(Çizelge 3.3) gerilme-şekil değiştirme davranışı incelenmiştir.

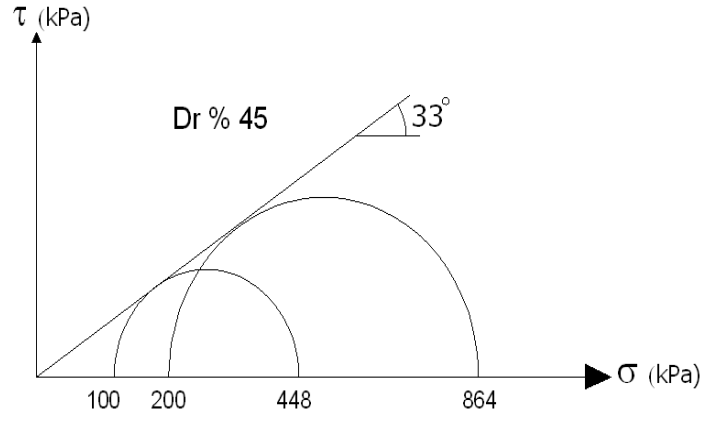
Çizelge 3.3 Kum zemine ilişkin sıklık boşluk oranı ilişkisi

$D_r$ (%)	Boşluk Oranı (e)	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )
45	0.698	1.56
60	0.644	1.61
75	0.505	1.66
85	0.536	1.72

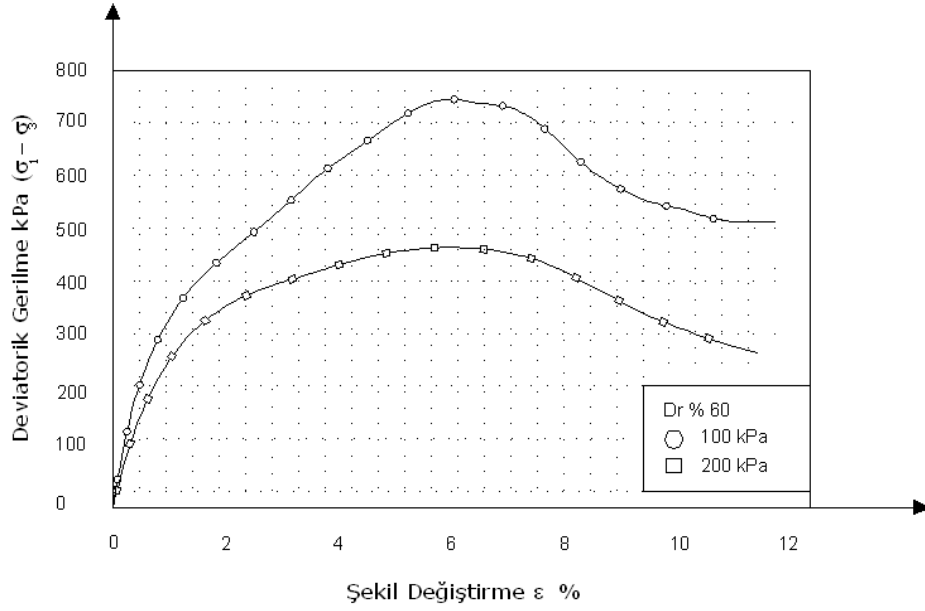
Her bir göreceli sıklık değeri için 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde hazırlanan deney örnekleri üzerinde 100 kPa ve 200 kPa'lık hücre basınçları altında konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.(Şekil 3.3-Şekil 3.10)



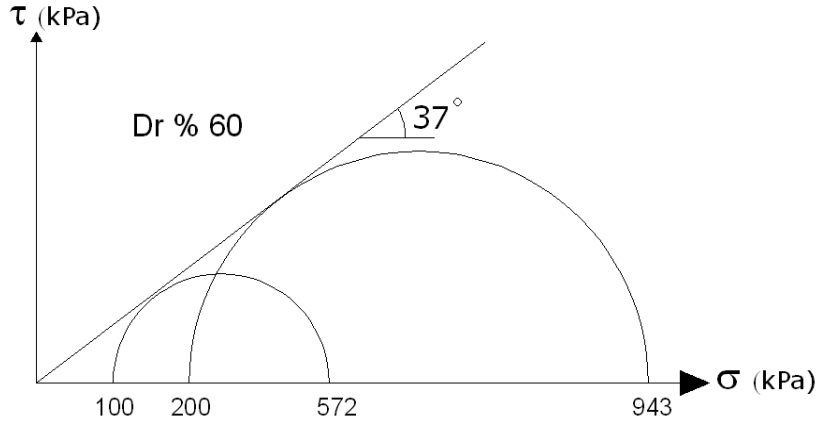
Şekil 3.3 Kum zemini için % 45 sıklıktaki gerilme şekil değiştirme eğrisi



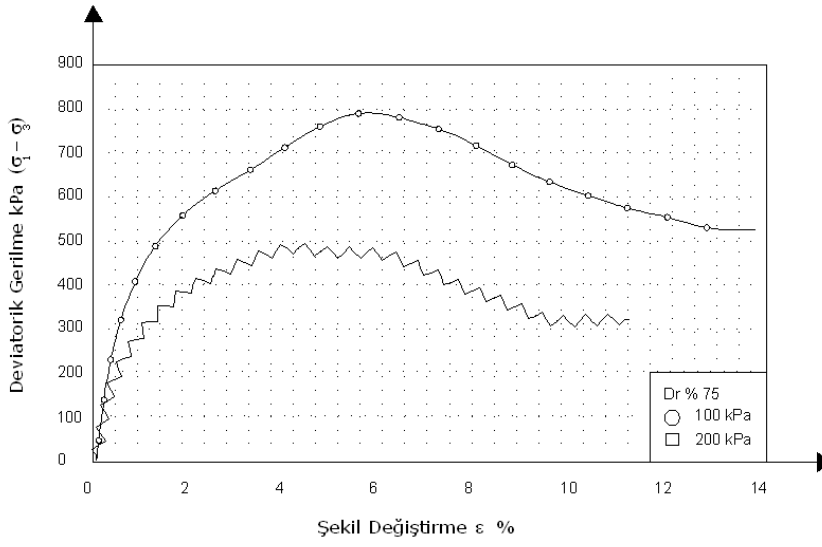
Şekil 3.4 Kum zemini için % 45 sıklıktaki içsel sürtünme açısı



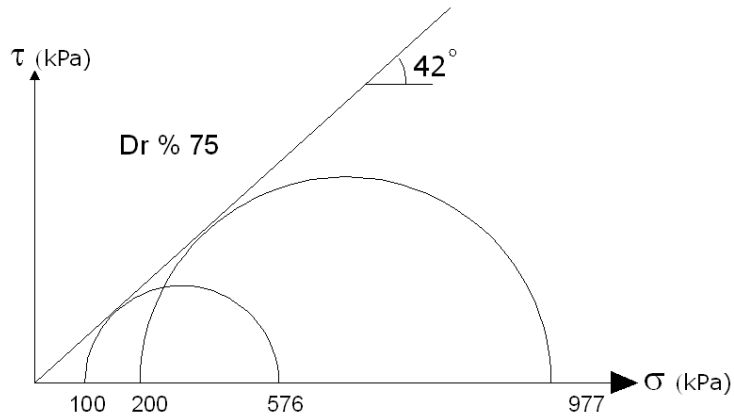
Şekil 3.5 Kum zemini için % 60 sıklıktaki gerilme şekil değiştirme eğrisi



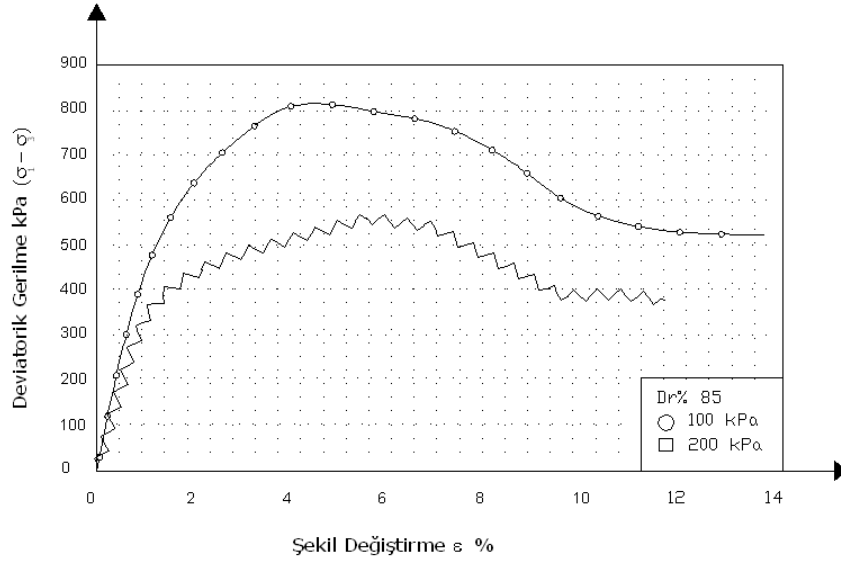
Şekil 3.6 Kum zemini için % 60 sıklıktaki içsel sürtünme açısı



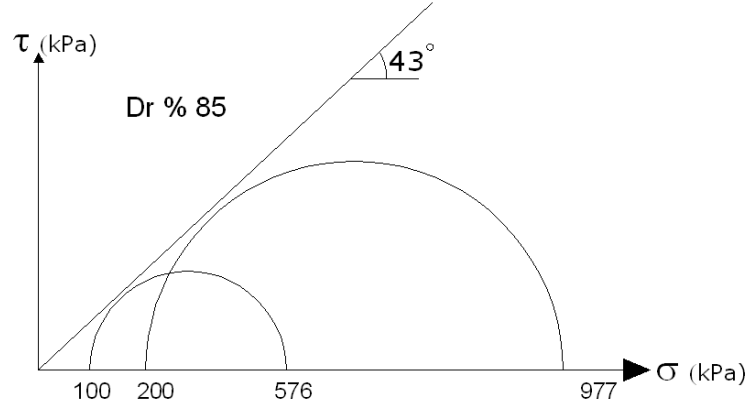
Şekil 3.7 Kum zemini için % 75 sıklıktaki gerilme şekil değıştirme eğrisi



Şekil 3.8 Kum zemini için % 75 sıklıktaki içsel sürtünme açısı



Şekil 3.9 Kum zemini için % 85 sıklıktaki gerilme şekil değiştirme eğrisi



Şekil 3.10 Kum zemini için % 85 sıklıktaki içsel sürtünme açısı

Rölatif sıklıkları % 45,60,75 ve 85 değerlerinde hazırlanan kum örnekleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinin toplu sonuçları Çizelge 3.4'te görülmektedir.

Çizelge 3.4 Kum malzemesinin sıklık- içsel sürtünme açıları

$D_r$ (%)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$\phi$ (°)
45	100	348.74	33
	200	664.79	
60	100	402.24	37
	200	703.37	
75	100	476.42	42
	200	777.42	
85	100	523.9	43
	200	761.57	

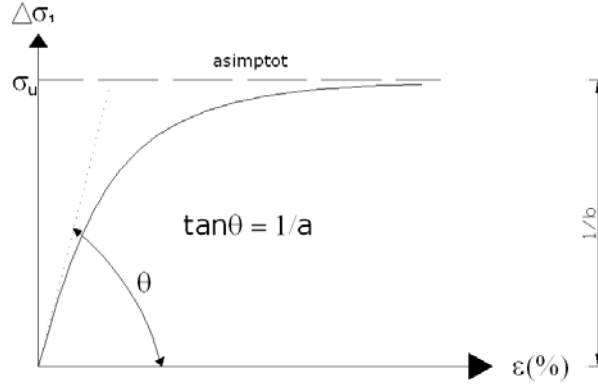
### 3.4 Hiperbolik Model

Üç eksenli basınç deney sonuçlarının değerlendirilmesinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar, hiperbolik bir bağıntı ile tanımlanabileceği model kullanılmıştır.

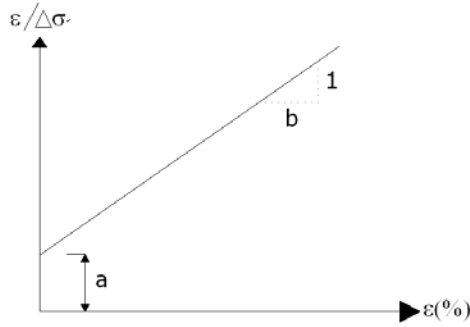
$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (3.1)$$

Eşitlikte yer alan a ve b malzeme parametreleri olup, a değeri başlangıç tanjant elastisite modülünün tersine ( $a=1/E_i$ ), b ise gerilme-şekil değiştirme grafiğinde, Şekil 3.11’de görüldüğü gibi gerilme farkının asimptotik değerinin tersi  $b = 1/(\sigma_1 - \sigma_3)$  değerine eşittir. Eşitlikte yer alan a ve b değişkenleri deney sonuçlarının eşitlikteki değerlerinden yararlanılarak  $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$  eksen takımında yerine yazılmasıyla elde edilir.





Şekil 3.11 Hiperbolik modelde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 3.12 Hiperbolik Modelde a ve b değişkenlerinin gösterimi

Başlangıç tanjant modülü  $E_i = 1/a$  herhangi bir  $\varepsilon$  değerinde

$$\frac{\Delta\sigma_i}{\varepsilon} = \frac{1}{a + b\varepsilon} \quad (3.2)$$

eksen takımı ve  $(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a}$  eşitliğinden yararlanılarak oluşturulan grafik Şekil

3.12'de gösterilmektedir. Bu grafik yardımı ile a ve b parametrelerinin yanı sıra kumun farklı sıklık ve hücre basınçlarına karşılık gelen başlangıç elastisite modülleri belirlenmiştir.  $E_i$  başlangıç (tanjant) elastisite modülünün değişik çevre basınçları için değerleri Janbu [64] tarafından önerilen;

$$E_i = K\sigma_p \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_p} \right)^n \quad (3.3)$$

bağıntısından yararlanılarak bulunabilir. Burada K elastik rijitlik katsayısı, n ise sabit bir katsayı,  $\sigma_3$  çevre basıncı,  $\sigma_p$  ise atmosfer basıncını göstermektedir. Duncan ve Chang[65]

çalışmasında kırılma anındaki asal gerilme farkının asimptotik asal gerilme farkı oranına kırılma oranı ismini vermişlerdir.

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (3.4)$$

ve kohezyonsuz zeminlerde;

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2\sigma_3 \sin \phi}{(1 - \sin \phi)} \quad (3.5)$$

olduğuna göre hiperbolik gerilme-şekil değiştirme bağıntısının

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \varepsilon_a} = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{(1 - \sin \phi)R_f}{2\sigma_3 \sin \phi} \varepsilon_a} \quad (3.6)$$

biçiminde yazılabileceğini göstermişlerdir. 3.6 eşitliğinin  $\varepsilon_a$  ya göre türevi herhangi bir gerilme seviyesindeki tanjant sıkışma modülü değerini vermektedir. Kohezyonsuz zeminler için üç eksenli basınç deneyinde tanjant sıkışma modülü ifadesi

$$E_t = \left( 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi)}{2 \sin \phi} x \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} \right)^2 E_i \quad (3.7)$$

şeklini almaktadır. Kum zemin üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen  $E_i$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  ve  $R_f$  değerleri Çizelge 3.5'te verilmektedir.

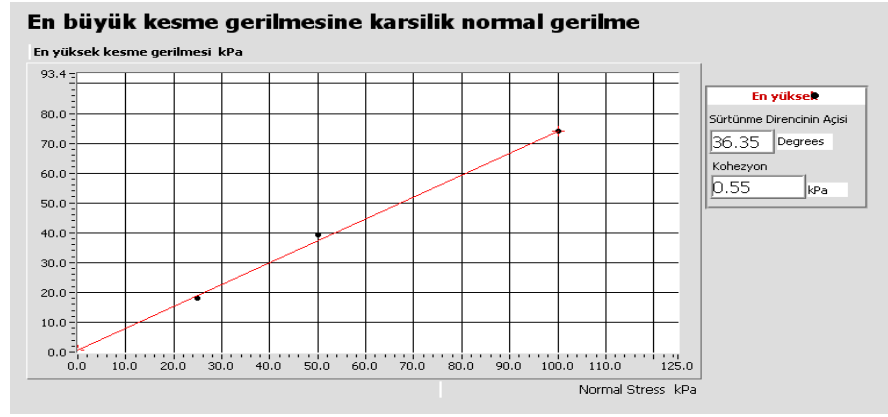
Çizelge 3.5 Üç eksenli deneylerinden elde edilen kum zeminin mekanik parametreleri

$D_T$	$\sigma_3$ (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kPa)	$a$ (kPa) <sup>-1</sup>	$b$ (kPa) <sup>-1</sup>	$E_i$ (kPa)	$R_f$	$\phi$ (°)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kPa)
45	100	348.74	0.0000181	0.0026	55320	0.907	33.02	384.62
	200	664.79	0.0000109	0.0011	91460	0.731		909.09
60	100	402.24	0.0000147	0.0018	68240	0.724	36.80	555.56
	200	703.37	0.0000084	0.0011	118650	0.774		909.09
75	100	476.42	0.0000118	0.0016	84970	0.762	41.92	625.00
	200	777.42	0.0000057	0.001	174480	0.777		1000.00
85	100	523.9	0.0000099	0.0015	100660	0.786	43.16	666.67
	200	761.57	0.0000051	0.009	197700	0.685		1111.15

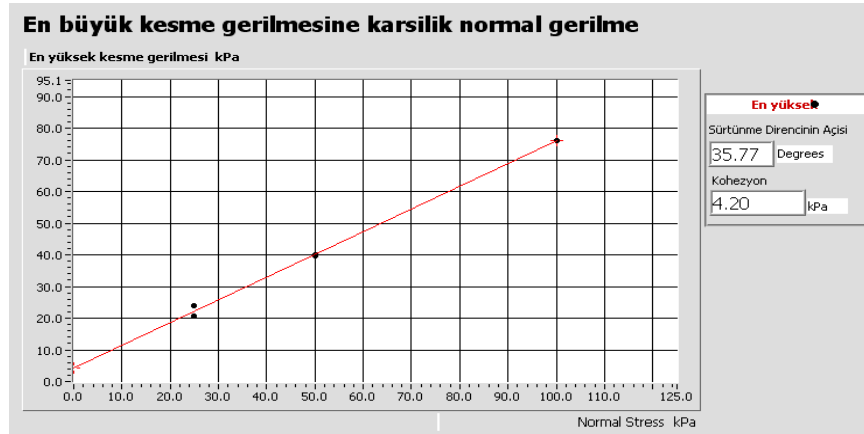
Sonuçlardan görülebileceği gibi kum örneklerinin göreceli sıklık değerleri arttıkça başlangıç elastisite modüllerinin de arttığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte eşit sıklıktaki kum örnekleri için  $E_1$ 'nin çevre basıncı ile orantılı olarak büyüdüğü görülmektedir.

### 3.5 Direkt Kesme Deneyleri

Deneyde kullanılacak kum malzeme üzerinde ayrıca kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.  $D_r=70\%$  ve  $50\%$  rölatif sıklık için, 1.27 mm/dk kesme hızında 25 kPa, 50 kPa ve 100 Pa olan üç farklı düşey basınç altında deneyler yapılarak içsel sürtünme açıları bulunmuştur.  $D_r=50\%$  için  $\phi = 35,75^\circ$  ,  $D_r=70\%$  için ise  $\phi = 36,35^\circ$  olarak elde edilmiştir. Deney sonuçları Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 'te verilmiştir.



Şekil 3.13  $D_r=70\%$  için direkt kesme deneyine ait içsel sürtünme açısı sonuçları

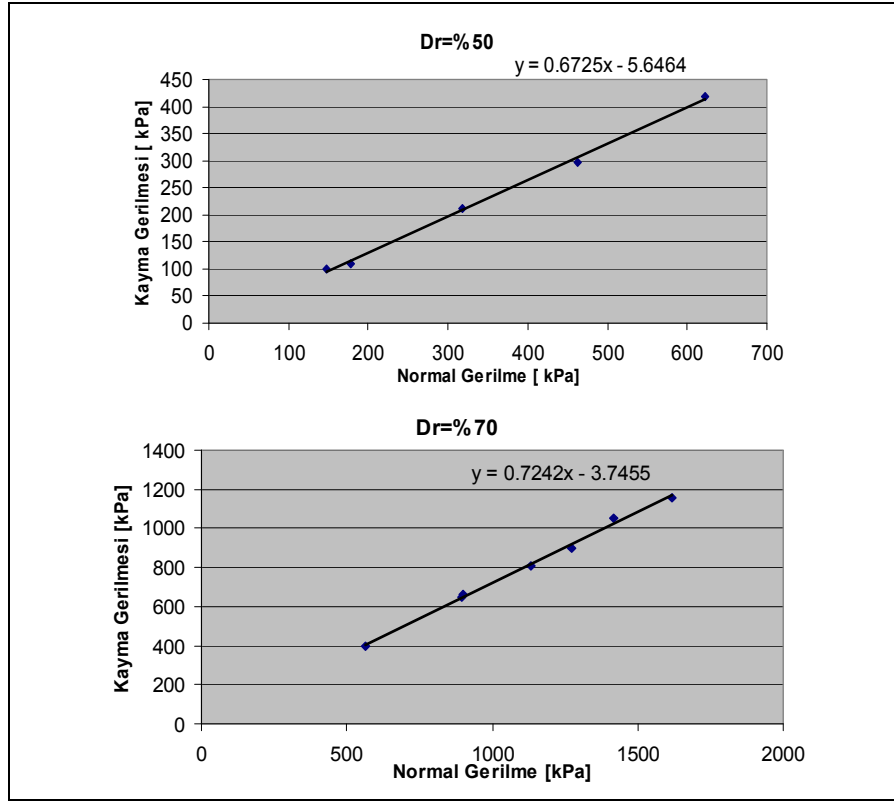


Şekil 3.14  $D_r=50\%$  için direkt kesme deneyine ait içsel sürtünme açısı sonuçları

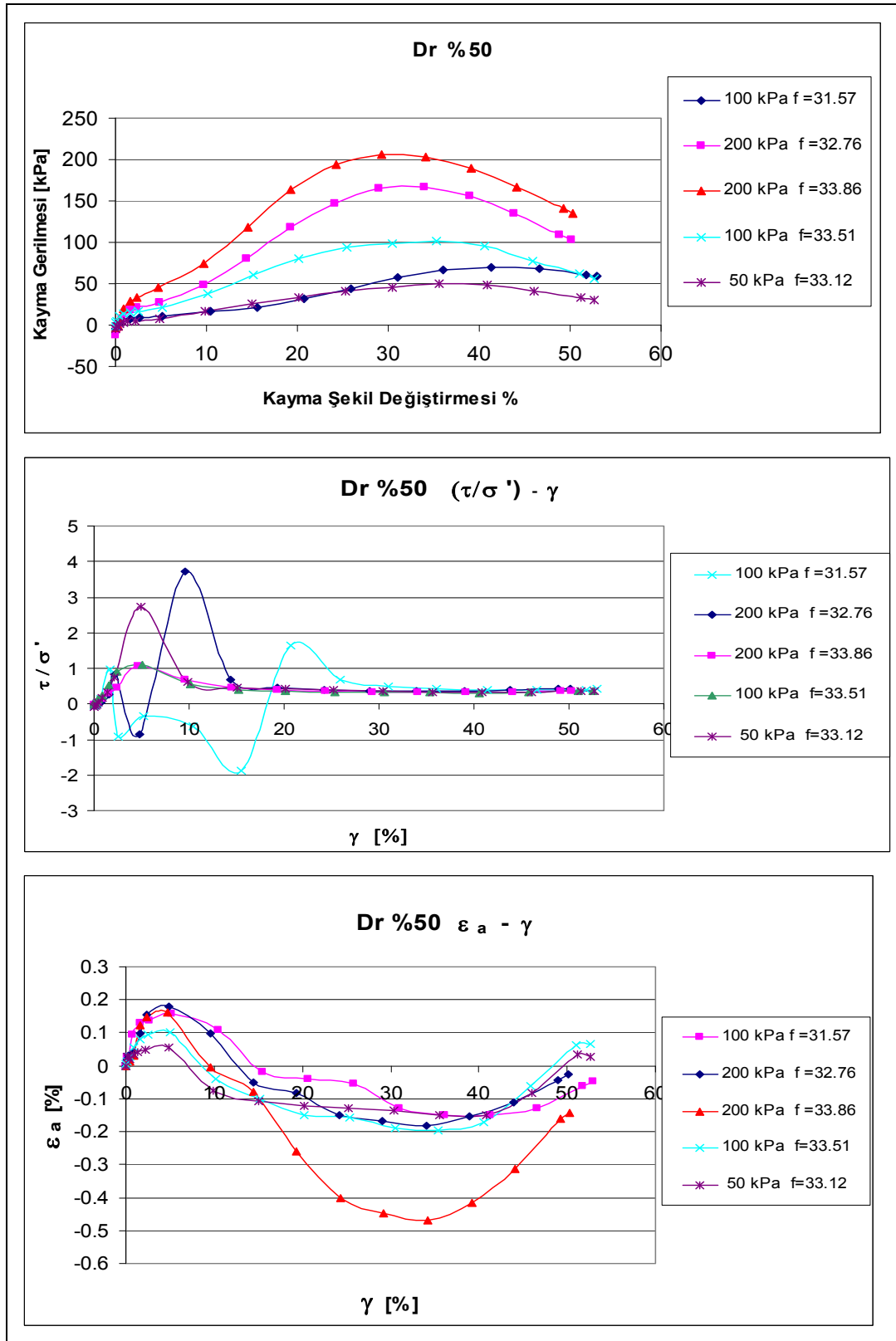
### 3.6 Basit Kesme Deneyleri

Deney sisteminde kullanılacak kum malzemeye ait parametreleri belirlemek amacıyla aynı zamanda basit kesme deneyleri yapılmıştır. Arazideki yükleme durumları, inşaat adımları ya da dalga yükleri gibi nedenlerle değiştiğinden laboratuvar ortamında arazi koşulları ile en uyumlu benzeşimin sağlandığı bilinmektedir[66]. Direkt kesmeden en önemli farkı, basit kesme deneyinde hacmin sabit tutularak kesme işlemi gerçekleştirilebilmesi ve bunun için kesme esnasında uygulanan düşey kuvvetin, numunedeki değişimlere göre artırılması ya da azaltılması olmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak granüler malzeme için  $D_r=70$  ve  $50$  sıklıkta numuneler hazırlanmış ve 50, 100, 200 kPa düşey basınç altında, her basınç kademesinde iki deney yapılarak kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.  $D_r=70$  için  $\phi=35,75^\circ$  bulunurken  $D_r=50$  için ise  $\phi=33,12^\circ$  bulunmuştur.

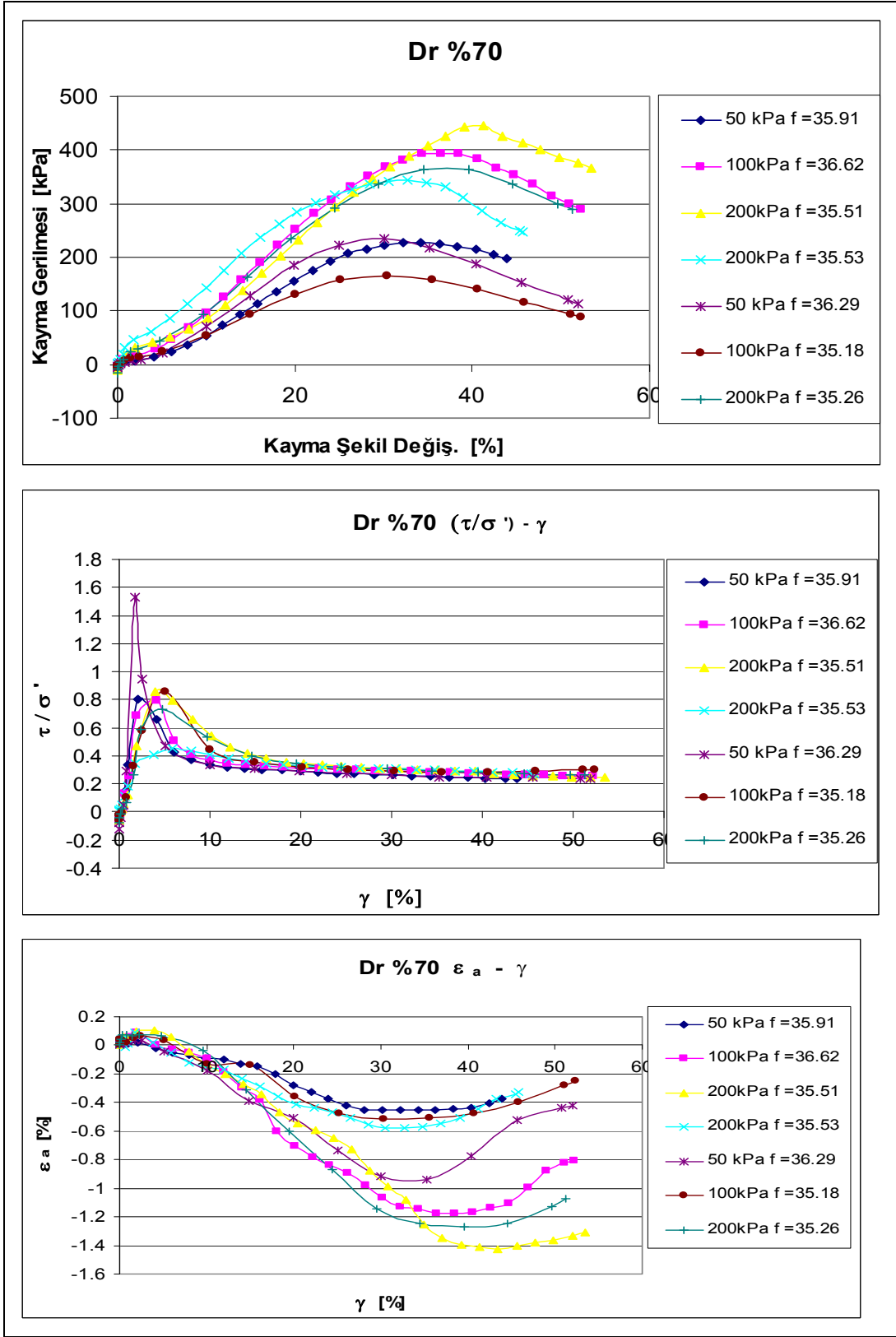
Normalize edilmiş kayma gerilmesi oranı  $(\tau / \sigma) - \gamma$  grafikleri incelendiğinde(Şekil 3.16)  $D_r=50$  için  $\gamma=5$  kayma şekil değiştirme seviyelerinde yaklaşık 1 mertebelerine yaklaştığı görülmüştür.  $D_r=70$  sıklığındaki malzeme için ise(Şekil 3.17)  $\gamma=5$  kayma şekil değiştirme seviyelerinde normalize kayma şekil değiştirme değerinin 0.8 mertebesinde olduğu görülmektedir. Artan kayma şekil değiştirme seviyelerinde ise normalize edilmiş kayma gerilmesi değeri 0.2-0.3 mertebelerinde kararlı hale gelmektedir.



Şekil 3.15 Basit kesme deneyi içsel sürtünme açısı sonuçları

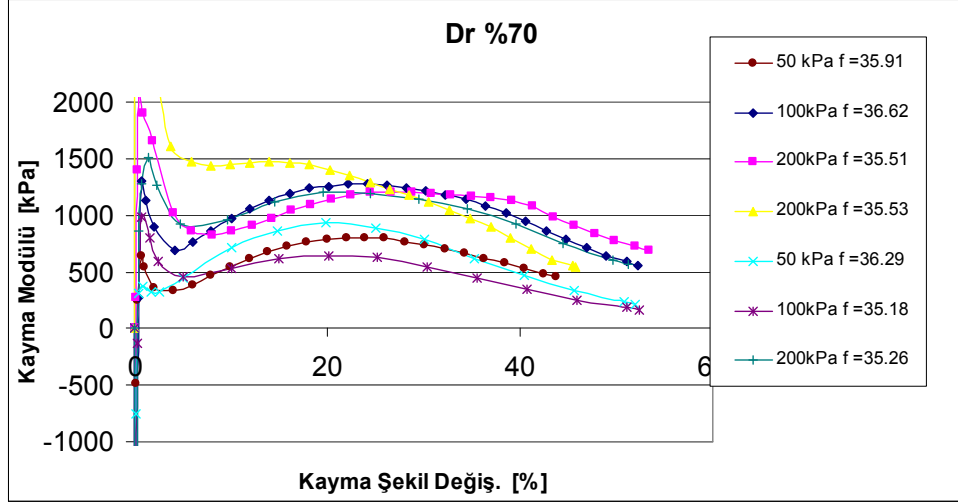


Şekil 3.16 Basit kesme deneyi sonuçları (Dr%50)

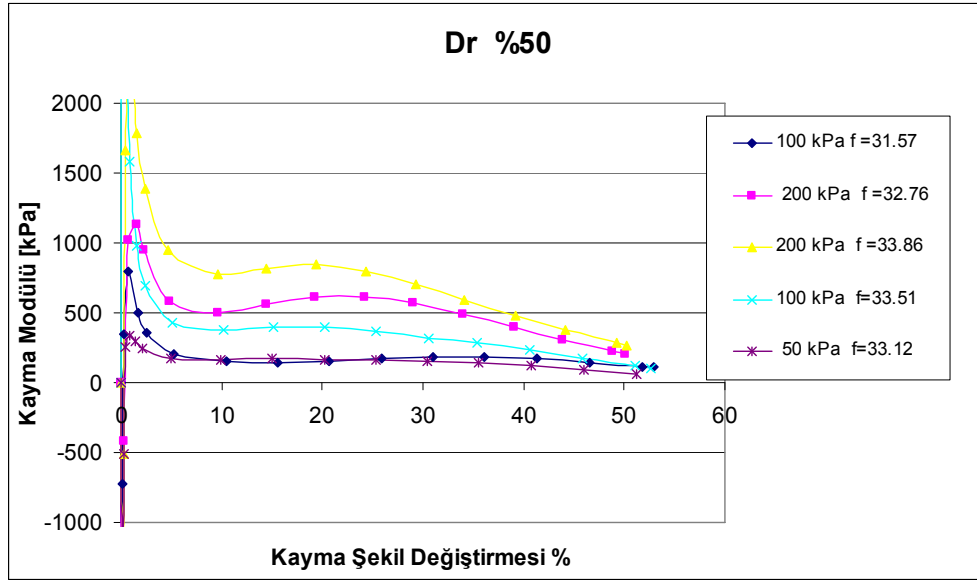


Şekil 3.17 Basit kesme deneyi sonuçları Dr%70

Kayma modülünün kayma şekil değiştirme ile ilişkisi Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 'da gösterilmiştir. Dr%50 için, kayma modülü başlangıç kayma şekil değiştirme seviyelerinden itibaren azalarak %10 şekil değiştirme seviyelerinde sabit seviyeye ulaşmıştır. Dr%70 için, kayma modülü %10 şekil değiştirme seviyelerinde minimum değerler aldıktan sonra %20-25 kayma şekil değiştirme seviyelerine kadar artış göstererek tekrar azalma eğilimi göstermiştir.



Şekil 3.18 Dr=%70 için kayma modülü-şekil değiştirme



Şekil 3.19 Dr=%50 için kayma modülü-şekil değiştirme



### 3.7 Çevrimli Basit Kesme Deneyleri

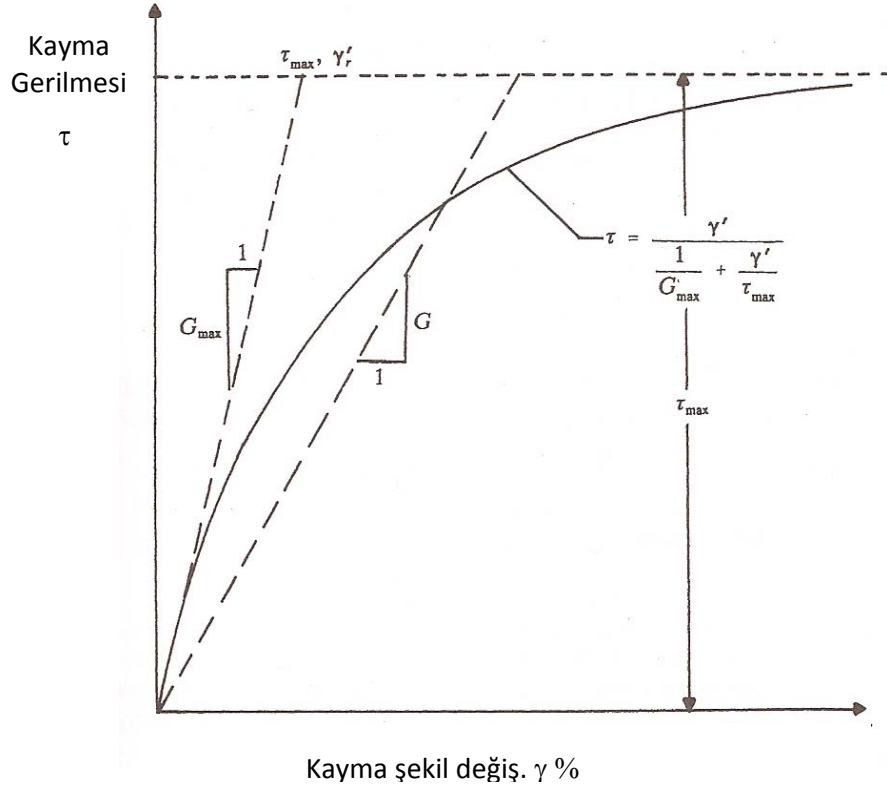
Model deeneyde kullanılacak kum malzemenin dinamik davranışını gözlemlemek için YTÜ İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim dalı laboratuvarında bulunan Geocomp marka Çevrimli Basit Kesme deney aletinde gerilme kontrollü deneyler yapılmıştır. Hazırlanan kuru ve su altındaki numuneler üzerinde değişik  $\tau / \sigma_v$  oranları ve farklı frekans değerleri için çevrimli basit kesme deneyleri tekrarlanmıştır.

Çevrimli basit kesme deneyi, zeminlerin kayma modüllerinin ve sönüm oranlarının bulunması için uygun bir deney sistemidir[62]. Çevrimli basit kesme deneylerinde genelde 20-30 mm yüksekliğinde ve 60-80 mm çapında numuneler kullanılmaktadır. Yüklemeler ise yatay ve düşey gerilmeler şeklinde olmaktadır. Uygulanan düşey gerilme altında, düşey gerilmenin belirli oranlarında ve farklı frekanslarda yatay gerilmeler verilmektedir. Deneyler gerilme kontrollü olarak ya da şekil değiştirme kontrollü olarak iki farklı yöntemle yapılabilmektedir.

Zeminlerin kayma modülleri hiperbolik model kullanılarak başlangıç ve artan kayma şekil değiştirme seviyelerindeki değerlerinden elde edilebilmektedir(Şekil 3.20).

$$\tau = \frac{\gamma}{1/G_0 + \gamma/\tau_{maks}} = \frac{\gamma \cdot G_0}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (3.8)$$

hiperbolik fonksiyonda tanımlanmaktadır.  $\tau$  kayma gerilmesini,  $\gamma$  ise kayma şekil değiştirmesini göstermektedir.  $G_0$ , kayma şekil değiştirme seviyesinin çok düşük olduğu ( $\gamma\% < 10^{-4}$ ) başlangıç değeri için hesaplanan  $G = \tau/\gamma$  sekant kayma modülüdür. Burada  $\gamma_r = \tau_{maks}/G_0$  referans birim kayma olarak adlandırılır. Kayma şekil değiştirme değeri arttıkça kayma modülünün değeri azalmaktadır.



Şekil 3.20 Kayma gerilmesi kayma şekil değıştirmesi ilişkisi[67]

Çevrimli yüklemeler altında kayma modülünün kayma şekil değıştirmesi ile ilişkisini en büyük kayma modülüne göre normalize ederek,  $G/G_{maks} - \gamma$  eğrileri elde edilmektedir.

En büyük kayma modülü değeri literatürde verilen bazı yapılmış ampirik ifadelerinden yararlanılarak elde edilebilmektedir. Ampirik formüllerde kayma dalgası hızına, boşluk oranına, SPT-N darbe sayısına göre olmak üzere çeşitli parametreleri kullanılmaktadır.

Örnek olarak kumlarda en büyük kayma modülü için Hardin ve Black tarafından [68] çalışmasında danelerin yuvarlak ve köşeli olması durumlarına göre aşağıdaki formülleri önermişlerdir.

$$G_{max} = \frac{6908(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma'_o{}^{1/2} \text{ (kPa)} \quad \text{yuvarlak daneli,} \quad (3.9)$$

$$G_{max} = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma'_o{}^{1/2} \text{ (kPa)} \quad \text{köşeli daneli} \quad (3.10)$$

Burada  $\sigma_o$  ortalama efektif gerilme, e ise boşluk oranıdır.

$$\sigma'_o = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (3.11)$$

$\sigma'_1$  : düşey efektif gerilme

$$\sigma'_2 = \sigma'_3 = K_0 * \sigma_v \quad (3.12)$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (3.13)$$

$K_0$  sükunetteki yanal toprak itki katsayısı ,  $\phi$ : drenajlı içsel sürtünme açısını göstermektedir.

$$\sigma'_0 = \frac{1}{3}(\sigma'_v + 2\sigma'_v(1 - \sin \phi)) \quad (3.14)$$

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_v}{3}(3 - 2 \sin \phi) \quad (3.15)$$

formülünden elde edilmektedir.

Benzer şekilde Seed ve Idriss tarafından [69] çalışmasında en büyük kayma modülü değeri kip/ft<sup>2</sup> cinsinden

$$G_{\max} = 1000 K_{2\max} (\sigma_0^{0.5}), \quad \sigma_0(\text{psf}) \quad (3.16)$$

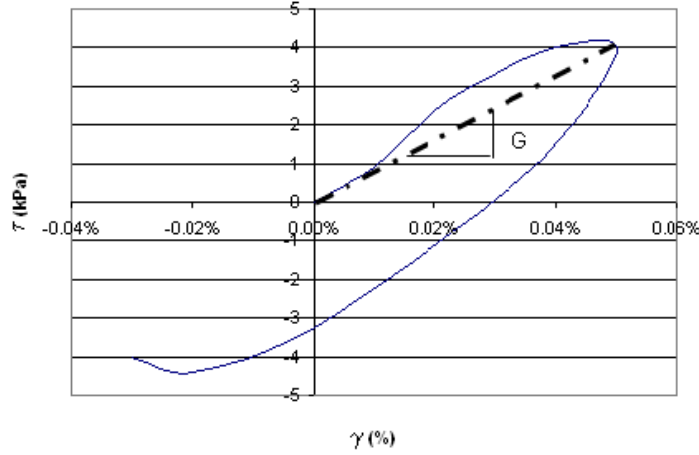
olarak vermektedir.

$K_{2\max}$  değeri gevşek zemin için(Dr=%30) 34 değerini, Dr=%50 için 46 değerini sıkı zemin için (Dr=%90) ise 70 değerini almaktadır. almaktadır.

Deneysel çalışmalarda  $\sigma_0$  değeri Dr=%50 sıklık için basit kesme deneyinden elde edilen  $\phi = 35.75^\circ$  değeri kullanılarak hesap edilmiştir. Çeşitli düşey gerilme seviyeleri için deneylerde kullanılan en büyük kayma modülleri ise  $\sigma_v = 50$  kPa için  $G_{\max} = 12169$  kPa,  $\sigma_v = 100$  kPa için  $G_{\max} = 17209$  kPa,  $\sigma_v = 200$  kPa için  $G_{\max} = 24337$  kPa,  $\sigma_v = 300$  kPa için  $G_{\max} = 29807$  kPa,  $\sigma_v = 400$  kPa için  $G_{\max} = 34417$  kPa olarak hesaplanmıştır.

Çevrimli basit kesme deney numuneleri  $h=27$  mm yüksekliğinde ve  $d=63.5$ mm çapında olmak üzere yağmurlama sistemi ile uniform olarak hazırlanmıştır. İstenen sıklıkta (Dr=%50 'nin) numune elde edebilmek için sabit miktarda kum numunesi belirli yükseklikte olacak şekilde, deney aleti üzerinde ve çelik halkaları membran etrafına yerleştirilmiş durumunda iken yağmurlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Membranın istenen çapta olması için vakum uygulanmıştır. Düşey gerilmenin uygulandığı yükleme pistonu ve başlığının yerleştirilmesi esnasında olacak titreşimlerin mümkün olduğunca az olmasına dikkat edilmiştir. Kayma modülünün kayma şekil değiştirme seviyelerine göre değişimleri MATLAB ortamında yazılan bir program yardımıyla elde edilmiştir. Bunun için her çevrimde kayma modülü, çevrimin pozitif tarafındaki yarısı için görülen maksimum kayma şekil değiştirmesi seviyesindeki kayma

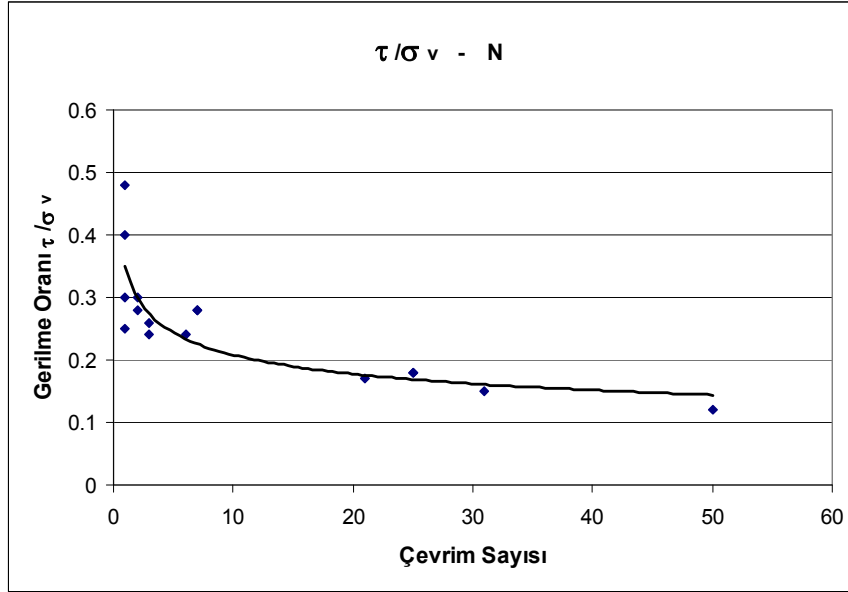
gerilmesinin o çevrimdeki en büyük kayma şekil deęiřtirmesine oranı ile bulunmuřtur(řekil 3.21). Artan dūřey gerilmeler altında kayma modūlü deęerlerinin arttıęı gōrūlmūřtur.



řekil 3.21 Her çevrim için kayma modūlü elde edilmesi

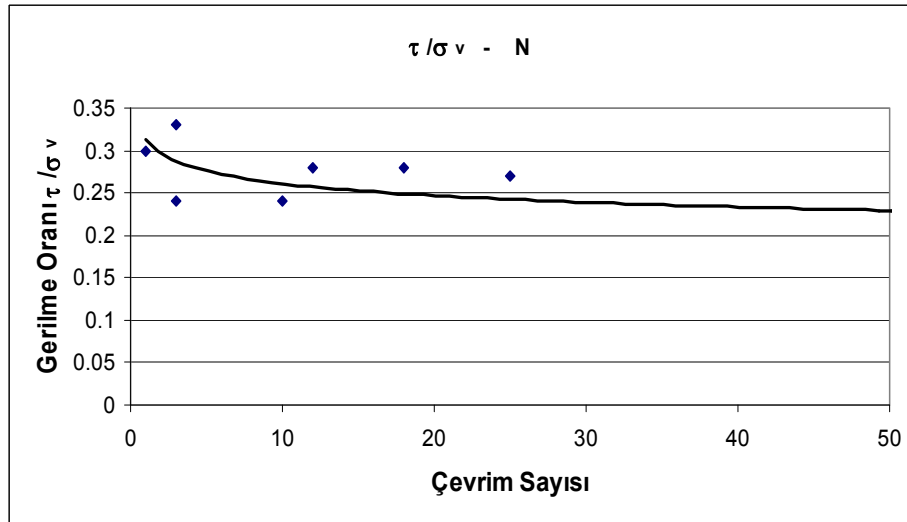
Deneilerde uygulanacak frekans aralıęını belirlemek için 1 Hz ve 0.2Hz frekansında n deneyler yapılmıř, deney sisteminin kullanım kitapçıęında belirtildięi ūzere 1 Hz altında olan ūklemelerde kayma gerilmeleri kontrolūnūn daha iyi saęlandığı gōrūlmūřtur.  $D_r = 50\%$  rölatif sıklıkta hazırlanan kuru ve suya doęgun numuneler ūzerinde 0.2 Hz -1Hz frekansında, 50 – 100 – 200 – 300 - 400 kPa 'lık dūřey gerilmeler altında, 0.1 – 0.5 arasında  $\tau / \sigma_v$  gerilme oranlarında ve 50 çevrim sayısında 35 civarında çevrimli basit kesme deneyi yapılmıřtır. Kayma şekil deęiřtirmesinin  $\pm \gamma = 5\%$  deęerine ulařması durumunda zeminde gōme oluřtuęu (kayma dayanımının) ařıldıęı kabul edilmiřtir.

Literatūrdaki çalıřmalardan da bilindięi ūzere būyūk gerilme oranlarının ( $\tau / \sigma_v > 0.2$ ) zemine uygulanması mūmkūn olmamakta, ilk çevrimden itibaren kayma dayanımının ařıldıęı gōrūlmektedir. Gerilme oranı ile gōmeye yolaçan çevrim sayısı arasındaki iliřki řekil 3.22 ve řekil 3.23 'te gōsterilmektedir. Yūksek gerilme oranlarında kayma dayanımı ilk çevrimlerde ařılmakta, gerilme oranı azaldıkça kayma dayanımının ařılması için daha yūksek çevrim sayılarında yūk uygulanması gerekmektedir.



Şekil 3.22 Kuru numunelerde gerilme oranı – göçmeye yolaçan çevrim sayısı ilişkisi(Dr=%50)

Suya doymun numuneler üzerinde çevrimli basit kesme deneylerinde elde edilen, gerilme oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki Şekil 3.23'te gösterilmektedir.



Şekil 3.23 Suya doymun numunelerde gerilme oranı - göçmeye yolaçan çevrim sayısı ilişkisi(Dr=%50)

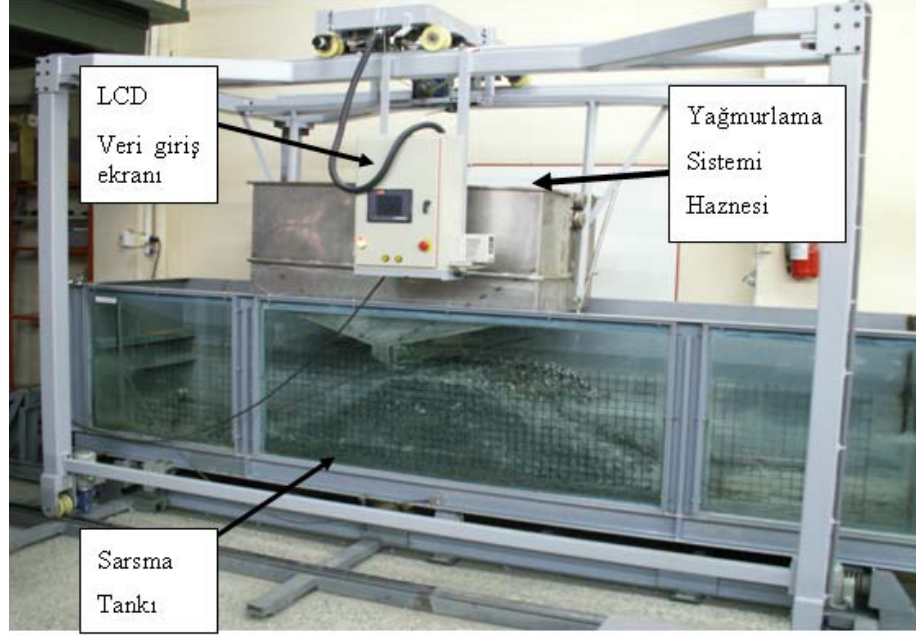
### MODEL DENEY SİSTEMİ

Model deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı Liman Laboratuvarında mevcut olan 4.5 m uzunluğunda, 1.0 m genişliğinde ve 1.0m yüksekliğinde bir sarsma tankı, sisteme istenen rölatif sıklıkta malzeme yerleştirebilmeyi sağlayan yağmurlama sistemi, ivme ölçer ve boşluksuyu basınç ölçerlerden oluşan bilgisayar destekli ölçüm sisteminden oluşan bir model deney sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

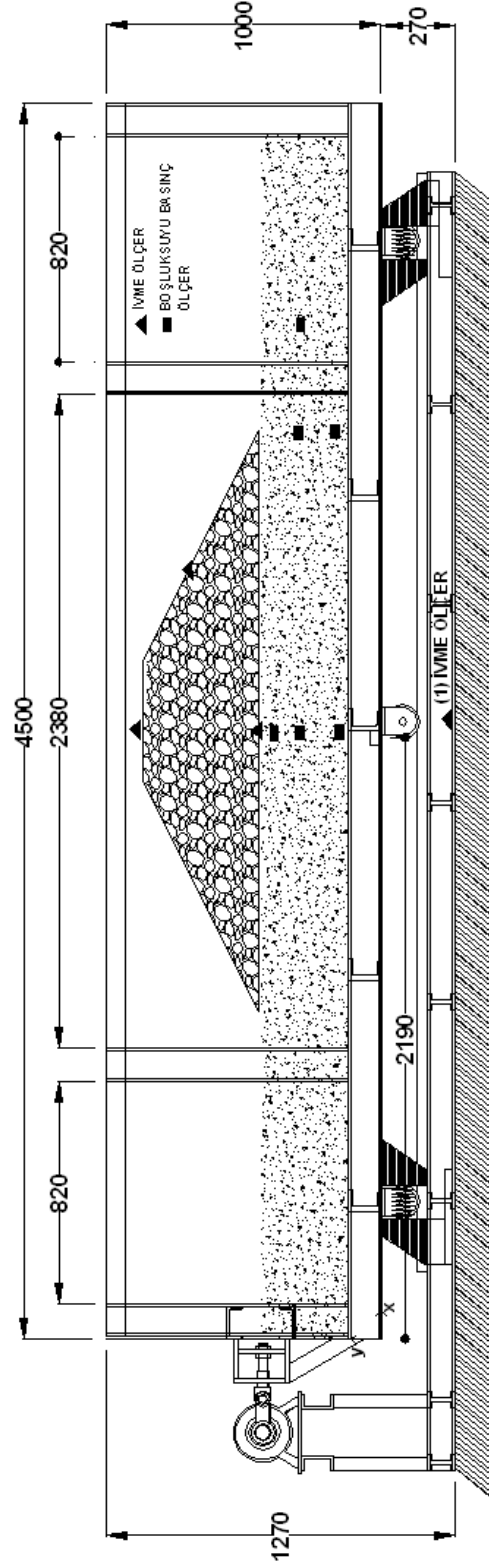
#### 4.1 Sarsma Tankı ve Yağmurlama Sistemi

Sarsma tankı 4.5 m uzunluğunda, 1.0 m genişliğinde ve 1.0m yüksekliğinde olan ve 1 mm - 20 mm arasında yatay doğrusal hareket ile farklı frekanslarda bir yönde (x yönünde) salınım verilebilecek şekilde hazırlanan bir güç iletim sisteminden oluşmaktadır (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3). Sistem çelik raylar üzerinde hareket etmektedir. Tek yönde çevrimli hareket uygulanması sırasında görüntü alınabilmesi için sarsma tankının ön cephesi cam olarak imal edilmiştir.

Sarsma tankı içerisine istenen sıklıkta numune yerleşimi bir yağmurlama sistemi(Şekil 4.1, Şekil 4.3). yardımıyla yapılmaktadır. Yağmurlama sistemi, yatay ve düşeyde hareket imkanı sağlayan motor sistemi ve hareketlerin kullanıcı tarafından programlanabilmesine olanak sağlayan dokunmatik lcd veri giriş ekranından oluşmaktadır.



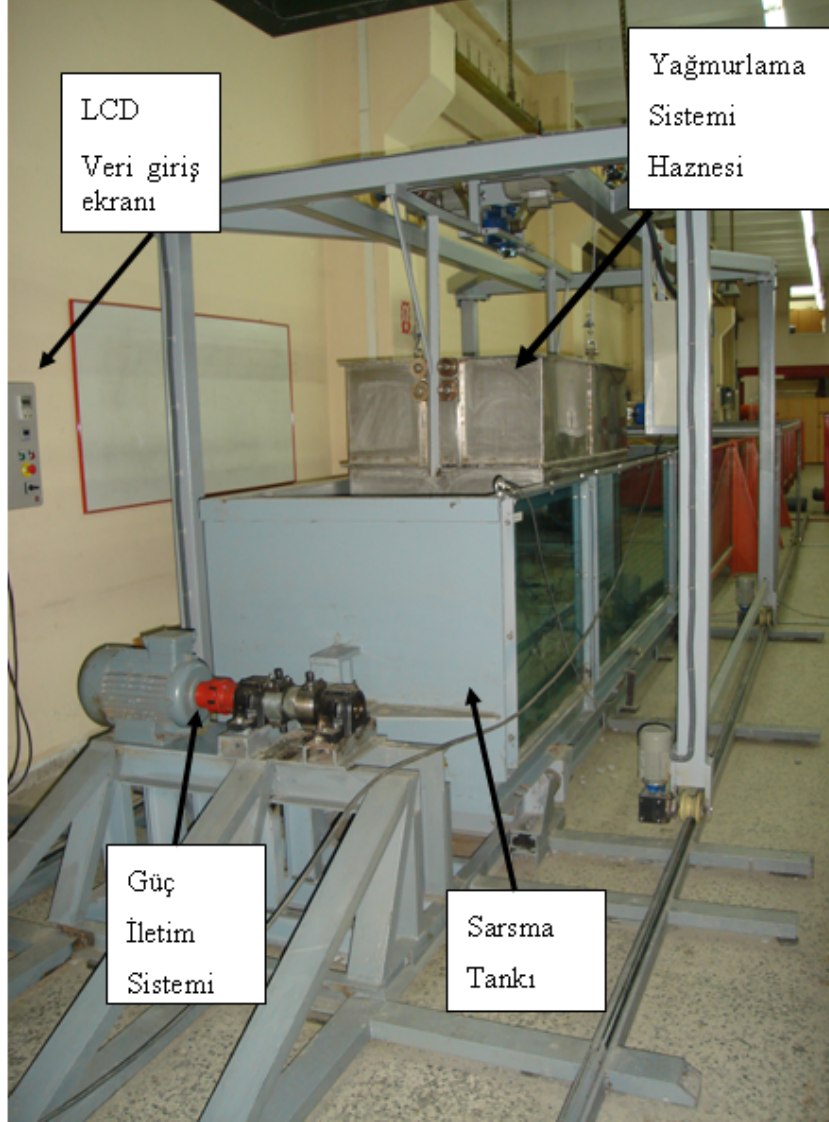
Şekil 4.1 Model deney sistemi- sarsma tankı ve yağmurlama sistemi



Şekil 4.2 Model deney sistemi ve ölçüm noktaları



Sarsma tankına uygulanacak çevrimli yer değiştirme hareketi, tank yanına yerleştirilen g itme sistemi yardımıyla yapılmaktadır(Şekil 4.3). Model deney sistemine verilmek istenen sinuzoidal harekete ait frekans değeri veri giriş panelinden girildikten sonra sisteme monte edilmiş motor ve g iletim mili yardımıyla çevrimli hareket sisteme aktarılmaktadır. Hareketin genliği ise, g iletim mili üzerinden ayarlanarak sarsma tankı istenen deplasman genliğinde sallanmaktadır.



Şekil 4.3 Model deney sistemi-yandan görünüş

Sisteme uygulanabilecek ivme değeri çevrimli hareketin frekansına bağlı olarak değişmekte olduğundan deneyler öncesinde sistem yüklü iken farklı frekans değerlerinde çalıştırılarak elde olunacak ivme değerleri yaklaşık olarak tespit edilmiştir. Buna göre model deneyler, 3

mm genişliğinde 20 sn boyunca 3 Hz, 4Hz, 5Hz ve 6 Hz frekansa sahip sinuzoidal hareket uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ivme değerleri model deneyin kütlesine de bağlı olarak 0.1 g-0.6 g arasında değişim göstermiştir.

#### 4.2 Sıklık Tayini

Model deneylerde, yağmurlama sisteminin kapak açıklığı ve düşme yüksekliği ayarlanarak dalgakıran altında homojen bir tabaka oluşturulmuştur.

Sistem ile hazırlanabilecek kum çökellerine ait rölatif sıklıkları araştırmak için kum danelerinin düşme yüksekliği ve yüksekten düşen numunenin debisi değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Hazne içerisine konan kumun dökülme ağzının aralığı değiştirilerek kuru halde homojen sıklıkta numuneler hazırlanmış sonrasında benzer şekilde su içerisinde numuneler hazırlanmıştır.

Öncelikle düşme yüksekliği 20 cm sabit tutularak hazne kapağı açıklığının numune rölatif sıklığı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Birinci deneyde, hazne kapağı ağzı 2.5 cm açılarak deney yapılmıştır. Rölatif sıklık tayini için kum numune, 10.15 cm çapında 11.6 cm yüksekliğindeki CBR kalıbı içerisine boşaltılmıştır. Düşme yüksekliğinin tüm doldurma işlemi sırasında sabit olmasını sağlayabilmek için yatayda ileri ve geri hareket ettirilirken her adımda yüksekliği artırılmıştır. Birinci deneyde elde edilen numune rölatif sıklığı %15 olarak bulunmuştur.

İkinci deneyde, kum daneleri kuru halde 20 cm yükseklikten hazne ağzı 0.5 cm olacak şekilde boşaltılmıştır. Hazne ağzı açıklığı 0.5 cm ye kadar daraltılması numune sıklığını oldukça artırmış  $Dr=75$  olarak hesaplanmıştır.

Düşme yüksekliği 20 cm iken hazne ağzı 2cm olarak ve 1 cm olarak deneyler tekrarlanmıştır. Hazne ağzı açıklığı 2 cm iken  $Dr=23$ , hazne ağzı açıklığı 1 cm iken  $Dr=44$  olarak hesaplanmıştır.

Düşme yüksekliğinin numune rölatif sıklığına etkisini görebilmek için hazne ağzı açıklığı 1 cm de sabit tutularak 45 cm yükseklikten numune boşaltılarak deney tekrar edilmiştir. Numune sıklığı artarak  $Dr=55$  değerini almıştır.

### 4.3 Su altında Numune Hazırlama

Su altında istenen sıklıkta numune hazırlamak için sarsma tankı içerisine 30 cm su doldurulmuş, su üzerinden 1 cm yüksekten 1 cm hazne ağız açıklığından kum boşaltılmıştır. Rölatif sıklık  $Dr=25$  olarak bulunmuştur. İkinci olarak 1 cm hazne ağız açıklığında 30 cm su yüksekliği üzerine 10 cm yüksekten kum boşaltılmış, numunenin rölatif sıklığı  $Dr=30$  olarak bulunmuştur.

Düşme yüksekliği artırılarak 65 cm yukarıdan 30 cm yüksekliğindeki su içerisine kum boşaltılarak deney tekrarlanmış ve rölatif sıklık değeri  $Dr=42$  olarak hesaplanmıştır.

Rölatif sıklık tayini deneylerinde kuru numune hazırlanırken düşme yüksekliğinin artırılması ile rölatif sıklığı arttığı, düşen numune debisini artması ile ise rölatif sıklığın azaldığı görülmüştür.

Su altında numune hazırlanmasında ise düşme yüksekliğinin artması rölatif sıklığı çok az miktarda değiştirmiştir. Danelerin suya çarpması ile enerji kaybı oluşmakta ve suyun kaldırma kuvveti etkisiyle su içerisinde düşme hızı yavaşlamaktadır.

Model deneylerde, 30 cm su yüksekliği üzerine, 20cm yüksekten 1 cm yağmurlama ağız açıklığı ile sabit hızda yağmurlama yapılarak  $Dr=40$  sıklıkta homojen tabakalar elde edilmiştir.

### 4.4 Ölçüm Sensörleri

Yapılan model deneylerde, sisteme tabandan uygulanan ana girdi hareketi ve model üzerinde oluşacak ivmeler dört adet ivme ölçer yardımıyla, çevrimli gerilmeler etkisi altında kum zemin içerisinde oluşacak boşluksuyu basınçları ise altı adet boşluksuyu basınç ölçer aracılığı ile tüm ölçerlerin bağlı olduğu bilgisayarlı veri kayıt sistemine kayıt edilmektedir. Boşluksuuyu basınç sensörü olarak DRUCK markasının PDCR81 modeli kullanılmıştır. PDCR81 modeline ait teknik özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Boşluksuyu basınç sensörüne ait teknik özellikler(Druck- Pdc81 tipi)

Dinamik Ölçüm Aralığı	0-100 kPa
Ölçüm Hassasiyeti	0.020 mV/V/mba
Doğruluk	± %0.2
Çalışma Sıcaklığı	-20 °C - +120 °C

Deneyler sırasında sarsma tankının alt noktasında ve model deney sistemi içerisinde konumlandırılmış olan PCB Piezotronics ve IMI tarafından üretilen tek eksenli ivme sensörleri kullanılmıştır(Çizelge 4.2.)

Çizelge 4.2 İvme sensörlerine ait teknik özellikler

	PCB	IMI 626B13 ICP
Dinamik Ölçüm Aralığı	±5g	±5g
Ölçüm Hassasiyeti	100 mV/g	1000 mV/g
Rezonans Frekansı	0.7 – 6500 Hz	0.2 – 6000 Hz
Genlik Doğrusallığı	%1	%1

Model sınırlarının zeminlerin dinamik davranışını etkilediği bilindiğinden [70], kullanılan sensörlerin yerleşimlerinde sınır koşullarının etkisinin azaltılması için planda model kenarlarından uzakta orta bölgelerde yerleştirilmesine dikkat edilmiştir. Ayrıca, boşluksuyu basınç ölçerlerin suya doymun hale gelmesi için model deney sistemi kurulduktan sonra sistem su içerisinde bir gün bekletilmiştir.

#### 4.5 Veri Toplama Sistemi

Deneyde elde edilen ivme sinyallerini bilgisayara aktarmak için PCB tarafından üretilen analog sinyalleri dijital sinyale dönüştüren, dört kanallı A/D sinyal koşullayıcı kullanılmıştır. Sistem, gelen sinyallerin gücünü artırmak için kazancı 1, 10, 100 kat artırabilecek ayar sistemine sahiptir. Boşluksuyu basınç sinyallerinin güçlendirilmesi amacıyla Phoenix tarafından üretilmiş olan sinyal güçlendirici ile 10 kat güçlendirilmektedir. Elde edilen dijital

sinyaller National Instruments tarafından üretilen data toplama kartı ile bilgisayar ortamına kaydedilmektedir.

Model deney sırasında sistemde ölçülen dijital boşluksuyu basınç değerleri ile ivme değerleri LABVIEW ortamında hazırlanmış olan veri toplama programı ile bilgisayar ortamına kaydedilmektedir. Volt cinsinden gelen sinyaller sensörlere ait kalibrasyon değerleri ile kPa ve g cinsinden sonuçlara dönüştürülmekte ve gelen sinyaller saniyede 1000 örnekleme ile kaydedilmektedir. Ayrıca, model deney sırasında oluşacak deformasyonların görüntülenebilmesi için 1 saniye aralıklı JPG formatında görüntüler bilgisayar ortamına kaydedilmektedir.

### MODEL DENEYLER

#### 5.1 Giriş

Model deneyler iki ana çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 20 cm kalınlığında %40 rölatif sıklıkta suya yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış kum tabaka tabanında değişik ivme büyüklüklerine sahip çevrimli yatay yerdeğiştirme hareketleri uygulanarak suya doymuş kum tabakasında oluşan ivme ve boşluksuyu basınçları ölçülmüştür. Boşluksuyu basınçları kesit tabanında, ortası ve yüzeye yakın bir noktada, ivme ölçümleri ise kesit tabanında ve tabaka yüzeyinde kaydedilmiştir.

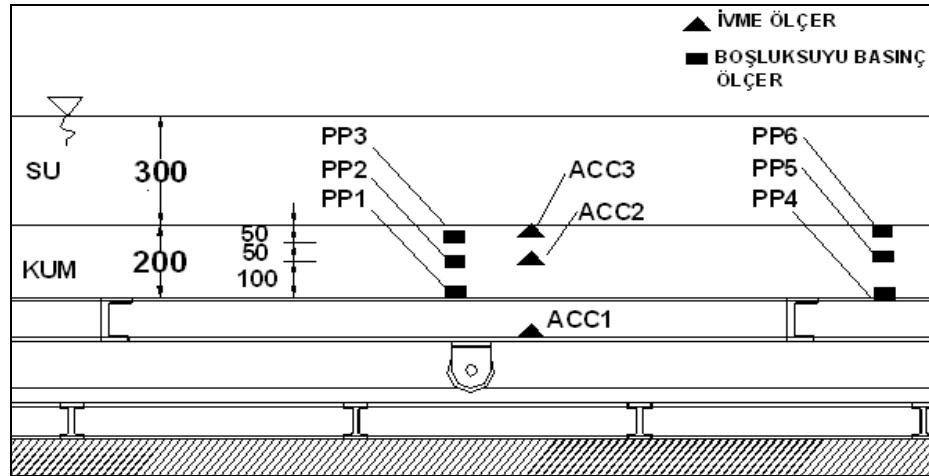
İkinci aşama deneylerde ise 40cm kalınlığında %40 rölatif sıklıkta suya yağmurlama yöntemiyle bir kum tabakası hazırlanmış, daha sonra bu kum tabaka üzerinde ½ kenar şev eğimine sahip 40cm yüksekliğinde dalgakıran kesiti oluşturulmuştur. Model deney kesiti oluşturulurken ölçek etkisi dikkate alınarak hazırlanmıştır. Dalgakıran kesitinde kullanılan malzemeler ve kesit boyutları 1/50 ölçekte seçilmiştir. Ancak deneyde uygulanan tekrarlı hareketin süresinde ölçek etkisi dikkate alınmamıştır. Kum tabaka tabanında değişik şiddette çevrimli yatay yer değiştirmeler uygulanırken, oluşan boşluksuyu basınçları dalgakıran altında temel zemininde, ortası ve yüzeye yakın bir noktada, ayrıca dalgakıran topuğu altında tabanda ve orta nokta ve açık alanda tabaka ortasında, ivme ölçümleri ise kesit tabanında, tabaka yüzeyi ile, dalgakıran şevi ve kretinde kaydedilmiştir. Model deneyler, sıvılaşabilen zeminler üzerinde yeralan dalgakıranların davranışına ışık tutabilmek amacı ile gerçekleştirilmiş olup, arazi zemin ve yükleme koşulları ile farklılıklar gözönüne alınarak elde edilen sonuçların tasarım aşamasında kullanılabilmesi için arazi gözlemleri ve sayısal analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğine inanılmaktadır.

## 5.2 Birinci Aşama Deneyleer

Birinci aşama model deneyleer 20cm kalınlığında %40 rölative sıklıkta 30cm yüksekliğindeki su içine yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış bir kum tabakası üzerinde yapılmıştır. Sisteme tabanında uygulanan tekrarlı yatay yerdeğıştirme hareketinin yolaçtığı ivme değerlerini ölçmek için kesit tabanına, kesit ortasına ve kesit yüzeyine ivme ölçerler yerleştirilmiştir(Şekil 5.1). Boşluksuyu basınç artışlarını ölçmek için ise kesit tabanına(H), kesit ortasına ( H/2) ve kesitin üstten 5 cm 'sine (H/4) olmak üzere üç farklı noktaya boşluksuyu ölçerler yerleştirilerek tekrarlı hareket nedeniyle oluşan boşluksuyu basınçları kayıtları alınmıştır. Ayrıca, kum tabakası içerisinde aynı derinliklerde olmak üzere farklı bir kesitte üç boşluksuyu ölçer daha yerleştirilerek diğer ölçerlerle karşılaştırılması yapılmıştır. İvme ölçerler(ACC) ve boşluksuyu basıncı ölçerlerin(PP) konumları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Üç farklı taban hareketi uygulanarak model deneyleer yapılmıştır. Uygulanan çevrimsel taban hareketleri 3mm genişliğinde ve 20 saniye süresince verilmiştir. Çevrimli hareketin öncesinde 5-6 s durağan durumda kayıt alınarak kayıt sisteminin kontrol edilmiş, 20 s uygulanan hareket sonrasında da sönümlenmenin gözlemlenmesi için kayıt alınmaya devam edilmiştir.

Dalgakırana temel zemini oluşturacak kum tabakası tabanında 5 Hz frekansında (DeneyA1), 4 Hz frekansında(DeneyA2)ve 3 Hz frekansında(DeneyA3) olmak üzere üç farklı dinamik hareket uygulanarak oluşan ivme ve boşluksuyu basınçları ölçülmüştür.



Şekil 5.1 Sensör yerleşimi

### 5.2.1 Denev sonuçları

5 Hz, 4 Hz ve 3 Hz olmak üzere üç farklı frekansta 20 sn süresince dinamik hareket uygulanarak model denev sisteminde ivme kayıtları ve boşluksuyu basınçları ölçülmüştür. Çevrimsel taban yatay yer değiştirme hareketi sonucunda kesit tabanında ivme değerleri sırasıyla 0.45g, 0.23g ve 0.09g olan, dinamik hareket uygulandığı ölçülmüştür(Şekil 5.2,Şekil 5.6,Şekil 5.10).

Denev A1 'de kesit tabanında 0.45g lik tekrarlı hareket uygulanmış, kesit ortasında ve yüzeyinde ise 0.40g seviyesinde maksimum ivme ölçülmüştür. Denev A2'de 0.23g maksimum ivmeli tekrarlı hareket tabanda uygulanmış, kesit ortasında 0.22g ölçülmüş, yüzeyde yeralan sensörün su altındaki ince kum tabakasında oluşan sıvılaşma nedeniyle denev sırasında yön değiştirmesine bağlı olarak tutarsız ölçümler elde edildiği düşünölmektedir. DenevA3'te kesit tabanında en büyük ivme değeri 0.09g olan çevrimli hareket ölçülmüş, kesit ortasında ise taban ivme kaydına uygun olmayan kayıtlar elde edilmiş, kesit yüzeyinde ise 0.08g maksimum ivme ölçülmüştür.

Boşluksuyu basınç ölçümleri için ise herbiri üç boşluk suyu basınç ölçerden oluşan, aynı kotlara yerleştirilen iki ayrı sensör seti kullanılarak sensörlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. İki farklı kesitte aynı derinliklerde yerleştirilen boşluksuyu basınç ölçerlerden bir set ölçer (PP1, PP2, PP3) model denev sistemin orta kesitinde, ikinci set ölçerler(PP4, PP5, PP6) ise 1 m uzağında aynı derinliklere yerleştirilmiştir.

Bu çalışmada, boşluk suyu basıncı oranı ( $r_u$ ) çevrimli yükler etkisi altında oluşan artık boşluk suyu basıncı değerlerinin statik durumdaki(başlangıç) efektif gerilme değerlerine oranı olarak tanımlanmıştır. Çevrimli yükler etkisinde ortaya çıkan  $r_u = 1.0$  durumu, efektif gerilmelerin sıfır değerini almasına karşılık gelmekte olup sıvılaşma kriteri olarak kabul edilmiştir. Model denevlerde ölçölen artık boşluk suyu basıncı değerleri kullanılarak hesaplanan  $r_u$  değerleri, ölçüm noktasındaki başlangıç efektif gerilme değerlerine doğrudan bağımlı olup ince bir tabakadan oluşan kum temel zemini için hata payı içerebileceği kabul edilmelidir. Özellikle tabaka yüzeyine çok yakın yerleştirilen sensörlerde, dinamik yükleme etkisinde sensörün yer değiştirmesi ve/veya çevresinde zeminin sıklık derecesinin değişmesi olası hata payını artırmaktadır. Bu nedenle, ölçölen artık boşluk suyu basıncı değerlerinden hesaplanan  $r_u >$



1.0 değerlerinin fiziksel anlamı bulunmadığı ve dikkate alınmaması gerektiği düşünölmektedir.

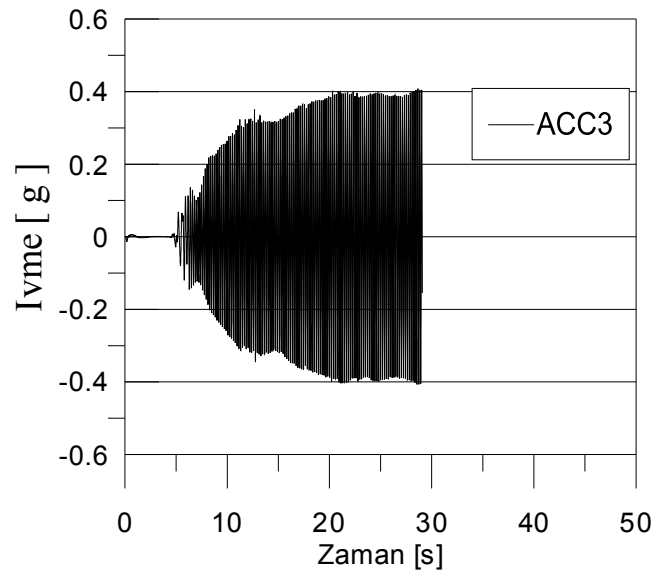
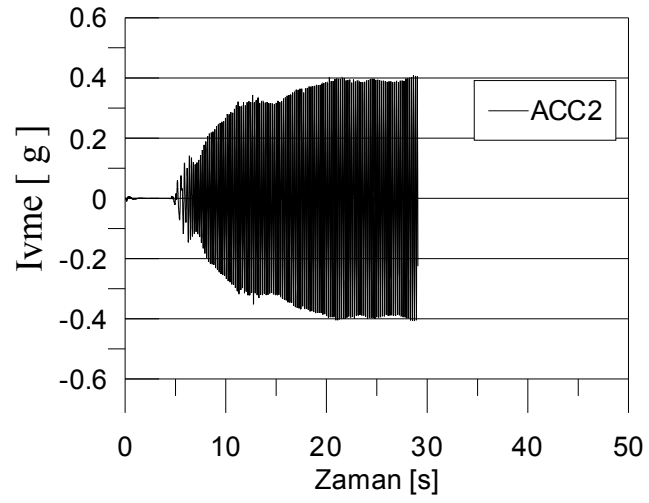
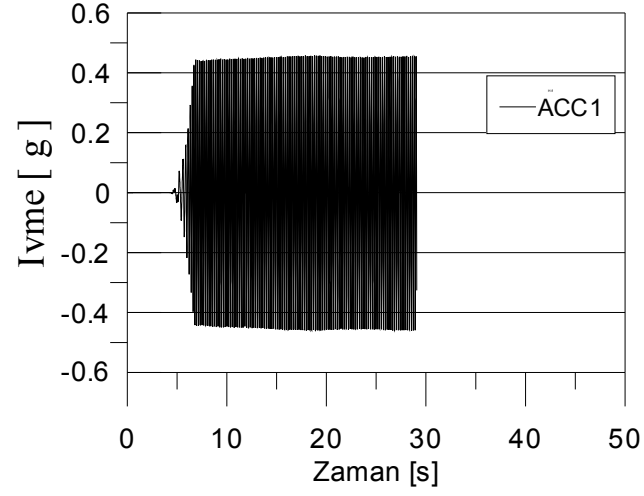
Deney A1'de uygulanan taban hareketi etkisinde ölçölen maksimum artık boşluksuyu basınçları yüzeyde 0.40-0.50 kPa, tabaka ortasında 0.80 – 1.0 kPa, kesit tabanında ise 1.20 - 1.50 kPa ölçölmüştür(Şekil 5.3).

Boşluk suyu basıncı oranı  $r_u$  değerlerine bakıldığında ise ilk saniyelerde 0.60 ve 0.80 değerlerine yükselip zamanla azaldığı, tabaka ortasında maksimum 0.90-1.10 seviyesine, yüzeyde ise 1.0 değerine ulaştığı görölmektedir (Şekil 5.4,Şekil 5.5.).

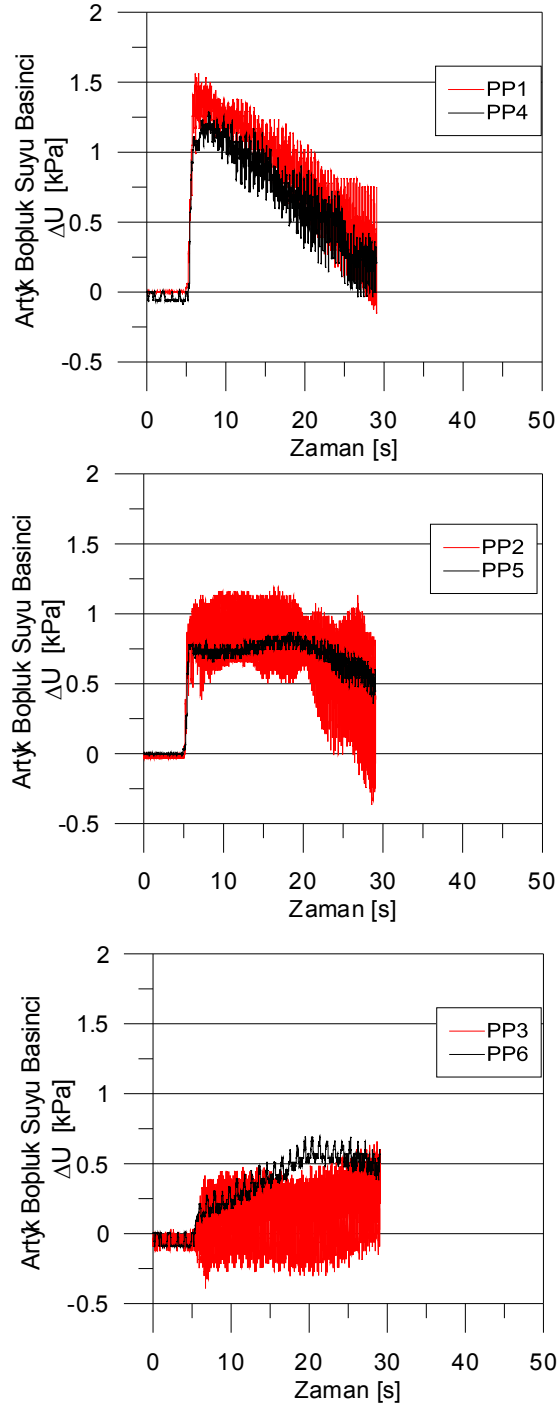
Deney A2'de, kesit tabanında uygulanan 0.23g seviyelerinde ivme değerine sahip dinamik hareketin etkisinde oluşun maksimum boşluksuyu basınçları yüzeyde 0.50 kPa, tabaka ortasında 1.20 kPa, tabanda ise 1.50 kPa olarak ölçölmüştür(Şekil 5.7). Boşluk suyu basıncı  $r_u$  değerleri ise yüzeyde 0.80 değerine, tabaka ortasında ve tabanda ise 1.10 değerine ilk saniyelerde ulaşmıştır(Şekil 5.8, Şekil 5.9). Aynı seviyede yerleştirilmeye çalışılan sensörlerin farklı sonuç vermesinin yerleşim sırasında oluşun seviye farklılığından kaynaklandığı düşünölmektedir.

Deney A3'te, tabanda uygulanan 0.09g ivme değerine sahip dinamik hareket nedeniyle oluşun maksimum boşluk suyu basınçları, kesitte tabanında 1.60-1.80 kPa, tabaka ortasında 1.20 – 0.60 kPa, yüzeyde ise 0.25-0.55 kPa olarak ölçölmüştür(Şekil 5.11). Maksimum  $r_u$  değerleri ise tabanda 0.85, tabaka ortasında 1.30 ve yüzeyde ise 1.10 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.12,Şekil 5.13).

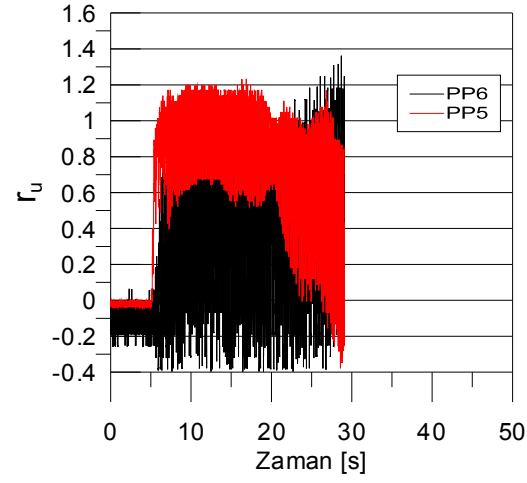
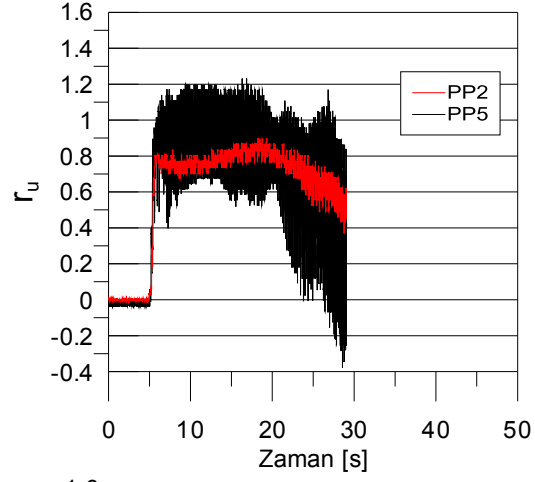
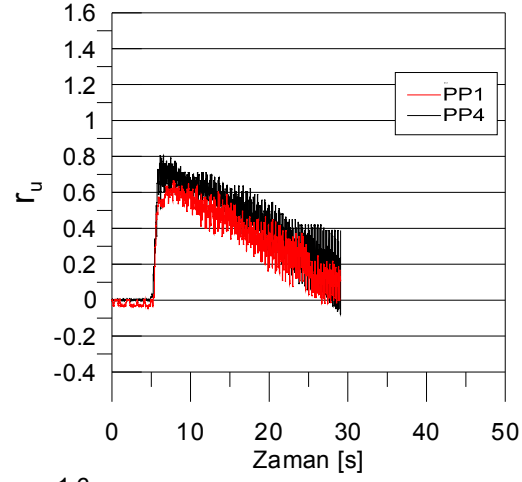
Model deney sistemine uygulanan çevrimli taban yer hareketin ivme değeri arttıkça kum tabakasında oluşun boşluksuyu basıncı oranı ( $r_u$ ) değerinin ilk çevrimlerden itibaren arttığı, yüzeyde hesaplanan  $r_u$  değerinin tabandaki  $r_u$  değerlerine göre daha büyük olduğu görölmektedir. Yüzeyden 5 cm aşağıda ölçölen artık boşluksuyu basınçları tabanda ölçölen boşluksuyu basınçlarına göre daha az olurken, yüzeye yakın noktada yeralan sensör seviyesinde düşey efektif gerilme çok düşük olduğundan hesaplanan  $r_u$  değerleri daha yüksek çıkmaktadır.



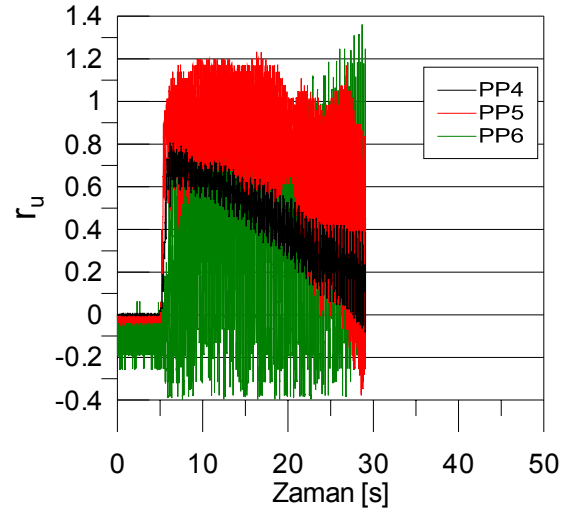
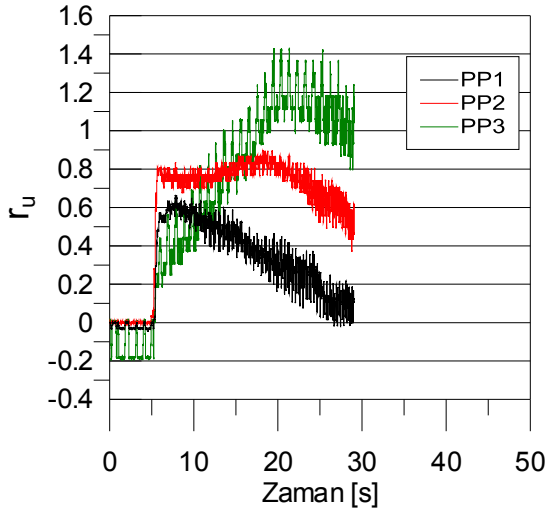
Şekil 5.2 Kum tabakasında ölçülen ivme değerleri (deney A1)



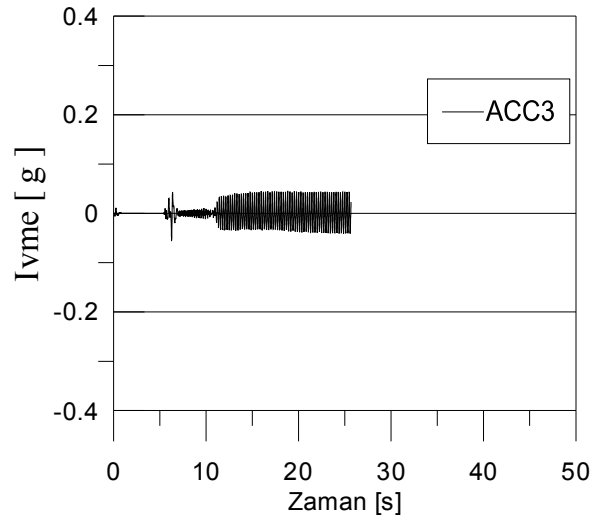
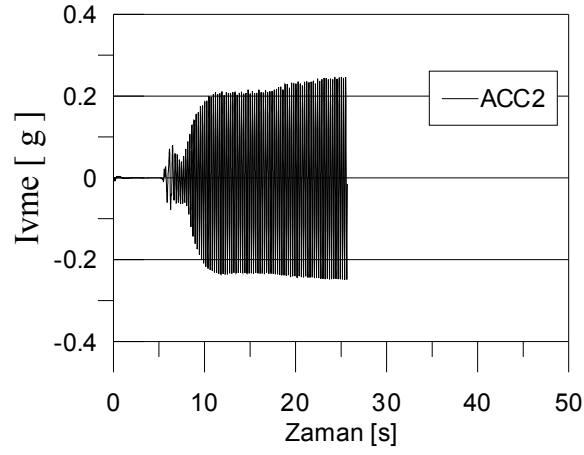
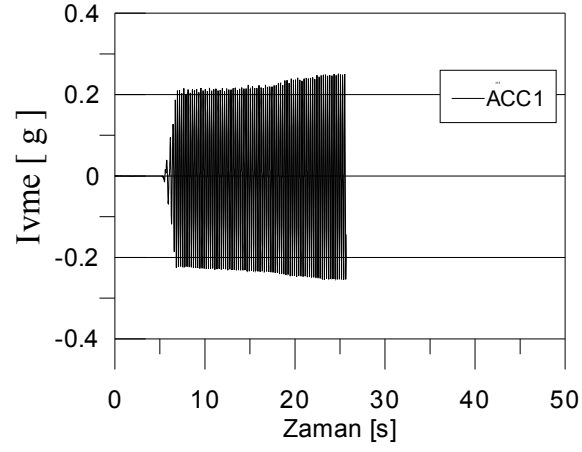
Şekil 5.3 Kum tabakasında ölçülen artık boşluksuyu basınçları (deney A1)



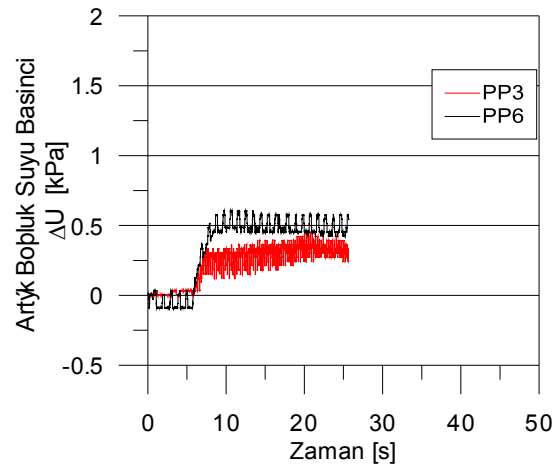
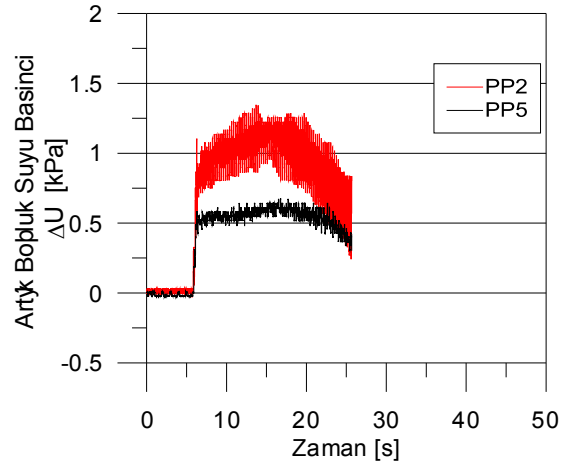
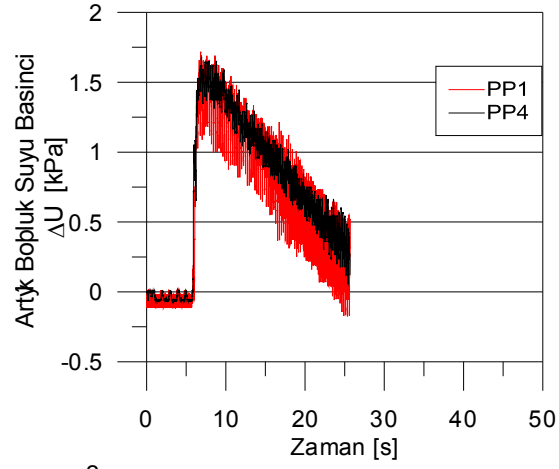
Şekil 5.4  $r_u$ -zaman davranışı (deney A1)



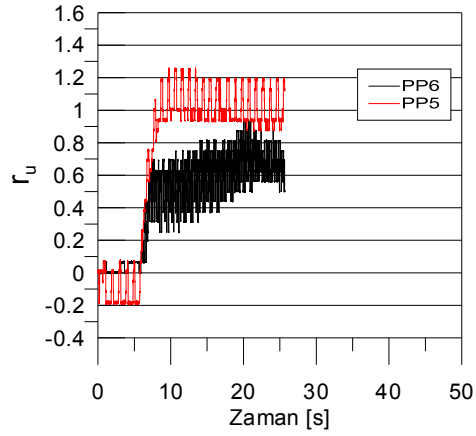
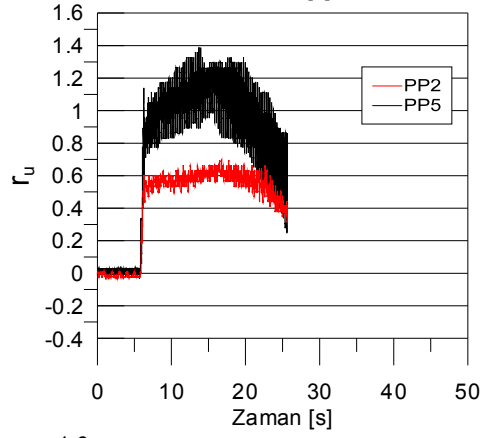
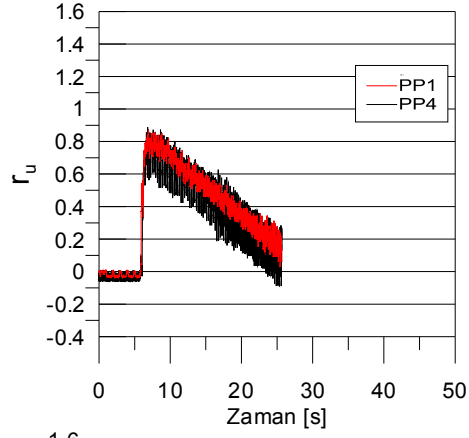
Şekil 5.5  $r_u$  – zaman davranışı (deney A1)



Şekil 5.6 Kum tabakasında ölçülen ivme değerleri (deney A2)

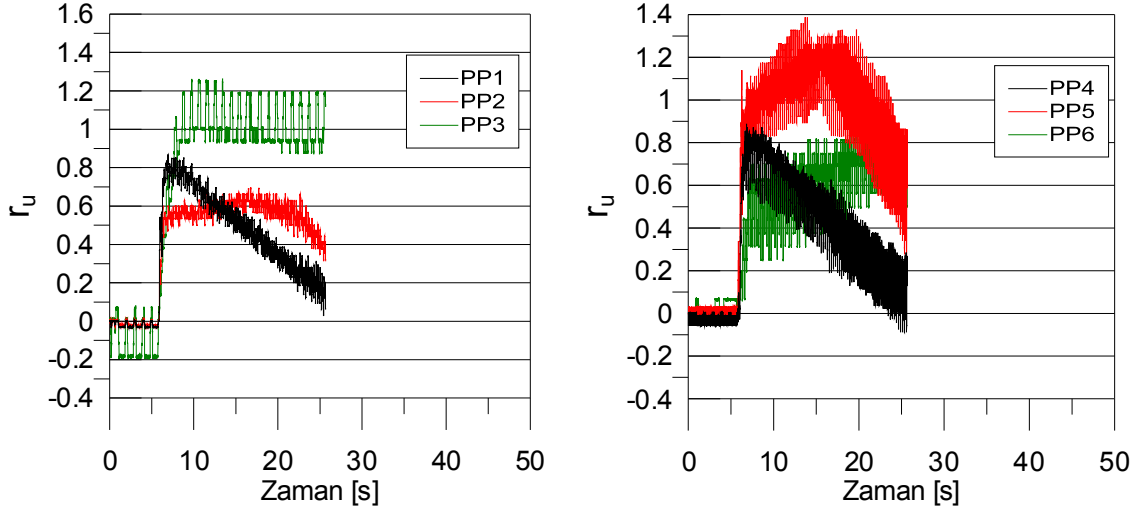


Şekil 5.7 Kum tabakasında ölçülen artık boşluksuyu basınçları (deney A2)

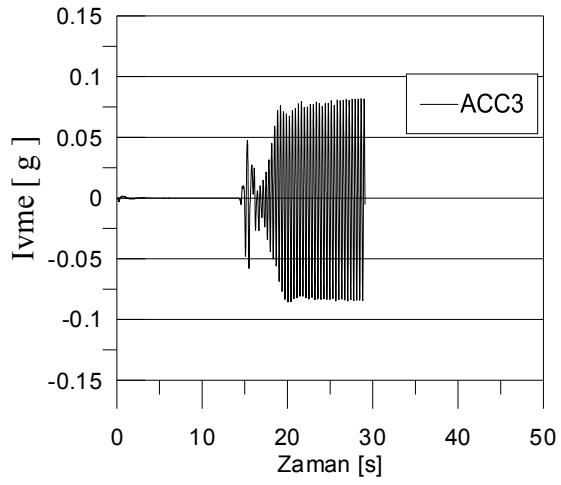
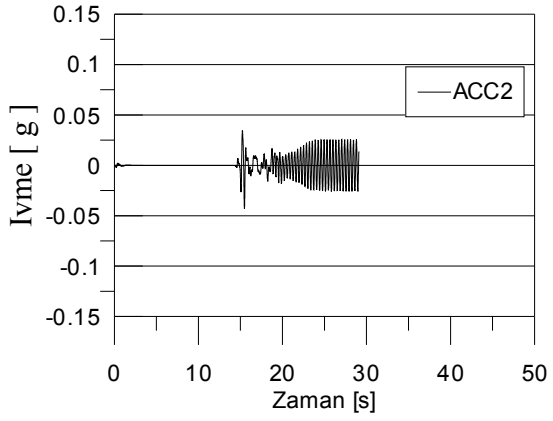
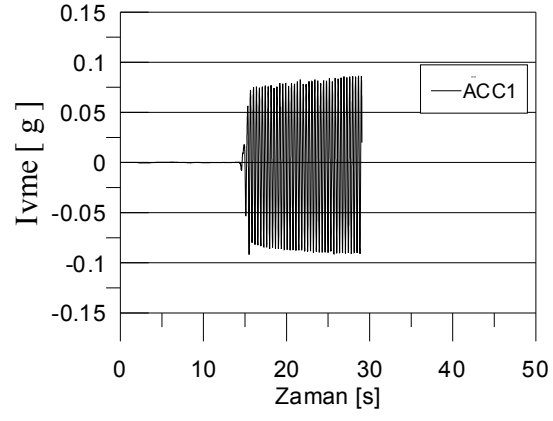


Şekil 5.8  $r_u$ -zaman davranışı ( deney A2)

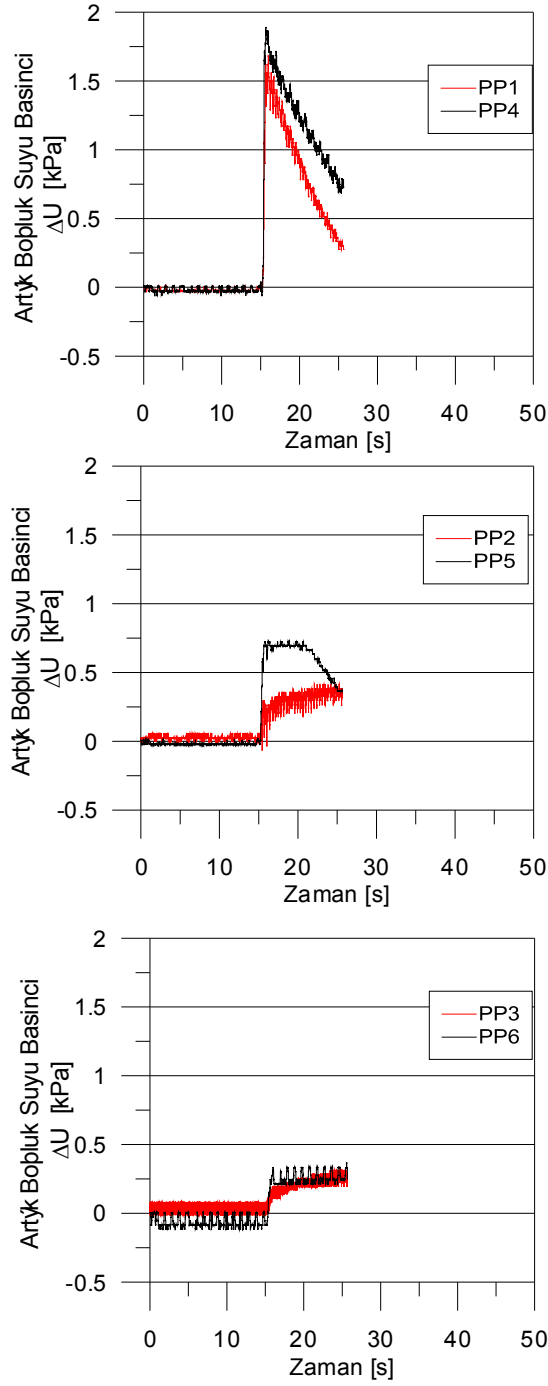




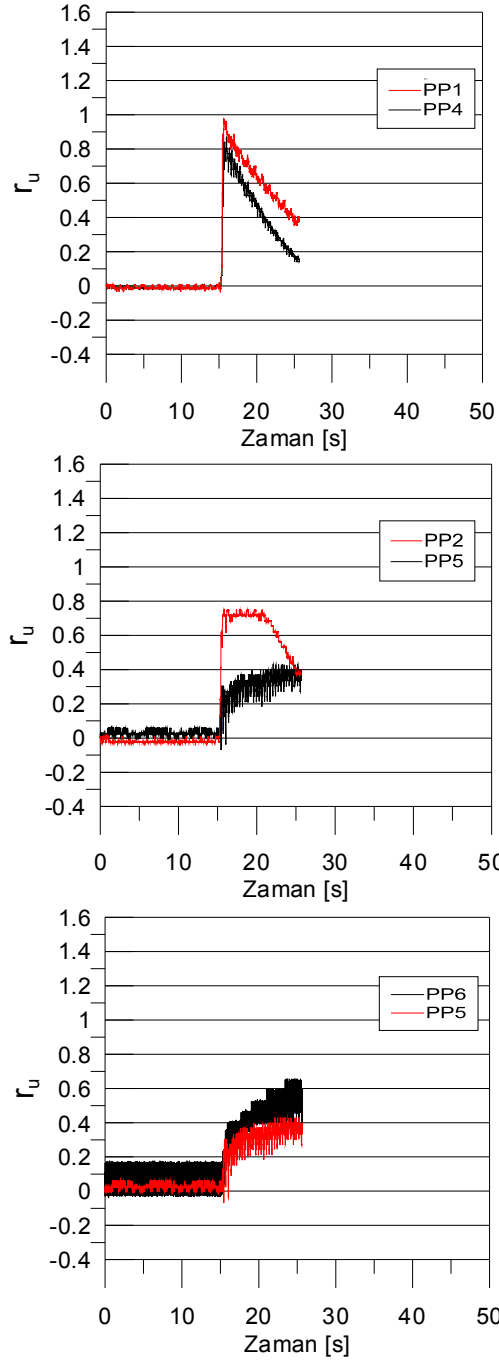
Şekil 5.9  $r_u$  – zaman davranışı (deney A2)



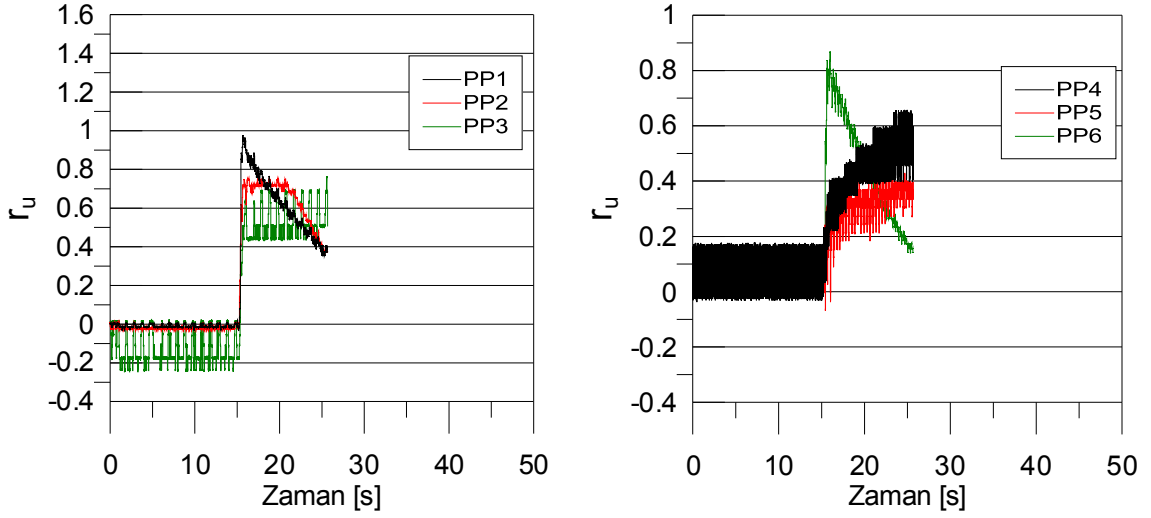
Şekil 5.10 Kum tabakasında ölçülen ivme değerleri (deney A3)



Şekil 5.11 Kum tabakasında ölçülen boşluksuyu basınç değerleri (deney A3)



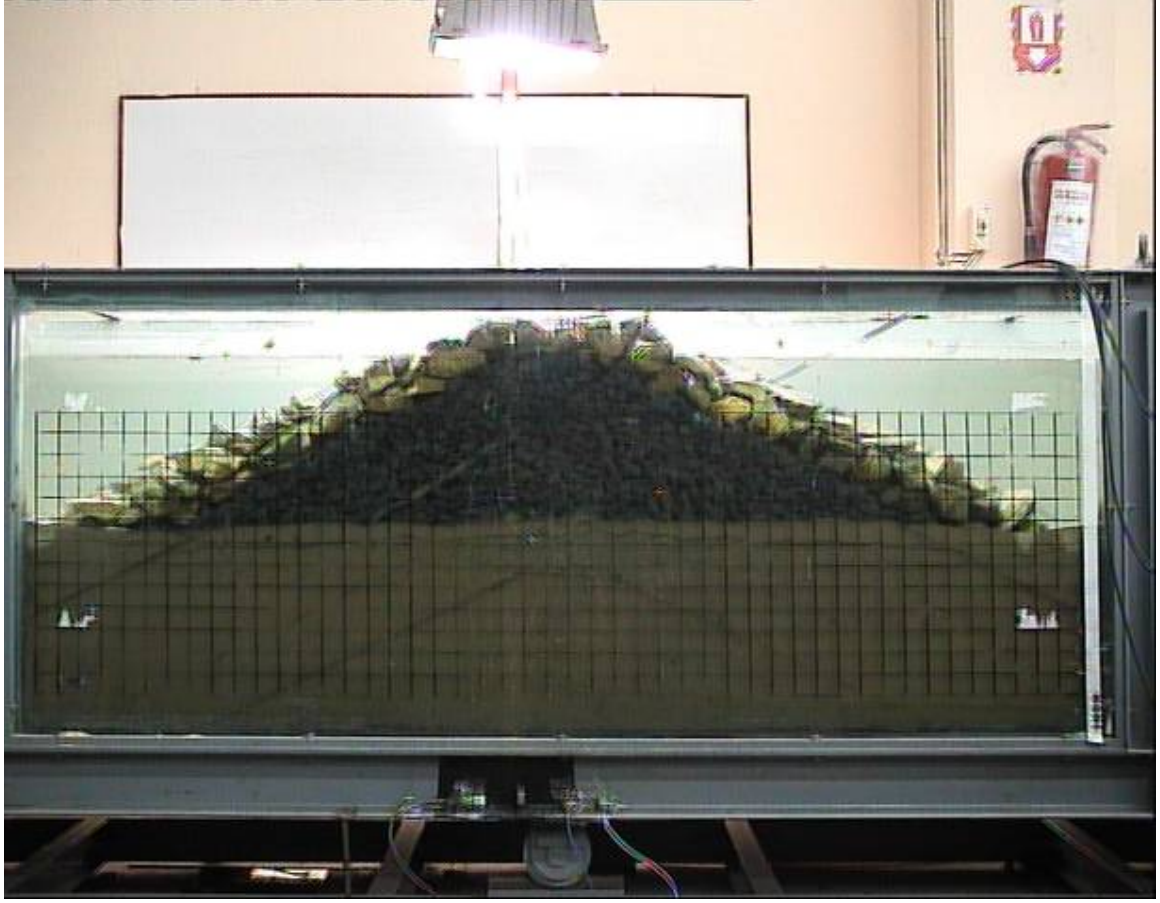
Şekil 5.12  $r_u$ - zaman davranışı (deney A3)



Şekil 5.13  $r_u$  – zaman davranışı (deney A3)

### 5.3 İkinci Aşama Deneyler

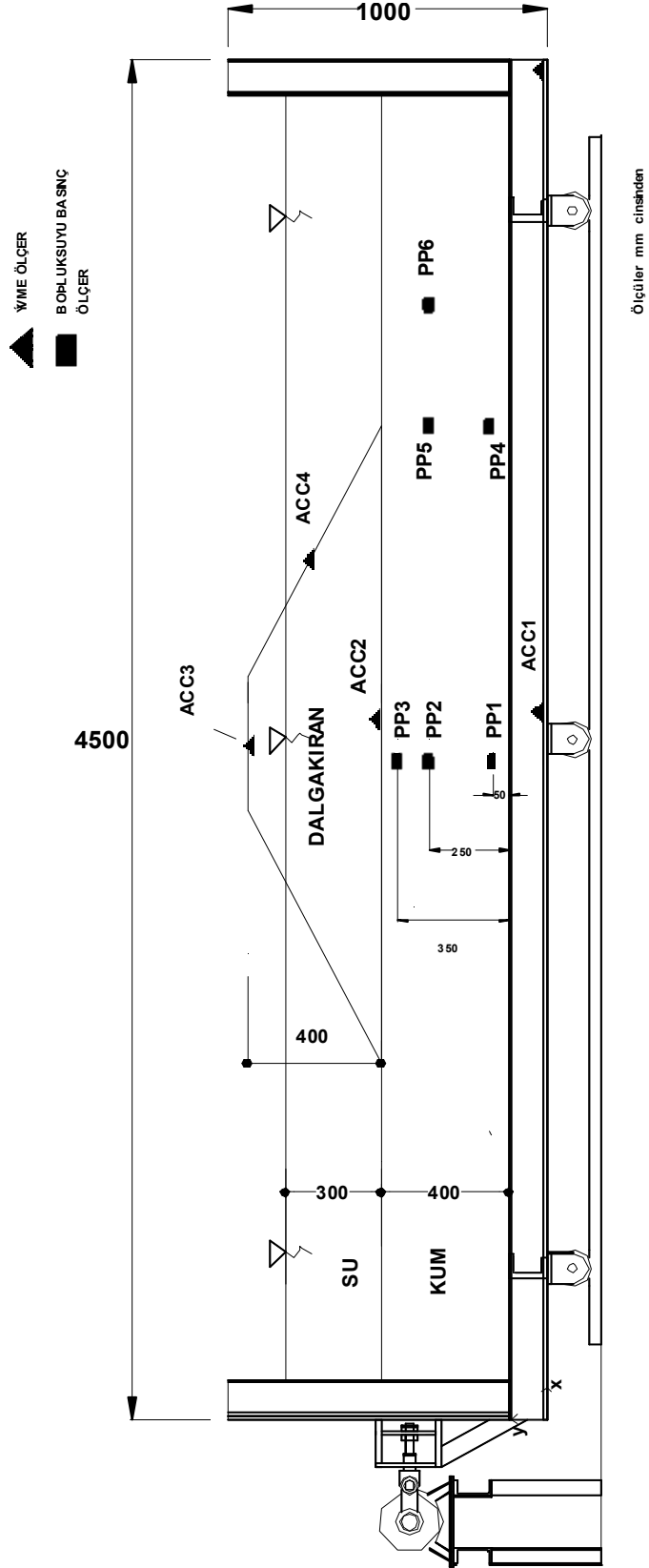
İkinci aşama deneylerde 40cm kalınlığındaki kum zemin tabakası üzerinde 40cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesiti oluşturularak, temel tabakası tabanında farklı ivme değerlerinde sinuzoidal dinamik yükleme yapılan model deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminde 30cm su yüksekliği içerisine, 20cm yukseklikten yağmurlama tekniğiyle kum boşaltılarak,  $D_r=40\%$  sıklıkta, 40cm kalınlığında, 400cm genişliğinde ve 100cm derinliğinde bir kum tabakası oluşturulmuştur. Bunun üzerine 40cm yüksekliğinde 1:2 kenar şev eğimine sahip bir dalgakıran kesiti de yağmurlama tekniği ile yerleştirilmiştir. Dalgakıran kesiti, 30 cm yüksekliğindeki çekirdek ve 10cm kalınlığındaki anroşman malzemesinden oluşmaktadır. Su yüksekliği ise dalgakıran tabanından 30cm yukarıdadır (Şekil 5.14). Görüntü almada kolaylık sağlamak için tank üzeri karelaja bölünmüş ve halojen bir lamba yardımıyla sisteme yukarıdan aydınlatma sağlanmıştır.



Şekil 5.14 Sıvılaşılabilen tabaka ve dalgakıran kesiti

Model deney sistemi tabanında uygulanan çevrimli yatay yer değiştirme hareketi ve kesit içerinde oluşan ivme değerleri, deney sistemi tabanı ile kum tabaka yüzeyi, dalgakıran şev yüzeyi ve kretine yerleştiren ivme ölçerler yardımıyla ölçülmüştür(Şekil 5.15).

Çevrimsel taban hareketi etkisinde oluşacak ivme ve artık boşluk suyu basınçları ölçümlerini almak için kullanılan sensörler Çizelge 5.1’de verildiği gibi isimlendirilmiş ve yerleştirilmiştir.



Œekil 5.15 Model deney sistemi ve öliçim noktaları

Çizelge 5.1 Ölçüm cihazları isim ve yerleri

İSİM	YERİ	CİHAZ	X (m)	Y (m)
PP1	Dalgakıran merkezi altı, sıvılaşılabilen kesit tabanında	Boşluk suyu Basınç ölçer	0.00	0.05
PP2	tabaka ortasında,	Boşluk suyu Basınç ölçer	0.00	0.25
PP3	tabaka yüzeyine yakın noktada,	Boşluk suyu Basınç ölçer	0.00	0.35
PP4	topuk altında kesit tabanında,	Boşluk suyu Basınç ölçer	0.90	0.05
PP5	topuk altında kesit ortasında,	Boşluk suyu Basınç ölçer	0.90	0.25
PP6	açılıhta kum tabaka ortasında	Boşluk suyu Basınç ölçer	1.20	0.25
ACC1	Kesit tabanında	Akselometre	0.00	0.00
ACC2	Dalgakıran tabanında	Akselometre	0.00	0.40
ACC3	Dalgakıran kretinde	Akselometre	0.00	0.80
ACC4	Dalgakıran şev yüzeyinde	Akselometre	0.50	0.60

Dalgakıran ve kum temel zemininin çevrimsel yükleme altındaki davranışını incelemek için 6 farklı model üzerinde 18 adet deney yapılmıştır(Çizelge 5.2)

Model deneyler aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmiştir:

- Model 1: 40cm kalınlığında kum temel zemini üzerinde oluşturulan 40cm yüksekliğinde dalgakıran modeli üzerine 3 defa tekrarlı yükleme uygulandı.
- Model 2: 40cm kalınlığında kum temel zemini dinamik uygulamaya maruz bırakıldıktan sonra üzerinde oluşturulan 40cm yüksekliğinde dalga kıran modeli üzerine 4 defa tekrarlı yükleme uygulandı.



- Model 3: 40cm kalınlığında kum temel üzerinde oluşturulan 40cm yüksekliğinde dalgakıran modeli üzerine 3 defa tekrarlı yükleme uygulandı.
- Model 4: 40cm kalınlığında kum temel üzerinde oluşturulan 40cm yüksekliğinde dalgakıran modeli üzerine 1 defa tekrarlı yükleme uygulandı.
- Model 5: 40cm kalınlığında kum temel üzerinde oluşturulan 40cm yüksekliğinde dalgakıran modeli üzerine 2 defa tekrarlı yükleme uygulandı.
- Model 6: 40cm kalınlığında ve içerisine 45cm aralıklarla PVD (düşey prefabrik dren) yerleştirilen kum temel üzerinde oluşturulan 40cm yüksekliğinde dalgakıran modeli üzerine 4 defa tekrarlı yükleme uygulandı.

Model deneylere ait detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir:

Deney 1a) 40cm kalınlığında sıvılaşabilen bir kum tabakası üzerine yerleştirilen 40cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesitinin davranışının incelenmesi,

1b) Deformasyona uğrayan dalgakıran kesiti onarıldıktan sonra (ekstra malzeme ve yağmurlama tekniği ile yeniden dalgakıran kesitinin oluşturulması) tekrar çevrimsel yüklemeye maruz bırakılması,

1c) Daha önce dinamik yüklemeye maruz kalmış bir dalgakıran kesitinin daha şiddetli bir dinamik yüklemeye maruz kalması durumundaki bir sistemin davranışını gözlemlemek için, tekrar çevrimli yüklemeye maruz bırakılması,

Deney 2a)Üzerine dalgakıran yerleştirilmeden kum temel zemini tabakasının çevrimsel yüklemeye maruz bırakılması

2b) Sıvılaşmış zemin üzerine yerleştirilen dalgakıran kesitinin çevrimli yükleme altındaki davranışının incelenmesi

2c) Dalgakıran kesitinin onarılmadan daha şiddetli bir çevrimsel yüklemeye maruz kalması durumundaki davranışının incelenmesi

2d)Deforme olmuş kesitin onarılarak tekrar çevrimsel yüklemeye maruz bırakılması

2e) Deforme olmuş kesite tekrar daha şiddetli bir çevrimsel yükleme uygulanması

Deney 3a)Sıvılaşabilir bir kum tabakası üzerinde oluşturulan dalgakıran kesitinin şiddetli bir sarsıntı etkisinde davranışının incelenmesi

3b)Deforme olmuş kesitin onarılarak tekrar çevrimsel yüklemeye maruz bırakılması

3c) Deforme olmuş kesite tekrar çevrimsel gerilme uygulanması

Deney4) 40cm kalınlığında sıvılaşabilen bir kum tabakası üzerine yerleştirilen 40cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesitinin düşük şiddette bir sarsıntı altındaki davranışının incelenmesi

Deney5a)Dalgakıran kesitinin biraz daha şiddetli bir çevrimsel yükleme altındaki davranışının incelenmesi

5b) Deforme olmuş kesitin onarılarak tekrar çevrimsel yüklemeye maruz bırakılması

Deney 6a) 40cm kalınlığında sıvılaşabilen bir kum tabakası içerisine sıvılaşmayı geciktirecek/önleyecek önlem olarak prefabrik düşey drenlerin (PVD) belirli aralıklarla yerleştirilmesi ve üzerine yerleştirilen 40cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesitinin tekrarlı gerilme altında davranışının incelenmesi

6b)Deforme olan kesitin onarılarak çevrimli yüklemeye maruz bırakılması

6c) Deforme olmuş kesitin tekrar çevrimli yüklemeye maruz bırakılması

6d) Deforme olmuş kesitin daha şiddetli bir çevrimsel yüklemeye maruz bırakılması

Çizelge 5.2 Model deneyler

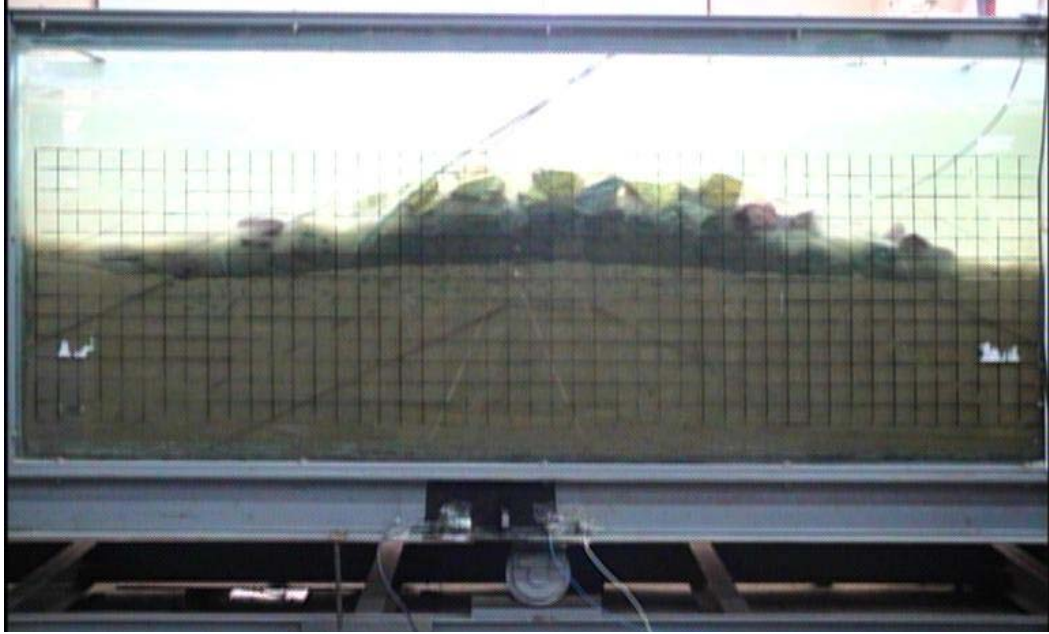
Model No	Deney No	Kum h(cm)	Dalgakıran Yüks. D(cm)	Dalgakıran Kesiti	Yükleme Tarihiçesi	a(g)
1	(1a)	40	40	Orijinal kesit	İlk yükleme	0.17g
	(1b)	40	40	Onarılmış kesit	İkinci yükleme	0.22g
	(1c)	40	40	Deforme kesit	Üçüncü yükleme	0.27g
2	(2a)	40	-	-	İlk yükleme	0.21g
	(2b)	36	40	Sıvılaşmış temel üzerinde orijinal kesit	Temel ikinci yükleme Dalgakıran ilk yükleme	0.22g
	(2c)	36	40	Deforme kesit	İkinci yükleme	0.31g
	(2d)	36	40	Onarılmış kesit	Üçüncü yükleme	0.25g
	(2e)	36	40	Deforme kesit	Dördüncü yükleme	0.33g
3	(3a)	40	40	Orijinal kesit	İlk yükleme	0.40g
	(3b)	40	40	Onarılmış kesit	İkinci yükleme	0.29g
	(3c)	40	40	Deforme kesit	Üçüncü yükleme	0.30g
4	(4)	40	40	Orijinal kesit	İlk yükleme	0.11g
5	(5a)	40	40	Orijinal kesit	İlk yükleme	0.17g
	(5b)	40	40	Onarılmış kesit	İkinci yükleme	0.27g
6	(6a)	40(pvd'li)	40	Orijinal kesit	İlk yükleme	0.15g
	(6b)	40(pvd'li)	40	Onarılmış kesit	İkinci yükleme	0.25g
	(6c)	40(pvd'li)	40	Deforme kesit	Üçüncü yükleme	0.19g
	(6d)	40(pvd'li)	40	Deforme kesit	Dördüncü yükleme	0.34g

## 5.4 Model Deneyleerde Gözlemlenen Dinamik Davranış

Deney sonuçları iki kısımda incelenecektir. Birinci kısımda ivme ve boşluksuyu basınçları, ikinci kısımda ise dalgakıran kesitinde gözlenen yerdeğişirmeler incelenecektir.

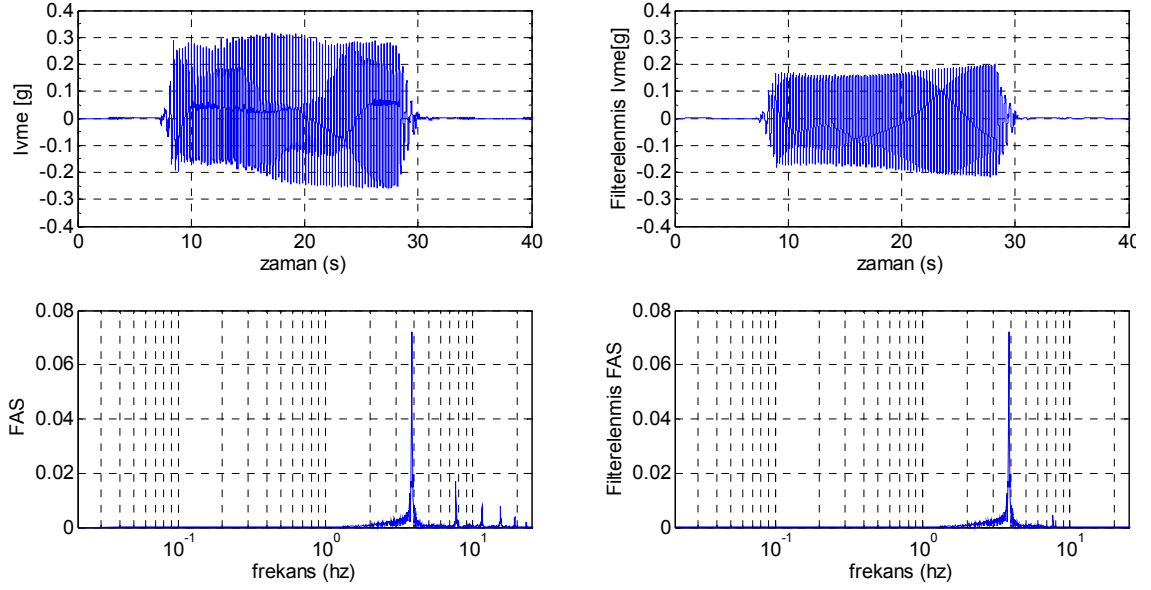
### 5.4.1 İvmeler ve Boşluk Suyu Basıncı Artışları

**Deney 1a:** 3mm genişliğinde 4 Hz frekansında (0.17 g ivme değerine sahip) çevrimli taban yer değiştirme hareketine maruz bırakılan sıvılaşıbilen tabaka üzerinde yerleştirilmiş dalgakıran modelinde, 20 sn sonunda krette 25cm mertebesinde düşey oturma, topuk bölgesinde ise sıvılaşıan zemin içerisine batma ve 25cm mertebesinde yatay ötelenme gözlemlenmiştir(Şekil 5.16).



Şekil 5.16 Deney sonunda sıvılaşıan tabaka üzerinde deforme olmuş dalgakıran modeli

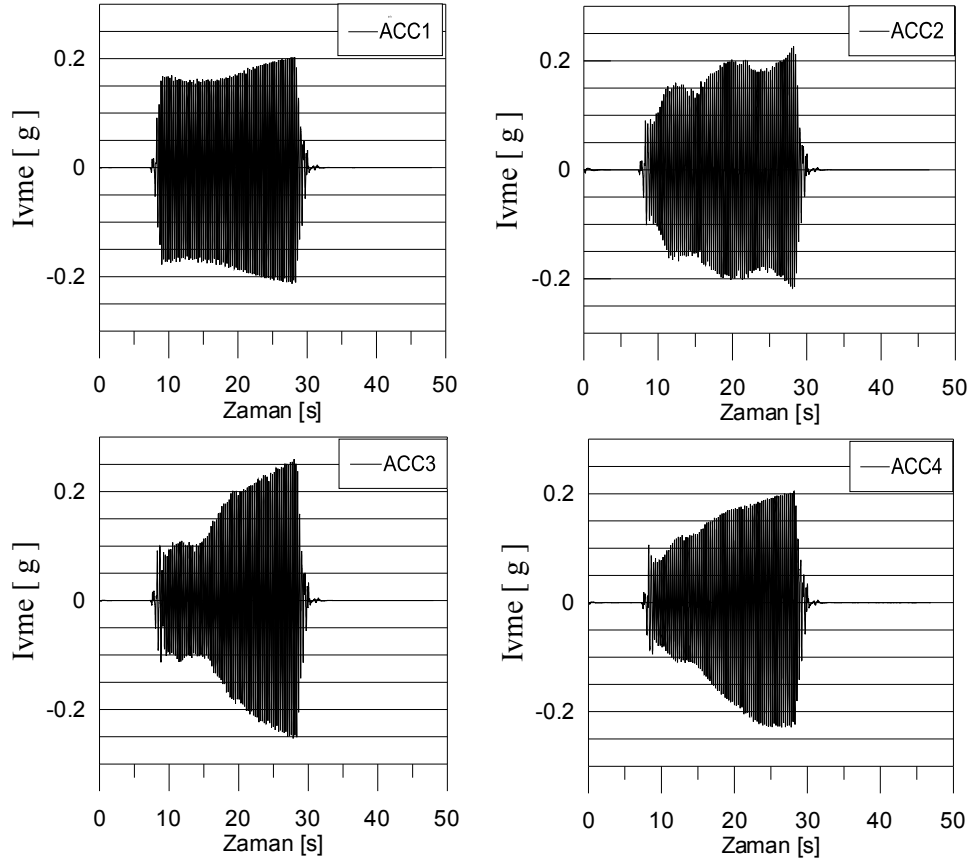
Modelde dalgakıran merkezi altında tabanda, dalgakıran kretinde ve şev yüzeyinde ölçülen ham ivme kayıtlarına, Butterworth filitreleme tekniği uygulanarak, hareketin hakim frekansı dışında kalan frekans bandındaki gürültü içeriği temizlenmiştir(Şekil 5.17). Ham kaydın frekans içeriği Fourier Genlik Spektrumu (FAS) ile filitreleme işleminden sonra elde edilen kaydın Fourier Genlik Spektrumu karşılaştırılarak frekans bandı kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 5.17 Filtrelenmiş ivme kaydı ve frekans içeriği örneği

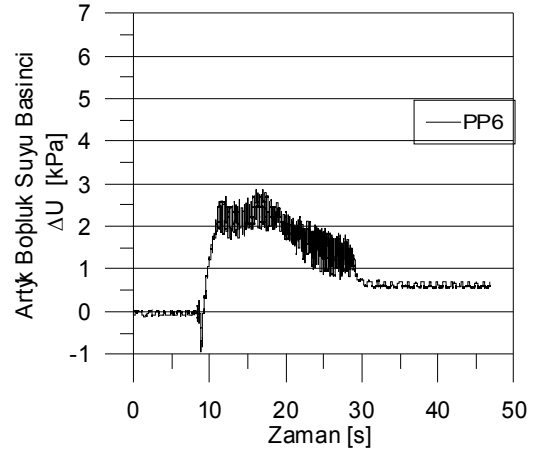
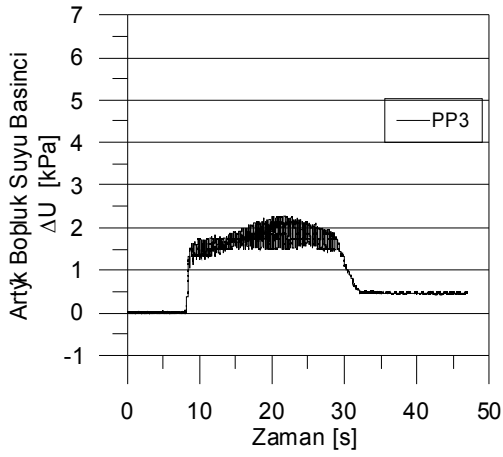
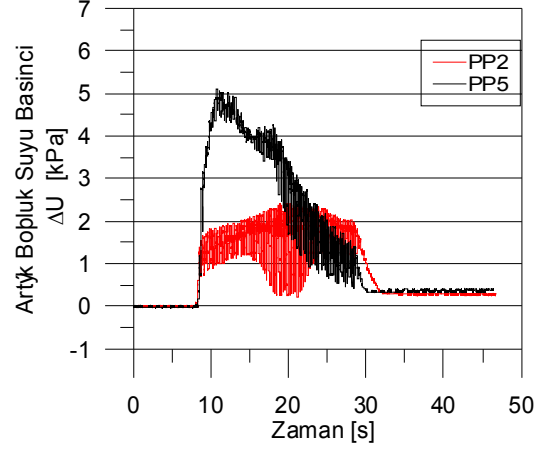
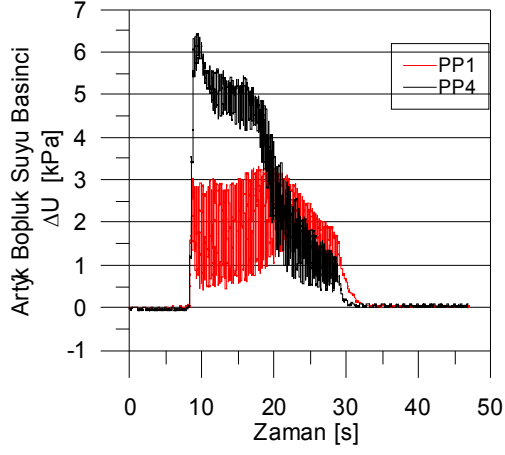
İvme kayıtları incelendiğinde (Şekil 5.18), deney düzeneğinde uygulanan taban hareketinin maksimum ivme değerinin (0.17g) sarsıntı sonunda 0.20g büyüklüğüne ulaştığı görülmektedir. Dalgakıran tabanında en büyük ivme 0.15-0.20g aralığında ölçülmüştür. Dalgakıran kretinde elde edilen ölçümlere bakıldığında ivme şiddetinin başlangıçta 0.10g seviyesinden artarak sarsıntı sonunda 0.25g seviyesine ulaştığı, dalgakıran şevinde ise sarsıntı sonunda 0.20g seviyelerine geldiği görülmektedir.

Dalgakıran altındaki temel zeminine yerleştirilen BSB ölçerler ile kaydedilen artık boşluksuyu basıncı –zaman grafikleri Şekil 5.19’ da verilmiştir. Dalgakıran orta kesiti altında kum tabaka içinde tabanda, tabaka ortasında ve tabaka yüzeyinde ölçülen maksimum artık boşluksuyu basıncı değerleri sırasıyla 3.0 kPa, 2.20 kPa ve 1.80 kPa olmuştur. Boşluksuyu basıncı değerleri ise topuk altında 6.0kPa ve 5.0kPa, açıklıkta ise 3.0 kPa olarak ölçülmüştür.

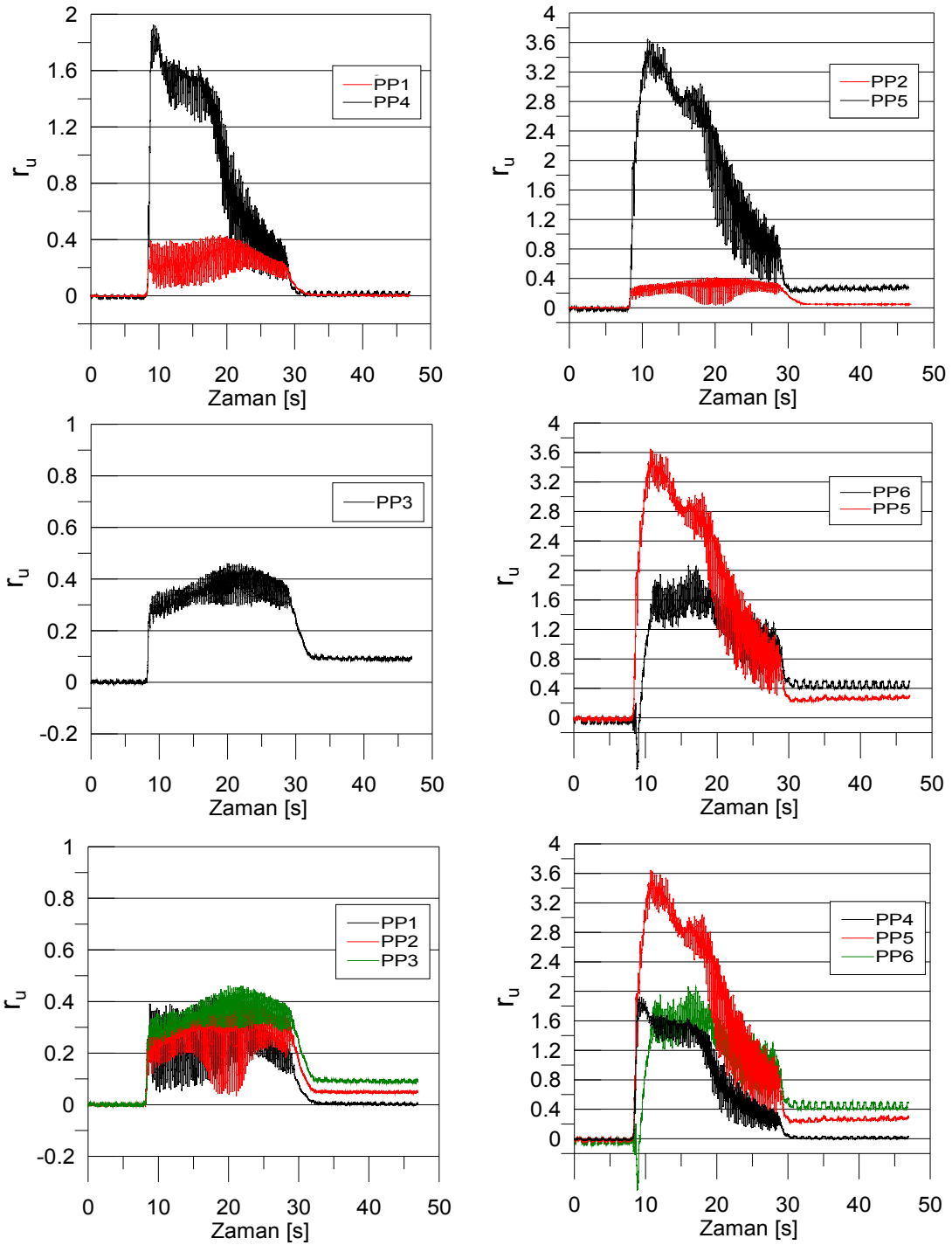


Şekil 5.18 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (Deney -1a - filtrelenmiş)

Boşluksuyu basıncı oranı ( $r_u$ ) değerlerinin zamanla değişimi incelendiğinde ise dalgakıran altındaki kum tabaka içerisinde hesaplanan maksimum  $r_u$  değerleri 0.40-0.50 mertebesinde kalırken topuk altında ve açıklıkta ise  $r_u$  değerlerinin 1.60 ve 3.20 mertebelerine ulaştığı görülmektedir(Şekil 5.20).



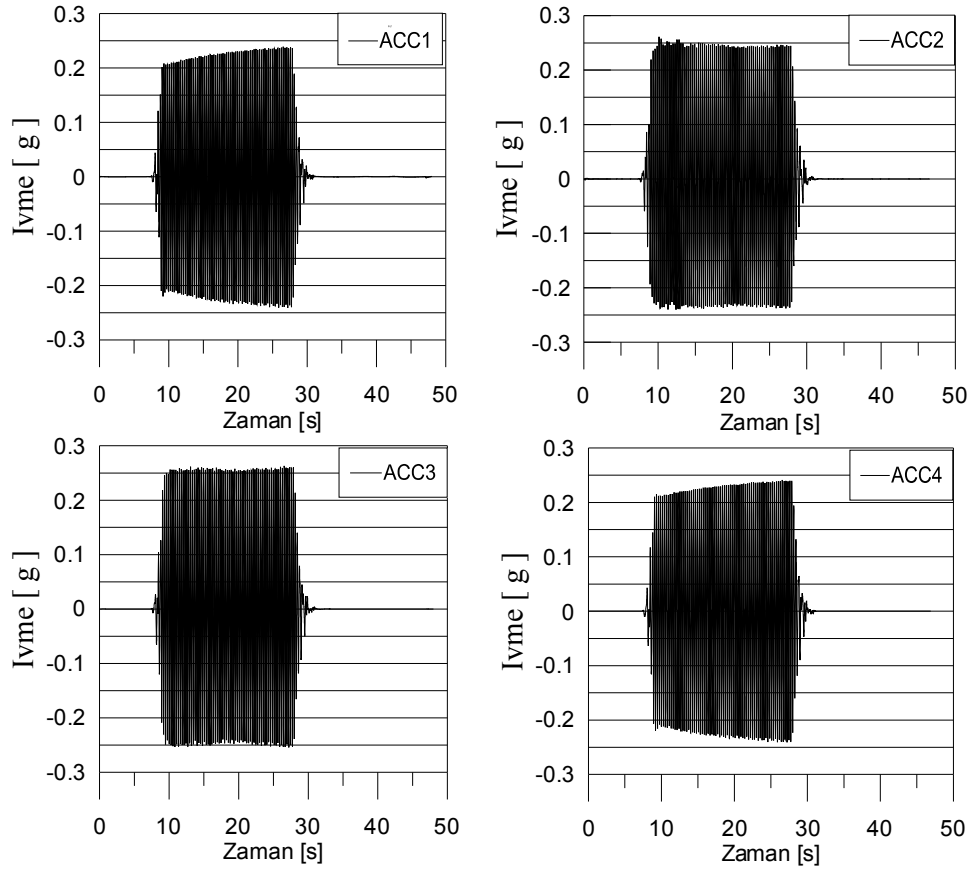
Şekil 5.19 Ölçülen boşluksuyu basınçları (deney -1a)



Şekil 5.20  $r_u$  - zaman grafiği (deney-1a)

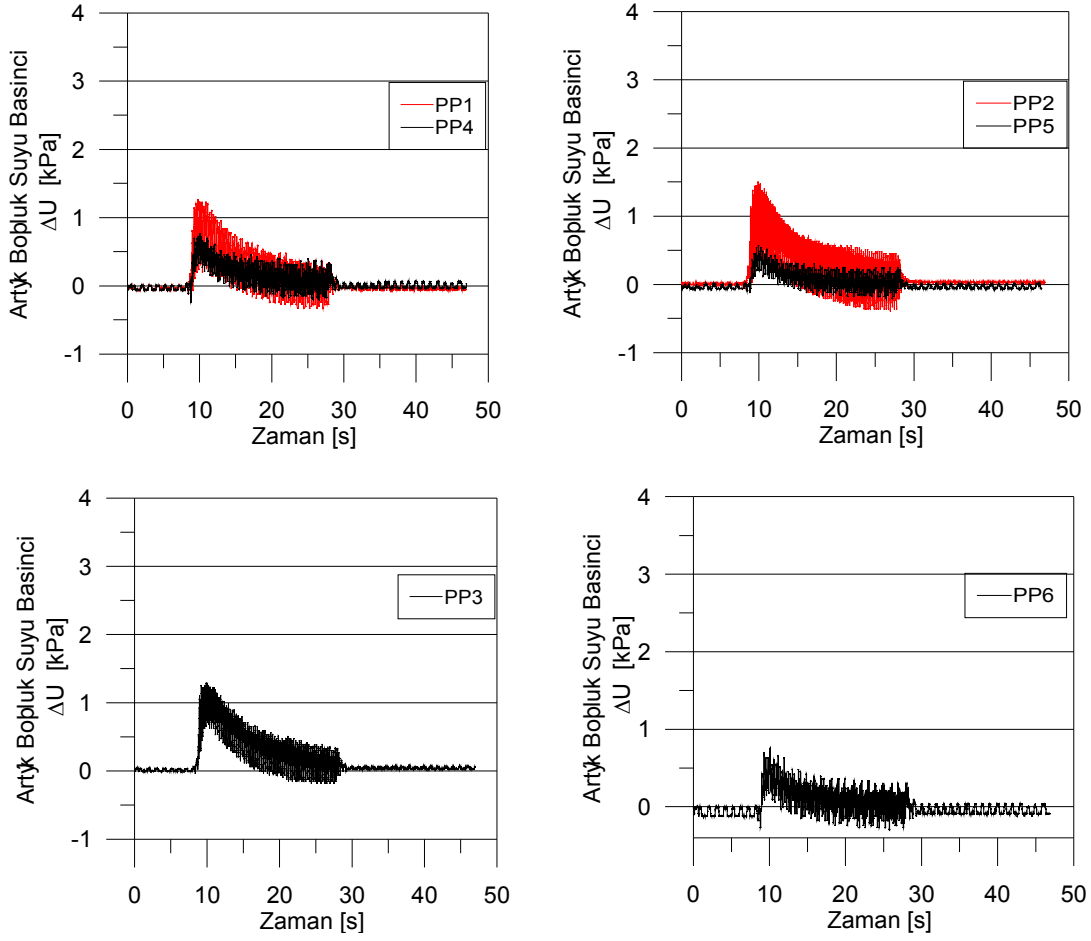


**Deney 1b:** Birinci deneyde çevrimli harekete maruz bırakılarak hasar gören dalgakıranın onarılmış kesitinin dinamik davranışını incelemek üzere dalgakıran kesiti ekstra malzemelerle yeniden oluşturularak (temele gömülen daneler çıkarılmadan) daha yüksek bir ivme değerinde (0.22g) tekrar çevrimli harekete maruz bırakılmıştır. Dalgakıran tabanında, kretinde ve şevinde ölçülen maksimum ivme değerlerinde, uygulanan ivmeye göre farklı oranda artışlar olduğu gözlemlenmiştir(Şekil 5.21). Kum tabaka üstünde ve dalgakıran kretinde ölçülen ivme büyüklükleri sırasıyla 0.24g ve 0.26g mertebesinde olmuştur. Dalgakıran şevinde ise maksimum ivme değeri ACC4= 0.24g olarak ölçülmüştür.



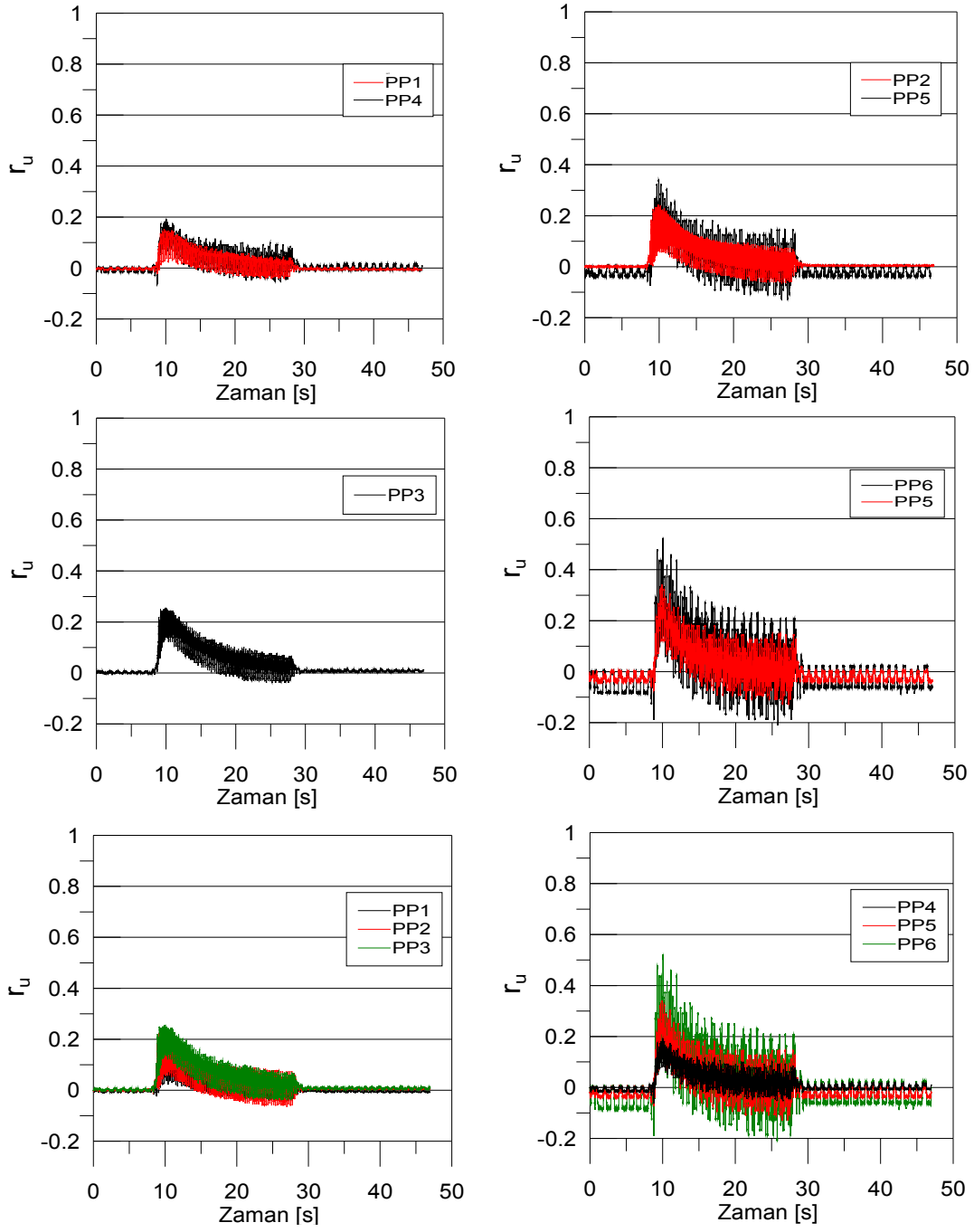
Şekil 5.21 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 1b - filtrelenmiş)

Birinci yükleme sonunda dalgakıran kesitinde oluşan düşey deformasyonlardan dolayı kum tabakasının rölatif sıklık oranı arttığından, açıklıkta ölçülen maksimum boşluksuyu basınçları 1.50 kPa seviyelerinde, dalgakıran altında ise 0.80-1.0 kPa seviyelerinde olmuştur(Şekil 5.22).



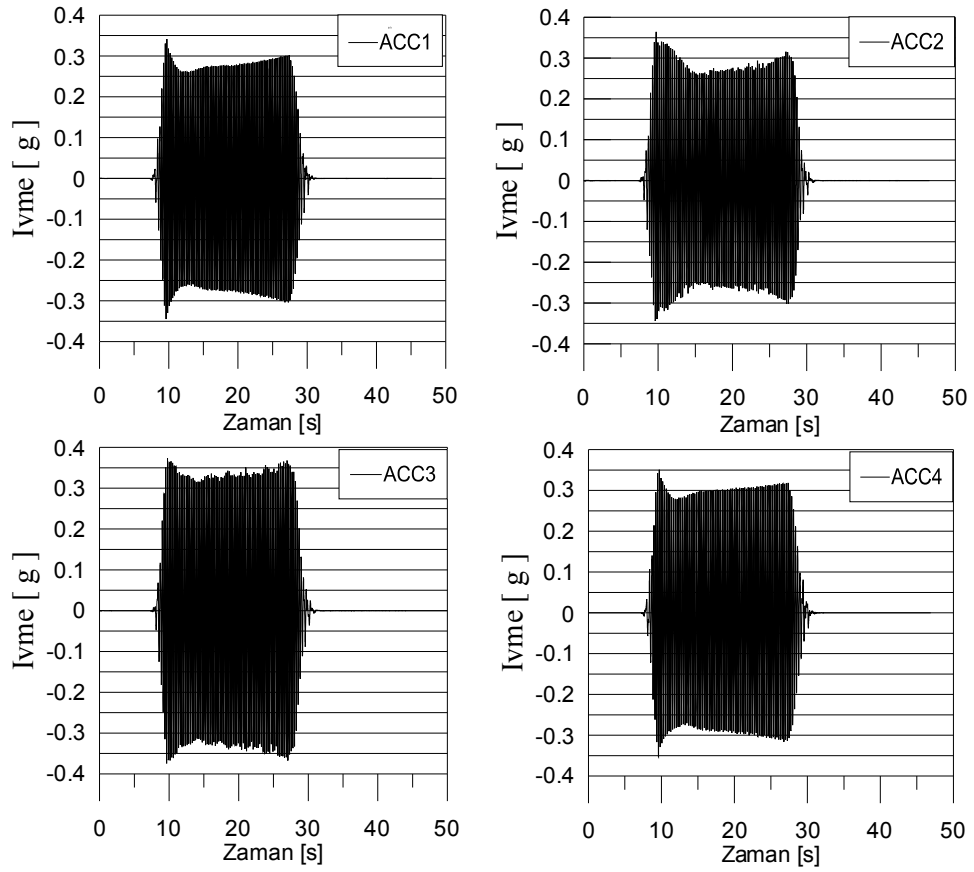
Şekil 5.22 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney-1b)

Benzer şekilde,  $r_u$  değerlerinin azalmış olduğu, topuk altında ve açıklıkta  $r_u$  değerinin yaklaşık 1.0 seviyesine, dalgakıran altında ise 0.20-0.30 değerlerine düştüğü görülmektedir (Şekil 5.23).



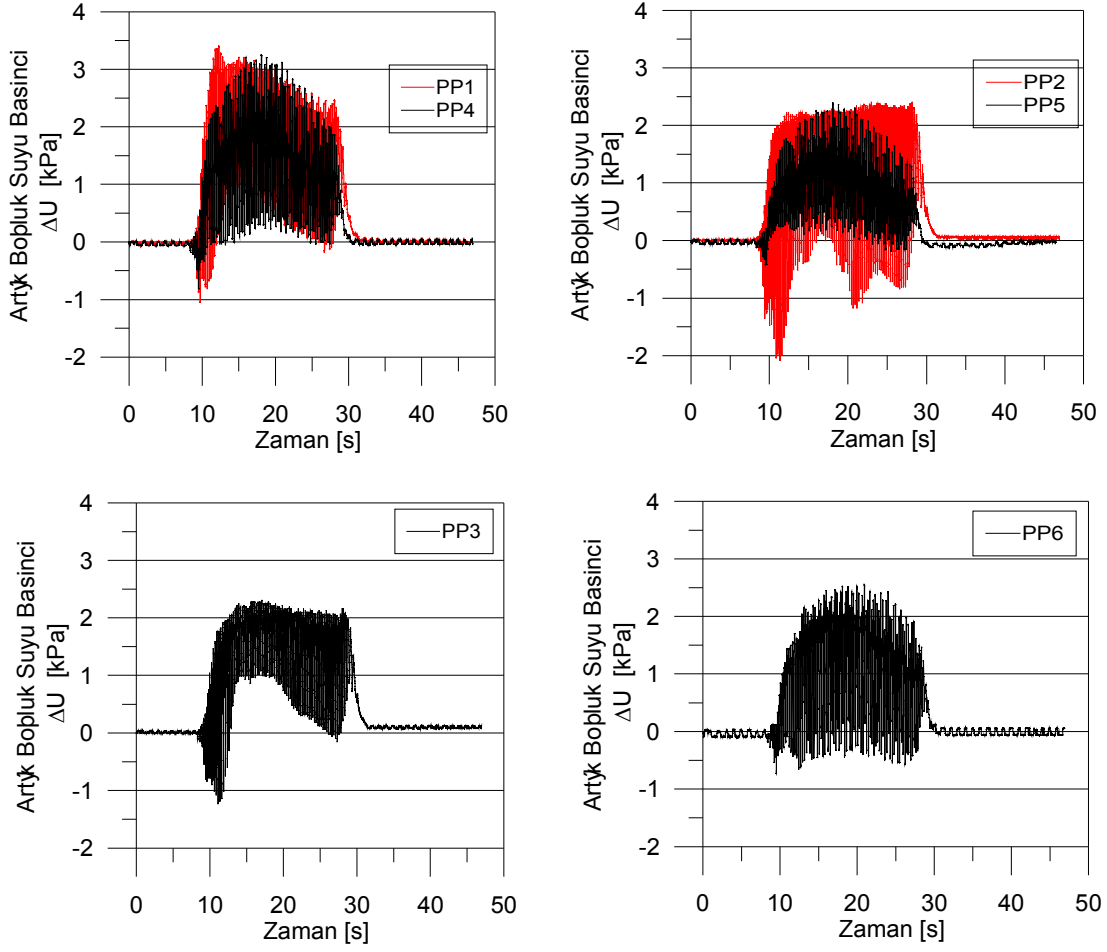
Şekil 5.23 ru - Zaman grafiği (deney-1b)

**Deney 1c :**Daha önce uygulanan iki kere dinamik yükleme sonucu hasar gören dalgakıranın kesitinin daha şiddetli bir sarsıntı altındaki dinamik davranışını gözlemleyebilmek için, kesite 0.27g maksimum ivme değerinde yeniden çevrimli hareket uygulanmıştır. Ölçülen ivme değerleri filitrelenmiş olarak Şekil 5.24'te sunulmuştur. Dalgakıran tabanında ölçülen ivme değeri ACC2=0.29g merterbesinde olurken ve krette ölçülen ivme değeri ise artarak ACC3=0.34g mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir. Dalgakıran şevinde ise ACC4=0.30g seviyelerinde ivme büyüklüğü ölçümü alınmıştır.



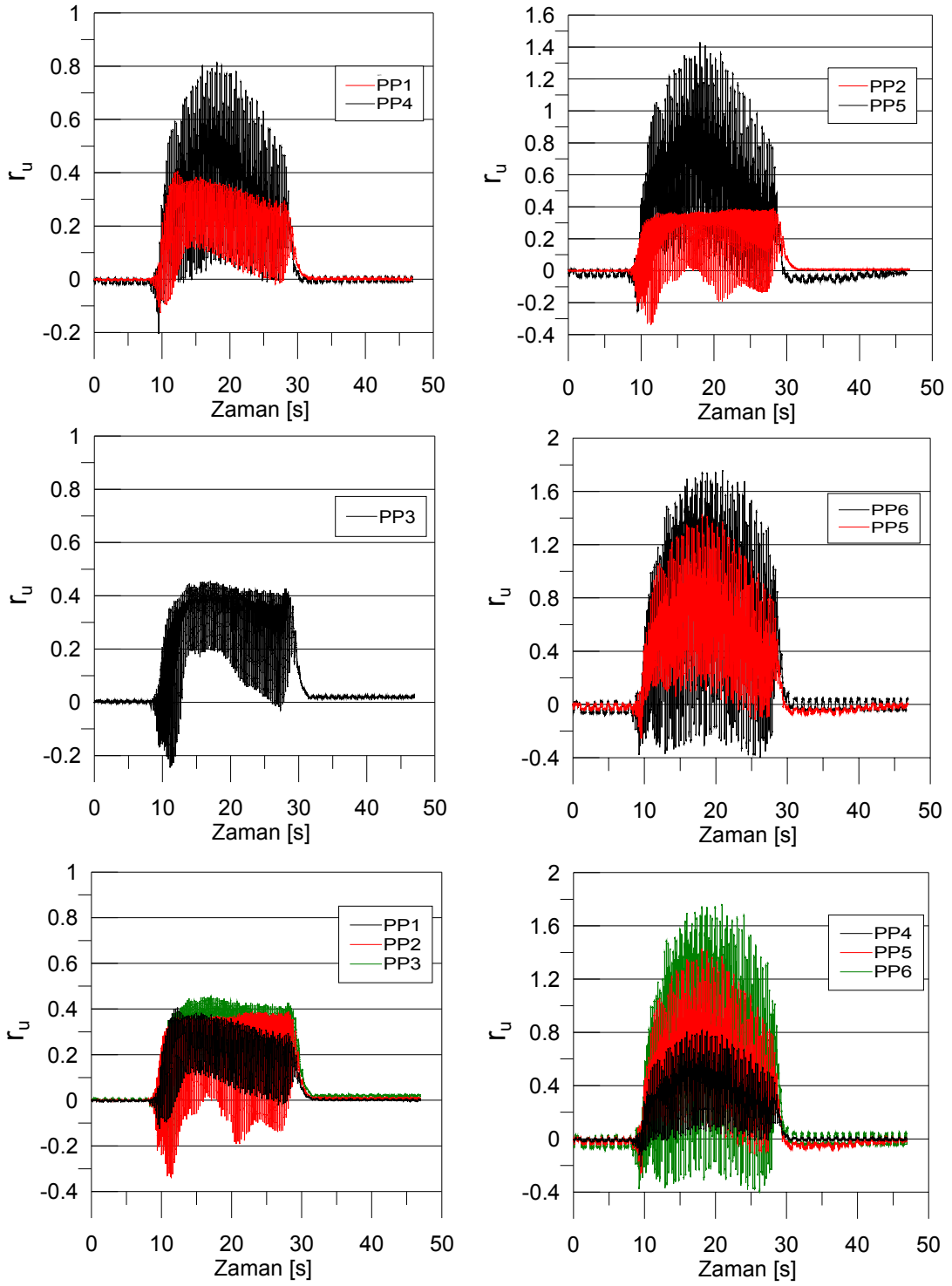
Şekil 5.24 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney1c - filitrelenmiş)

Dalgakıran altında ölçülen maksimum boşluksuyu basınçları 2.5-3.0 kPa seviyesinde olurken açıklıkta ölçülen boşluksuyu basınçları 2.0 kPa olarak elde edilmiştir(Şekil 5.25).



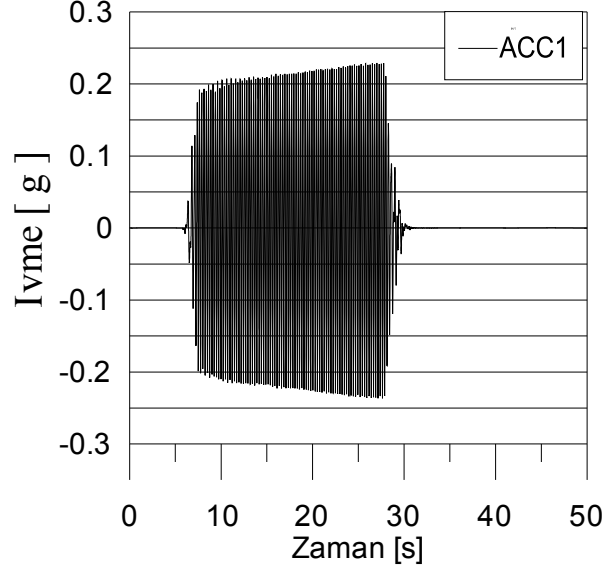
Şekil 5.25 Boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (deney - 1c )

Onarılmış kesitte maksimum  $r_u$  değerleri dalgakıran altında 0.35 mertebelerindedir. Topuk altında 0.80 ve 1.40 seviyesinde olan  $r_u$  değerlerinin açık alanda 10 saniye sonunda 0.80 – 1.50 seviyelerine çıktığı görülmüştür(Şekil 5.26).



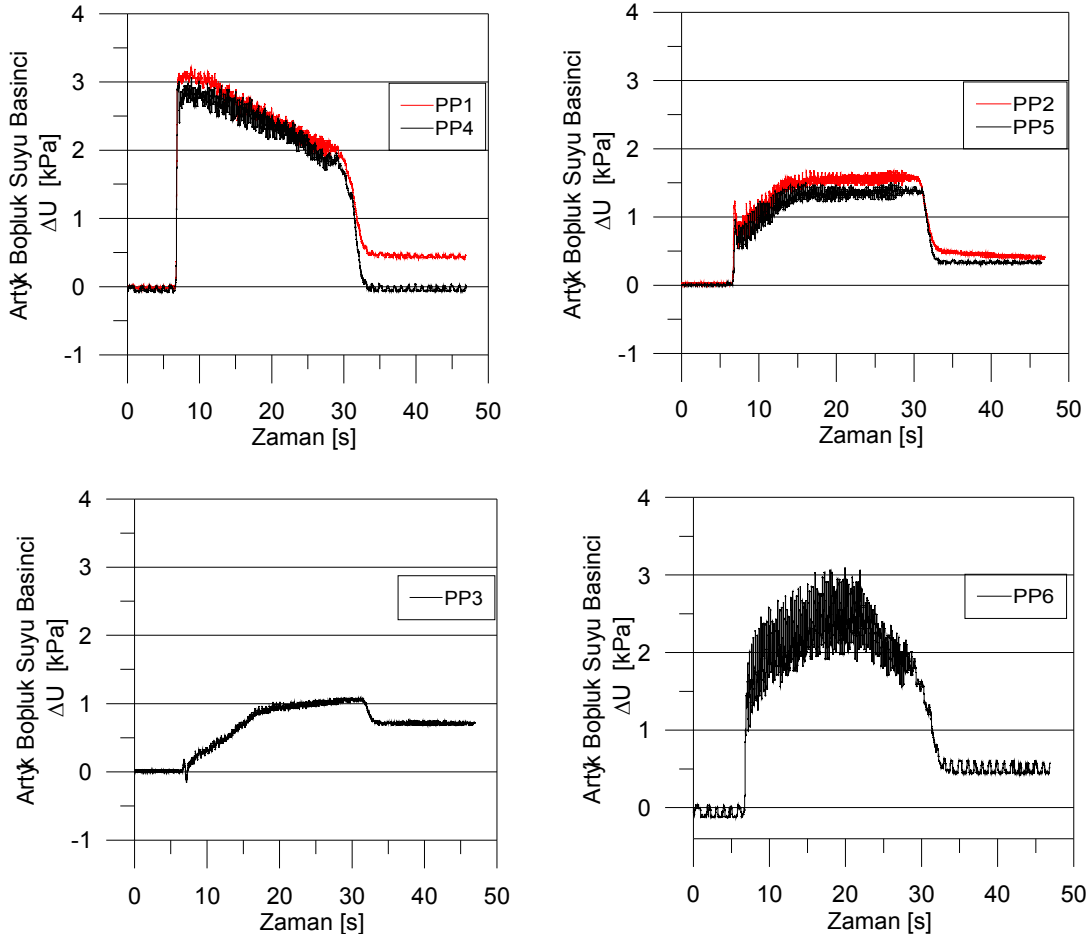
Şekil 5.26  $r_u$  - zaman grafiği (deney -1c)

**Deney 2a:** Sıvılaşımış bir kum tabakası üzerine inşa edilecek dalgakıran kesitinin dinamik davranışını gözlemek için, 40cm kalınlığında %40 sıklığında kum bir tabaka meydana getirilmiş ve üzerine dalgakıran yerleştirilmeden, maksimum ivme değeri 0.21g olan 20 saniyelik çevrimli hareket uygulanmıştır. Filtrelenmiş ivme kaydı Şekil 5.27’de gösterilmiştir.



Şekil 5.27 Kum temel tabakasına uygulanan ivme değerleri (deney2a - filtrelenmiş)

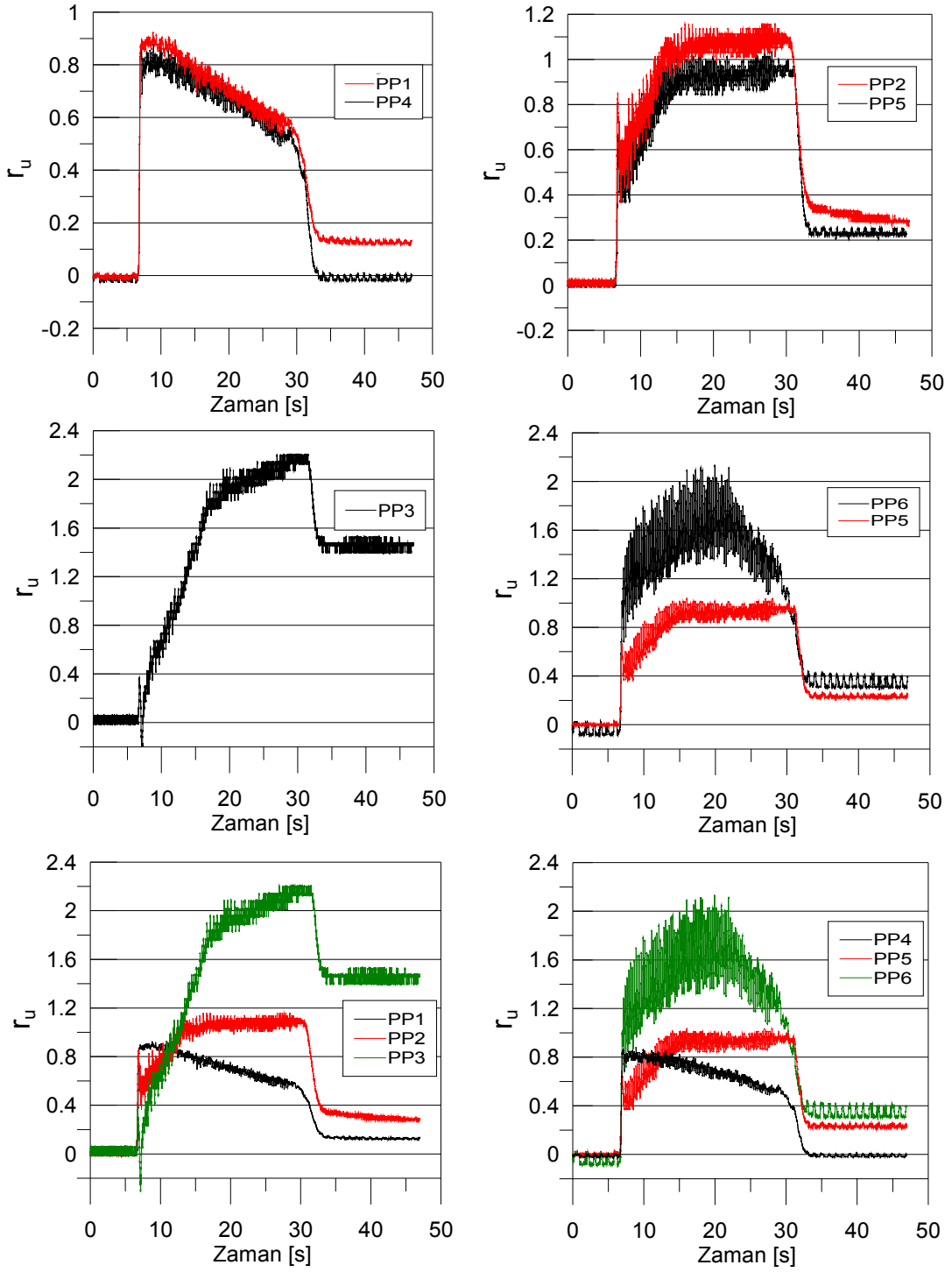
Ölçülen maksimum boşluksuyu basınçlarının tabanda ilk çevrimden itibaren 3.0 kPa seviyesine ulaşarak zamanla azaldığı Şekil 5.28’de görülmektedir. Tabaka ortasında ise maksimum boşluk suyu basıncının 5 saniye sonunda 1.50 kPa seviyelerine ulaştığı, yüzeye yakın bölgede 8 saniye sonunda 3.0 kPa ve 1.0 kPa seviyelerine ulaştığı görülmektedir. PP6 boşluk suyu basınç ölçer deney sisteminde PP5 ile benzer derinliklere konulmaya çalışılmış ancak yüzeye çok yakın olduğu için deney sırasında yeri değişmiş olabileceğinden farklı ölçüm değerleri elde edildiği düşünülmektedir.



Şekil 5.28 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2a)

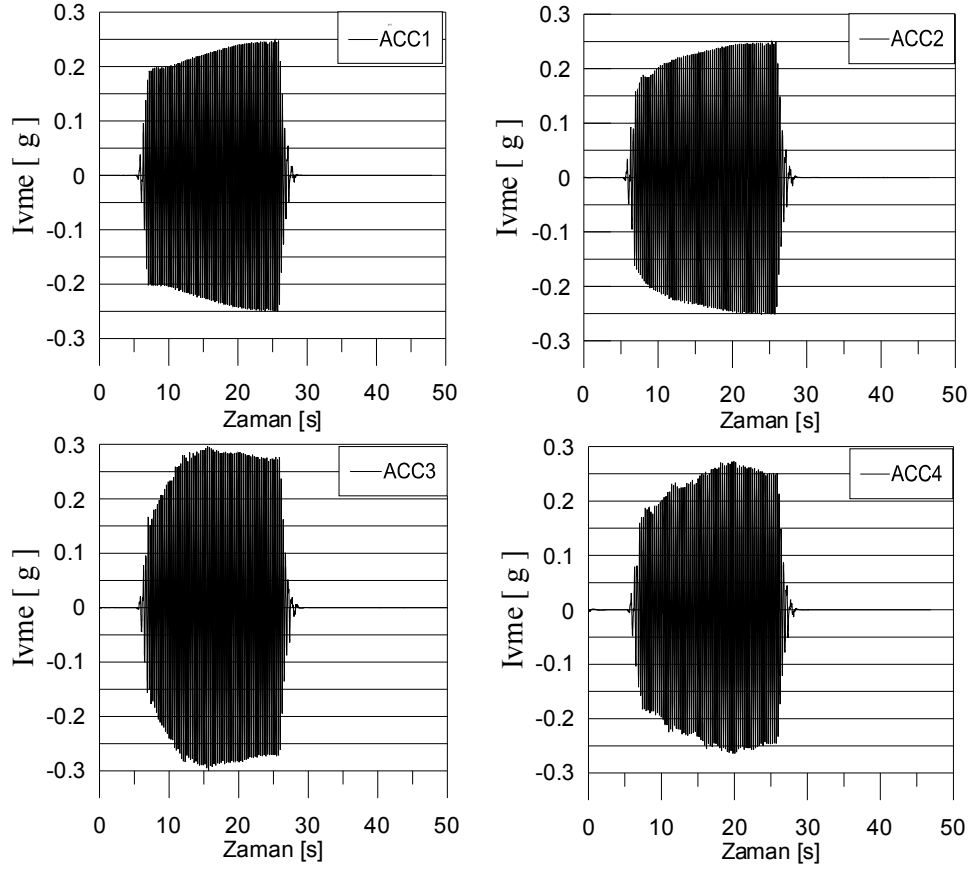
Kum tabakası tabanında  $r_u$  değerlerinin, ilk çevrimden itibaren hızla 0.90 seviyesine yükseldiği ve zamanla azaldığı görülmektedir (Şekil 5.29). Tabaka ortasında ise,  $r_u$  değerinin 7 saniye sonrasında 1.10 değerine kadar yükseldiği görülmüştür. Yüzeyde efektif gerilmenin az olması nedeniyle  $r_u$  yüksek değerlere ulaşmıştır. Açıklık bölgesindeki ise  $r_u$  tabanda 0.85, ortada 0.95 ve 1.60 maksimum değerlerine ulaşmıştır.





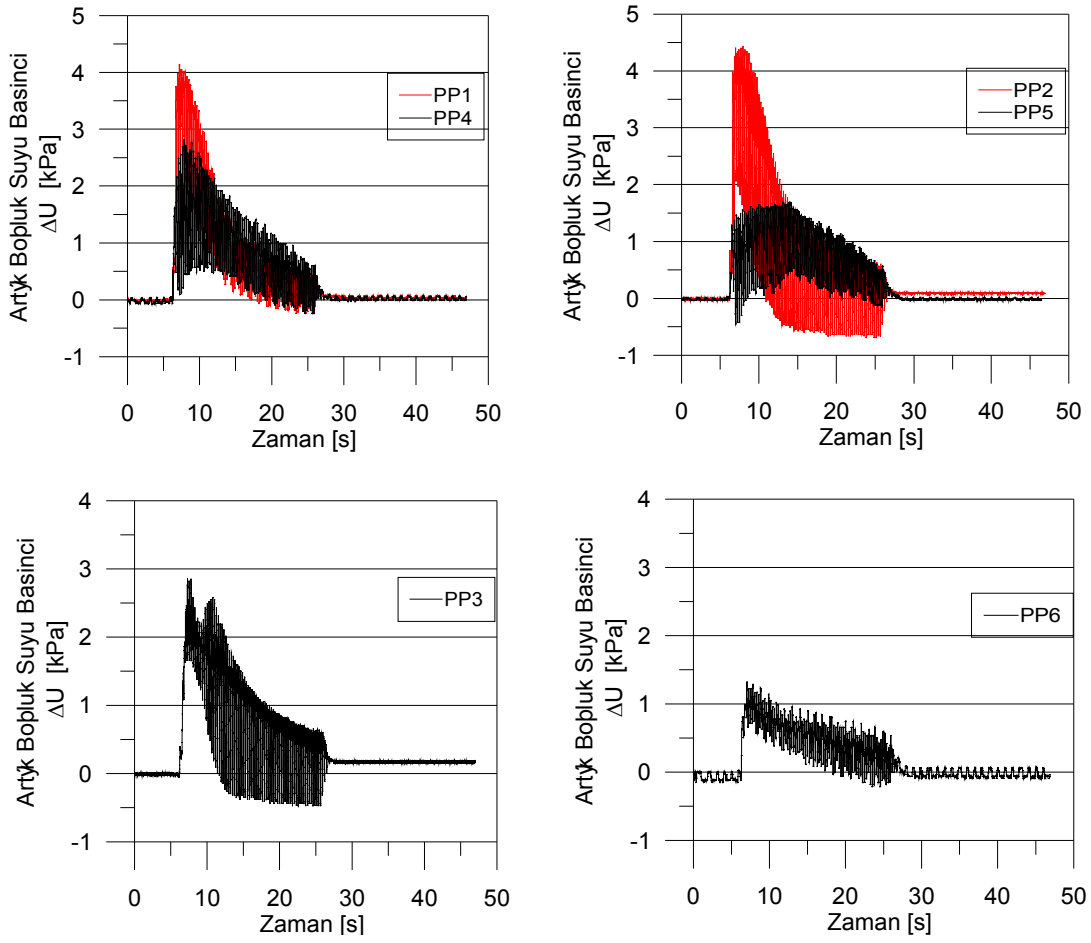
Şekil 5.29  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 2a)

**Deney 2b:** Çevrimli harekete maruz kalan sıvılaşmış kum tabakası üzerine 40cm yüksekliğinde dalgakıran kesiti yerleştirilerek yeniden 20 saniyelik çevrimli yükleme uygulanmıştır. Filtrelenmiş ivme ölçümlerine göre tabanda uygulanan 0,20 g maksimum ivme değeri dalgakıran tabanında deney sonunda doğru 0.24g mertebesinde olmuştur. (Şekil 5.30). Ölçülen ivme değeri 0.24g seviyelerine yükselirken dalgakıran kreti ve şevinde ise sırasıyla 0.28 ve 0.25 g maksimum ivme büyüklükleri ölçülmüştür.



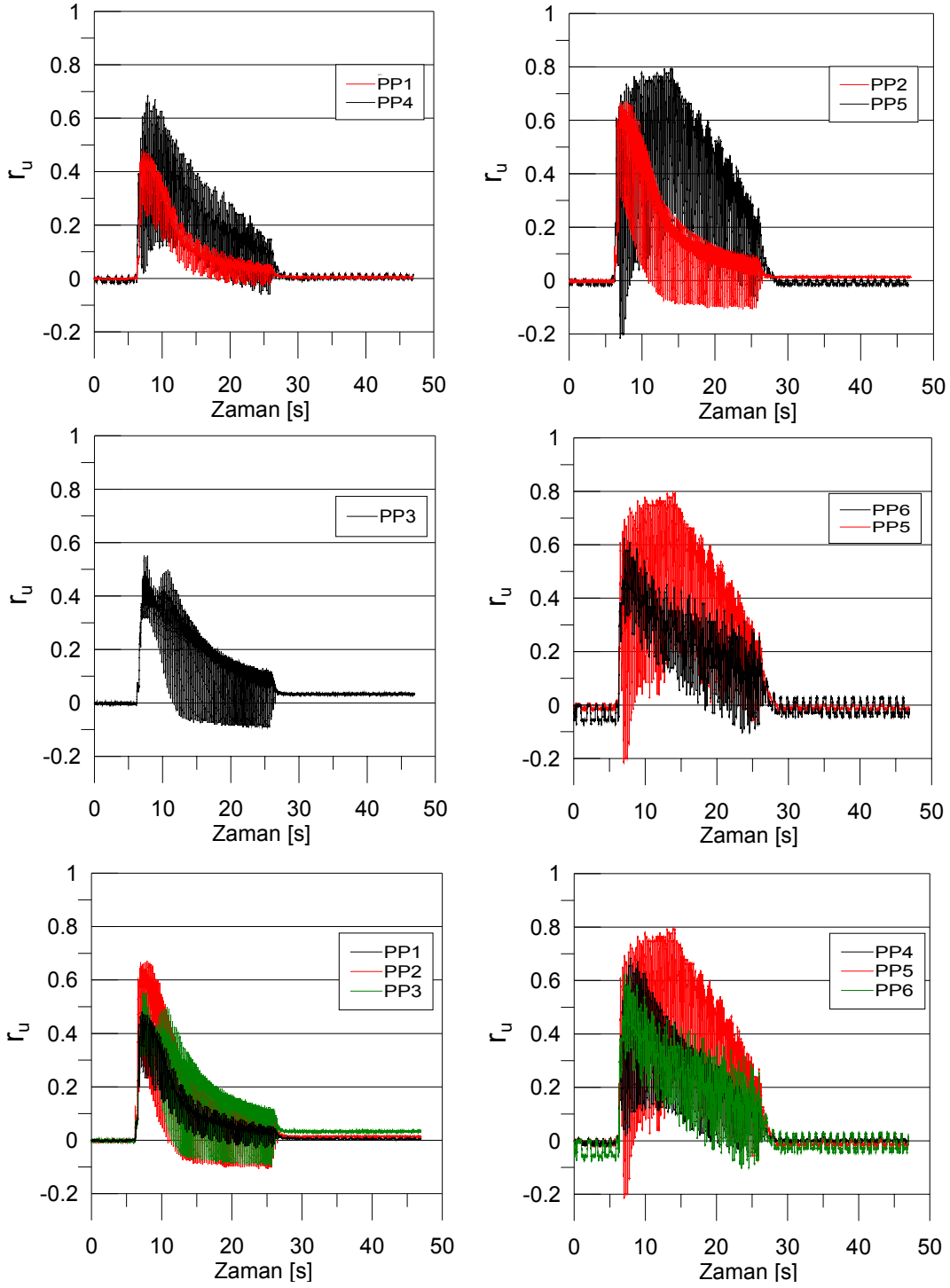
Şekil 5.30 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 2b - filtrelenmiş)

Kum temel zemininde ölçülen maksimum boşluksuyu basınçlarının dalgakıran altında 4.0 – 4.50 kPa’da, topuk altında ise 1.50 -2.50 kPa değerlerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.31).



Şekil 5.31 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2b)

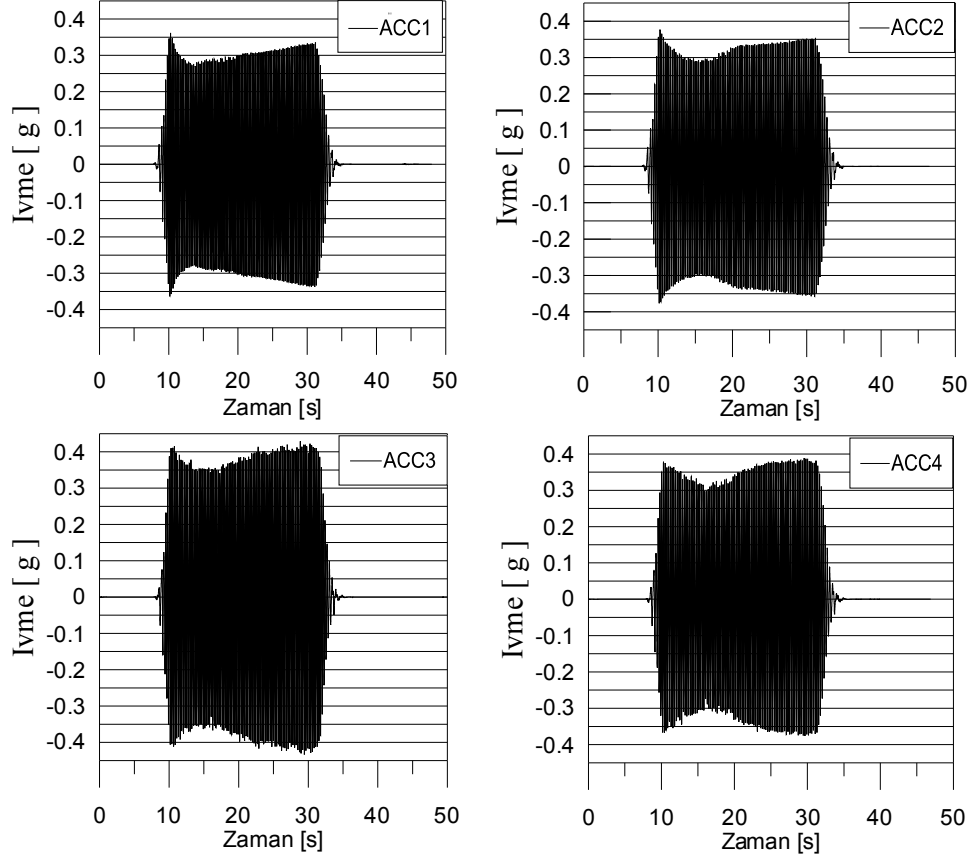
Dalgakıran altında oluşan maksimum  $r_u$  değeri tabanda 0.45, tabaka ortasında 0.65 yüzeyde ise 0.55 mertebesinde hesaplanırken, topuk altında taban seviyesinde 0.60 ve tabaka ortasında ise 0.80 seviyesine ulaştığı, açıklıkta ise 0.60 seviyesinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.32).



Şekil 5.32  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 2b)

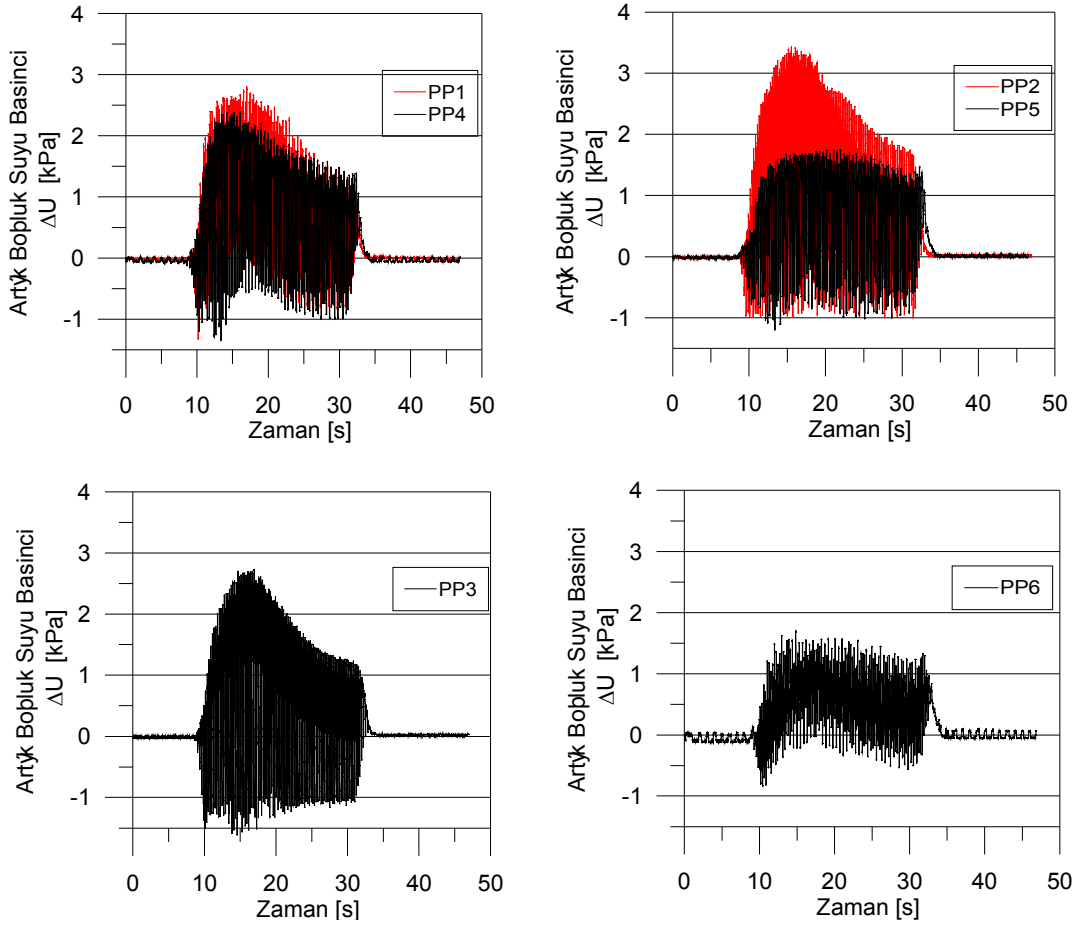
**Deney 2c:** Bir önceki deneyde çevrimli yükleme sonucunda deformasyona uğramış olan ve daha önce sıvılaşmış kum tabaka üzerine inşa edilmiş dalgakıran kesiti üzerinde onarılmadan yeniden 20 saniye süresince çevrimli hareket uygulanmıştır. Tabanda uygulanan çevrimsel

hareketin büyüklüğü 0.31g seviyelerinde ölçülmüştür (Şekil 5.33). Dalgakıran taban kreti ve şevinde ivme büyüklüklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Dalgakıran tabanında ölçülen ivme değeri 0.33g büyüklüğüne ulaşırken, dalgakıran kretinde 0.40g dalgakıran şevinde ise 0.37g seviyelerinde ölçülmüştür.



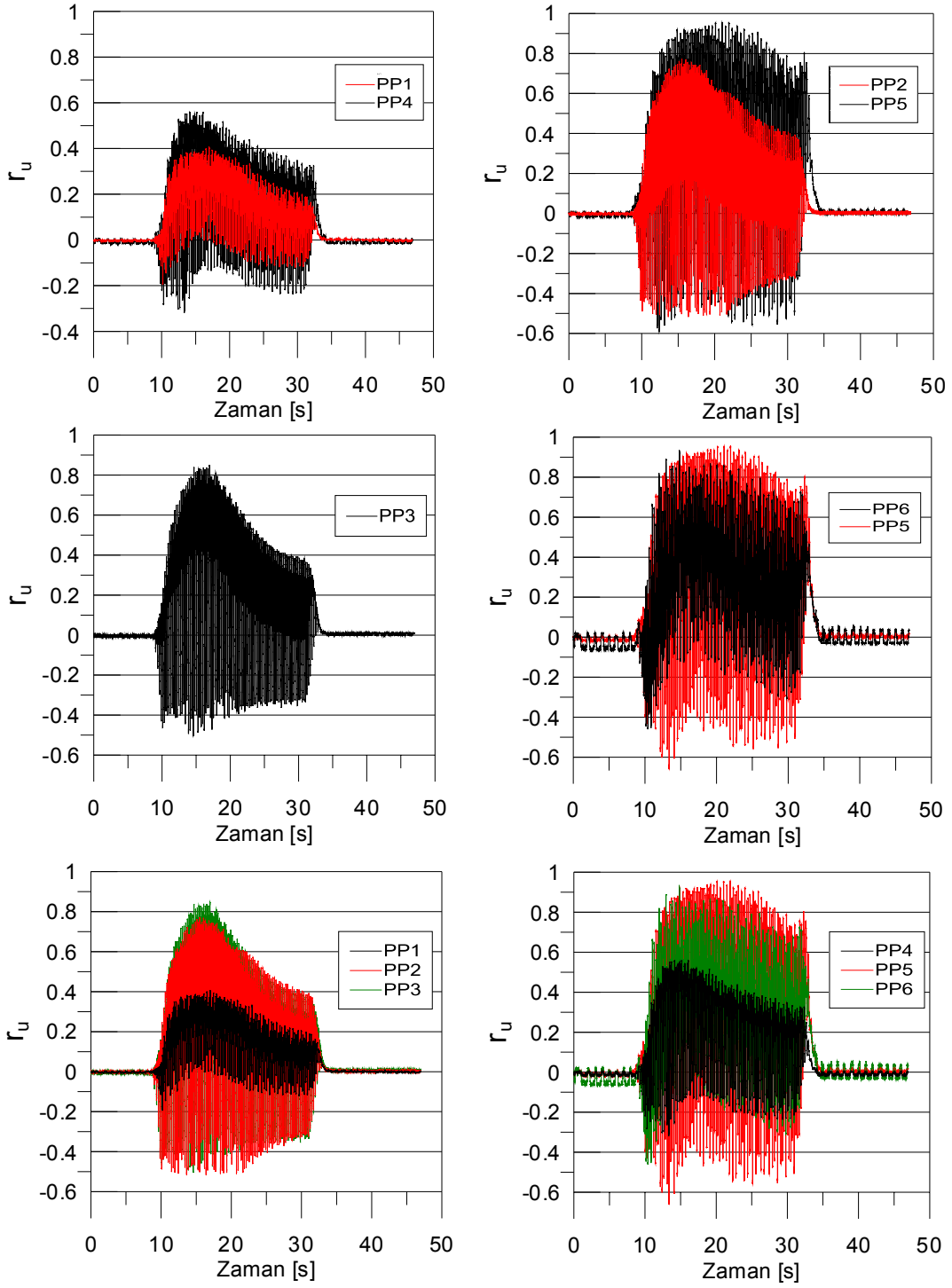
Şekil 5.33 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 2c - filtrelenmiş)

Ölçülen boşluksuyu basınçlarının maksimum değerinin dalgakıran altında 2.50-3.50 kPa arasında, açıklıkta ise 1.50 – 2.0 kPa seviyesinde olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.34).



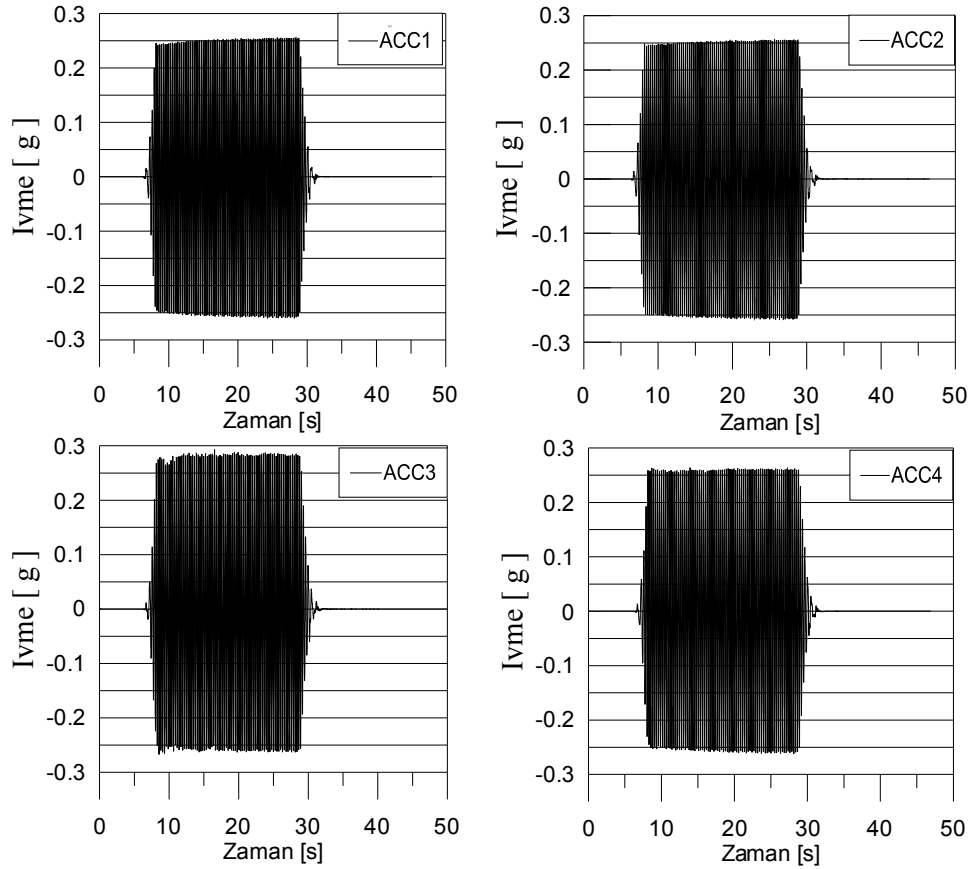
Şekil 5.34 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney- 2c )

Maksimum  $r_u$  değerlerinin dalgakıran altında taban seviyesinde 0.40, tabaka ortasında 0.70, yüzeyde ise 0.80 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Topuk altında maksimum  $r_u$  değerleri ise taban seviyesinde 0.50 ve tabaka ortasında 0.90 seviyesinde iken açık alanda ise 0.85 seviyesinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.35).



Şekil 5.35  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 2c)

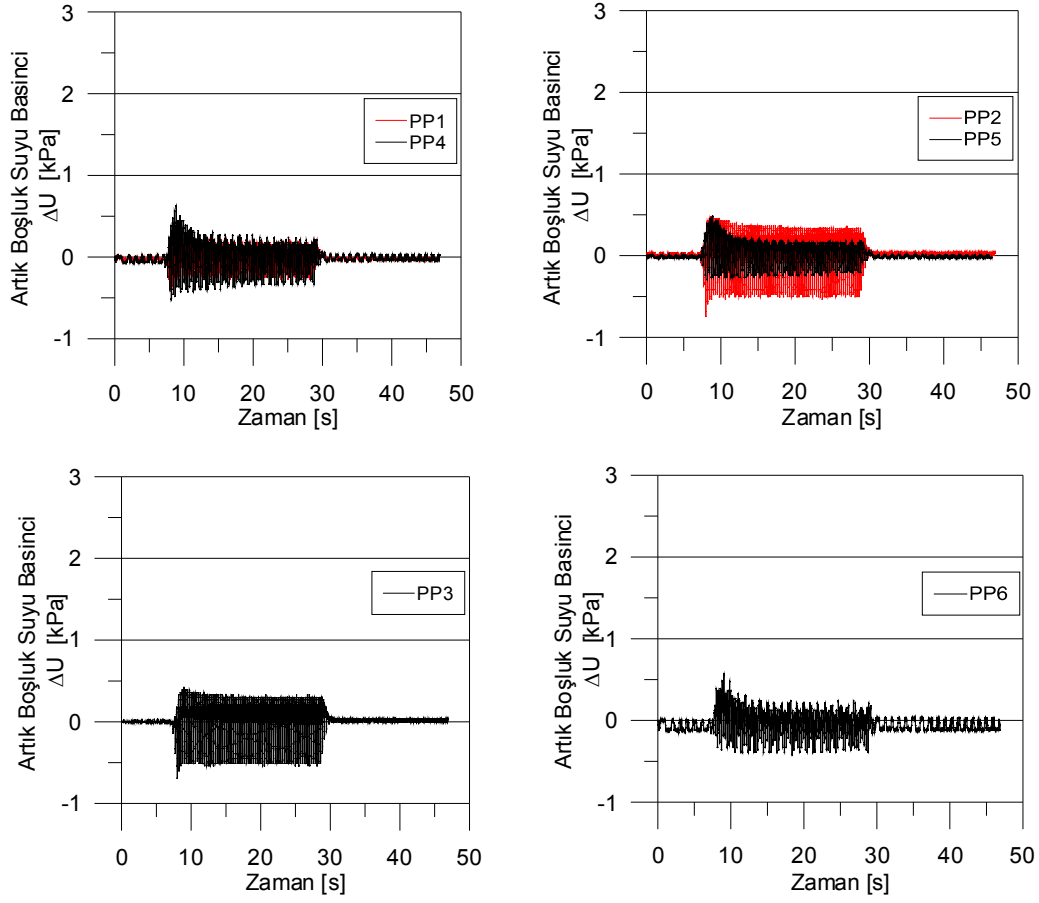
**Deney 2d:** Sıvılaşıp kum tabaka üzerine inşa edilmiş ve daha önce uygulanan çevrimli yükleme sonucunda deformasyona uğramış olan dalgakıran kesiti onarılarak dalgakıran yüksekliği 40cm'ye çıkarılmış, onarılmış kesite yeniden 20 saniye boyunca çevrimli hareket uygulanmıştır. Tabanda uygulanan çevrimsel hareketin büyüklüğü 0.25g seviyelerinde ölçülmüştür (Şekil 5.36). Dalgakıran tabanında ivme büyüklüğü sabit kaldığı, dalgakıran kreti ve şevinde ise ivme büyüklüklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Dalgakıran tabanında 0.25g, dalgakıran kretinde 0.28g ve dalgakıran şevinde 0.26g seviyelerinde ivme değerleri ölçülmüştür..



Şekil 5.36 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 2d- filtrelenmiş)

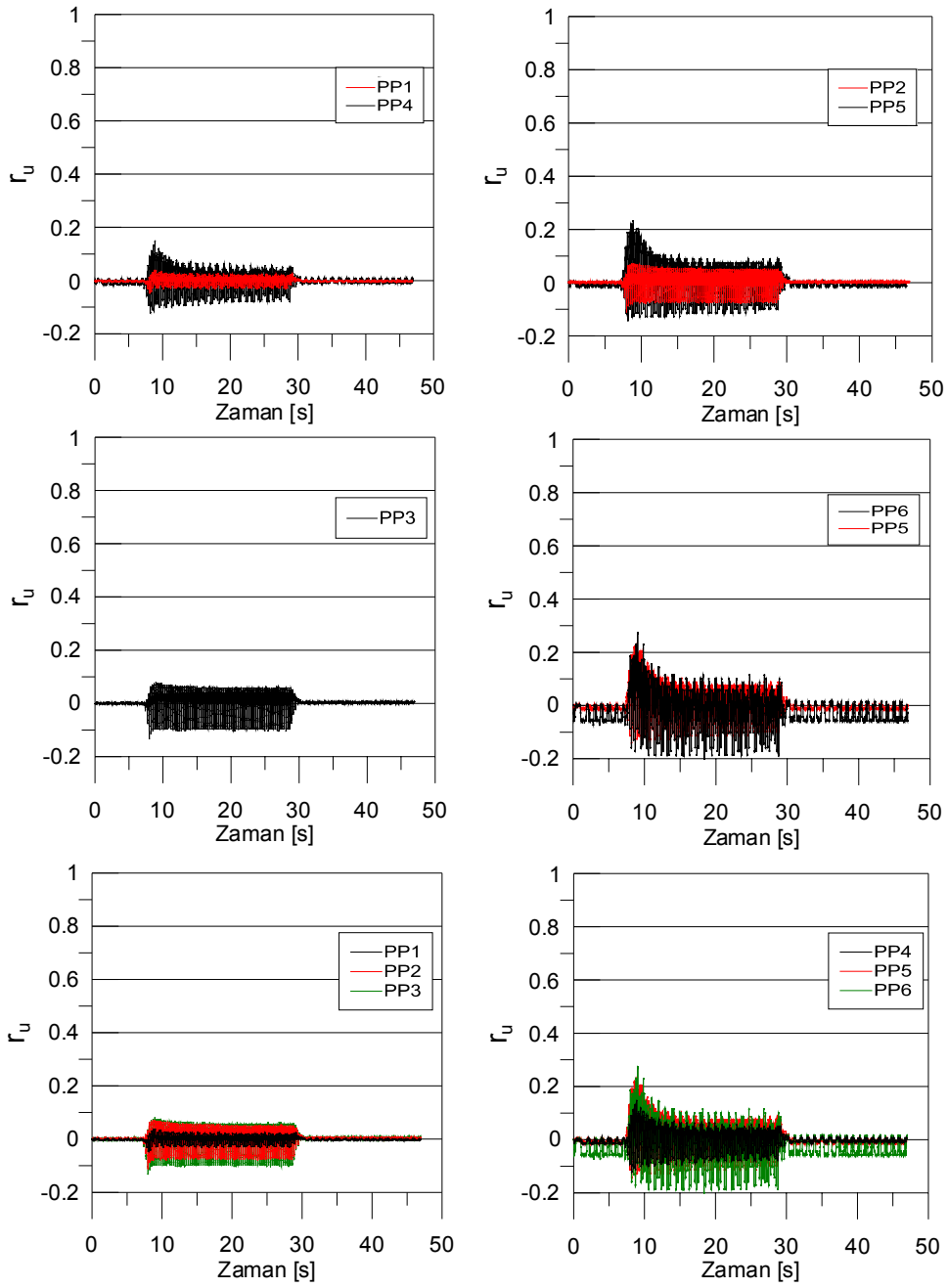
Onarılmış kesitte ölçülen boşluksuyu basınçlarının, daha önce iki kere uygulanan çevrimli hareketler sonrasında kum temel zeminin tabakasının rölatif sıklığının artmış olması nedeniyle, dalgakıran altında ve açıklıkta 0.50 kPa seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.37).





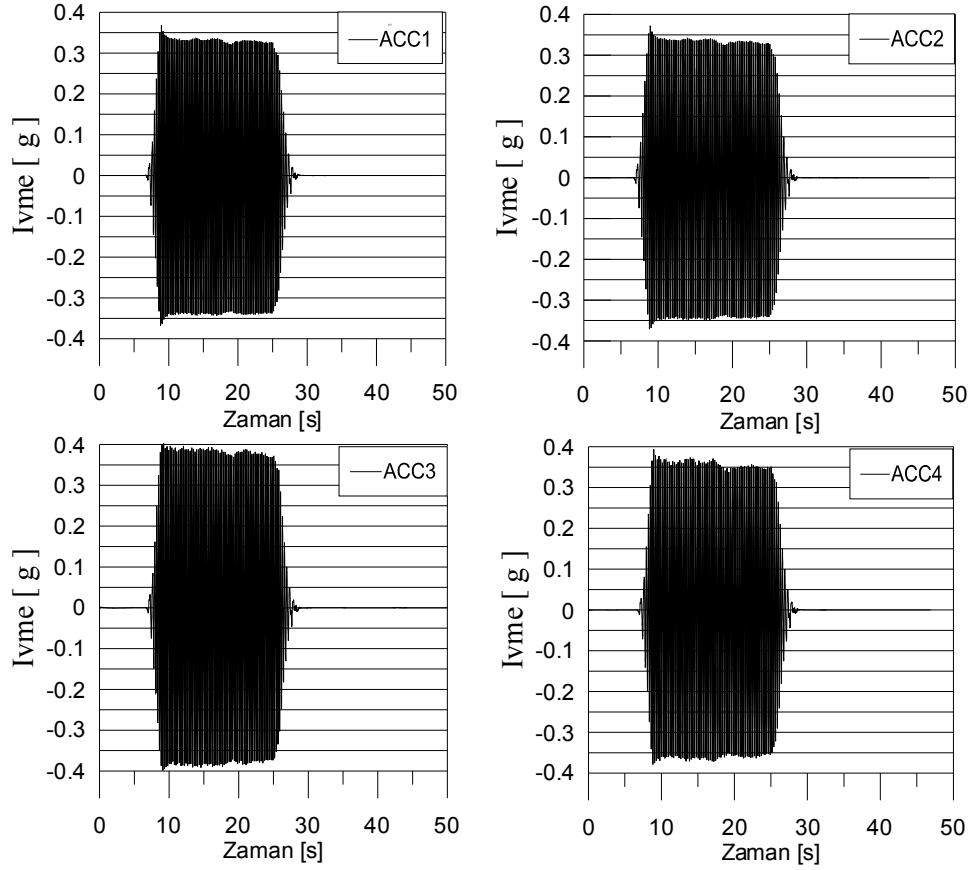
Şekil 5.37 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2d)

Dalgakıran altında, taban seviyesinde, tabaka ortasında ve yüzeyde  $r_u$  değerlerinin de 0.10 seviyelerinde kaldığı görülmüştür. Topuk altında hesaplanan maksimum  $r_u$  değerlerinin ise, taban seviyesinde ve tabaka ortasında 0.20 seviyesinde olduğu görülmüştür(Şekil 5.38).



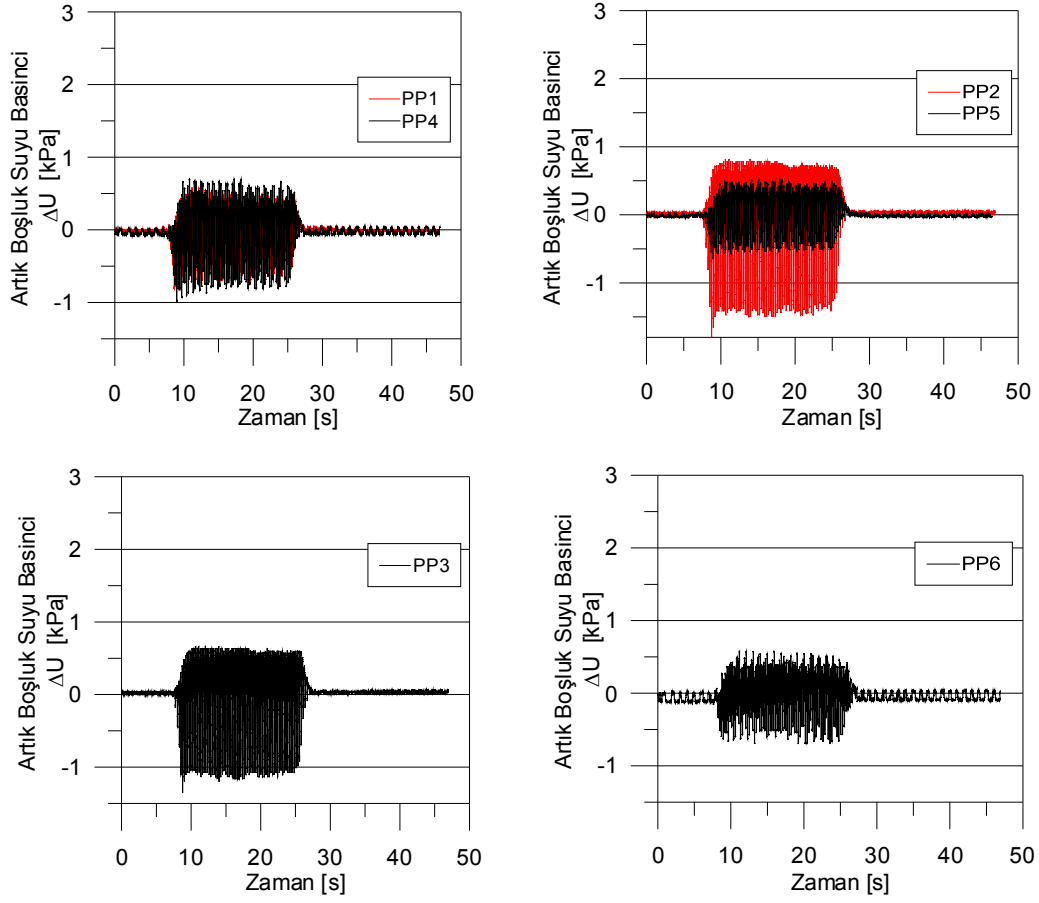
Şekil 5.38  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 2d)

**Deney 2e:** Daha önce uygulanan çevrimli yüklemeler sonucunda deformasyona uğramış olan, dalgakıran kesiti, onarılmadan daha yüksek bir ivme büyüklüğünde altında tekrar 20 saniyelik çevrimsel harekete maruz bırakılmıştır. Tabanda uygulanan çevrimsel hareketin ivmesi 0.33g seviyelerinde ölçülmüştür (Şekil 5.39). Dalgakıran tabanında, kretinde ve şevinde ölçülen ivme büyüklüklerinin arttığı, ve sırası ile, 0.34g, 0.38g ve 0.36g değerlerine ulaştığı gözlenmiştir.



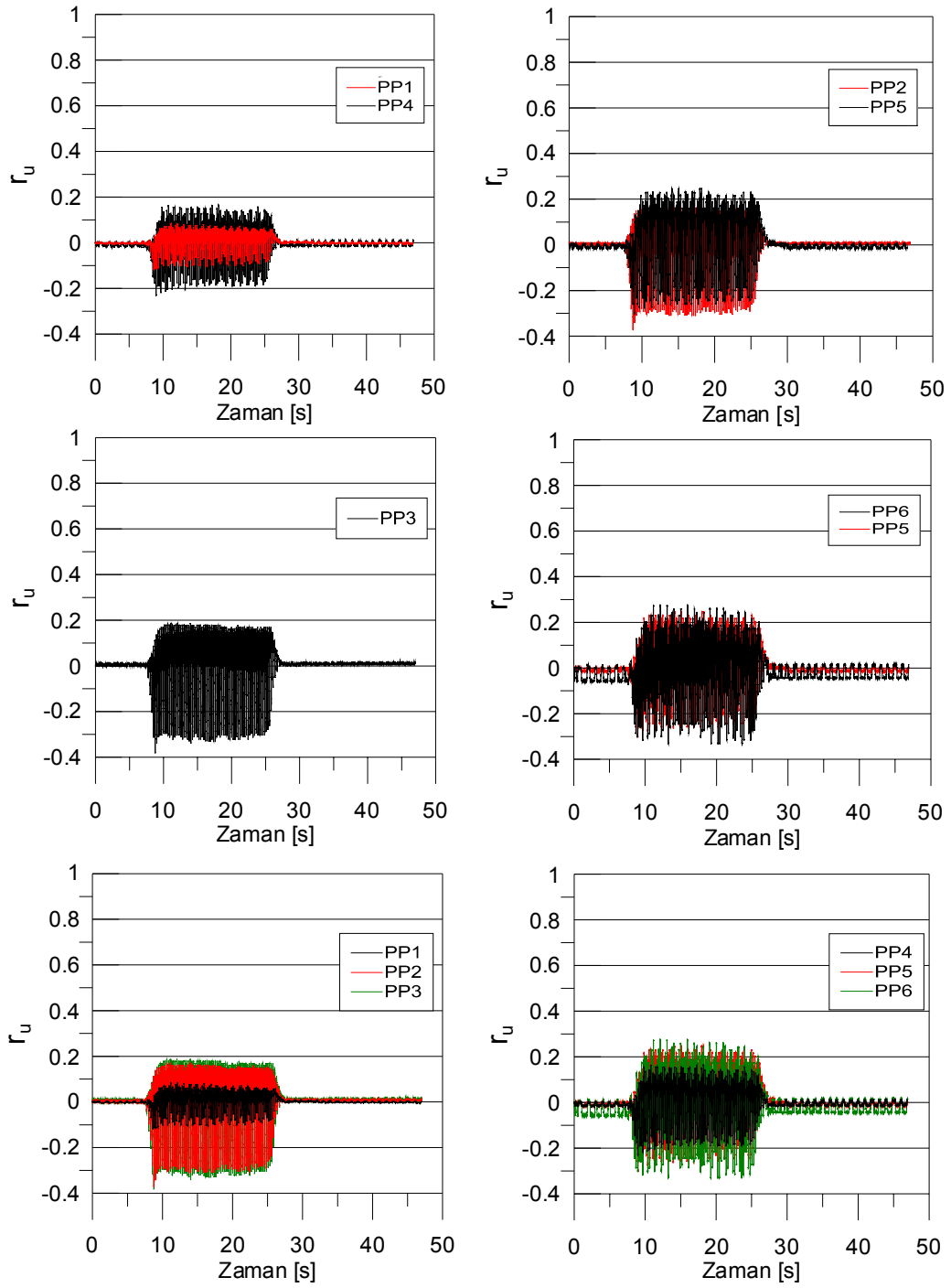
Şekil 5.39 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 2e - filtrelenmiş)

Uygulanan sarsıntı şiddeti ivme büyüklüğünü artmış olmasına rağmen, daha önce üç kez uygulanan çevrimli hareketler sonrasında kum tabakasının rölatif sıkılığının artmış olması nedeniyle, dalgakıran altında 0.50-0.70 kPa seviyelerine, açıklıkta ise 0.50 kPa seviyelerinde boşluksuyu basıncı artışları olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.40).



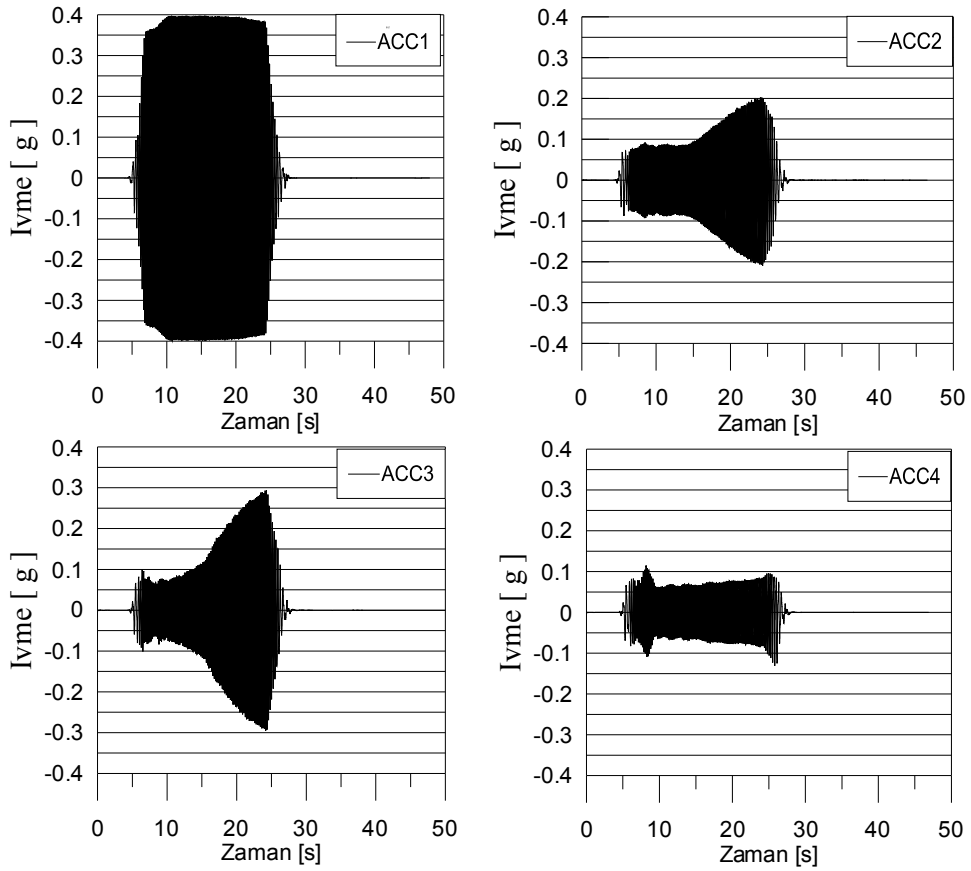
Şekil 5.40 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 2e)

Aynı nedenlerle dalgakıran altında, taban seviyesinde, tabaka ortasında ve yüzeyde  $r_u$  değerlerinin maksimum 0.10-0.15 seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Topuk altında ise maksimum  $r_u$  değerlerinin ise taban seviyesinde ve tabaka ortasında ise 0.15- 0.20 civarında olduğu görülmüştür(Şekil 5.41).



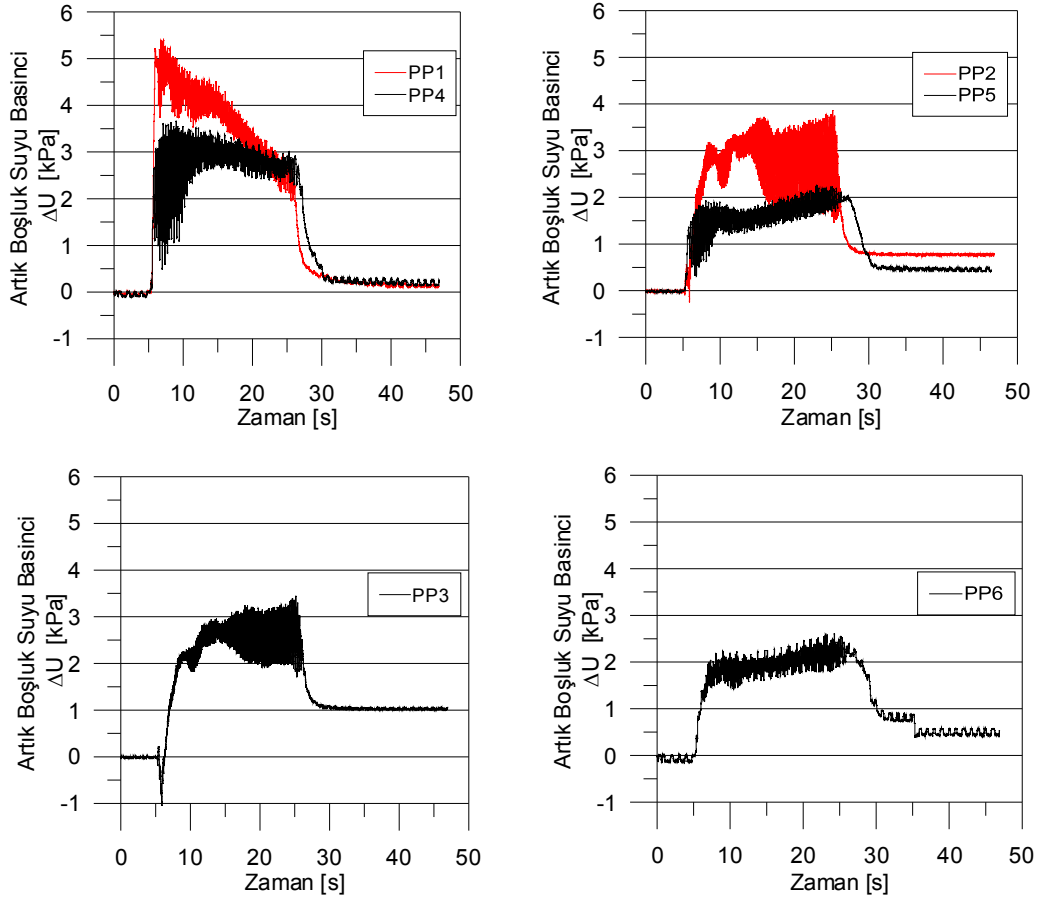
Şekil 5.41  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 2e )

**Deney 3a:** 40cm yüksekliğinde %40 rölatif sıklıkta yağmurlama sistemiyle hazırlanmış kum tabaka üzerine yerleştirilen 40cm yüksekliğinde dalgakıran kesitinin yüksek ivme büyüklüğüne sahip tekrarlı yüklemesinde dinamik davranışı incelenmiştir. Tabanda uygulanan 20 saniyelik çevrimsel hareketin büyüklüğü 0.40g seviyelerinde ölçülmüştür(Şekil 5.42). Ölçüm sisteminden kaynaklandığı düşünülen problem nedeniyle uygun formatta ivme kaydı elde edilememiş, dalgakıran kretinde ölçülen ivme değeri başlangıçta 0.10g iken 10saniye sonrasında artarak 0.30g büyüklüğüne ulaşmış, dalgakıran temelinde ise başlangıçta 0.09g olan ivme değeri, 10 saniye sonunda artarak 0.21g değerine ulaşmış, dalgakıran şevinde ise 0.09g mertebesinde ivmeler ölçülmüştür.



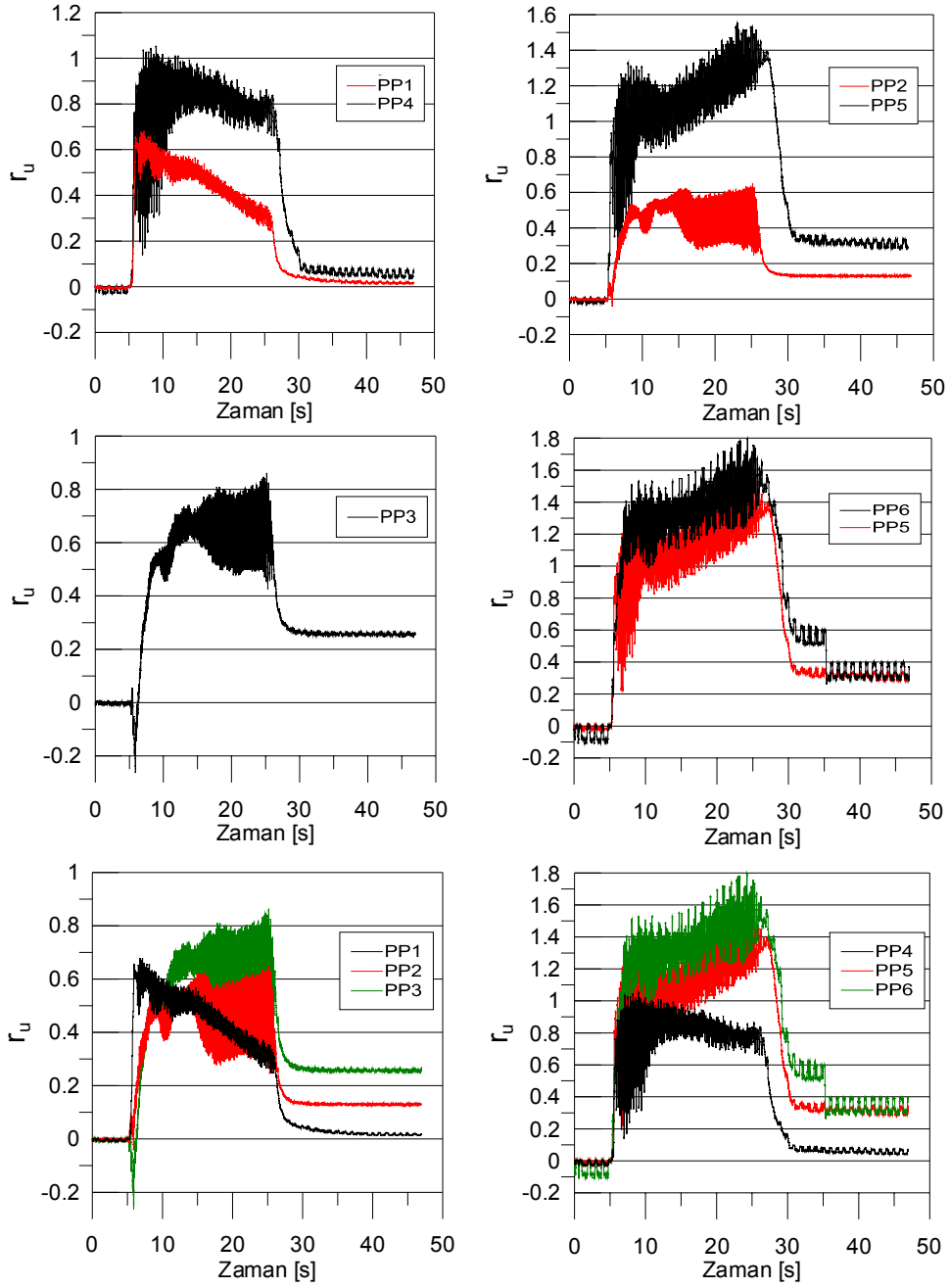
Şekil 5.42 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 3a - filtrelenmiş)

Ölçülen boşluk suyu basınçlarının, dalgakıran altında, kum tabakası taban seviyesinde 5.20 kPa, kum tabaka orta seviyesinde 3.50 kPa, ve kum tabaka yüzeyine yakın noktada 3.10 kPa seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.43). Topuk altında taban seviyesinde 3.50 kPa, topuk altı tabaka ortasında 2.0 kPa, açıklıkta tabaka ortasında ise 2.50 kPa seviyelerinde boşluksuyu basınçları ölçülmüştür (Şekil 5.43).



Şekil 5.43 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 3a)

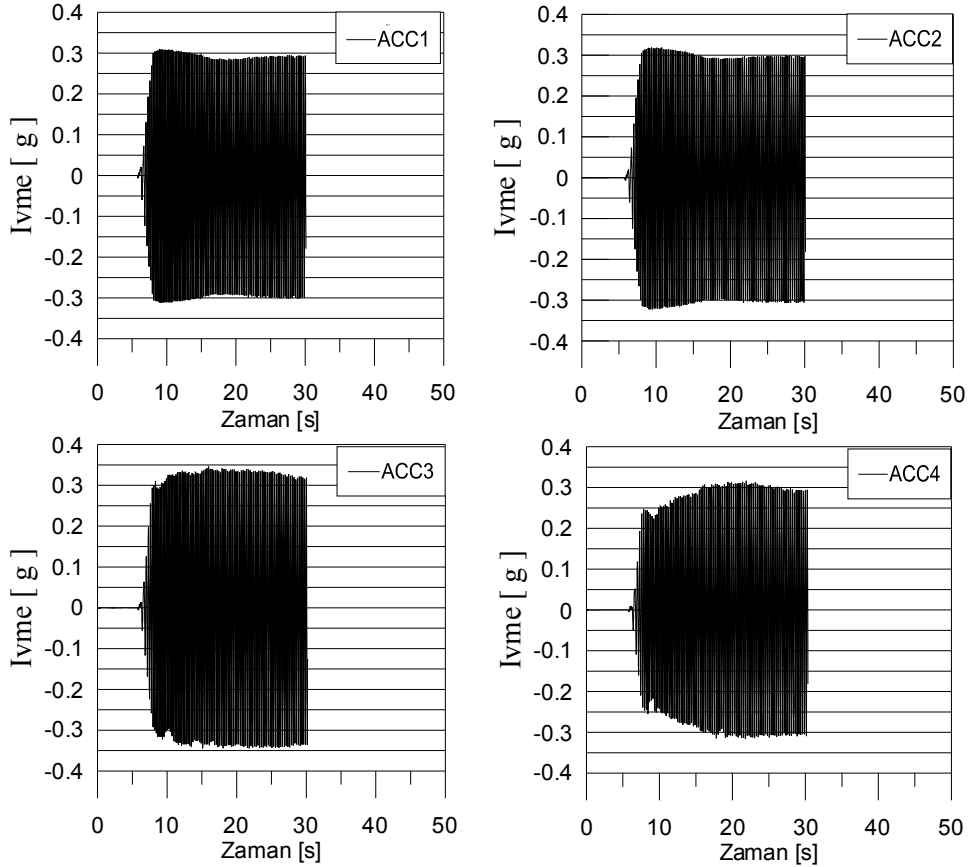
Maksimum boşluksuyu basıncı oranları ( $r_u$ ) dalgakıran altında, taban seviyesinde, tabaka ortasında ve yüzeyde sırasıyla 0.70, 0.60 ve 0.80 seviyelerinde olmuştur. Dalgakıran altında  $r_u$  oranları zamanla azalırken tabaka ortası ve tabaka yüzeyinde ise zamanla artış eğilimi gözlenmiştir. Topuk altında hesaplanan maksimum  $r_u$  değerlerinin ise tabanda 1.0 seviyesinden başlayarak 0.80 seviyesine düştüğü, tabaka ortasında ise zamanla 1.20 seviyesinden başlayarak deney sonunda 1.50 seviyesine yükseldiği, açıklıkta tabaka ortasında ise 1.30 - 1.60 seviyelerine ulaştığı görülmektedir(Şekil 5.44).



Şekil 5.44  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 3a)

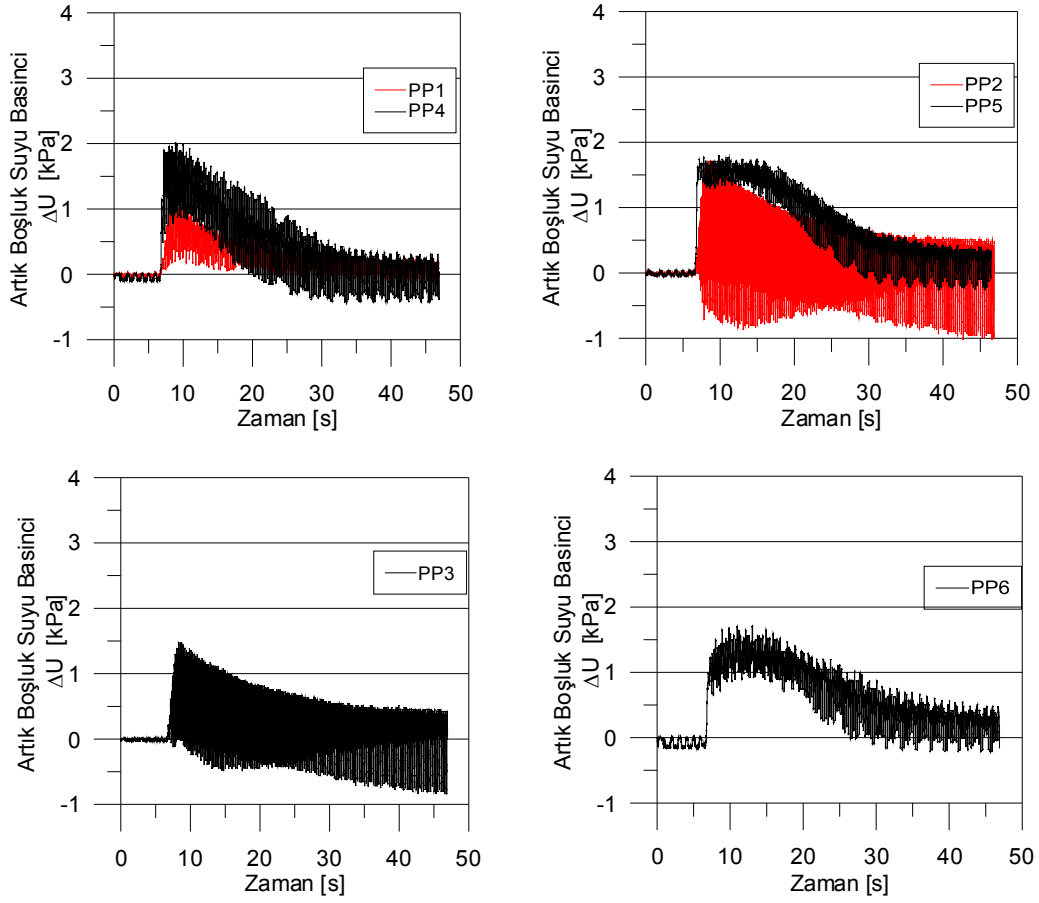


**Deney 3b:** Çevrimli yükleme etkisi altında deformasyona uğramış dalgakıran kesiti onarılıarak 40cm yüksekliğine getirildikten sonra 20 saniyelik tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Tabanda uygulanan çevrimsel hareketin büyüklüğü 0.29g seviyelerinde ölçülmüştür(Şekil 5.45). Dalgakıran temelinde ölçülen ivme büyüklüğünün 0.30g seviyelerinde, dalgakıran kretinde ölçülen ivme değerinin 0.34g büyüklüğünde, dalgakıran şevinde ise 0.31g seviyelerinde olduğu görülmektedir.



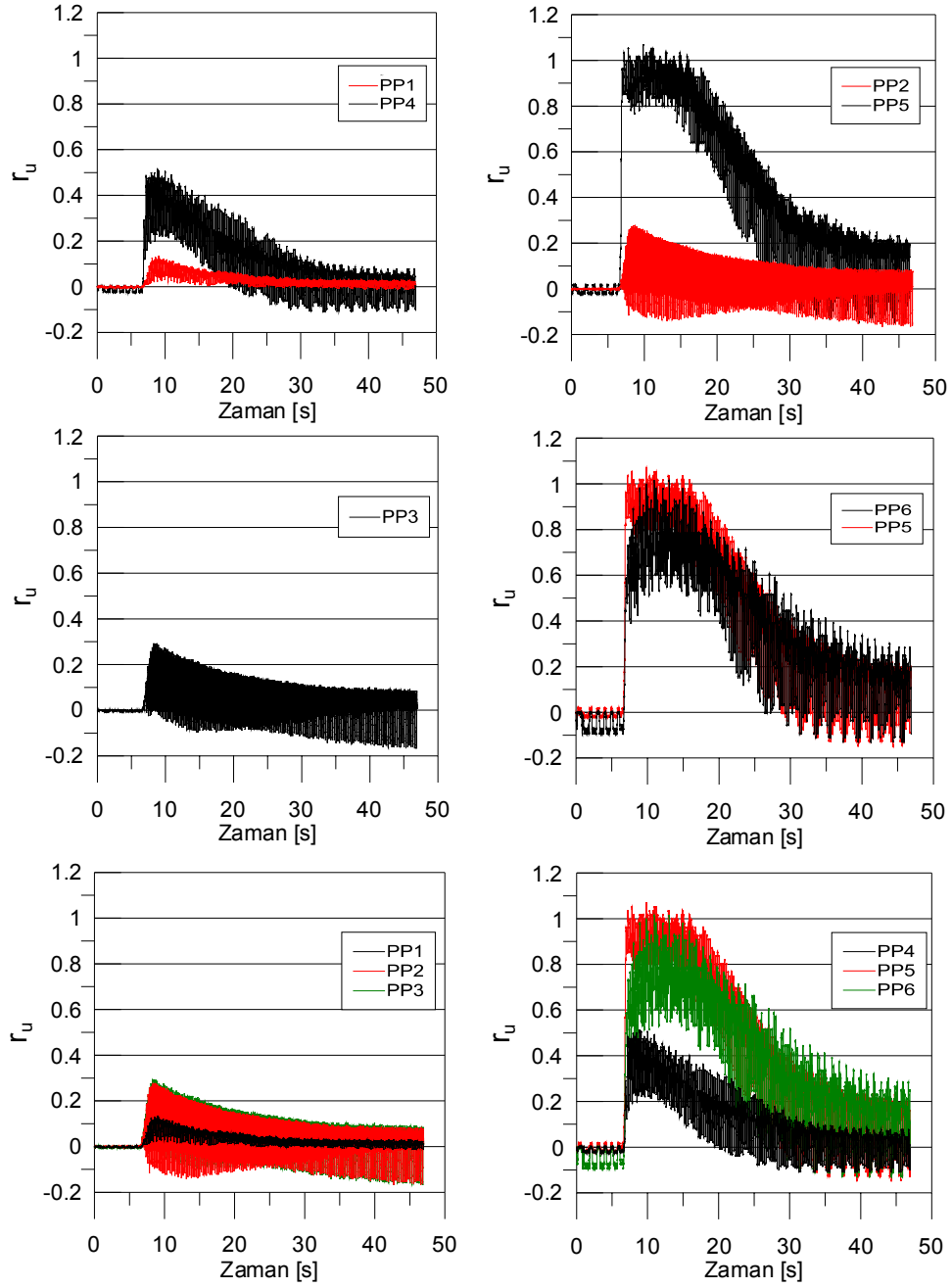
Şekil 5.45 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 3b- filtrelenmiş)

Ölçülen boşluk suyu basınçlarının, dalgakıran altında, kum tabakası taban seviyesinde 1.50 kPa, kum tabaka orta seviyesinde 1.60 kPa, ve kum tabaka yüzeyine yakın noktada ise 1.50 kPa seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.46). Topuk altında ve açıklıkta kum tabakasında alınan ölçümlere incelendiğinde, topuk altında taban seviyesinde 2.0 kPa, topuk altı tabaka ortasında 1.90 kPa, topuk altı tabaka ortasında 1.60 ve açıklıkta tabaka ortasında ise 1.80 kPa seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.46).



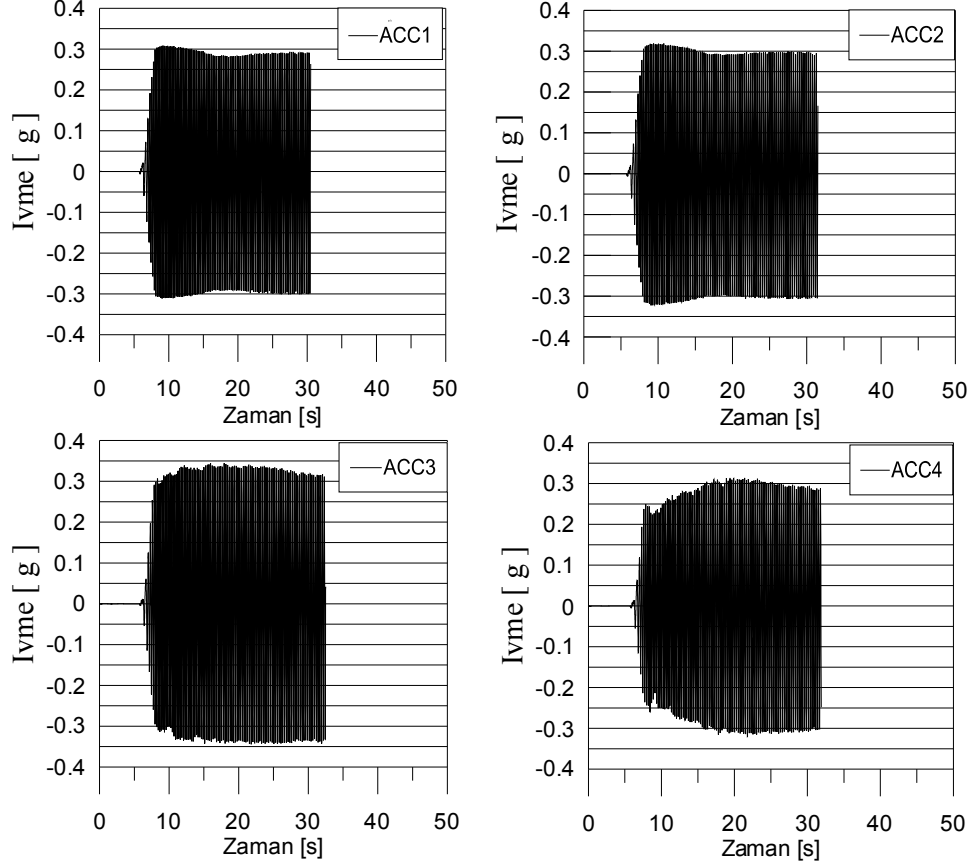
Şekil 5.46 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney- 3b)

Maksimum boşluksuyu basıncı oranları incelendiğinde, dalgakıran orta kesiti altında temel tabakası içinde oldukça düşük  $r_u$  oranları elde edildiği görülmektedir. Dalgakıran altında,  $r_u$  değerlerinin taban seviyesinde 0.15, tabaka ortasında ve yüzeyde ise 0.25 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Topuk altında hesaplanan maksimum  $r_u$  değerlerinin ise tabanda 0.45, tabaka ortasında ise 0.95 seviyelerinde olduğu, açıklıkta tabaka ortasında hesaplanan boşluksuyu basıncı oranının ise 0.90 seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.47).



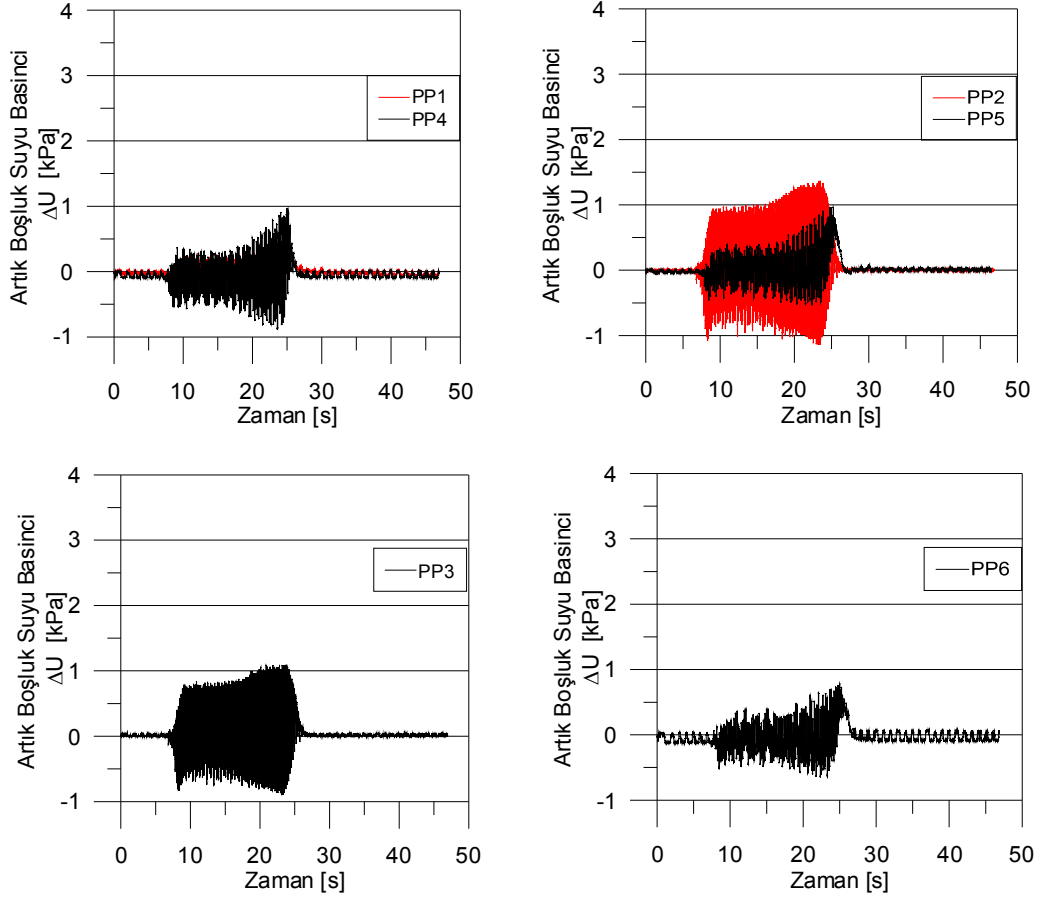
Şekil 5.47  $r_u$  - zaman grafiği (deney- 3b )

**Deney 3c:** Daha önce uygulanan deney sonunda deformasyona uğramış dalgakıran kesiti onarılmadan yeniden 20 saniyelik tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır(K Durumu). Tabanda uygulanan çevrimsel hareketin büyüklüğü 0.30g seviyelerinde ölçülmüştür(Şekil 5.48). Kum tabaka üzerinde ölçülen ivme büyüklüğü 0.34g seviyelerinde, dalgakıran kretinde ölçülen ivme değeri 0.25- 0.30g büyüklüğünde, dalgakıran şevinde ise 0.31g seviyelerinde ölçüldüğü görülmektedir.



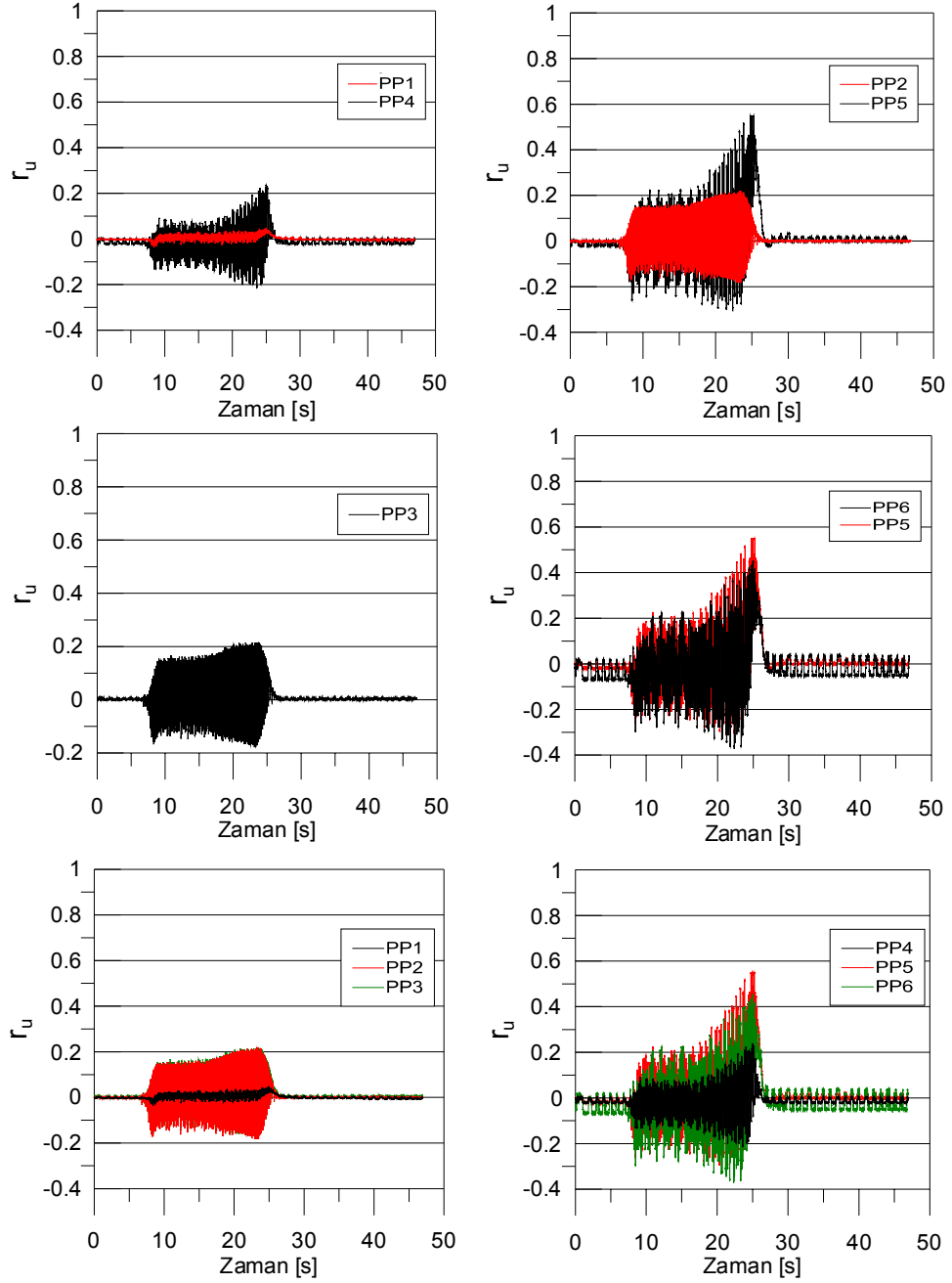
Şekil 5.48 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 3c - filtrelenmiş)

Dalgakıran altında kum tabakasında ölçülen maksimum boşluksuyu basınçlarının, taban seviyesinde, tabaka ortasında ve yüzeyde 1.0 kPa seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.49). Topuk altında ve açıklıkta alınan ölçümlerde de boşluk suyu basınçlarının 0.80 - 1.0 kPa seviyelerine ulaştığı görülmektedir(Şekil 5.49).



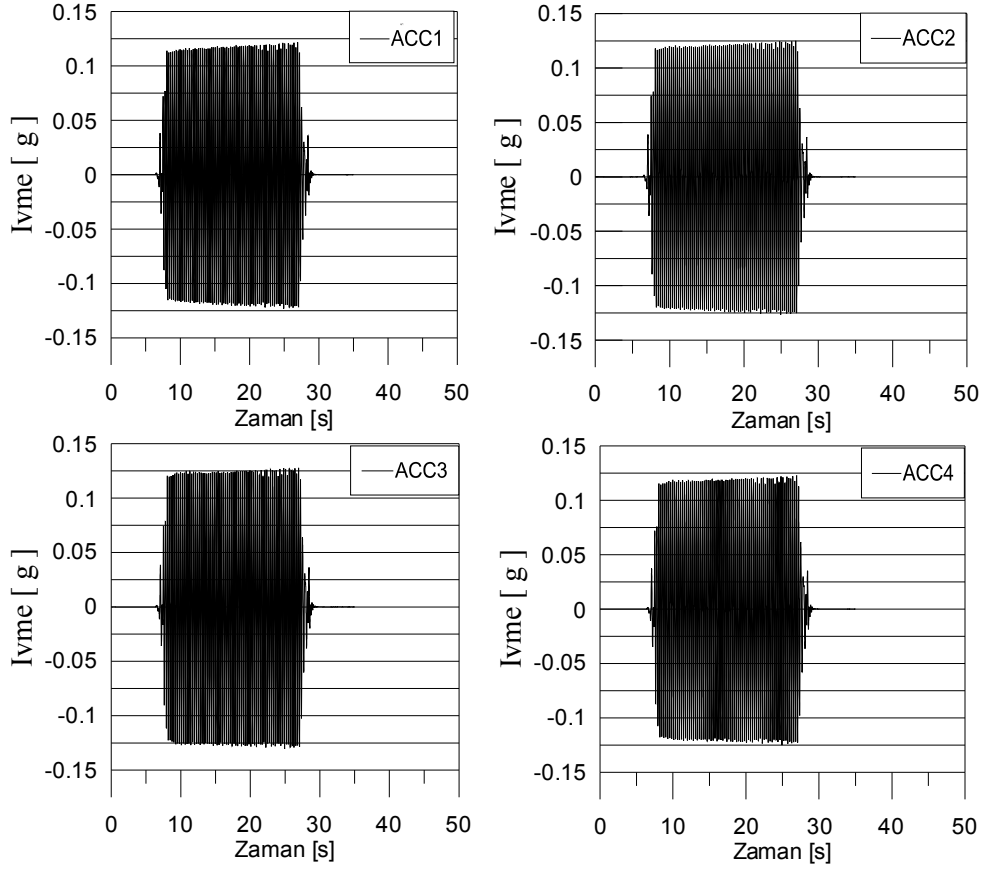
Şekil 5.49 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney -3c)

Maksimum boşluksuyu basıncı oranlarının dalgakıran orta kesiti altında 0.10-0.20 seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.50). Topuk altında  $r_u$  değerleri tabanda 0.25, tabaka ortasında ve açıklıkta 0.50 değerlerine ulaşmıştır.(Şekil 5.50).



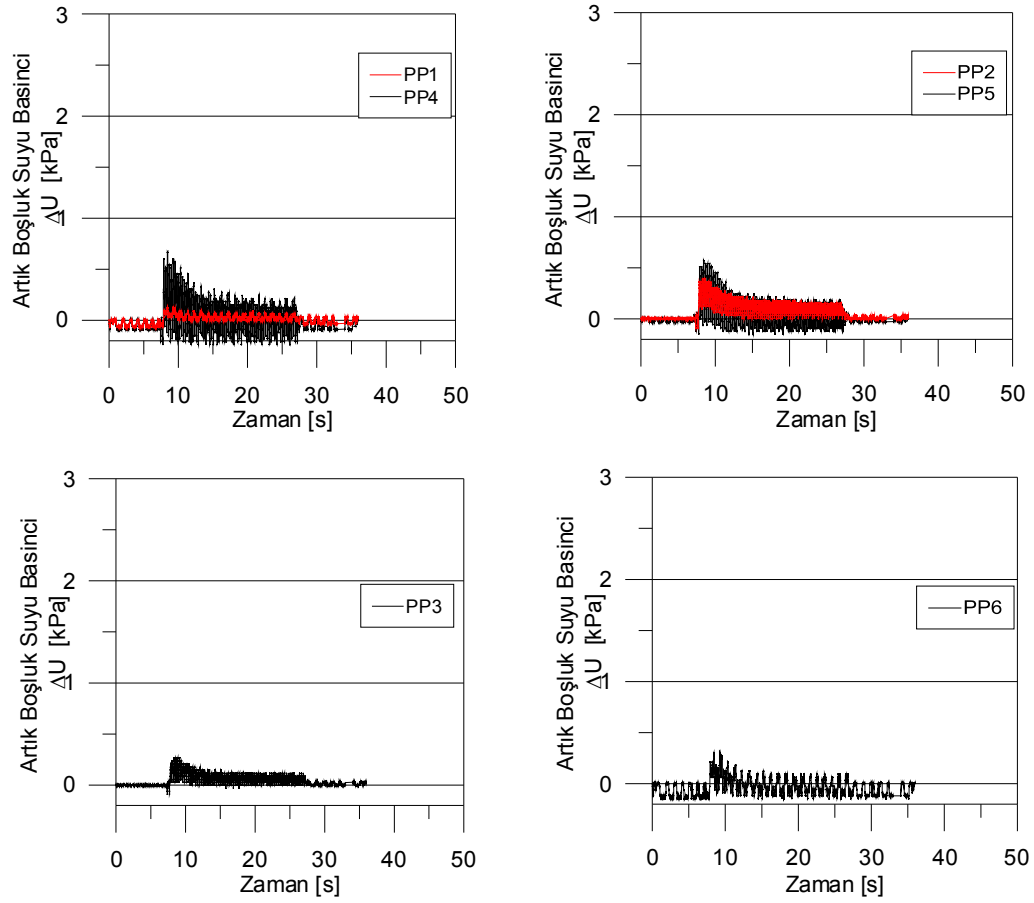
Şekil 5.50  $r_u$  - zaman grafiği (deney-3c )

**Deney 4:** Dalgakıran kesitinin düşük şiddette sarsıntılar etkisinde dinamik davranışını incelemek için 40cm kalınlığında %40 rölatif sıklığa sahip kum tabaka üzerine 40cm yüksekliğinde dalgakıran kesiti oluşturularak 20 saniye süresince tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Tabanda uygulanan çevrimsel hareketin büyüklüğü 0.11 g seviyelerinde ölçülmüştür(Şekil 5.51). Dalgakıran temelinde kum tabaka üzerinde ölçülen maksimum ivme büyüklüğü 0.12g, dalgakıran kretinde maksimum ivmenin 0.11g, dalgakıran şevinde ise 0.12g seviyelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.51 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 4 - filtrelenmiş)

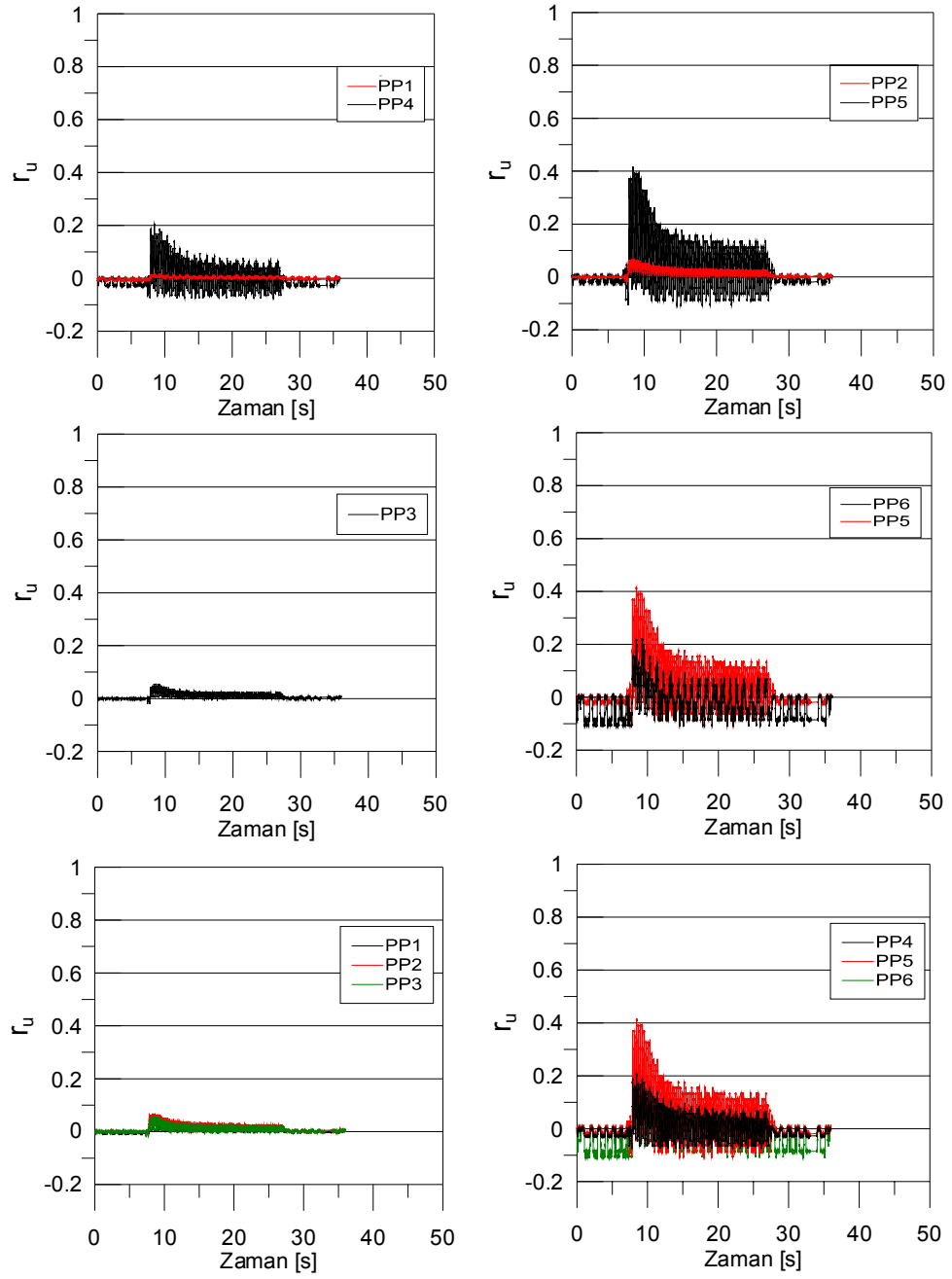
Uygulanan tekrarlı gerilmenin şiddeti küçük olduğundan ölçülen boşluksuyu basınçlarının büyüklüğü de düşük olmuştur. Ölçülen artık boşluksuyu basınçlarının dalgakıran altında 0.10-0.30 kPa seviyelerinde, topuk altında ise 0.20-0.50 kPa seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.52).



Şekil 5.52 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney-4)

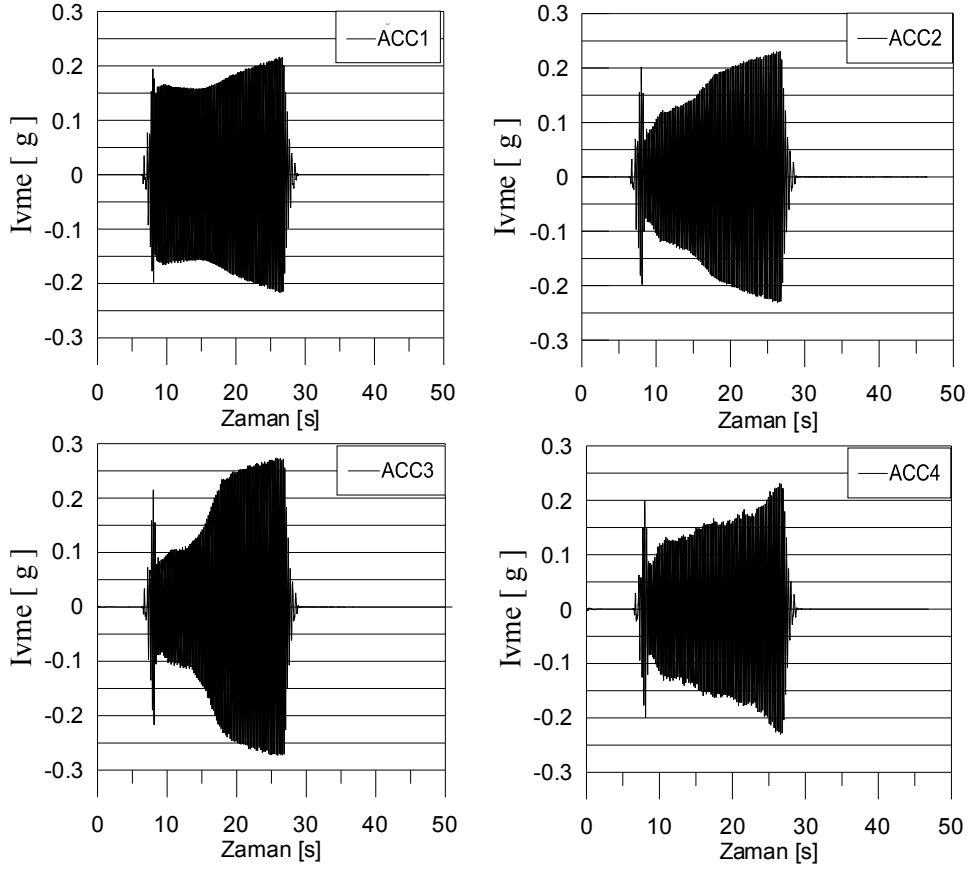
Benzer şekilde, düşük ivme büyüklüğü sebebiyle hesaplanan boşluksuyu basıncı oranlarının da düşük seviyede olduğu, dalgakıran altında 0-0.10 seviyelerinde, topuk altında ve açıklıkta 0.20-0.40 seviyelerinde olduğu görülmektedir (Şekil 5.53).





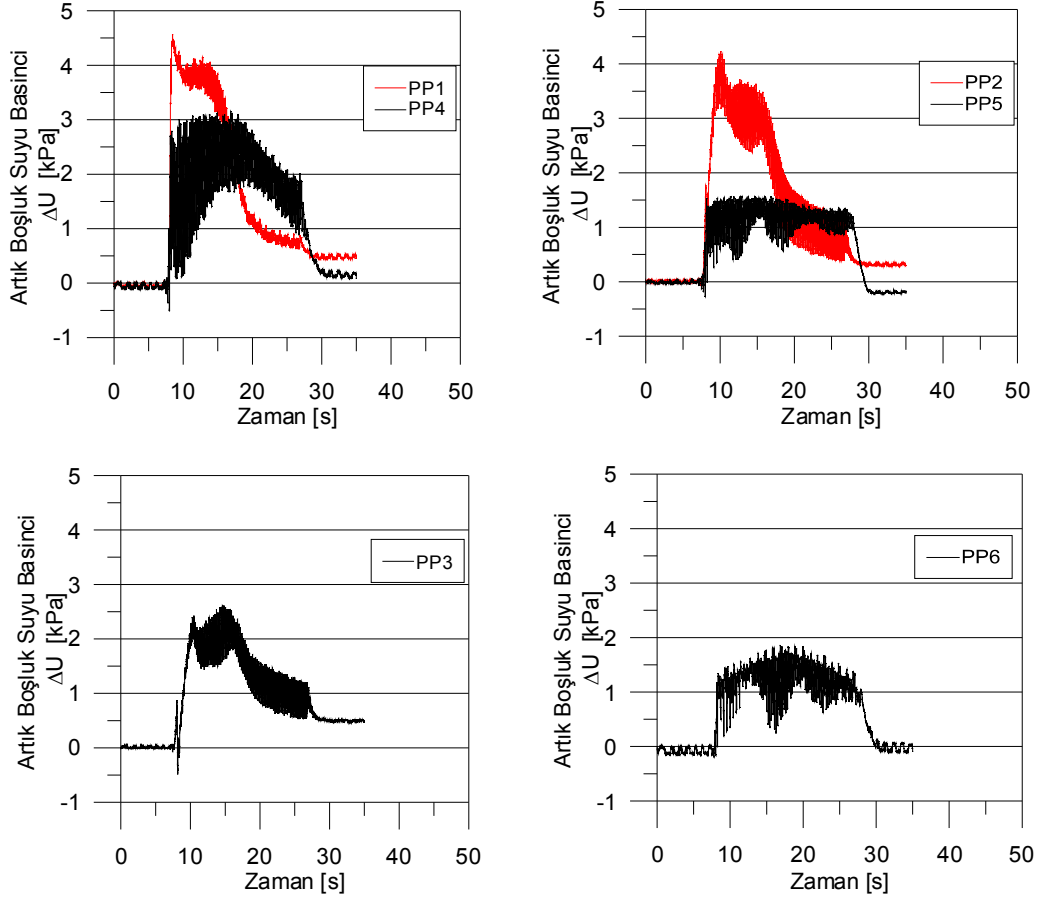
Şekil 5.53  $r_u$  - zaman grafiği (deney- 4)

**Deney 5a:** Düşük şiddette sarsıntı etkisinde dalgakıranın temelini oluşturan kum tabakasında ölçülen artık boşluksuyu basınçlarının çok küçük olması sebebiyle, aynı dalgakıran kesitine tabanda uygulanan ivme büyüklüğü artırılarak yeniden 20saniyelik çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Tabanda uygulanan çevrimsel hareketin büyüklüğü 0.17g-0.21g seviyelerinde ölçülmüştür(Şekil 5.54). Dalgakıran temelinde kum tabaka üzerinde ölçülen maksimum ivme büyüklüğü 10 saniye sonunda 0.22g seviyelerine ulaşmıştır. Dalgakıran kretinde ölçülen maksimum ivme 0.27g, dalgakıran şevinde ise 0.22g seviyelerinde olmuştur.



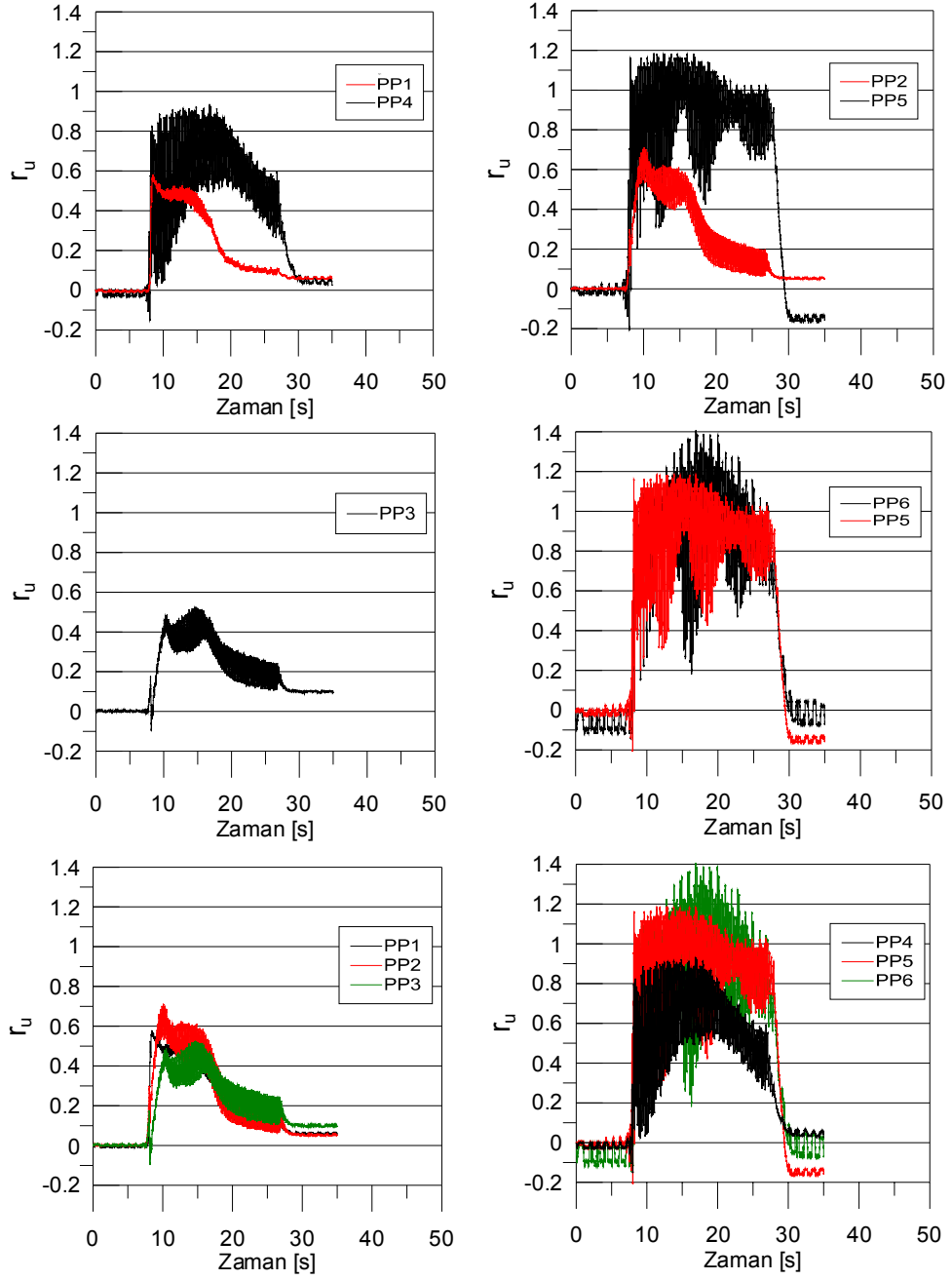
Şekil 5.54 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 5a - filtelenmiş)

Ölçülen artık boşluksuyu basınçlarının dalgakıran altında, tabanda 4.0 kPa seviyelerinde, tabaka ortasında 3.50kPa ve yüzeyde ise 2.50 kPa seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.55). Boşluk suyu basıncı artışları topuk altında taban seviyesinde 3.0kPa, tabaka ortasında 1.50 kPa seviyelerinde ölçülürken, açıklıkta tabaka ortasında ise 1.70 kPa olmuştur.



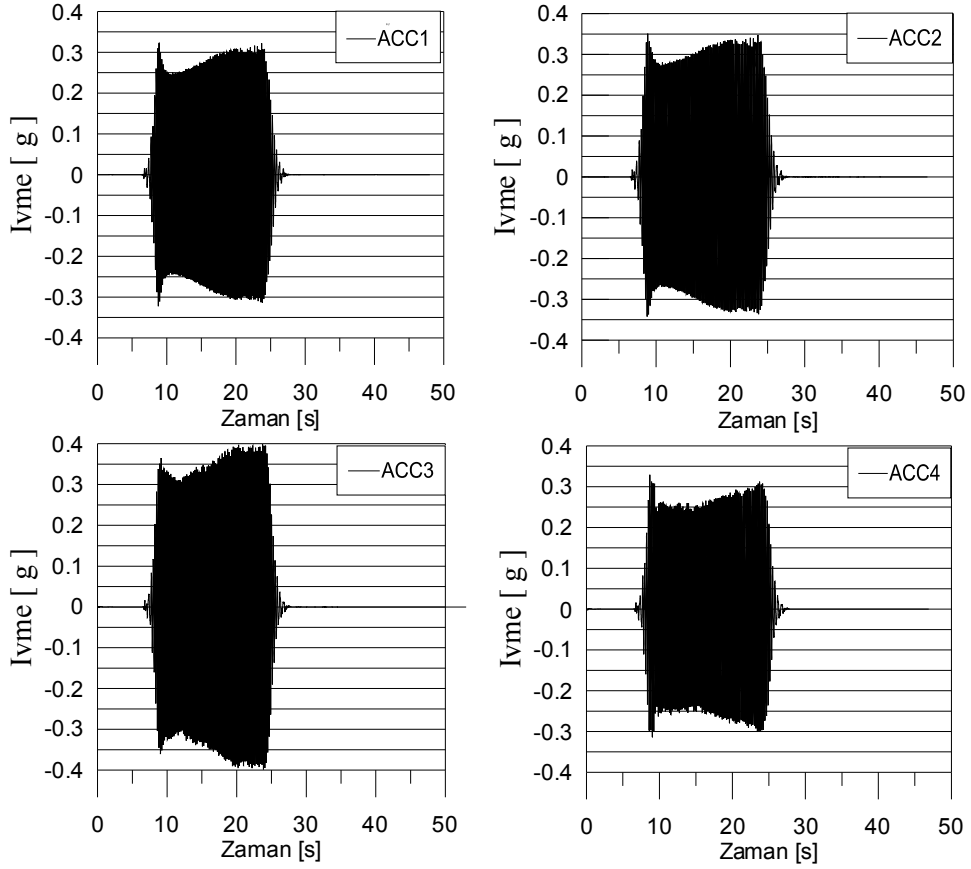
Şekil 5.55 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney -5a)

Boşluksuyu basıncı oranları dalgakıran altında tabanda 0.50, tabaka ortasında 0.60 seviyelerine ulaşırken, yüzeyde ise 5 saniye gecikmeli olarak 0.50 seviyelerine arttığı görülmektedir(Şekil 5.56). Topuk altında tabanda boşluksuyu basıncı oranının, çevrimli yüklemenin başlangıcıyla birlikte 0.90 seviyesine ulaştığı, tabaka ortasında 1.15 ve açıklıkta ise 10 saniye gecikmeli olarak 1.25 seviyelerine ulaştığı görülmektedir.



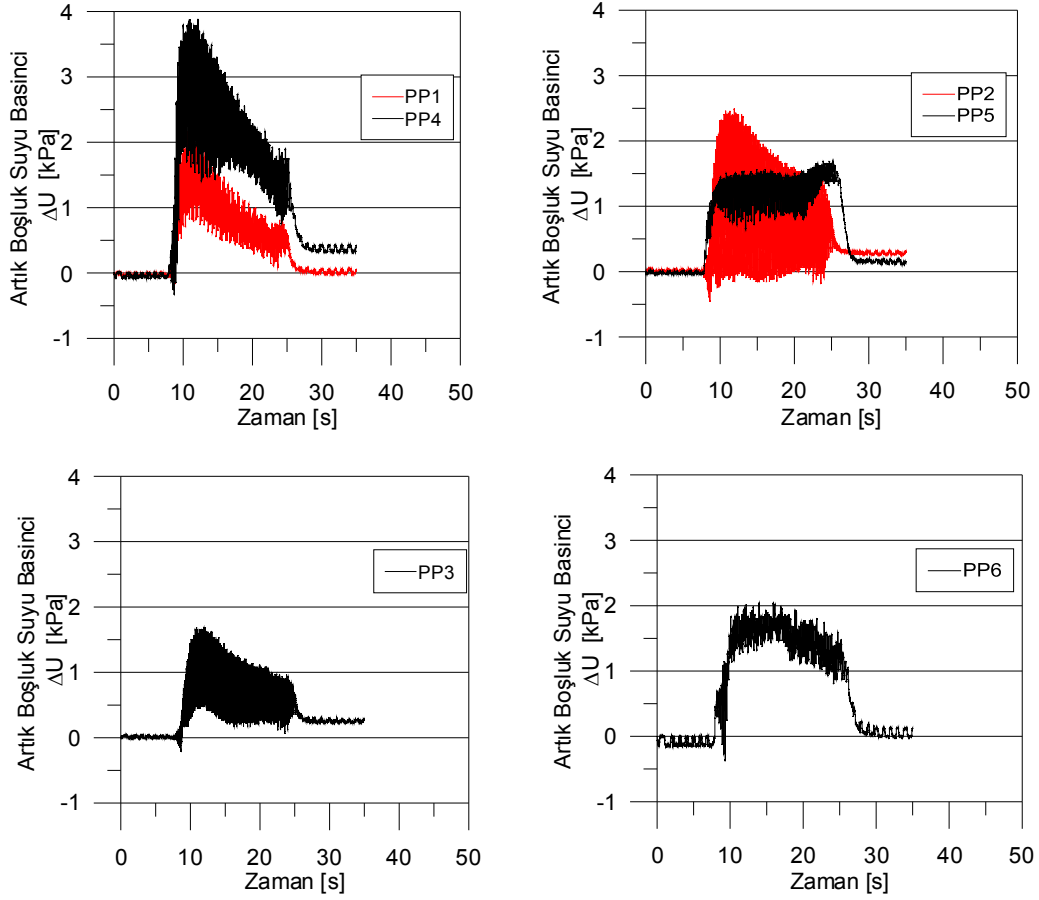
Şekil 5.56  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 5a )

**Deney 5b:** Uygulanan tekrarlı yükleme sonunda deforme olmuş dalgakıran kesiti onarılarak dalgakıran yüksekliği 40cm'ye çıkarılmış, ve ivme büyüklüğü arttırılarak yeniden 20 saniyelik çevrimli hareket uygulanmıştır. Tabanda uygulanan çevrimsel hareketin büyüklüğü 0.25g-0.30g seviyelerinde ölçülmüştür(Şekil 5.57). Dalgakıran temelini oluşturan kum tabakası üzerinde ölçülen maksimum ivme büyüklüğü 0.26g-0.32g seviyelerine ulaşmıştır. Dalgakıran kretinde ölçülen maksimum ivme 0.27g-0.39g olurken, dalgakıran şevinde ise 0.28g seviyelerinden başlayarak 10 saniye sonunda 0.33g değerine artış gösterdiği gözlenmiştir.



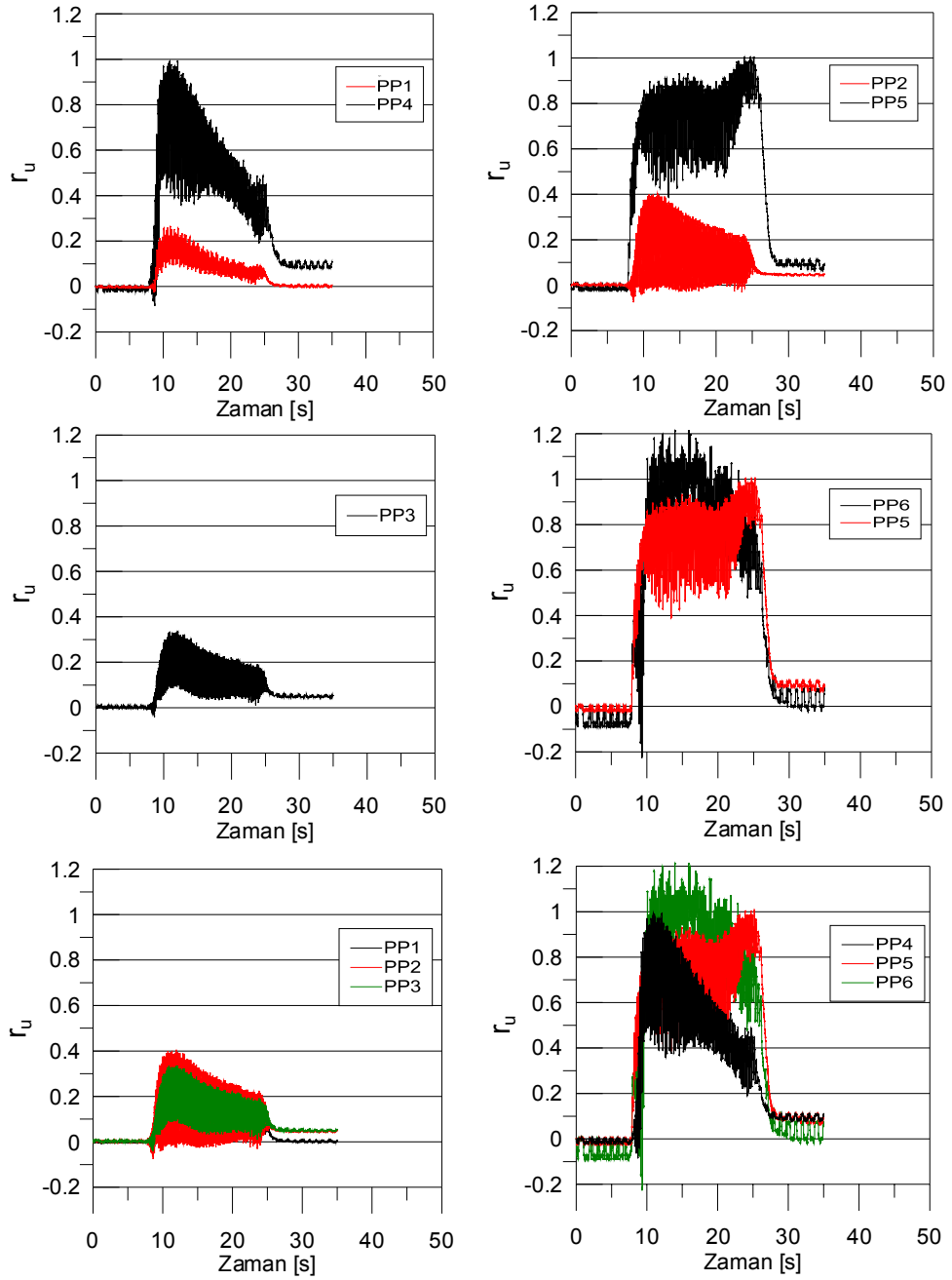
Şekil 5.57 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 5b - filtrelenmiş)

Ölçülen artık boşluksuyu basınçlarının maksimum değerlerinin (Şekil 5.58), dalgakıran altında kum temel tabanında 1.50 kPa, tabaka ortasında 2.30 kPa ve yüzeyde ise 1.70 kPa seviyelerinde olduğu görülmektedir. Topuk altında taban seviyesinde 3.80 kPa, tabaka ortasında 1.50 kPa ve açıklıkta tabaka ortasında ise 1.80 kPa seviyelerinde boşluk suyu basıncı artışları ölçülmüştür.



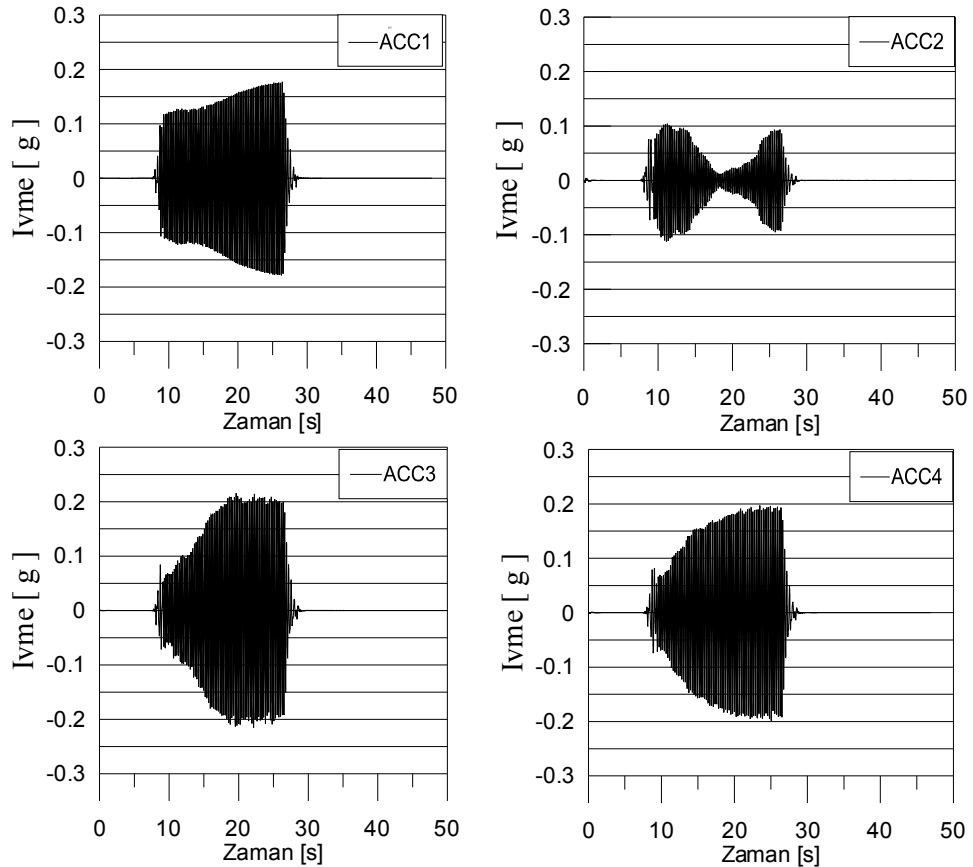
Şekil 5.58 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 5b)

Boşluksuyu basıncı oranlarının dalgakıran altında tabanda 5 saniye içerisinde 0.25 seviyelerine yükseldiği, tabaka ortasında 0.40, yüzeyde ise 0.30 seviyelerine ulaştığı ve zamanla azaldığı görülmektedir(Şekil 5.59). Topuk altında tabanda boşluksuyu basıncı oranının 0.90 seviyesine ulaşarak zamanla azaldığı, tabaka ortasında 0.90 ve açıklıkta ise 1.0 seviyelerine ulaşarak sarsıntı süresi boyunca aynı seviyelerde kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.59  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 5b )

**Deney 6a:** Sıvılaşılabilen kum tabaka üzerine yerleştirilen dalgakıran kesitinin dinamik yükleme altındaki davranışını iyileştirmek ve kum temel tabakası içerisinde oluşan artık boşluksuyu basıncının sönümlenmesini incelemek amacı ile kum temel içerisine 45cm aralıklarla prefabrik düşey dren(PVD) ler yerleştirilmiştir. PVD'ler tank tabanına ve yanlarına geçici sabitleme yöntemiyle sabitlendikten sonra üzerine yağmurlama yöntemiyle %40 rölatif sıklıkta kum temel hazırlanmış, kum temel tabakası üzerine 40cm yüksekliğinde dalgakıran kesiti yerleştirilmiştir. Hazırlanan kesite tabanda 20 saniye süre ile 0.12g-0.17g büyüklüğünde çevrimli hareket uygulanmıştır (Şekil 5.60). Dalgakıran tabanında ölçülen maksimum ivme büyüklüğü 0.10g seviyelerine ulaşip önce azalmış ve sonra tekrar artmıştır. Kayıt sırasında konumu değişmiş olabileceği düşünülmektedir. Dalgakıran kretinde ölçülen maksimum ivme 0.05g seviyelerinden başlayarak 12 saniye sonunda artarak 0.20g seviyelerine ulaşmıştır. Dalgakıran şevinde ise 0.05g-0.19g seviyelerinde ivme oluştuğu görülmektedir.

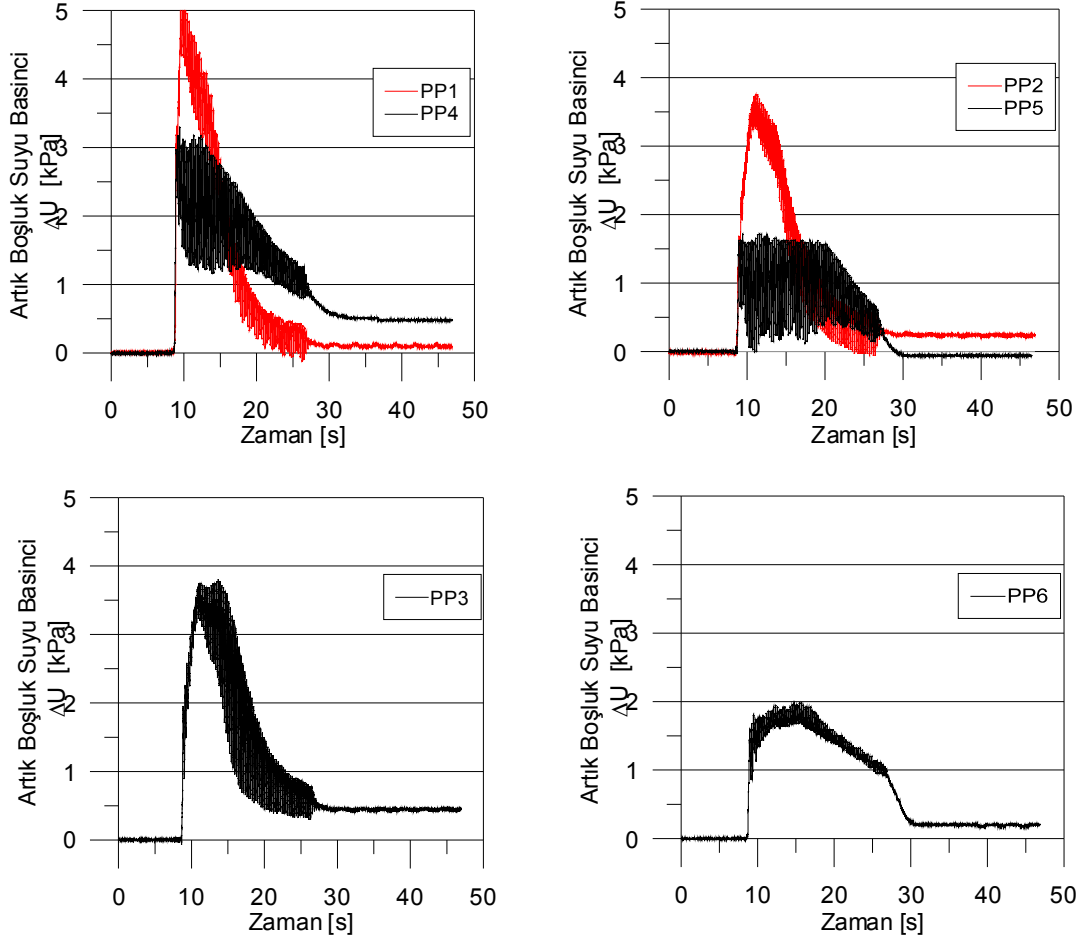


Şekil 5.60 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6a - filtrelenmiş)

Artık boşluksuyu basınçlarının (Şekil 5.61), dalgakıran altında kum temel tabanında 5.0 kPa seviyelerinde, tabaka ortasında ve yüzeyde 3.80 kPa seviyelerinde ölçüldüğü görülmektedir.

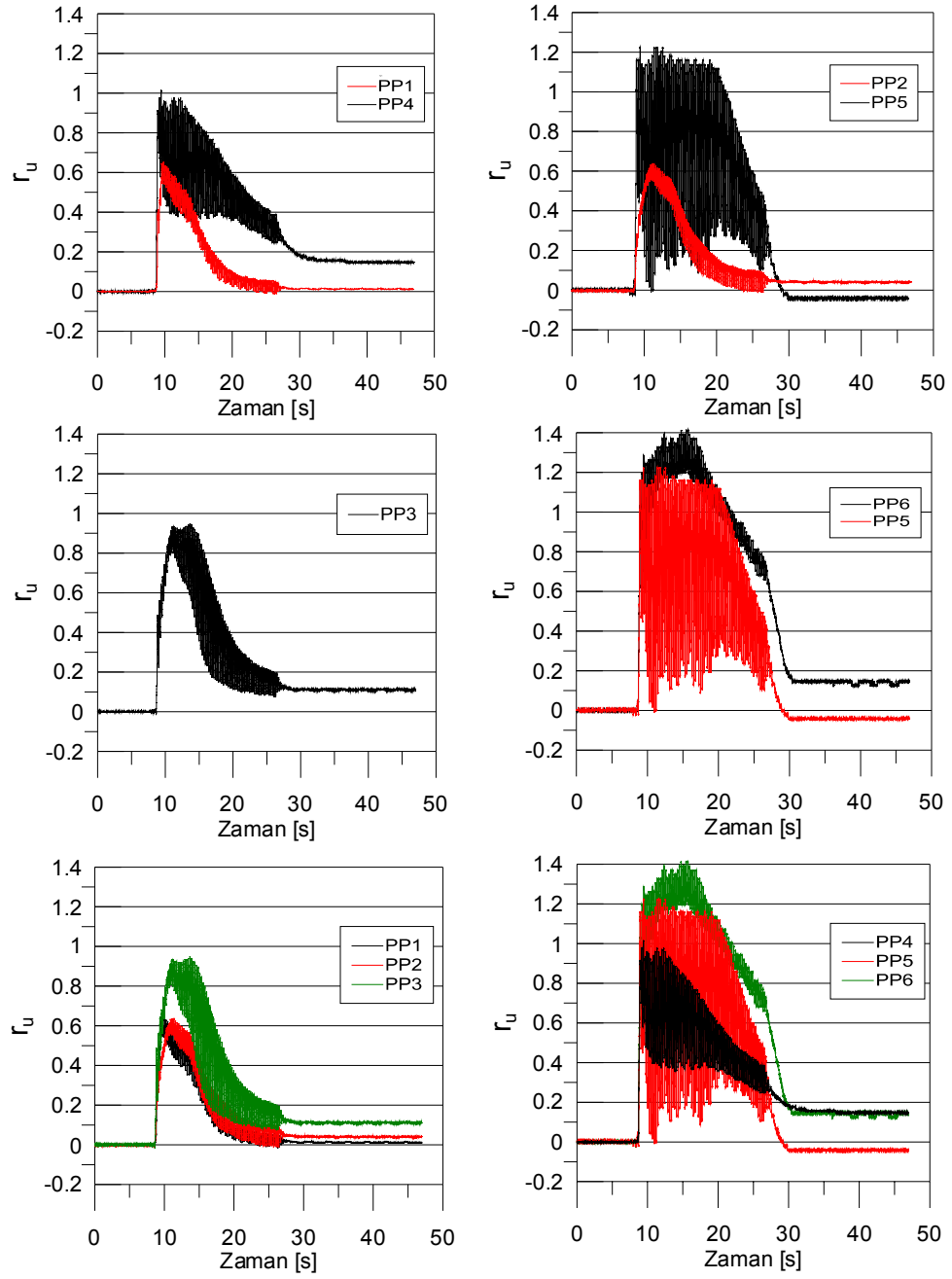


Topuk altında taban seviyesinde ölçülen artık boşluksuyu basıncı 3.0 kPa ve tabaka ortasında 1.60 kPa iken açıklıkta tabaka ortasında 1.90 kPa seviyelerinde ölçülmüştür.



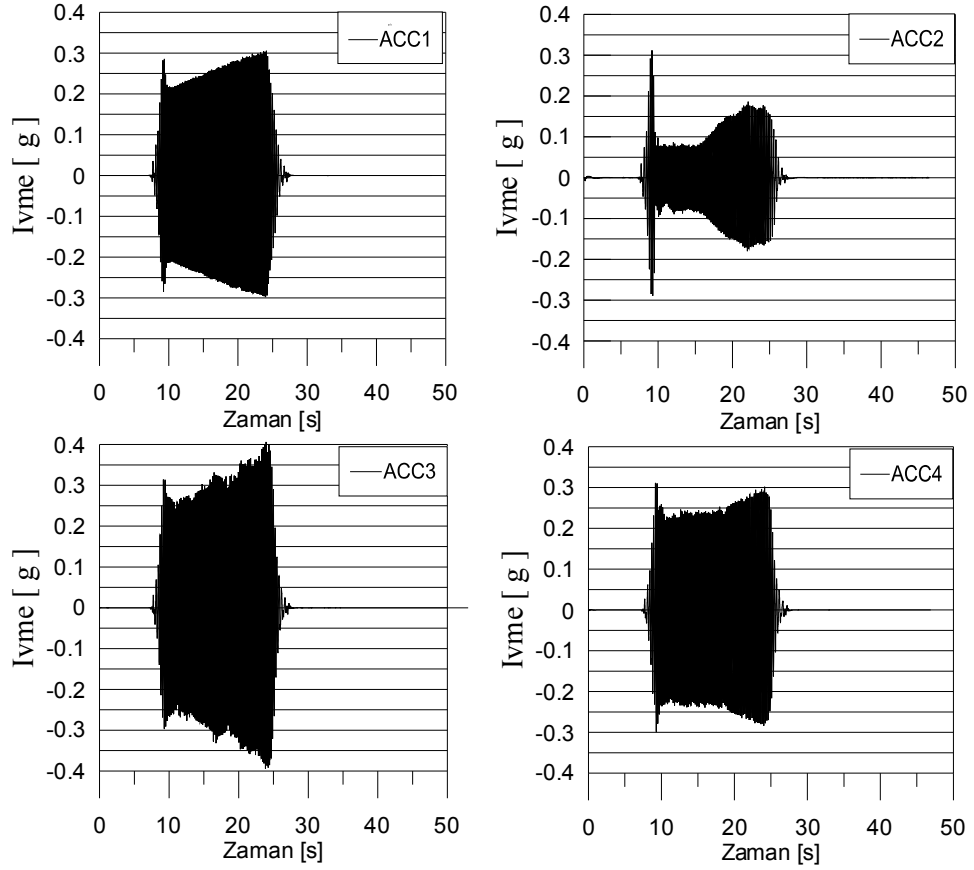
Şekil 5.61 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 6a)

Dalgakıran altında tabanda boşluksuyu basıncı oranının 0.60, tabaka ortasında 0.65 ve yüzeyde 0.90 seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.62). Topuk altında boşluksuyu basıncı oranının tabanda 0.90 ve tabaka ortasında 1.10 seviyesinde iken açıklıkta 1.30 seviyelerinde olduğu görülmektedir.



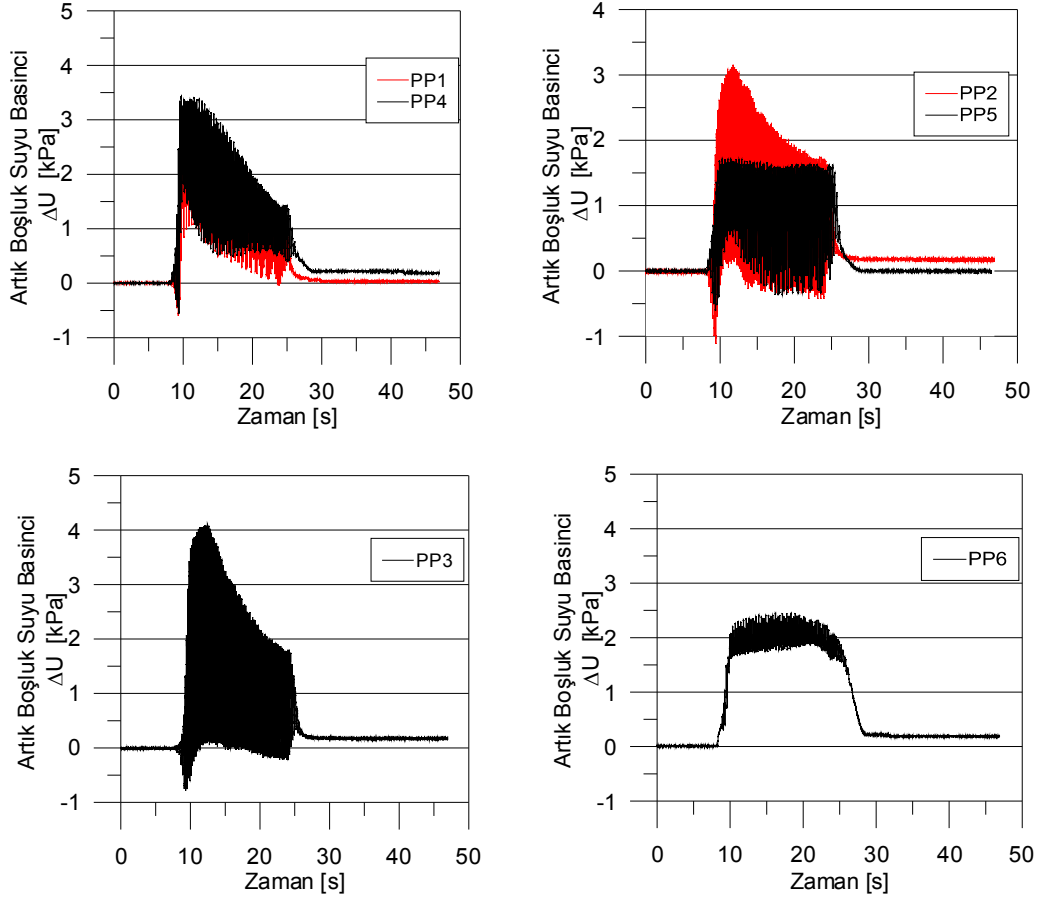
Şekil 5.62  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 6a)

**Deney 6b:** Uygulanan çevrimli yükleme etkisinde deforme olmuş kesit onarılarak dalgakıran yüksekliği 40cm çıkarıldıktan sonra, tekrar 20 saniye süre ile 0.22g-0.29g büyüklüğünde çevrimli hareket uygulanmıştır (Şekil 5.63). Dalgakıran temelinde ölçülen maksimum ivme büyüklüğü 0.15g iken, dalgakıran kretinde ölçülen maksimum ivme 0.27g seviyelerinden başlayarak 20 saniye sonunda 0.39g seviyelerine ulaşmıştır. Dalgakıran şevinde ölçülen ivme ise 0.23g-0.30g seviyelerindedir.



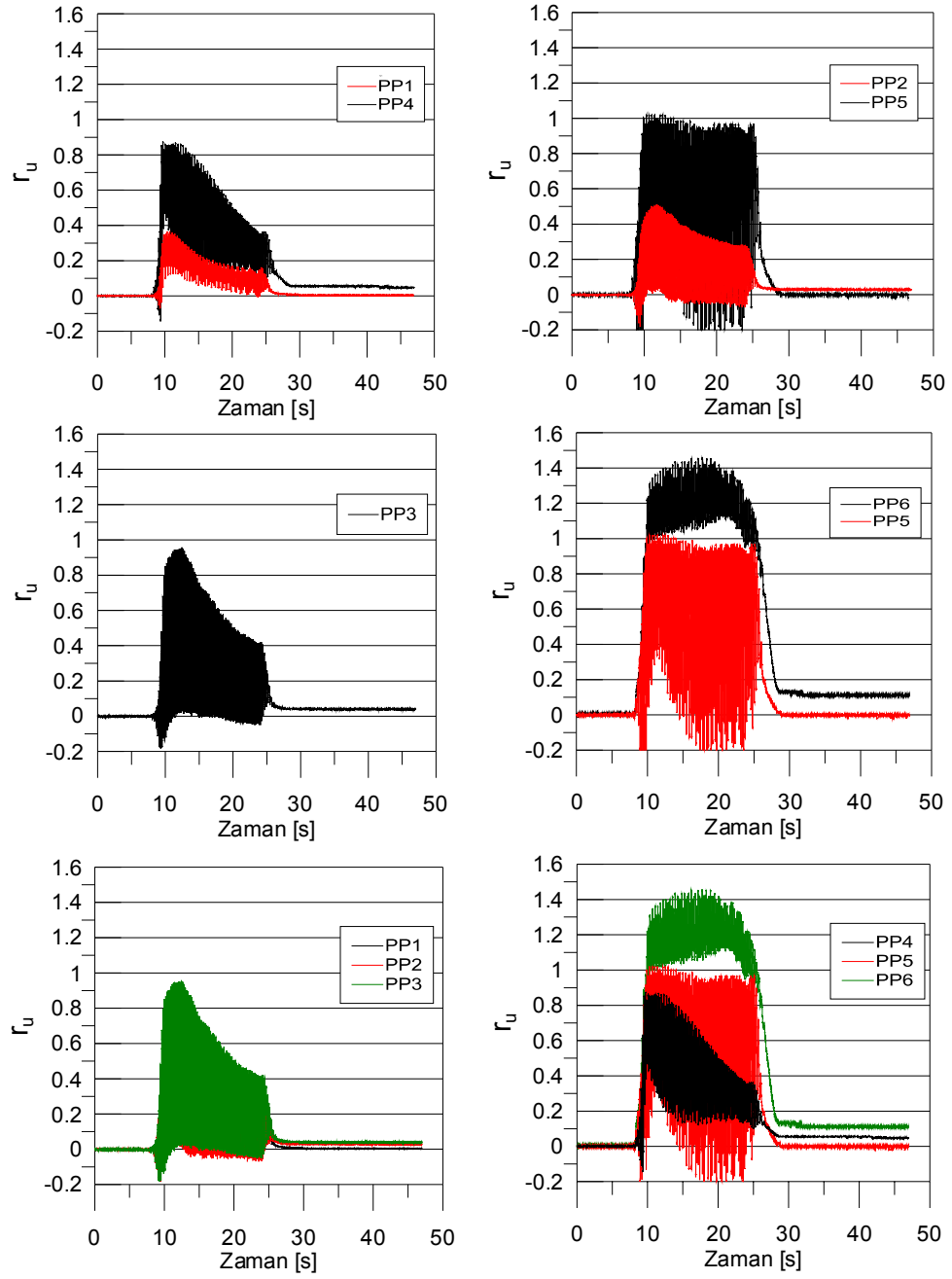
Şekil 5.63 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6b - filtrelenmiş)

Dalgakıran altında kum temel tabanında 3.50 kPa, tabaka ortasında 3.0 kPa ve yüzeyde 4.0 kPa seviyelerinde artık boşluk suyu basınçları ölçülmüştür (Şekil 5.64). 5. saniyeden sonra zamanla boşluk suyu basınçlarının azaldığı görülmektedir. Topuk altında taban seviyesinde 3.50 kPa ve tabaka ortasında 1.60 kPa maksimum boşluk suyu basıncı artışları ölçülmüş, uygulanan tekrarlı gerilmenin 5. saniyesinden sonra azalmaya başlamıştır. Açık alanda kum tabaka ortasında ölçülen maksimum 2.40 kPa boşluk suyu basıncının yükleme süresi sonuna kadar sabit kaldığı gözlenmiştir.



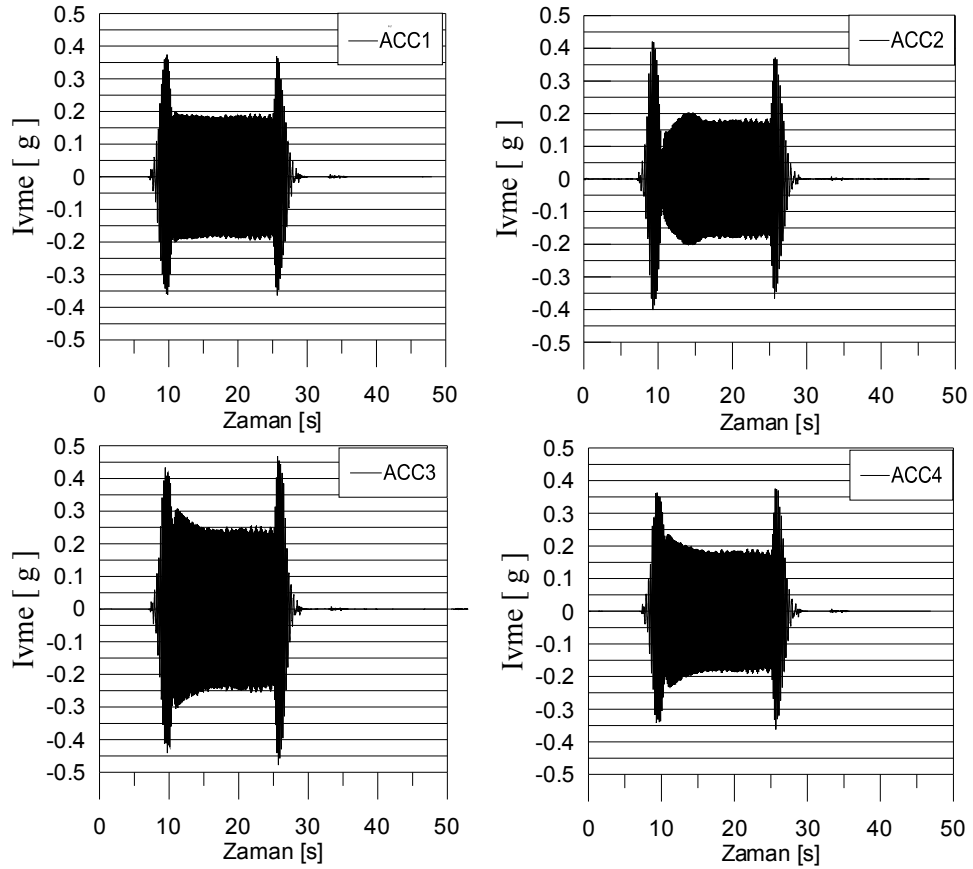
Şekil 5.64 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney – 6b)

Maksimum boşluk basıncı oranlarının (Şekil 5.65) dalgakıran altında tabanda 0.40, tabaka ortasında 0.50 ve yüzeyde 0.90 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Topuk altında tabanda 0.85, tabaka ortasında 0.95 ve açıklıkta ise 1.30 seviyesinde maksimum boşluk suyu basıncı oranlarına ulaşıldığı gözlenmektedir.



Şekil 5.65  $r_u$  - zaman grafiği (deney – 6b )

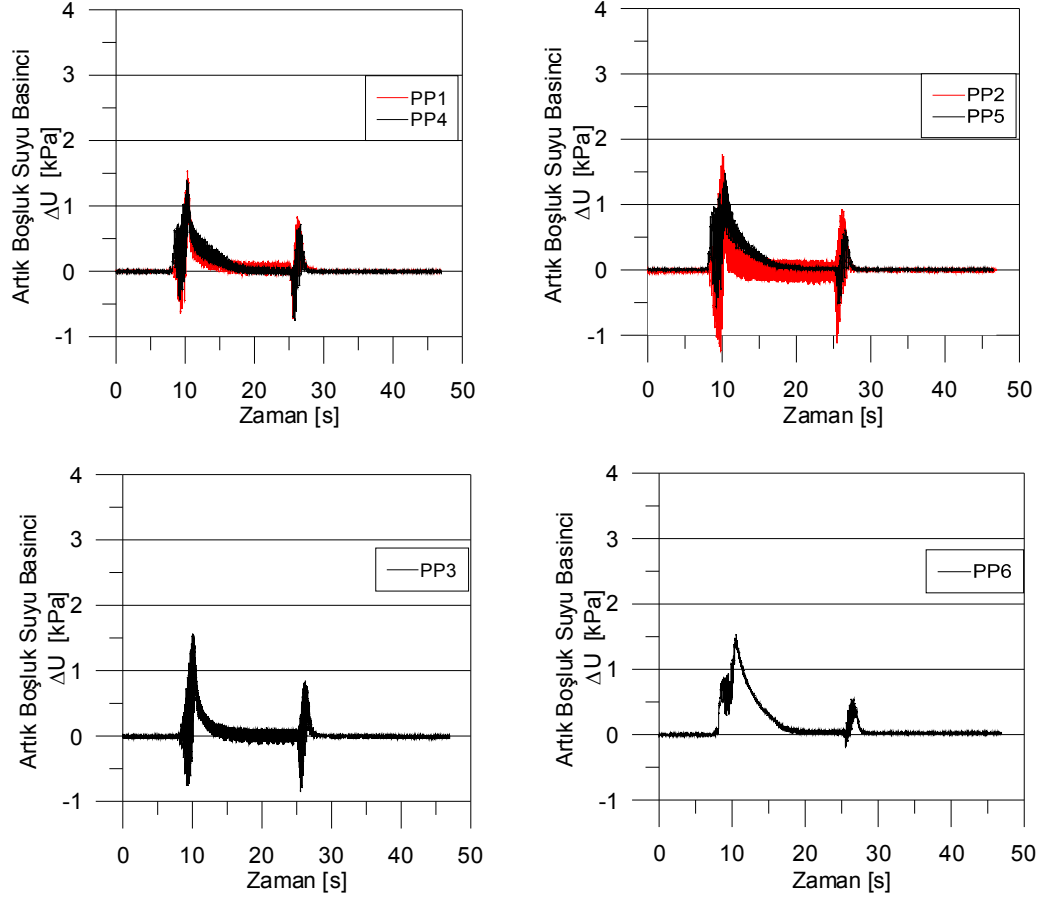
**Deney 6c:** Çevrimli yükleme etkisinde deforme olan kesit onarılmadan tekrar 20 saniye süre ile 0.35g büyüklüğünde çevrimli harekete tabi tutulmuştur. Ancak güç uygulama sisteminde yaşanan aksaklık nedeniyle ilk saniyelerden sonra ivme şiddetinin 0.35g'den 0.18g seviyesine düşmüş olduğu, deneyin son saniyelerinde ise tekrar 0.35g seviyesine çıktığı görülmektedir (Şekil 5.66). Dalgakıran tabanında ölçülen maksimum ivme büyüklüğü 0.39g, kretinde ise bu değer 0.43g seviyelerinde olduğu görülmektedir. Dalgakıran şevinde ise maksimum 0.35g seviyelerinde ivme kaydedilmiştir. Tabanda uygulanan çevrimli yüklemeye yaşanan düzensizlik diğer ivme kayıtlarında da gözlenmektedir.



Şekil 5.66 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6c - filtrelenmiş)

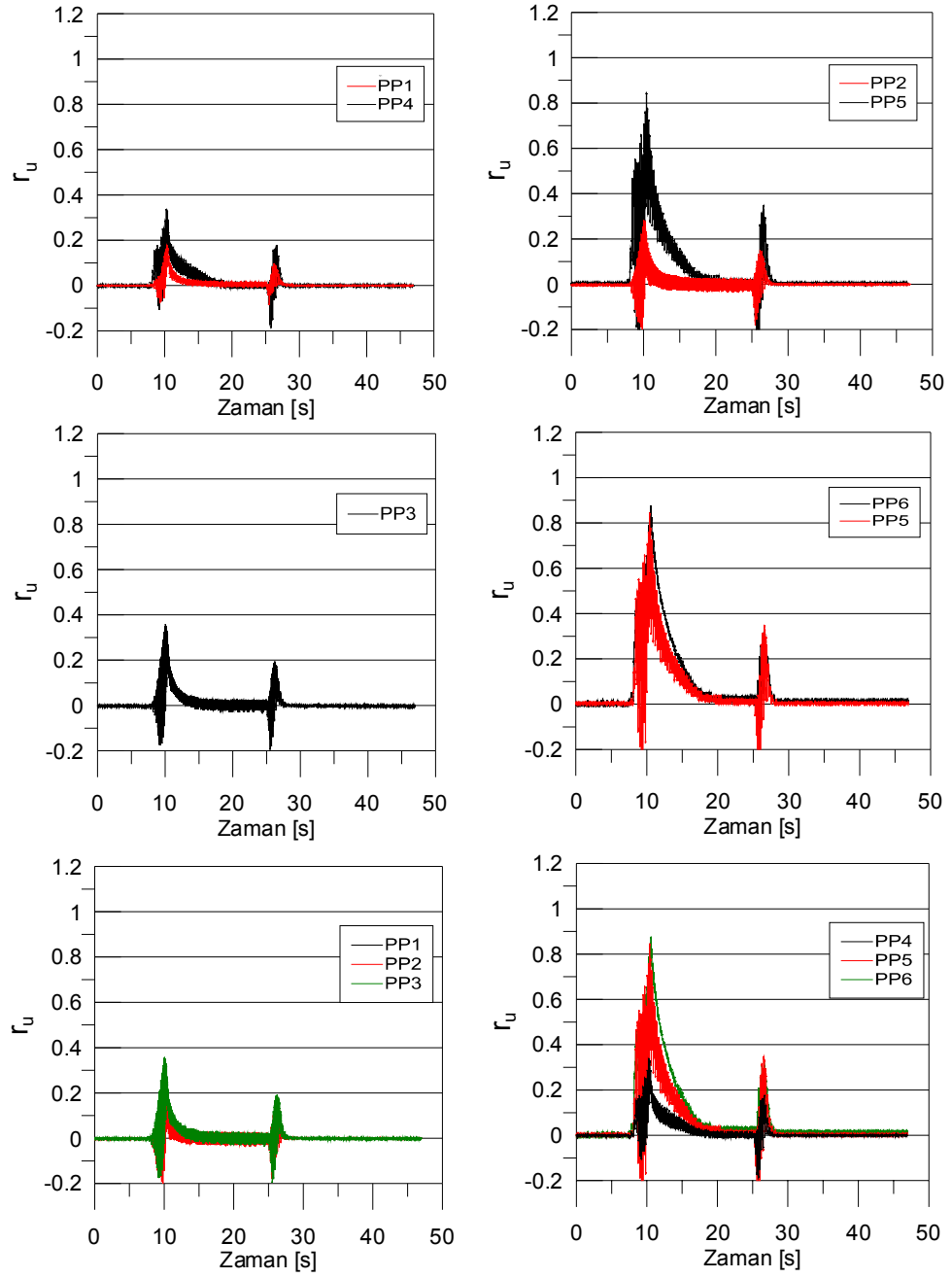
Dalgakıran altında kum temel tabanında, ortasında ve yüzeyinde 1.50 kPa seviyelerine ulaşan boşluk suyu basıncının, yüklemdeki düzensizliğe bağlı olarak önce hızla sönümlendiği, daha sonra tekrar yükselerek 0.90 kPa değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.67). Topuk altında taban seviyesinde 3.0 kPa, tabaka ortasında 1.60 kPa ve açıklıkta tabaka ortasında ise 1.90 kPa seviyelerinde maksimum boşluk suyu basıncı artışı ölçülmüştür. Elde

edilen boşluk suyu basıncı kayıtları, kum zemin içinde oluşan artış ve sönümlenmelerin yüklenme kaydı (ivme kaydı) ile paralel davranış gösterdiğine işaret etmektedir.



Şekil 5.67 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 6c)

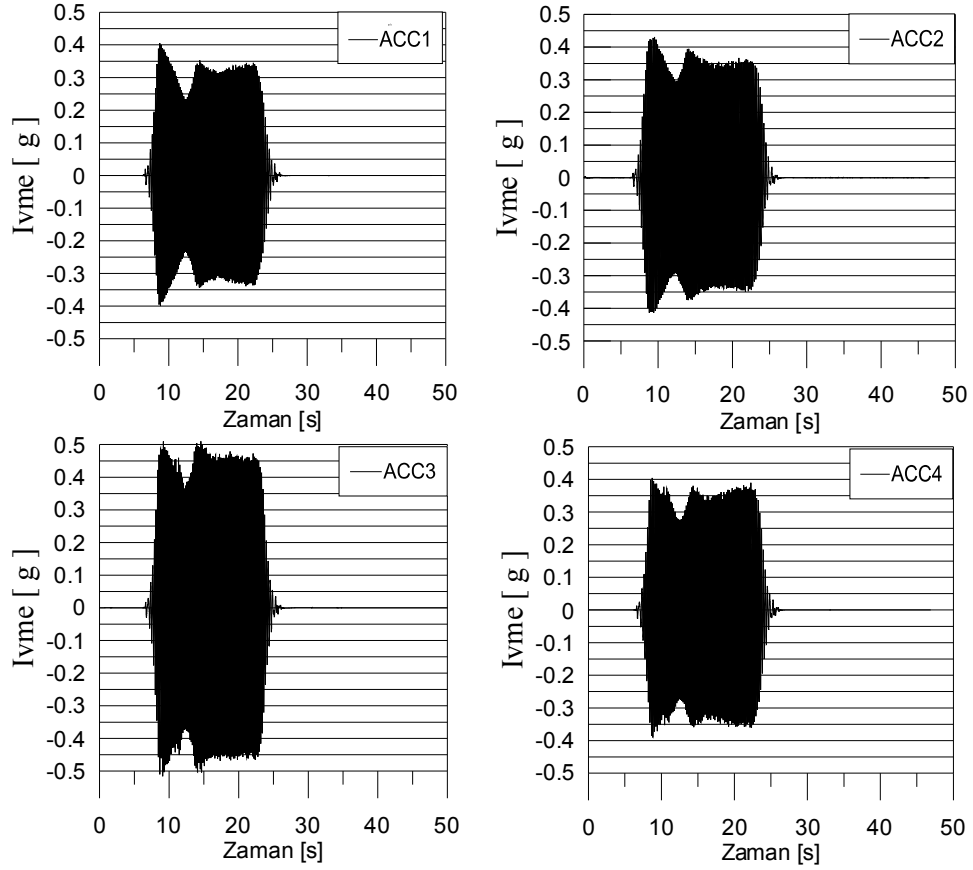
Dalgakıran altında tabanda maksimum boşluk suyu basıncı oranlarının 0.20, tabaka ortasında 0.30 ve yüzeyde 0.40 seviyelerinde olduğu görülmektedir(Şekil 5.68). Topuk altında tabanda 0.30, tabaka ortasında 0.75 ve açıklıkta ise 0.80 seviyelerinde maksimum boşluk suyu basıncı oranlarına ulaşıldığı gözlenmektedir.



Şekil 5.68  $r_u$  - zaman grafiği (deney – 6c )

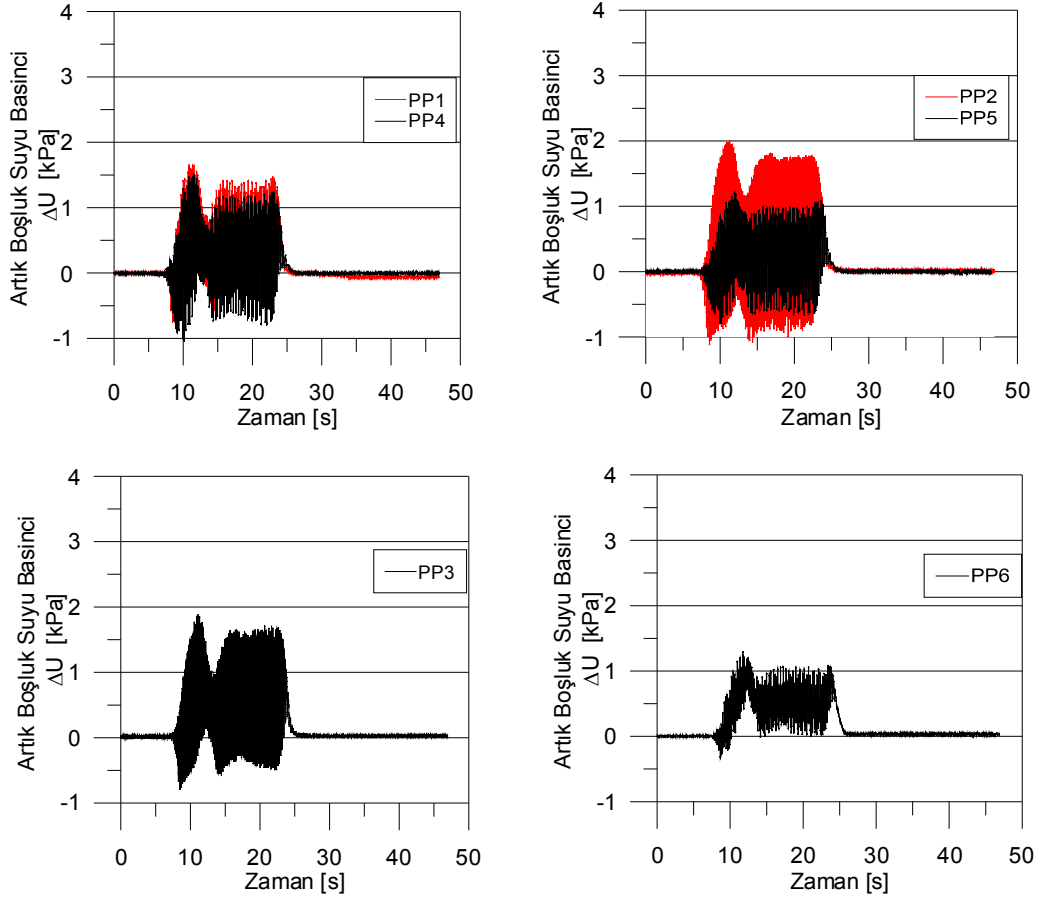


**Deney 6d:** Bir önceki deneyde uygulanmak istenen ancak güç iletim sisteminde oluşan problem nedeniyle düzenli olarak uygulanamayan sarsıntı etkisi altında deforme olan kesite onarım yapmadan yeniden tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Tabanda uygulanan 20 saniye süreli tekrarlı hareketin ivme büyüklüğü 0.40g-0.33g seviyesindedir. Dalgakıran temelinde 0.41g-0.36g, dalgakıran kretinde 0.30g-0.45g ve dalgakıran şevinde 0.36-0.41g seviyelerinde ivme büyüklükleri ölçülmüştür(Şekil 5.69).



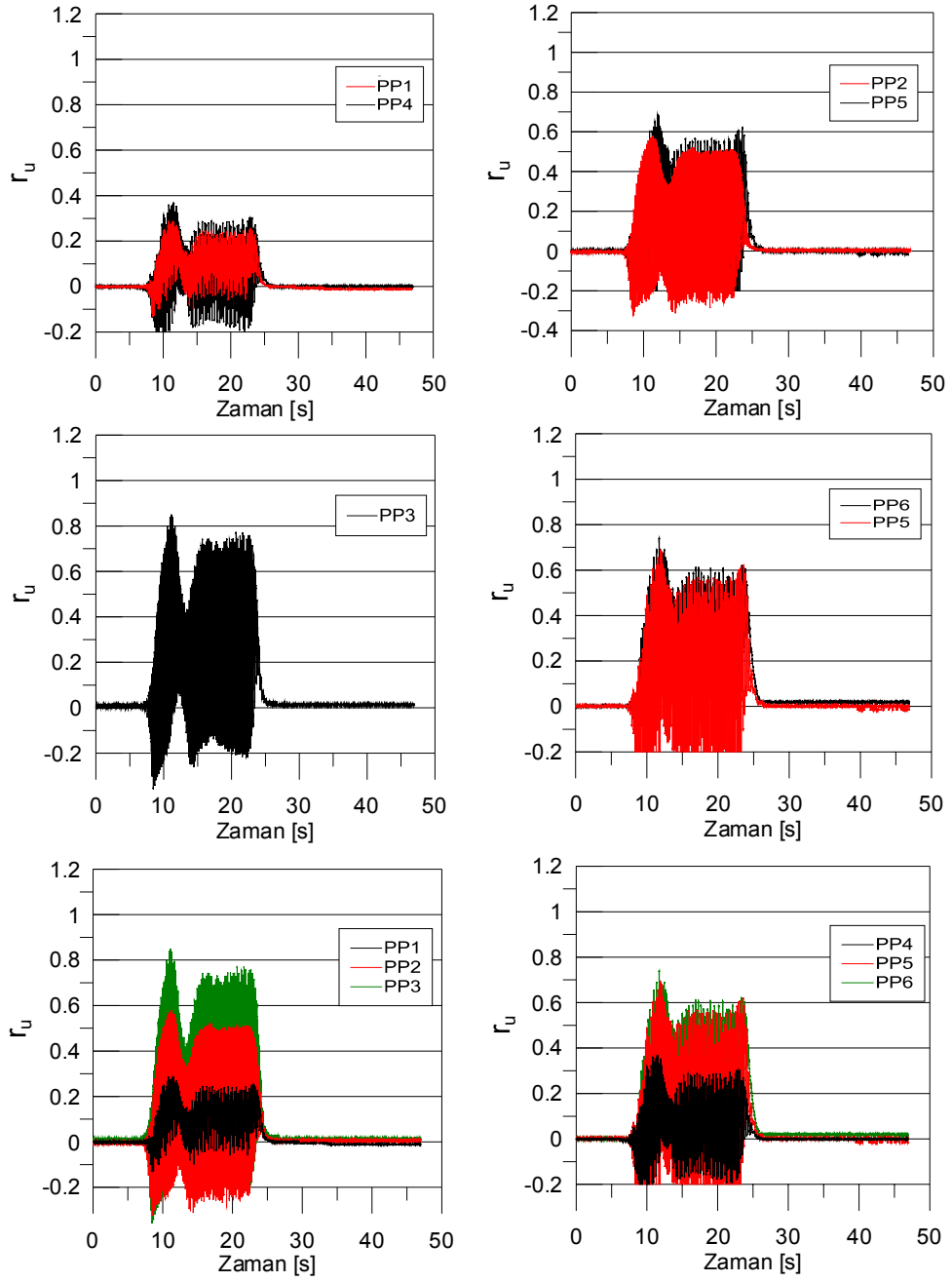
Şekil 5.69 Dalgakıran kesitinde ölçülen ivme değerleri (deney 6d - filtrelenmiş)

Dalgakıran altında kum temel tabanında 1.60 kPa, tabaka ortasında 2.0 kPa ve yüzeyde 1.80 kPa seviyelerinde maksimum boşluk suyu basıncı artışları ölçülmüştür(Şekil 5.70). Topuk altında taban seviyesinde 1.50 kPa, tabaka ortasında 1.20 kPa ve açıklıkta tabaka ortasında ise 1.10 kPa seviyelerine ulaşan boşluk suyu basıncı artışları ölçülmüştür.



Şekil 5.70 Boşluksuyu basıncı - zaman grafiği (deney - 6d)

Maksimum boşluk basıncı oranlarının ise (Şekil 5.71) dalgakıran altında tabanda 0.25, tabaka ortasında 0.55, yüzeyde ise 0.75 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Topuk altında maksimum boşluk suyu basıncı oranı tabanda 0.30, tabaka ortasında ve açıklıkta ise 0.55 seviyelerine ulaşmıştır.

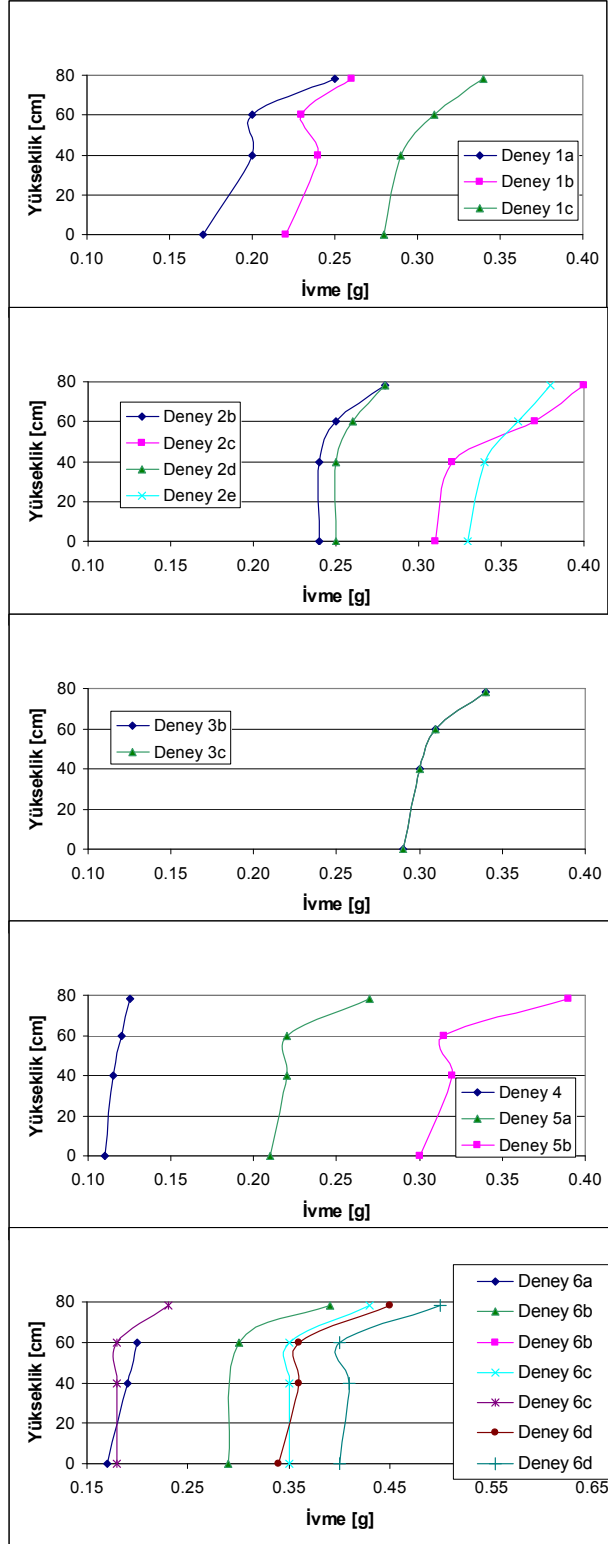


Şekil 5.71  $r_u$  - zaman grafiği (deney - 6d )

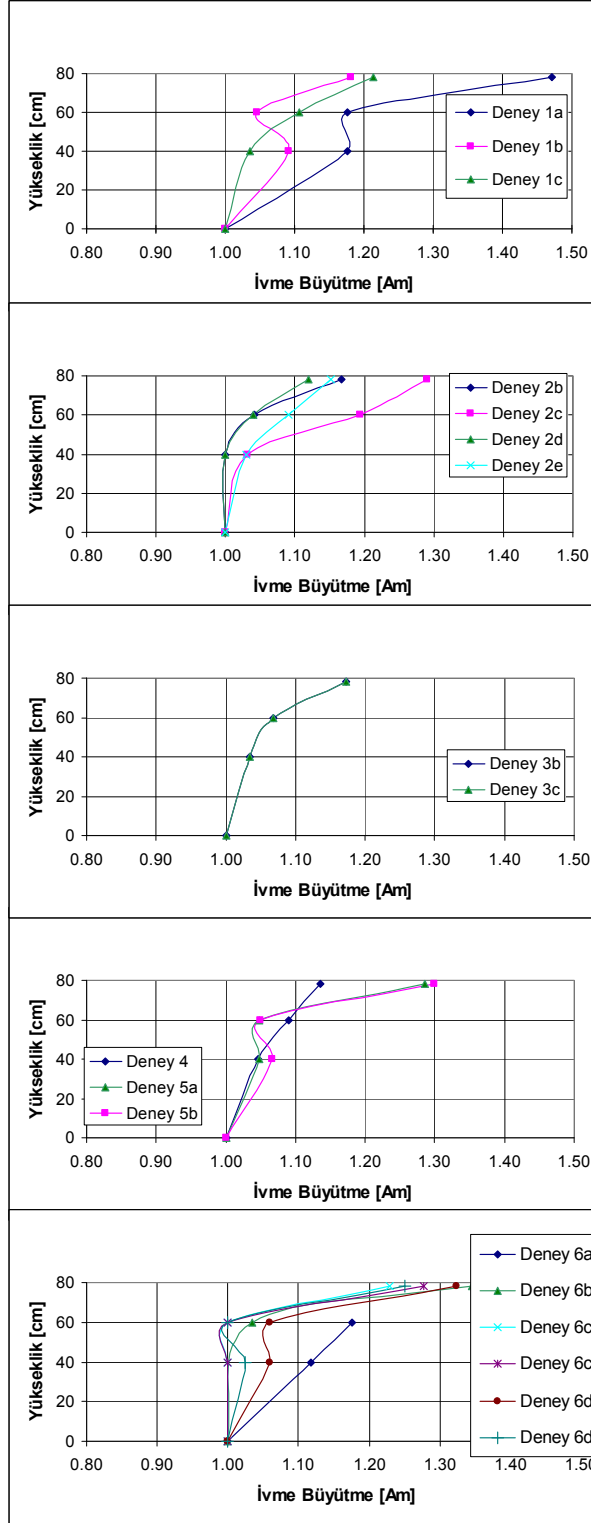
#### 5.4.1.1 Çevrimli Yükleme Etkisinde Oluşan İvmelerin Değerlendirilmesi

Kum zeminden oluşan temel zemini tabakasına oturan dalgakıran modeli tabanında uygulanan çevrimli yatay yer değiştirmeler, temel zeminde ve dalgakıran gövdesinde titreşimler oluşmasına yol açmıştır. Deneyleerde kum tabakası yüzeyinde (dalgakıran temelinde), dalgakıran kretinde ve dalgakıran şevi üzerinde bir noktada yerleştirilen ivme ölçerler ile sürekli ivme kayıtları alınmıştır. İvme kayıtlarının incelenmesinden, dalgakıranın değişik noktalarında oluşan maksimum ivme değerlerinin birbirinden farklı ve uygulanan ivmeden genellikle daha büyük oldukları gözlenmiştir. İvme kayıtları toplu olarak değerlendirildiğinde (Şekil 5.72ve Şekil 5.73)

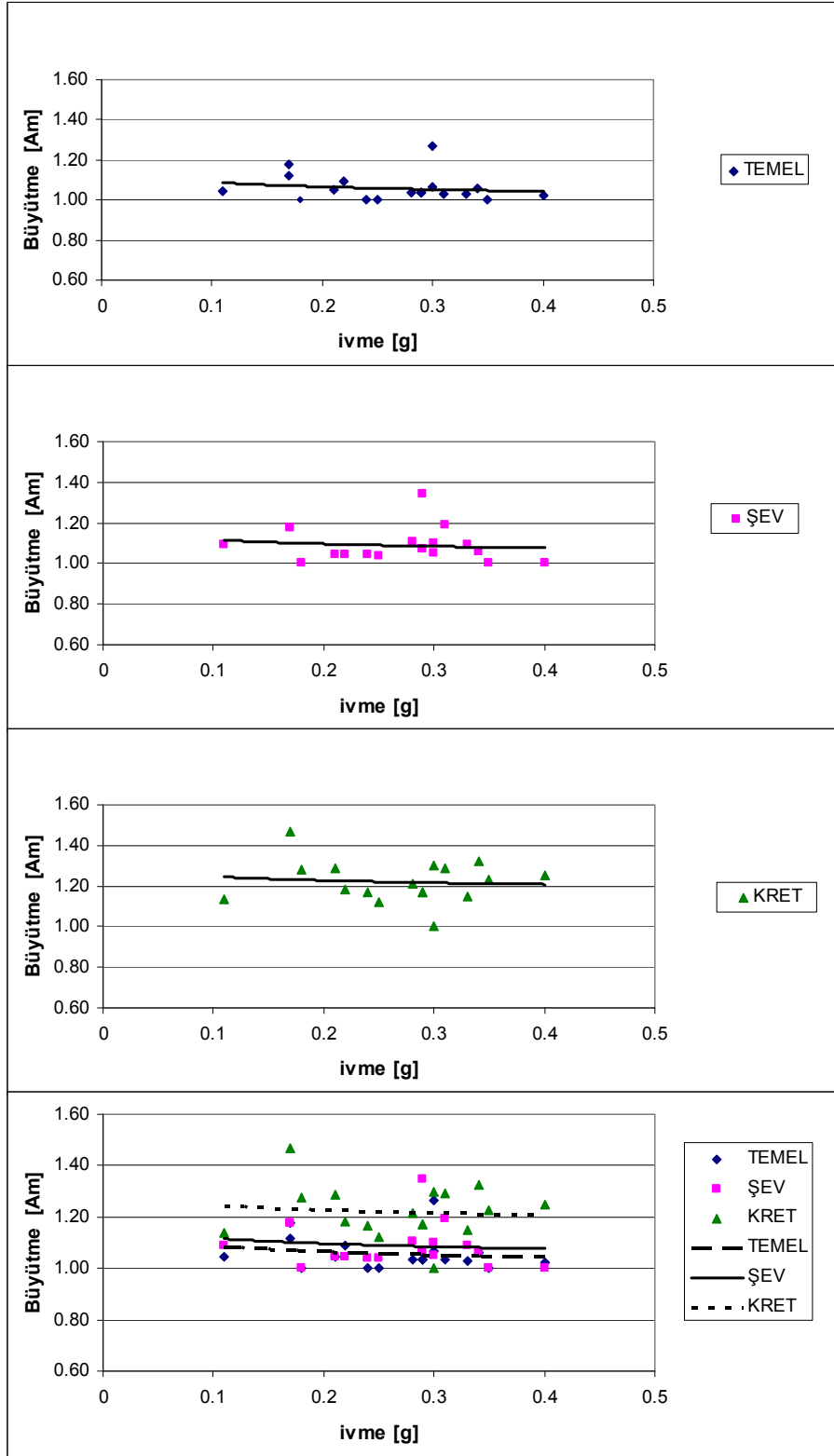
- a) 40cm kalınlığında kum temel tabakası yüzeyinde ölçülen maksimum ivme değerinin, tabanda uygulanan ivme değerine oldukça yakın olduğu ve sınırlı oranda ivme büyütmesi meydana geldiği (çoğunlukla 1.0-1.05 arasında);
- b) Şev yüzeyinde ölçülen ivme değerlerinin, tabanda uygulanan ivmeden daha büyük oldukları, ivme büyütmesi değerlerinin çoğunlukla 1.05-1.20 arasında değiştiği;
- c) En fazla ivme büyütmesinin dalgakıranın kretinde meydana geldiği (1.12-1.48 arasında);
- d) Dalgakıran kesitinin ilk defa çevrimli yüklemeye maruz kaldığı deneyleerde daha yüksek ivme büyütmeleleri oluştuğu, deforme olmuş kesitin tekrar yüklendiği deneyleerde daha küçük ivme büyütmeleleri meydana geldiği gözlenmektedir. Diğer taraftan, model dalgakıranda oluşan ivme büyütmelelerinin, dalgakıran temeli, şevi ve kreti üzerinde alınan tüm kayıtların incelenmesinden, uygulanan taban hareketinin ivme büyüklüğünden oldukça bağımsız olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.74). Deney 1a ile Deney 6a sonuçlarının karşılaştırılmasından ise temel zeminine PVD'ler yerleştirilmesinin, dalgakıran gövdesinde oluşan ivme büyütmeleleri üzerinde azaltıcı bir etki yarattığı gözlenmektedir (Şekil 5.75)



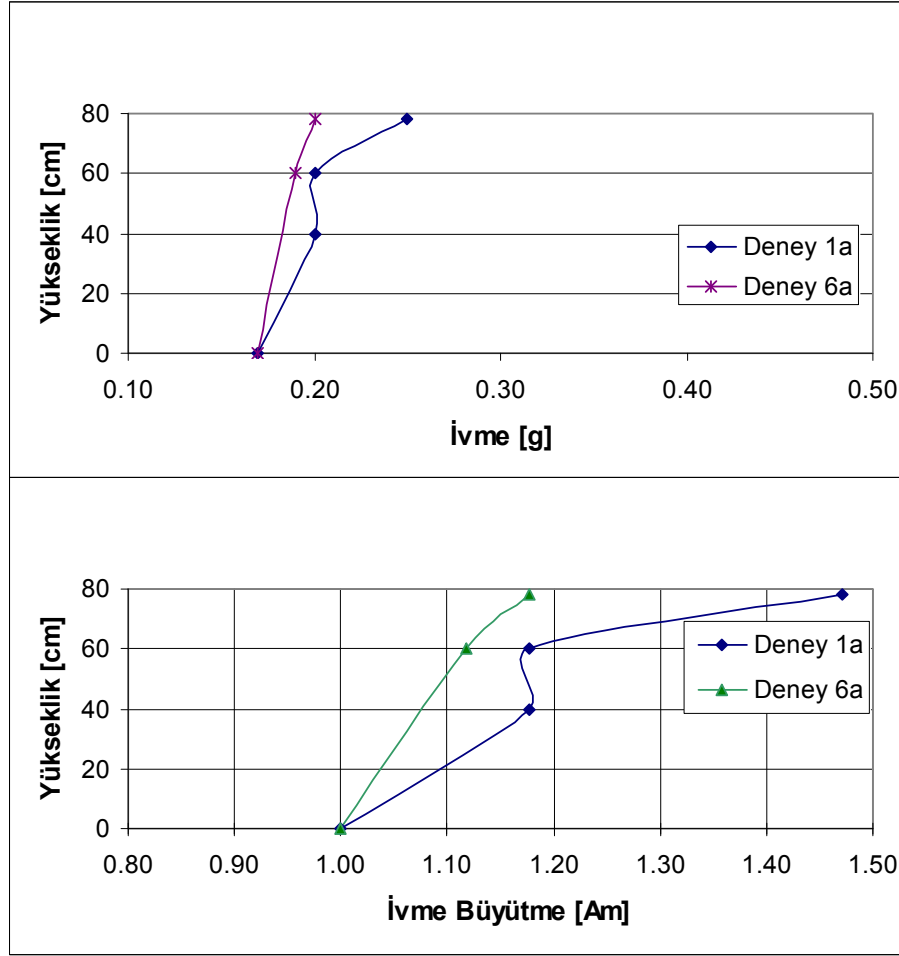
Şekil 5.72 Derinlik boyunca maksimum ivme değişimi



Şekil 5.73 Derinlik boyunca ivme büyütme



Şekil 5.74 İvme büyütlme - ivme dağılımı



Şekil 5.75 Temel zemininde PVD'ler olmasının ivme büyütmesi üzerindeki etkisi

#### 5.4.1.2 Çevrimli Yüklemler Etkisi Altında Oluşan Artık Boşluk Basınçlarının Değerlendirilmesi

Model deneylerde kum temel zemini içinde oluşan boşluk suyu basıncı artışları ve derinlikle değişimleri birlikte değerlendirilerek temel zemininin davranışı açıklanmaya çalışılmıştır.

Genel olarak incelendiğinde, kum tabaka tabanında daha yüksek boşluk suyu basınçları oluştuğu ve yüzeye doğru çıktıkça azalım gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 5.76). Boşluk suyu basıncı oranı  $r_u$  değerlerinin tabaka içinde değişimi incelendiğinde ise tabandan yüzeye doğru  $r_u$  değerlerinde artış olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.77-Şekil 5.78). Ölçüm noktalarının konumları gözönüne alındığında ise, dalgakıran altında daha düşük değerler elde edilirken, dalgakıran topuğu altında ve serbest açıklıkta ölçüm derinliğinin az ve düşey efektif gerilmenin çok düşük olduğu bu kesimlerde yüksek  $r_u$  değerine ulaşılmıştır. Aşağıdaki



paragraflarda dalgakıran altında boşluk suyu basıncı artışları ve ulaşılan  $r_u$  seviyeleri her bir deney için irdelenmektedir. Genellikle  $r_u \geq 1.0$  değerlerine ulaşılan topuk bölgesi altı ve açık alanda gözlenen davranış üzerinde ise kısaca durulmuştur.

Model 1, 1a deneyinde, dalgakıran merkezi altında elde edilen  $r_u$  değerleri 1.0 değerinin altında kalmış, ancak topuk ve açıklıkta  $r_u > 1.0$  değerlerine ulaşılması sebebiyle topuk altında sıvılaşma gerçekleşmiş, dalgakıran kesitinin topuk bölgesinde göçme yaşanmıştır.

1b deneyinde, daha önce sarsıntıya maruz kalmış kesit onarılarak daha büyük ivme değerinde tekrarlı gerilme uygulanmıştır. Bir önceki deney sonunda kum zeminin sıvılaşma kaynaklı oturma yapması ve dalgakıran kesitinin zemin içerisine çökmesi sebebiyle boşluk oranları azaldığından, dalgakıran altında  $r_u = 0.20-0.30$  ve topuk altı ile açıklıkta ise  $r_u = 1.0$  olmuştur.

1c deneyinde, onarılmış kesit çevrimsel gerilmeye maruz bırakıldıktan sonra bir süre beklenerek yeniden tekrarlı gerilme uygulanmıştır. Daha önceden maruz kaldığı çevrimli hareket sebebiyle boşluk oranları azalmış olan kesitte sıklıklar arttığından daha düşük  $r_u$  oranları hesaplanmış, sarsıntı şiddeti artmış olduğundan  $r_u$  oranlarında sınırlı artış meydana gelmiştir.

Model 2, 2a deneyinde, yalnızca kum temel kesiti hazırlanarak tekrarlı gerilmeye maruz bırakılmıştır. Uygulanan ivme değeri daha büyük olduğu için tabaka içinde  $r_u$  oranları 1.0 civarında olmuş, yüzeye yakın noktada ise daha az düşey efektif gerilme etkimesi nedeniyle  $r_u > 1.0$  değerleri hesaplanmıştır.  $r_u$  değerinin çok yüksek çıkması, yüzeye yakın noktalarda, düşey efektif gerilmelerin az olması nedeniyle çok küçük tekrarlı gerilme altında dahi daneler arası temasın kaybolabileceğini göstermektedir.

2b deneyinde, bir önceki deneyde tekrarlı gerilmeye maruz bırakılmış kum temel üzerine dalgakıran kesiti yerleştirilerek, yeniden daha yüksek şiddette çevrimsel gerilmeler uygulanmıştır. Bu nedenle sıvılaşma sonrası temel zemin sıklık derecesi artan kesitte daha düşük  $r_u$  değerlerine ulaşılmıştır.

2c deneyinde, 2b deneyi sonunda hasar görmemiş kesit üzerinde tekrar çevrimli yükleme yapılmıştır. Kum zemine daha önce üç defa uygulanan tekrarlı yüklemeler nedeniyle rölatif sıklığı artmış olmasına karşın, uygulanan sarsıntı şiddeti arttığından daha büyük  $r_u$  değerlerine yol açan boşluk suyu basıncı artışları meydana gelmiştir.

2d deneyinde, deforme olmuş kesit onarılarak tekrar tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Tabanda uygulanan hareketin ivmesinin daha düşük olması ve rölatif sıklığın daha önceki yüklemelerde artması nedeniyle düşük  $r_u$  değerleri elde edilmiştir.

2e deneyinde, daha yüksek ivmeye sahip tekrarlı yükleme uygulanmasına rağmen, daha önce dört defa uygulanan tekrarlı gerilmeler etkisinde rölatif sıklık artmış olduğundan, düşük  $r_u$  değerleri elde edilmiştir.

Model 3, 3a deneyinde, 40cm yüksekliğinde kum tabaka ve 40cm yüksekliğinde dalgakıran kesiti üzerinde, yüksek şiddette (0.40g ivme) uygulanması sebebiyle yüksek  $r_u$  oranları elde edilmiştir.

3b deneyinde, deforme olan kesit onarılarak tekrar tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Daha önce tekrarlı yüklemeye maruz bırakılan kum tabakanın rölatif sıklığı arttığından, artık boşluk suyu basınçlarında göreceli olarak düşüş ve dolayısıyla daha düşük  $r_u$  oranları elde edilmiştir.

3c deneyinde ise, deforme olan kesitin yeniden tekrarlı gerilmelere maruz bırakılması nedeniyle düşük  $r_u$  değerleri elde edilmiştir.

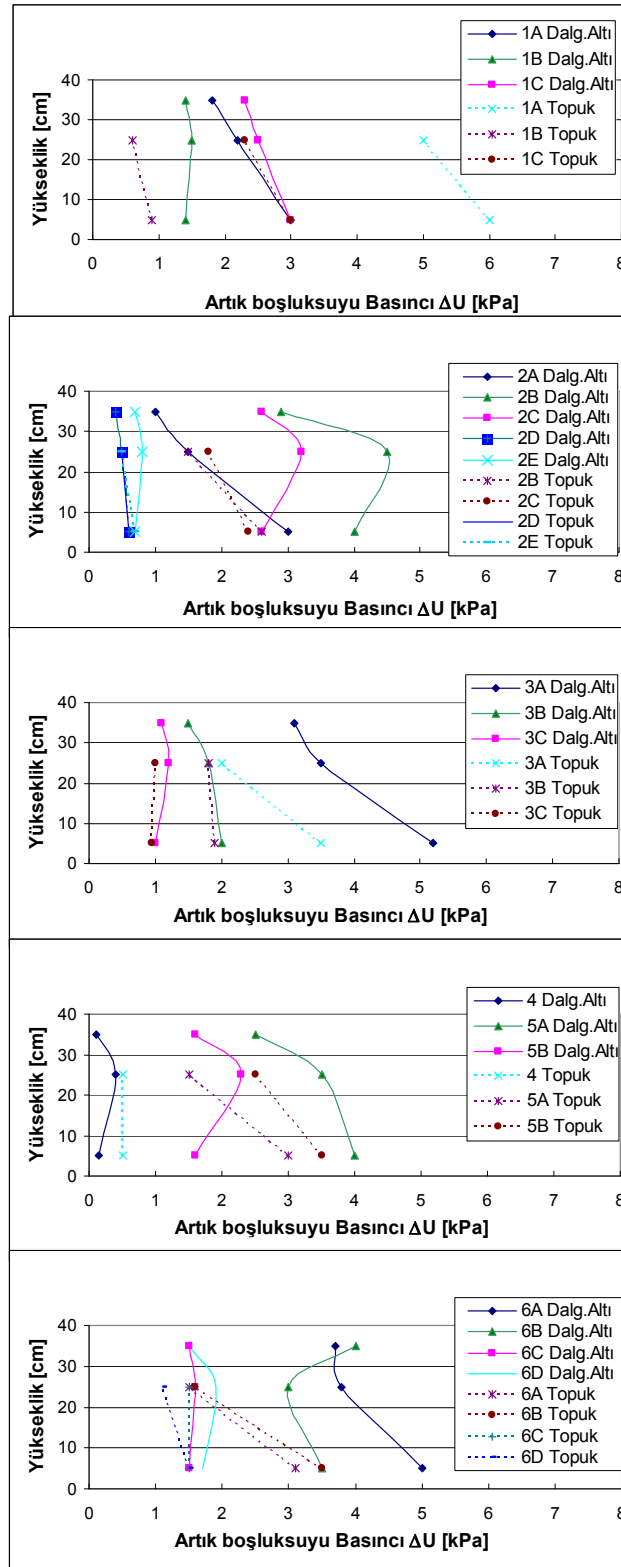
Model 4 deneyinde, kum tabaka ve dalgakırandan oluşan kesit üzerinde çok düşük ivme değerlerinde sarsıntı uygulanmış, tekrarlı gerilme şiddetinin az olması nedeni ile boşluk suyu basıncı artışları ve  $r_u$  değerleri düşük olmuştur.

Model 5, 5a deneyinde, Model 4 deneyinde sivilaşma görülmeyen ve dolayısıyla düşey yerdeğiştirmelerin çok sınırlı kaldığı kesit üzerinde yeniden daha büyük ivme değerinde tekrarlı hareket uygulanmış ve daha büyük  $r_u$  değerleri elde edilmiştir.

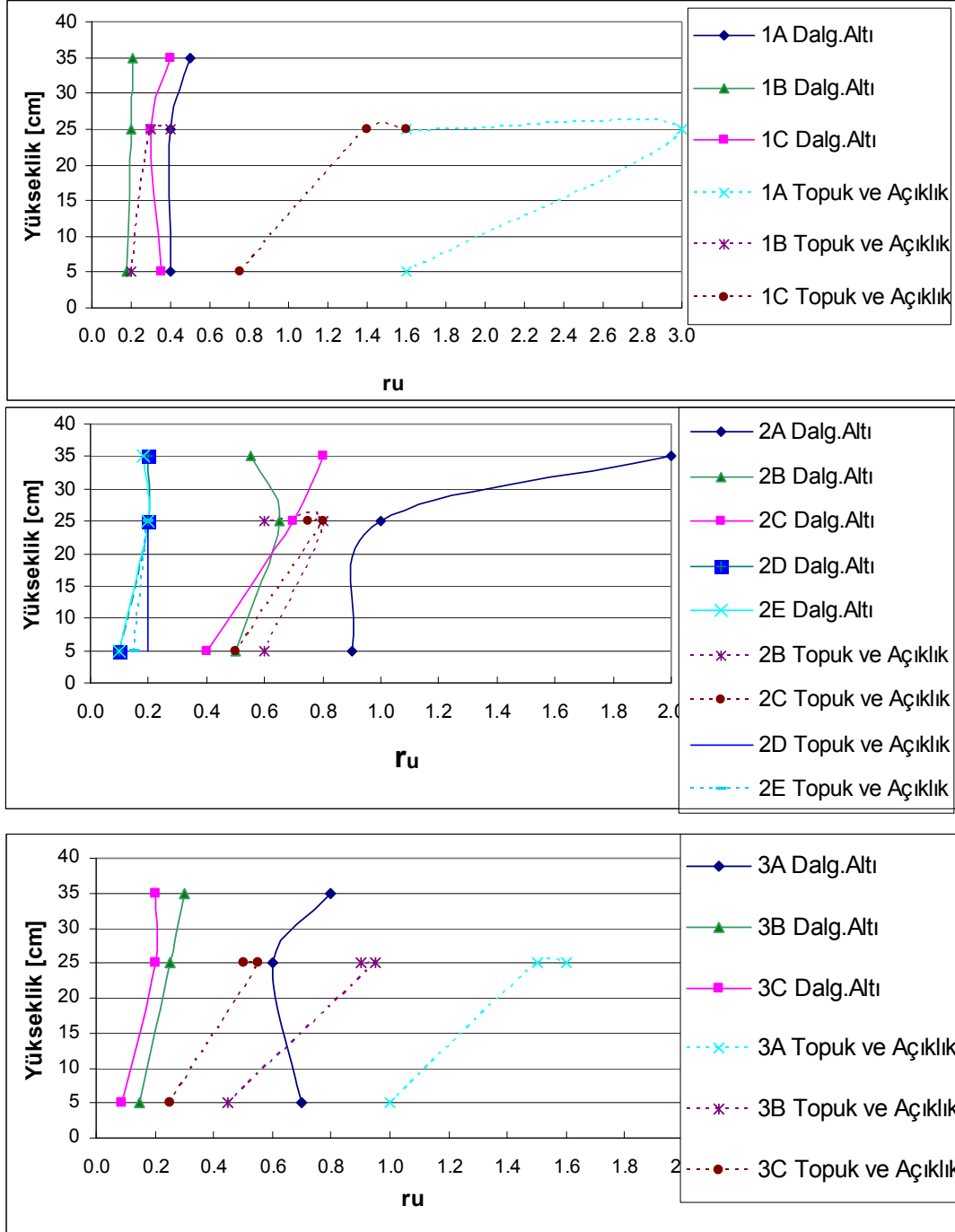
5b deneyinde ise, deforme olan kesit onarılmadan yeniden daha büyük tekrarlı harekete maruz bırakılmıştır. İvme şiddetinin artmasına rağmen ikinci kez tekrarlı hareket uygulanan kum tabakasinda daha önceki yüklemeler sırasında rölatif sıklık arttığından,  $r_u$  değerleri daha düşük seviyede kalmıştır.

Model 6 deneyleri, sivilaşabilen kum tabaka üzerinde yer alan dalgakıranların dinamik davranışını iyileştirmek için, kum tabaka içerisine PVD'ler yerleştirilerek tekrarlı hareket nedeniyle oluşan artık boşluksuyu basıncının sönümlenmesinin ne kadar başarılı olabileceğini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Seçilen PVD yerleşim aralıklarına göre artık boşluksuyu

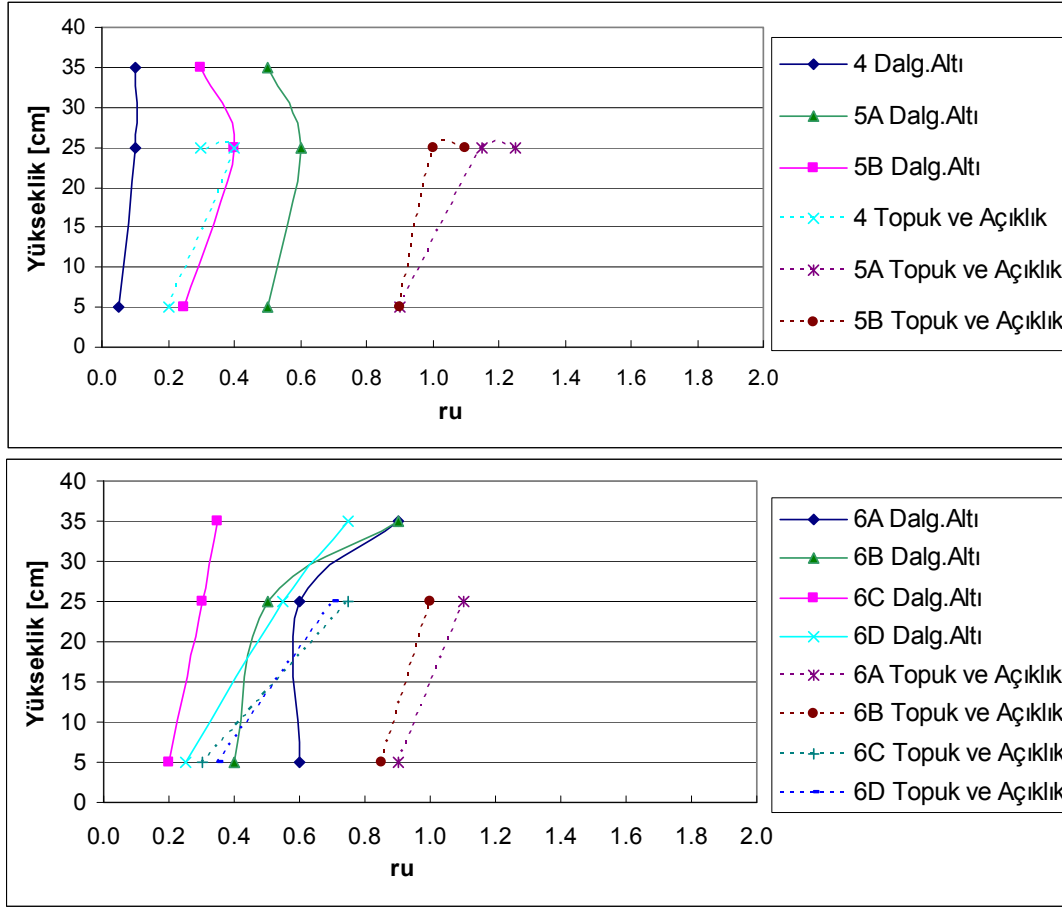
basıncı sönüm performansı değişik olacağından sadece bir deney ile anlamlı sonuçlar elde edilmesinin zor olacağı açıktır. PVD yerleşim aralığı ve PVD özellikleri değiştirilerek deneysel araştırmalara devam edilebileceği düşünölmektedir.



Şekil 5.76 Yükseklik boyunca artık boşluksuyu basıncı dağılımı



Şekil 5.77 Yükseklik boyunca  $r_u$  dağılımı



Şekil 5.78 Yükseklik boyunca  $r_u$  dağılımı

6a deneyinde, dalgakıran altındaki noktalarda boşluk suyu basınçlarında sınırlı artış oluşmuş ancak topuk altında ve açıklık bölgesinde  $r_u$  1.0 değerine yaklaşmıştır.

6b deneyinde deforme olan kesit onarılarak ikinci kez ve daha yüksek ivme değerinde tekrarlı hareket uygulandığında daha önce sıkışan kum tabakada daha düşük  $r_u$  oranları elde edilmiştir.

6c deneyinde, deforme olan kesite onarım yapılmadan yeniden daha düşük şiddette tekrarlı hareket uygulanmış, beklenildiği gibi daha düşük  $r_u$  değerleri elde edilmiştir.

6d deneyinde, önceki deneyde, güç uygulama sisteminde oluşan bir sorun nedeniyle ani gelişen bir pik ivme gözlenmiş olduğundan, düzgün bir çevrimli hareket, deforme olan kesite yeniden uygulanmıştır. Uygulanan çevrimli hareketin ivme büyüklüğü daha fazla olduğundan,  $r_u$  oranlarında artış gözlenmiştir. Uygulanan tekrarlı hareketin sahip olduğu maksimum ivme

değeri başlangıç durumuna göre (6a deneyi) daha fazla olmasına rağmen, daha önce üç kez çevrimli harekete maruz kalması sebebiyle kum zeminin rölatif sıkılık derecesi artmış, dolayısıyla daha düşük  $r_u$  oranları elde edilmiştir.

#### 5.4.2 Dalgakıran Kesitinde Oluşan Şekil Değişiklikleri

Model deneylerde tabanda uygulanan tekrarlı hareket etkisi altında kum temel tabakası içerisinde artık boşluk suyu basıncı gelişerek efektif gerilme seviyesinde azalma yaratmaktadır. Zamana bağlı olarak gelişen efektif gerilmedeki azalma kum temel tabakasında taşıma gücü kaybına sebep olurken, dalgakıran kesitinde devam eden sarsıntı etkisi ile birlikte yerdeğişiklikler gerçekleşmesine yol açmaktadır. Çevrimli yükleme etkisinde dalgakıran kesitinde oluşan şekil değişiklikleri farklı grafiksel gösterimler ile değerlendirilmiştir:

- a) Dalgakıran kesitinin çevrimli yüklenme süresince gelişen şekil değişikliği grafikleri
- b) Dalgakıran kretinde oluşan zamana bağlı düşey yer değiştirme (çökme)
- c) Dalgakıran kesitindeki değişimin yükseklik-genişlik-zaman uzayında gösterimi
- d) Dalgakıran kesitinde oluşan hasar oranının zamana bağlı değişimi

1 no'lu Model deney üzerinde uygulanan Deney 1a'da dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar yükseklik, genişlik ve zaman bilgilerini birarada gösteren üç boyutlu grafik halinde (Şekil 5.79) gösterilmiştir. Tekrarlı gerilme süresi uzadıkça dalgakıran kesitinde gelişen deplasmanların artarak devam etmiş olduğu görülmektedir.

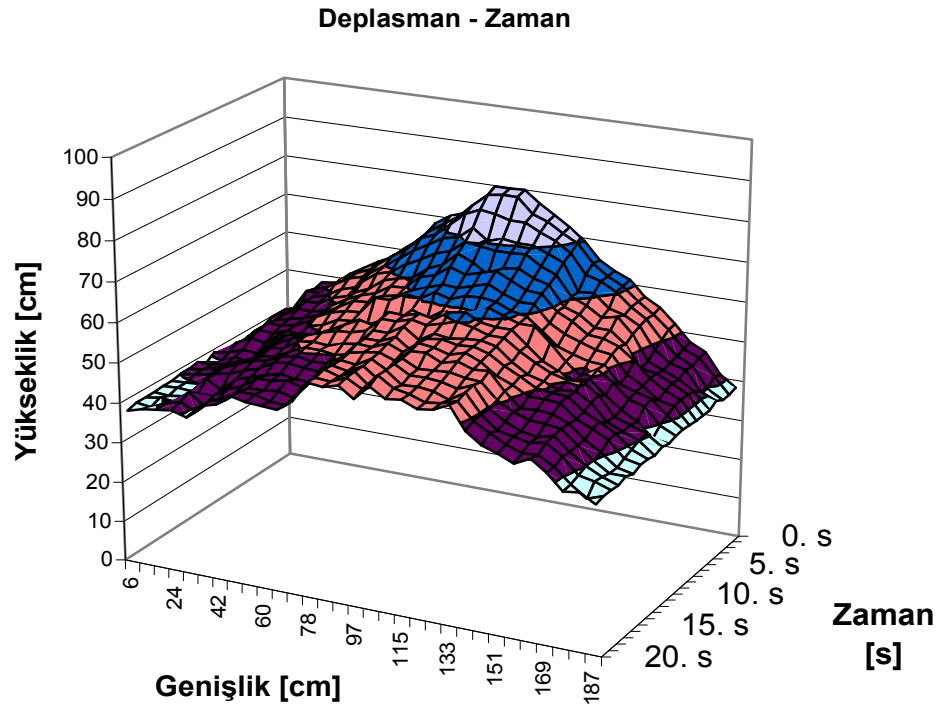
Dinamik yüklemelerin neden olduğu hasar oranı, kret düşey deplasmanı ve çevrimli yüklemenin değişik aşamalarında dalgakıran kesitinin şekil değişikliği (Şekil 5.80)'de gösterilmiştir. Kesitte meydana gelen hasar oranının, çevrimli yüklemenin ilk saniyelerinden başlayarak, artarak %60 seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Dalgakıran kreti seviyesi 80cm'den 50cm'ye inmiş ve 30cm'ye ulaşan düşey yer değiştirme oluşmuştur. Tekrarlı hareketin 5. saniyesi sonrasında kret kotu, su seviyesi olan 70 cm'nin altına inerek dalgakıran kesitinin fonksiyonunu yitirmiş olduğu gözlenmektedir.

Kesitte oluşan şekil değişiklikleri, kesit boyutlarından bağımsız olarak ifade edebilmek için çevrimli yüklemeler etkisinde oluşan "Hasar Oranı" (5.1) eşitliğinde tanımlanmıştır.

$$\text{Hasar Oranı} = \frac{V - \Delta V}{V} = 1 - \frac{\Delta V}{V} \quad (5.1)$$

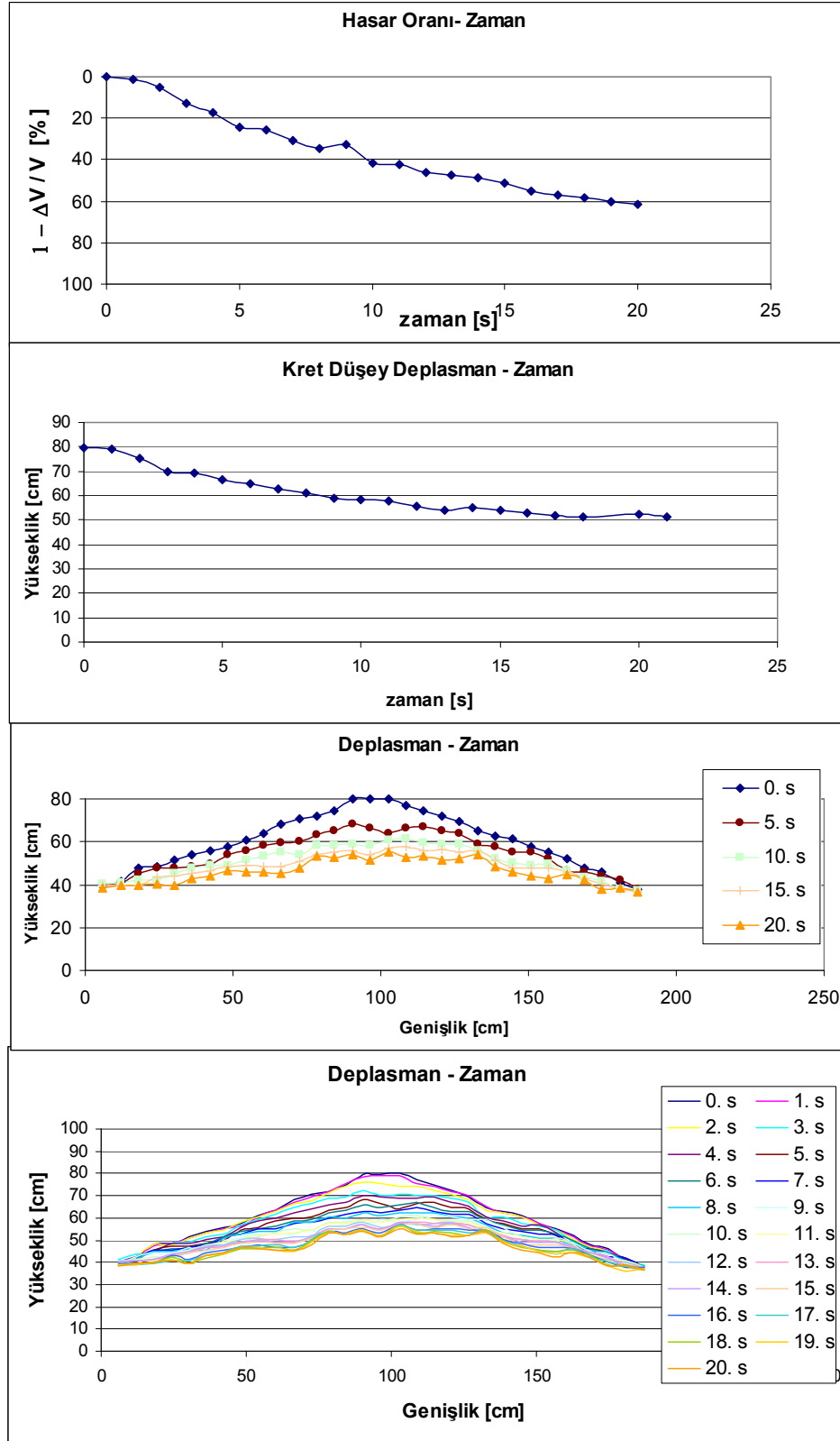
Burada V: Başlangıç hacmi

$\Delta V$  : çevrimli yükleme sırasında hacim değişimi olarak tanımlanmıştır.



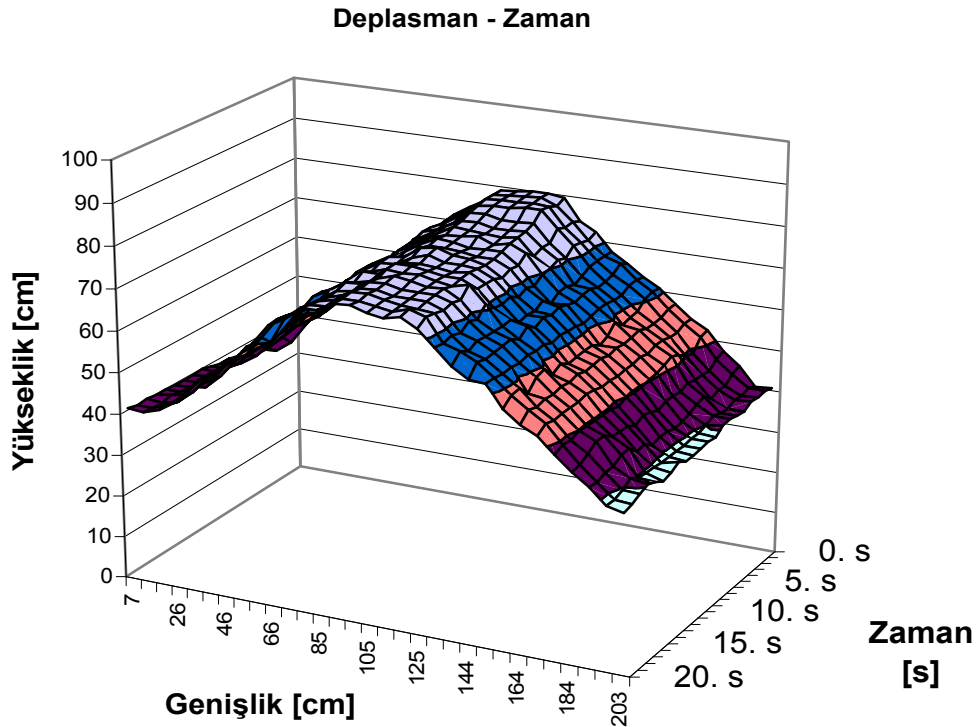
Şekil 5.79 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1a)



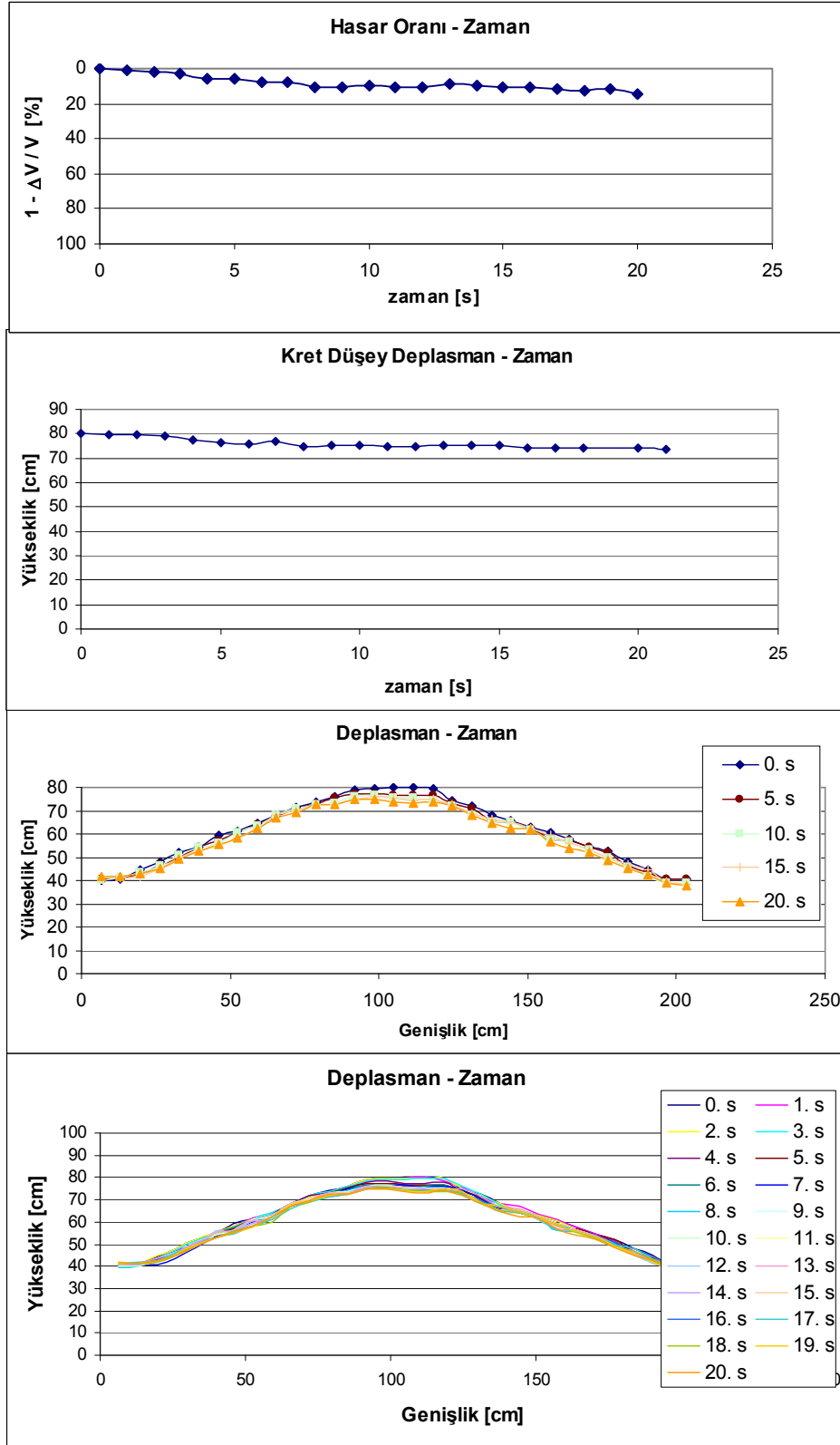


Şekil 5.80 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1a)

Deney 1b'de, dalgakıran kesitinde zaman bağılı olarak meydana gelen deplasmanlar üç boyutlu grafik halinde (Şekil 5.81) gösterilmiştir. Daha önce uygulanan çevrimli yükleme sonunda deforme olan dalgakıran kesiti onarılarak yeniden tekrarlı harekete maruz bırakıldığından, kesitte meydana gelen % 15 (Şekil 5.82) seviyesinde hasar oranı deney sonlanıncaya kadar sabit kalmıştır. Kret kotu ise su seviyesi üzerinde kalarak 74 cm seviyesine inmiştir. Bu deneysel gözlemler daha önce uygulanan çevrimli yükleme etkisi altında, kum temel tabakası ve dalgakıran gövdesinde meydana gelen sıkışma nedeni ile dalgakıranın dinamik direncinde artma meydana geldiğine işaret etmektedir.

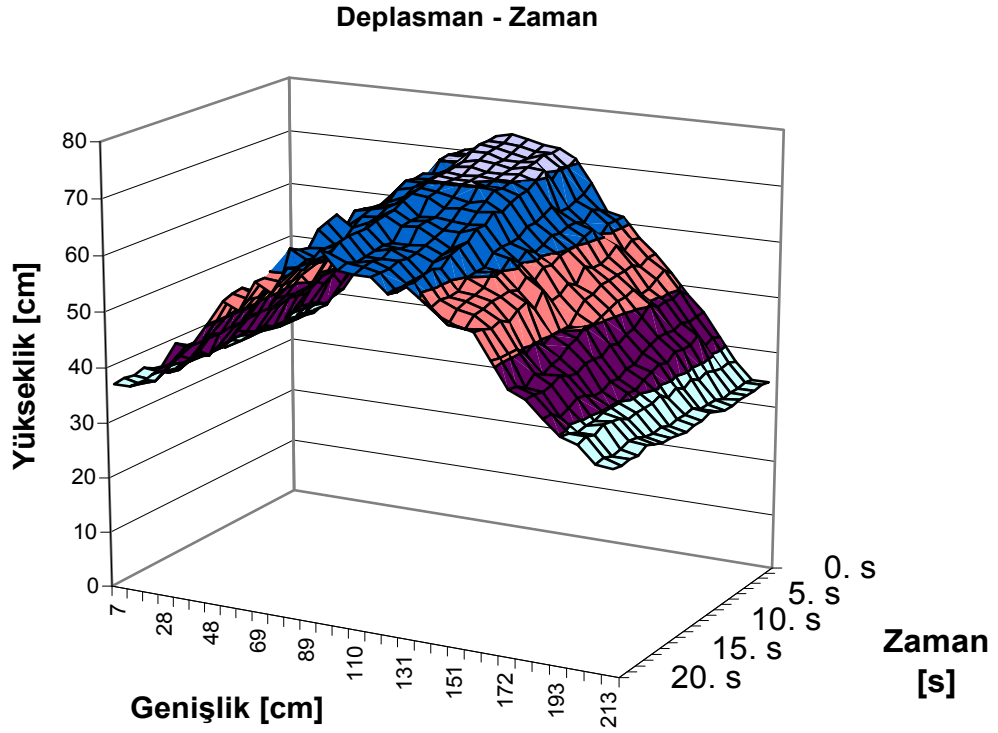


Şekil 5.81 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1b)

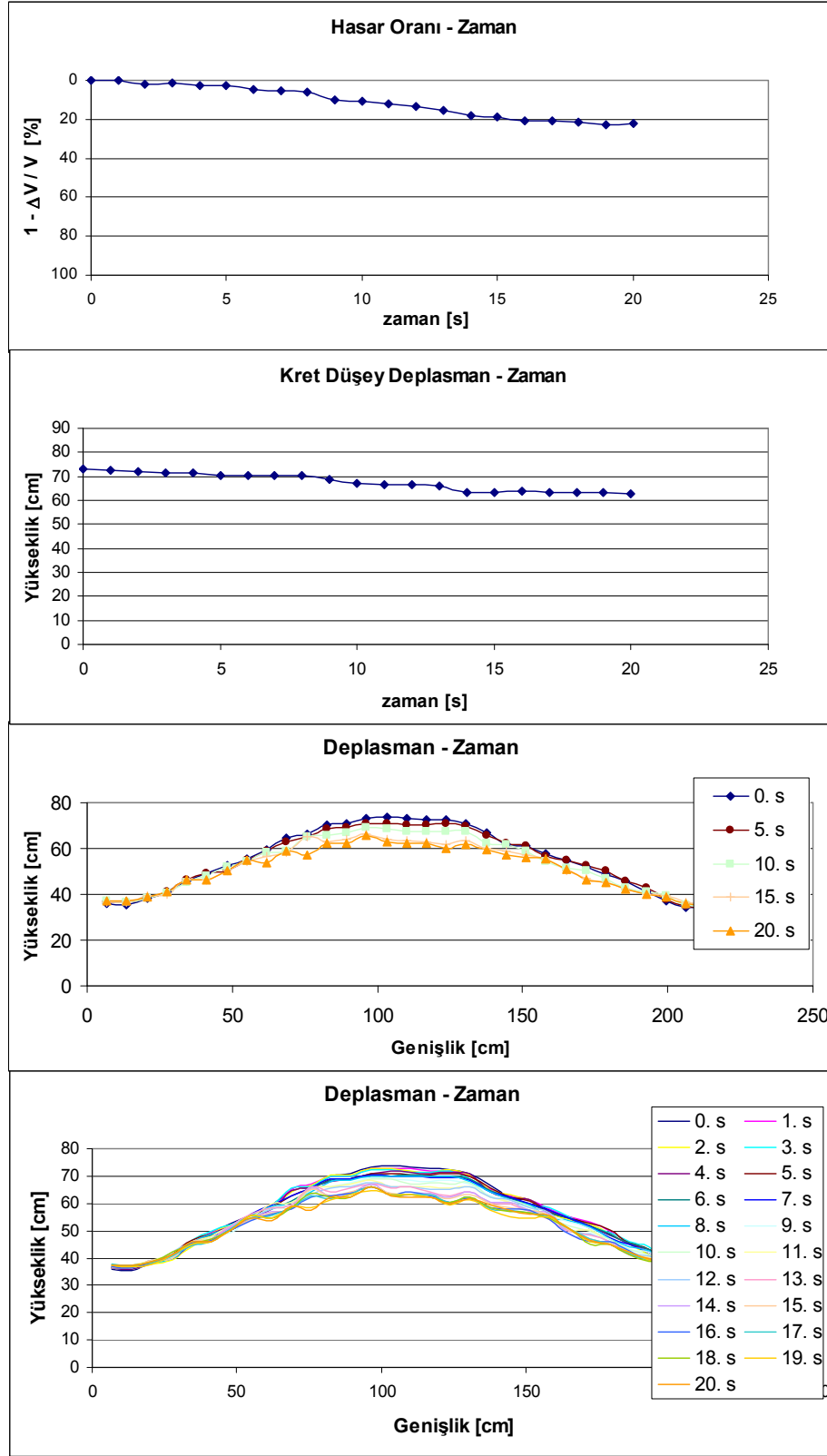


Şekil 5.82 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1b)

Deney 1c'de ise bir önceki deneyde deforme olan kesit onarılmadan yeniden tekrarlı hareket uygulandığından, kesitte meydana gelen şekil değiştirme yine sınırlı seviyede kalmış, ancak daha şiddetli bir sarsıntıya maruz kaldığından Deney 1b'de olduğundan daha fazla olmuştur(Şekil 5.83). Deney sonundaki ulaşılan hasar oranı seviyesi %22 olmuştur. Kesitte meydana gelen şekil değiştirmeler ve kret düşey yer değiştirmesi daha geç başlamış ve 15. saniye sonundan itibaren sabit seviyede kalmıştır(Şekil 5.84).

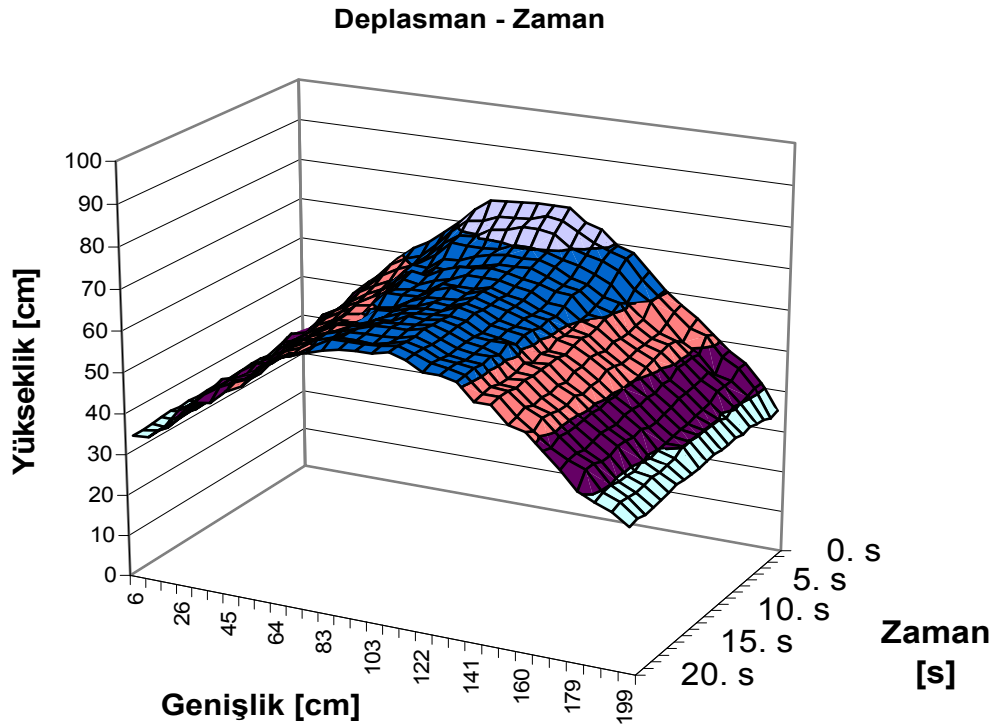


Şekil 5.83 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1c)

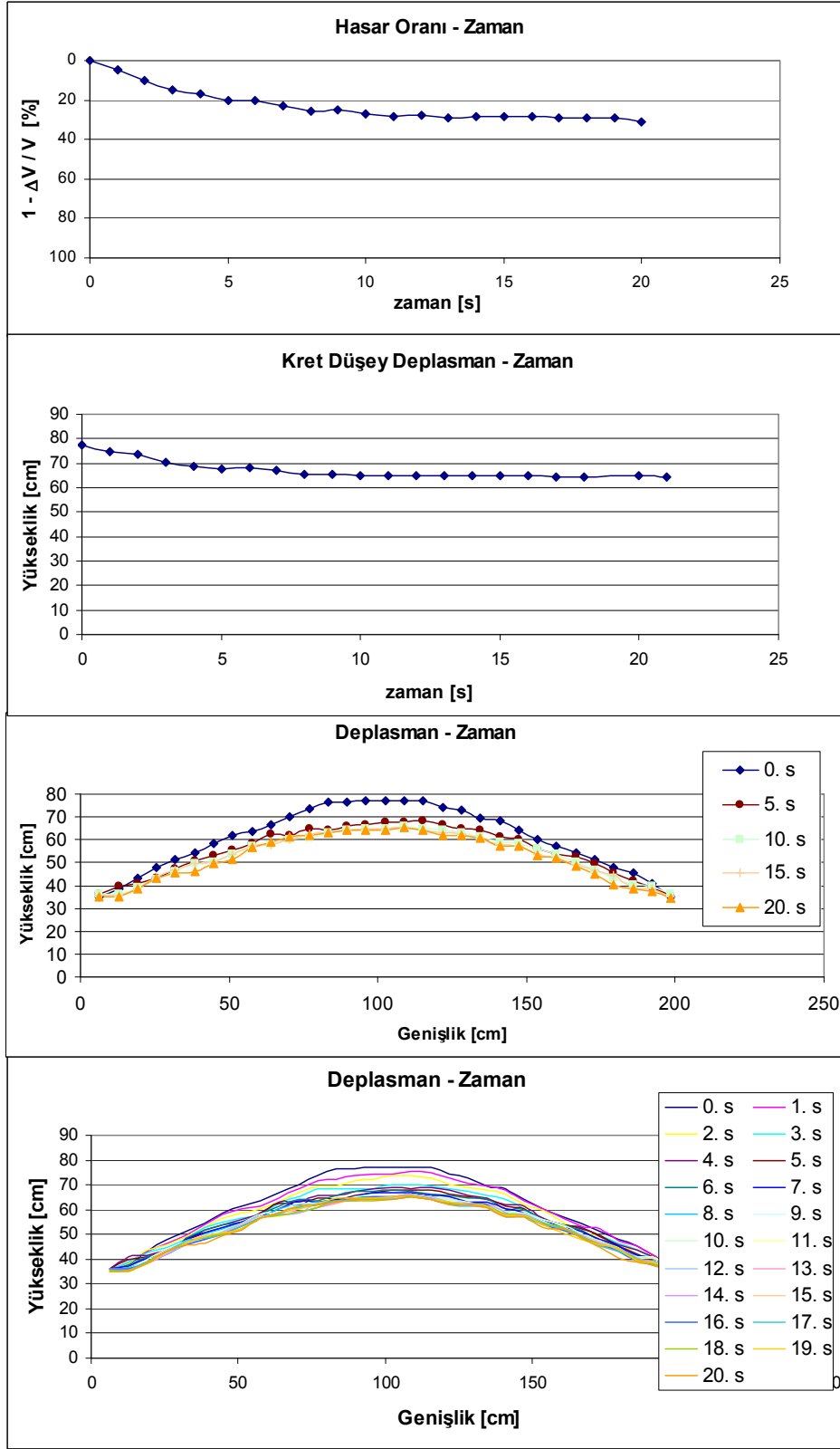


Şekil 5.84 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-1c)

Model 2 deneylerinde daha önce sıvılaşıp bir kum temel üzerine yerleştirilen dalgakıran kesitinin davranışı incelenmiştir. Deney 2b'de, çevrimli hareket etkisinde sıvılaşma oluşmuş kum temel tabakası üzerine dalgakıran kesiti yerleştirilerek yeniden tekrarlı hareket uygulanmıştır. Kesitte meydana gelen zaman bağımlı deplasmanlar üç boyutlu grafik üzerinde görülmektedir(Şekil 5.85). Dalgakıran kesitinde dinamik yükleme sonunda oluşan hasar oranı %30 seviyesinde olmuştur(Şekil 5.86). Kesitte meydana gelen hasar ilk 10 saniyede büyük oranda tamamlanmıştır. Kret yüksekliği 63 cm seviyesine inerek su seviyesi altında kalmış ve dalgakıran fonksiyonunu yitirmiştir.

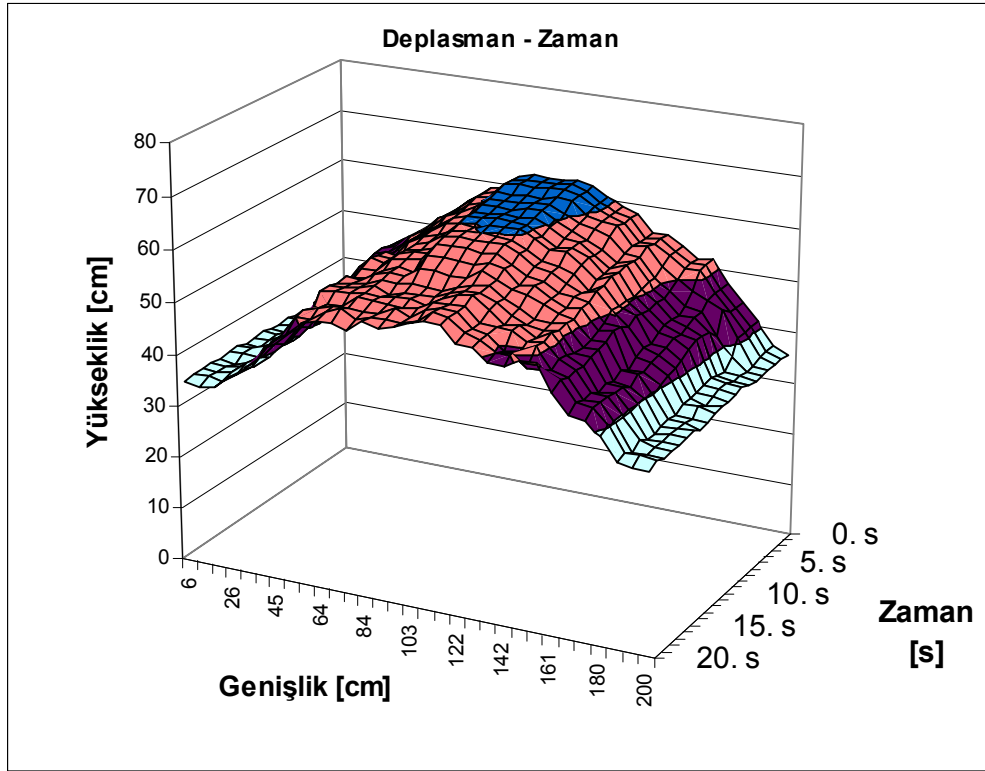


Şekil 5.85 Dalgakıran kesitinde zamana bağımlı oluşan deplasmanlar(deney-2b)



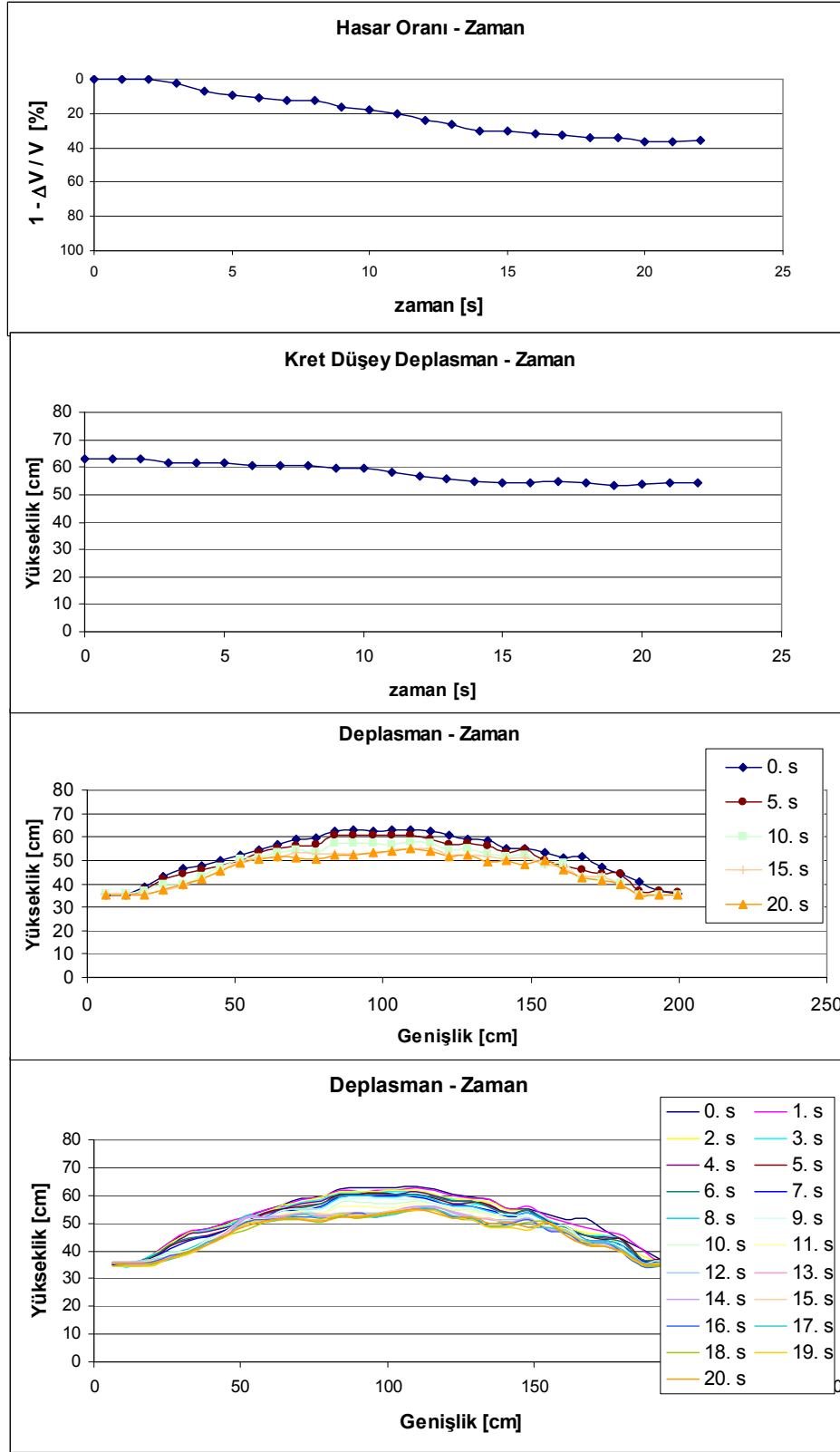
Şekil 5.86 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2b)

Deney 2c'de, daha önce sarsıntıya maruz kalmış dalgakıran kesiti onarılmadan daha yüksek ivme büyüklüğüne sahip bir çevrimli harekete maruz bırakılmıştır. Kesitte zaman bağı olarak oluşan deformasyonlar üç boyutlu olarak(Şekil 5.87) gösterilmiştir. Kesitte meydana gelen hasar oranı deney sonunda %35 seviyesine ulaşmıştır(Şekil 5.88). Krette 10 cm düşey deplasman gerçekleşmiş kret kotu 55cm seviyesine inmiştir.



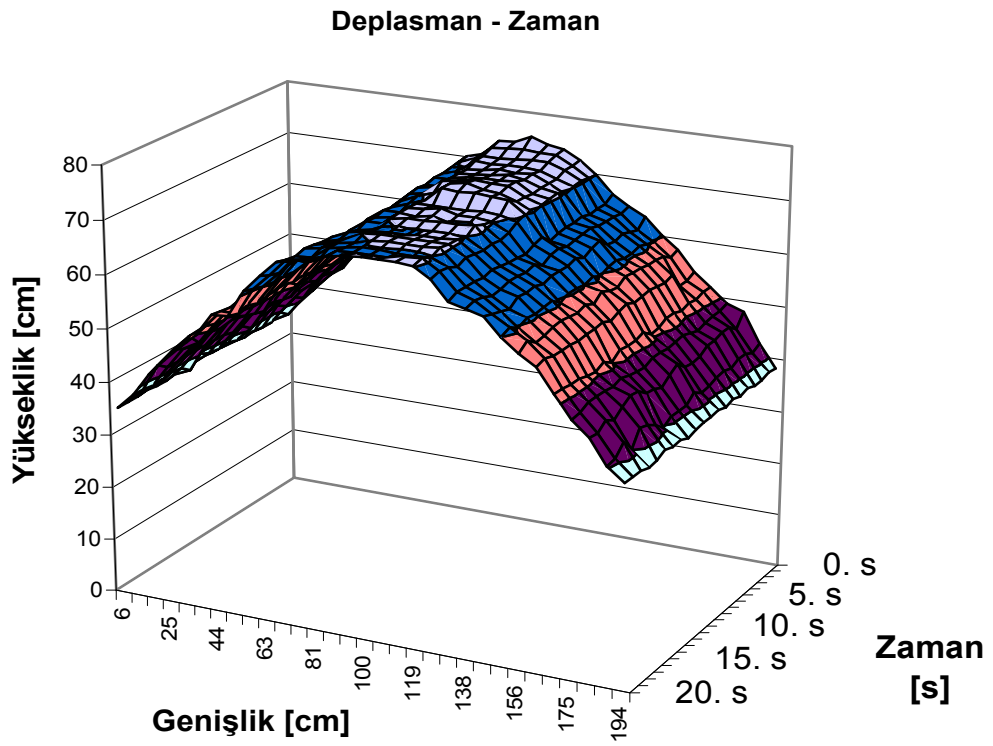
Şekil 5.87 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2c)



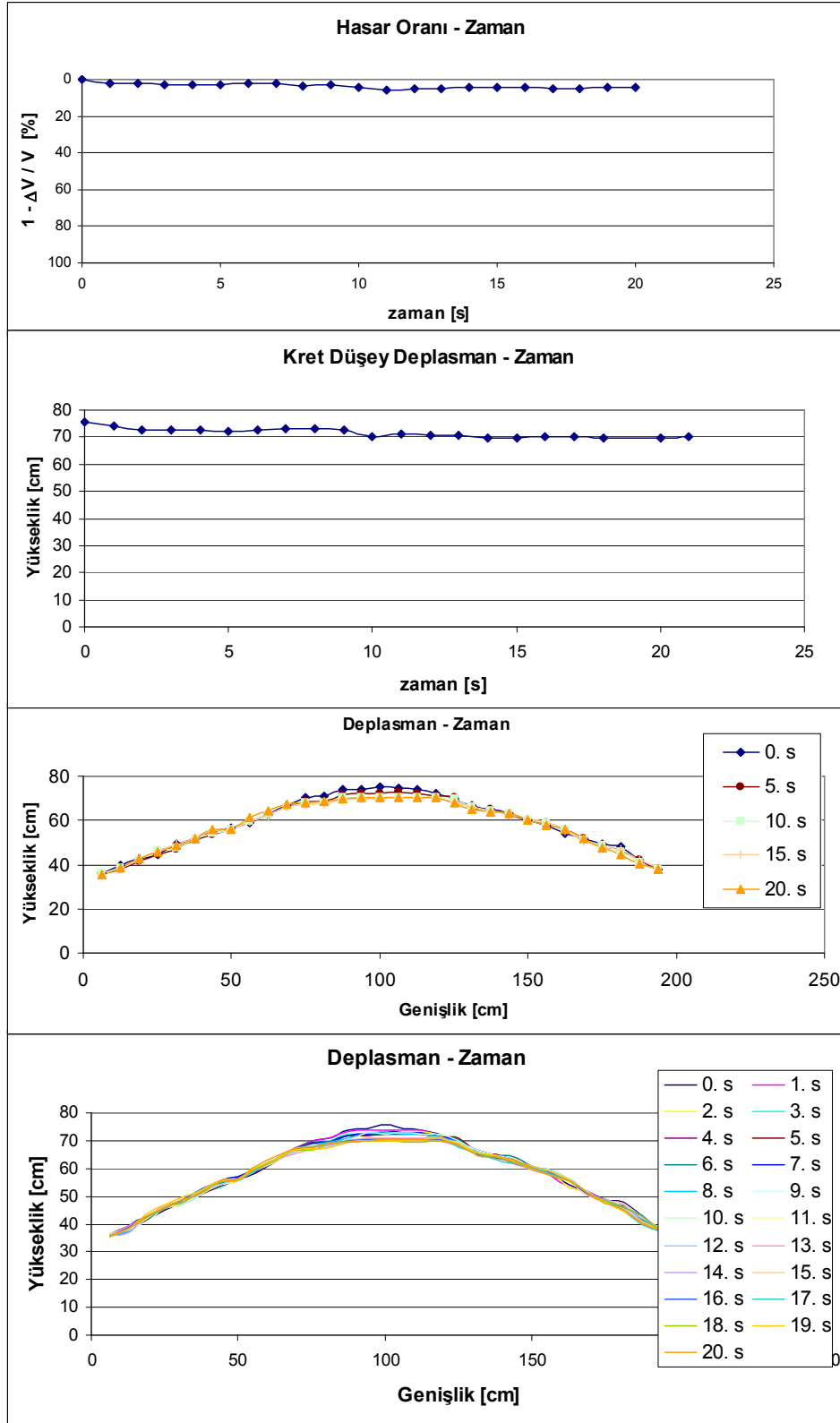


Şekil 5.88 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2c)

Deney 2c sonunda deforme olan kesitin onarılarak yeniden çevrimli harekete maruz bırakıldığı Deney 2d'de, zamana bağlı olarak meydana gelen deformasyonlar üç boyutlu grafik halinde (Şekil 5.89)gösterilmiştir. Üçüncü kez tekrarlı harekete maruz kalan kesitte oluşan deformasyonlar sınırlı seviyede kalmıştır. Hasar oranı-zaman grafiği incelendiğinde, hasar oranının deney sonunda %5 seviyesinde kaldığı görülmektedir(Şekil 5.90). Krette oluşan düşey deplasman seviyesi de benzer şekilde düşük kalarak kret kotu 75cm'den 70cm 'ye inmiştir.

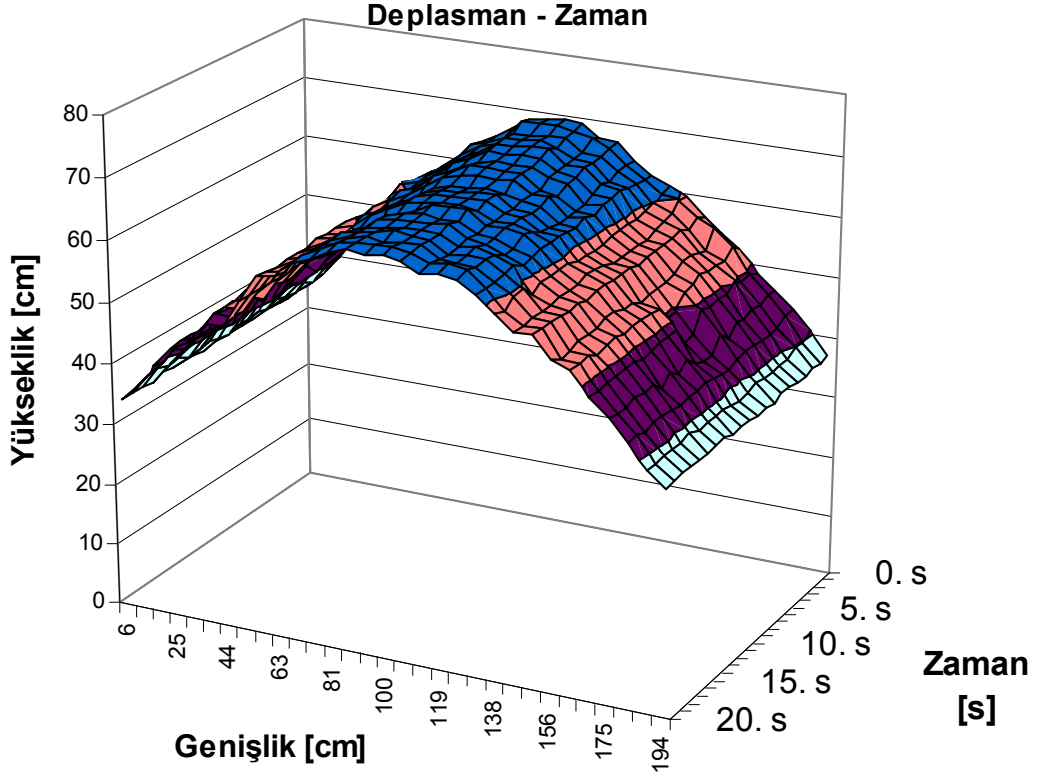


Şekil 5.89 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2d)

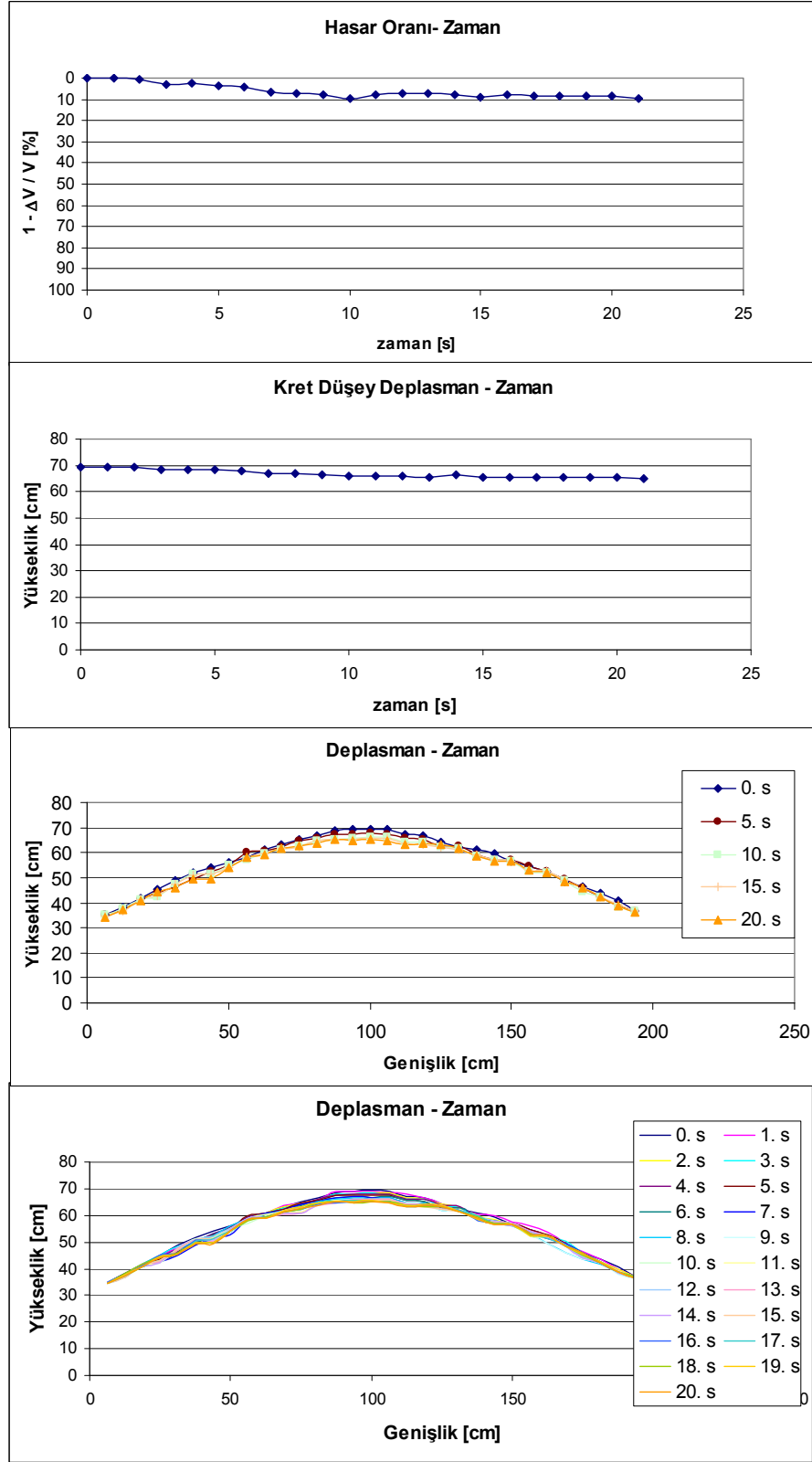


Şekil 5.90 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2d)

Deney 2e’de ise bir önceki deneyde deforme olan kesit onarılmadan yeniden daha şiddetli bir tekrarlı harekete tabi tutulmuştur. Dalgakıran kesitinde oluşan zamana bağlı deformasyonlar Şekil 5.91’de gösterilmiştir. Dördüncü kez uygulanan çevrimli hareketler nedeniyle deplasman seviyesi sınırlı olmuştur. Hasar oranı incelendiğinde, deney sonunda %8 seviyesine ulaştığı, kret kotunun ise 65cm’ye inmiş olduğu görülmektedir.

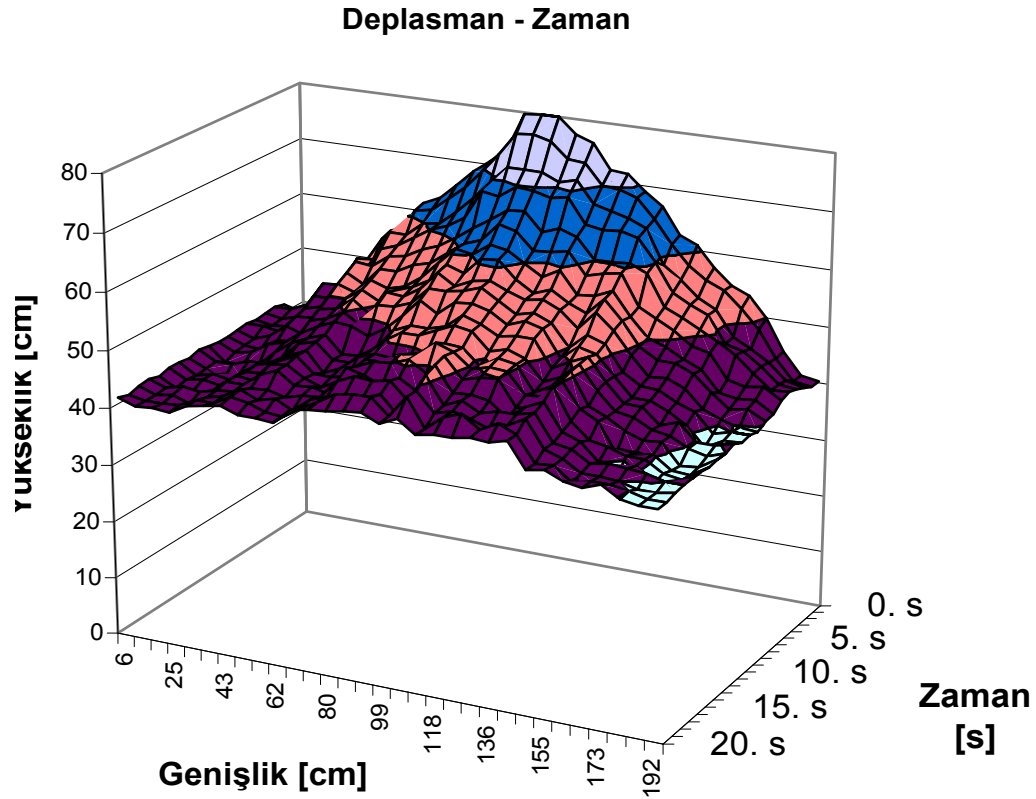


Şekil 5.91 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2e)

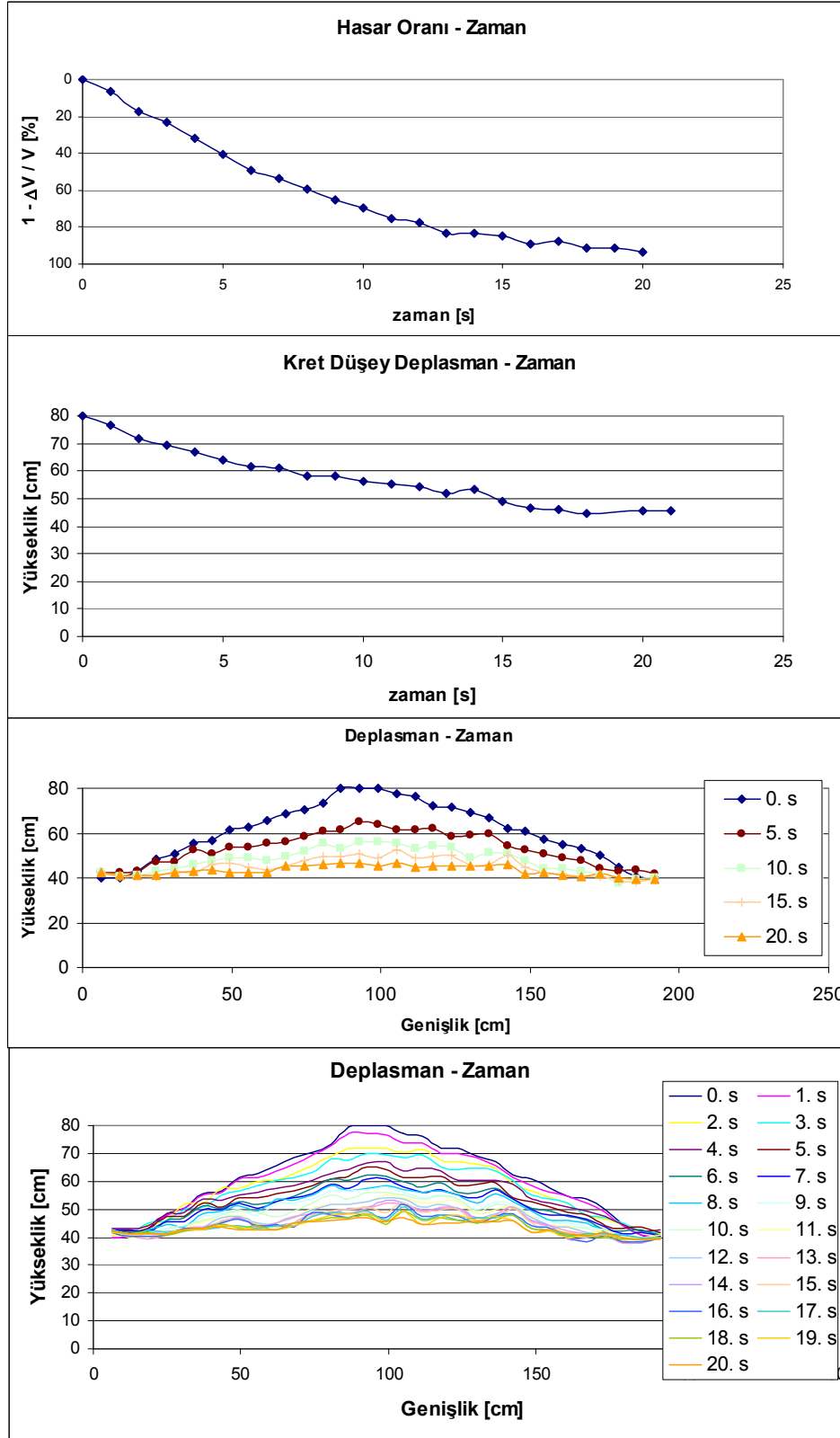


Şekil 5.92 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-2e)

Model 3 deneylerinde 40cm kum temel üzerinde oluşturulan 40cm yüksekliğindeki dalgakıran üzerinde değişik şiddette çevrimli yüklemeler uygulanmıştır. Deney 3a'da, 0.40g ivme büyüklüğünde tekrarlı hareket uygulanmış, deney süresince gelişen deformasyonlar üç boyutlu grafik halinde(Şekil 5.93) gösterilmiştir. Uygulanan ivmenin şiddeti nedeniyle ilk çevrimlerden itibaren kesitte hızlıca deplasmanlar geliştiği, deney sonunda dalgakıran kesitinde büyük oranda göçme yaşandığı görülmektedir. Zamana bağlı gelişen hasar oranı incelendiğinde(Şekil 5.94), hasar oranı, ilk 10 saniye içerisinde %70, deney sonunda ise %95 seviyesine ulaşmıştır. Kret seviyesi büyük oranda düşey deplasman yaparak, kret kotu 80 cm'den 45cm'ye düşmüştür.

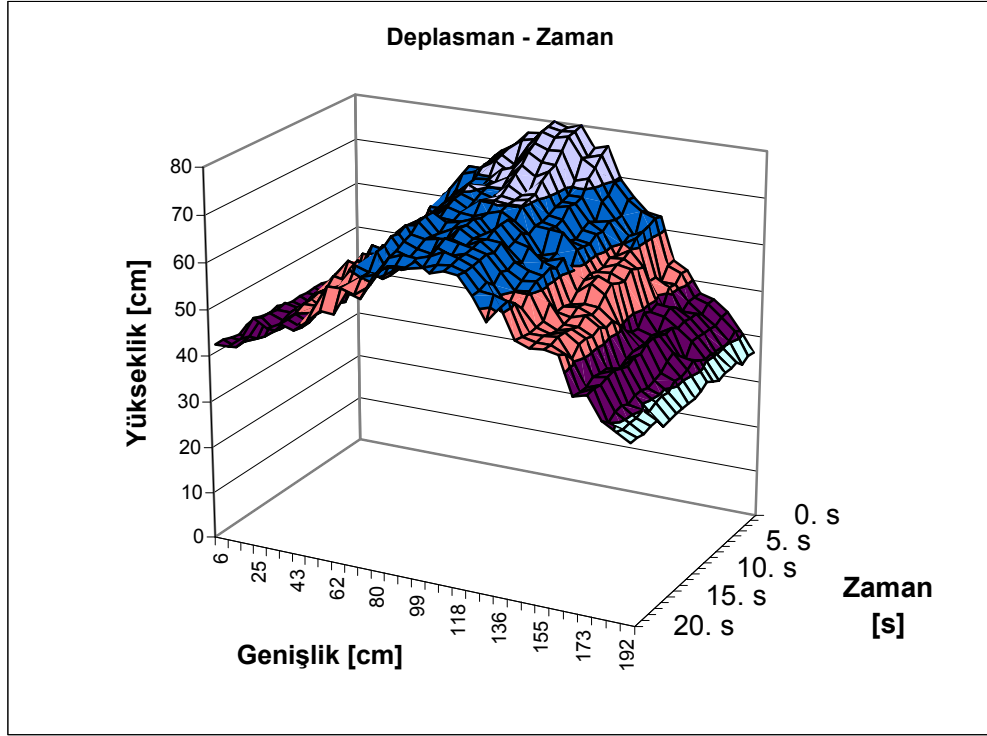


Şekil 5.93 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-3a)



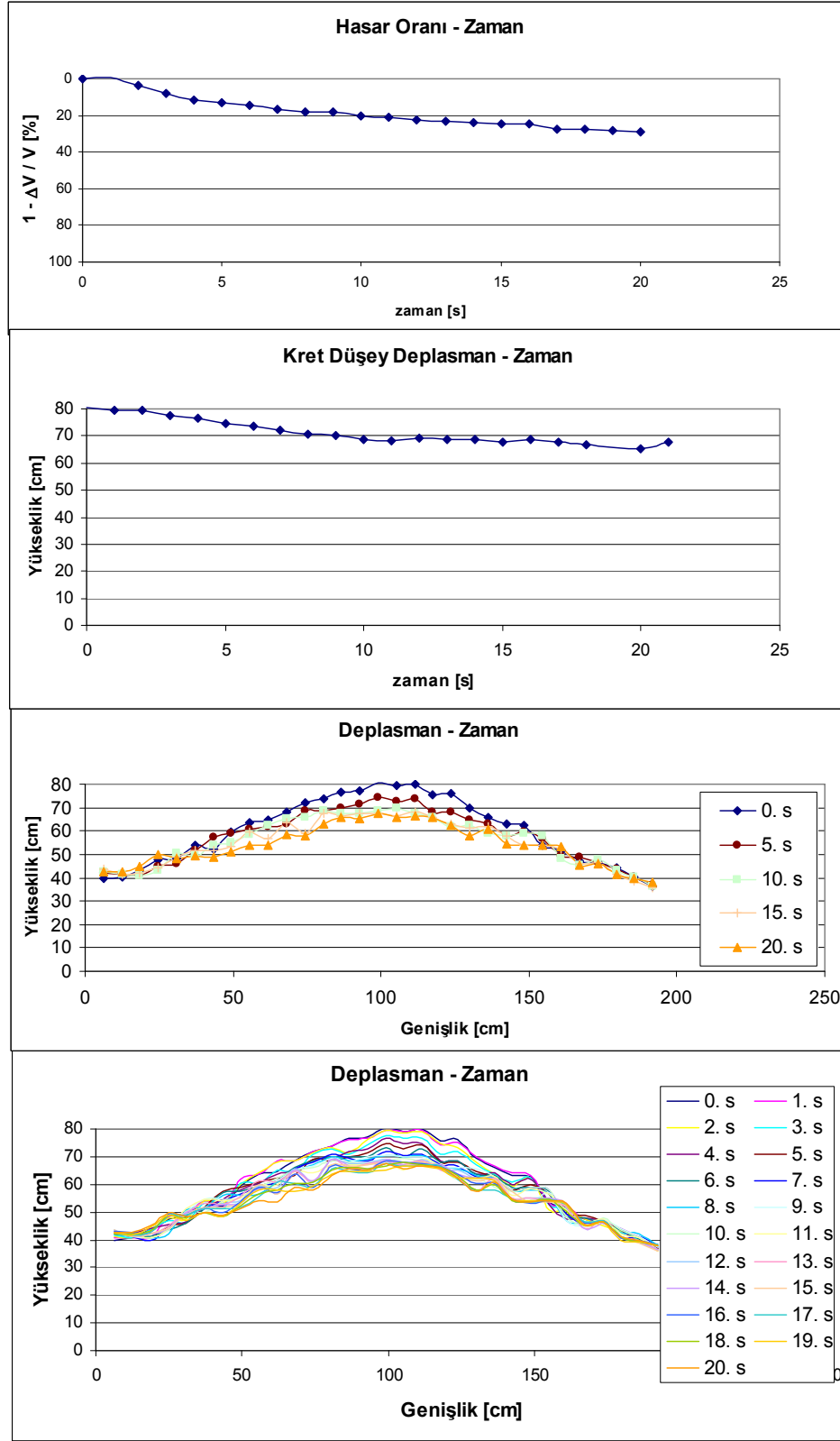
Şekil 5.94 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar(deney-3a)

Deney 3b’de, bir önceki deneyde büyük oranda göçme yaşayan kesit onarılarak dalgakıran kesiti yeniden tekrarlı gerilmeye maruz bırakılmıştır. Kesitte meydana gelen zamana bağlı deplasmanlar üç boyutlu grafik (Şekil 5.95) üzerinde gösterilmiştir. Daha önce çevrimli harekete maruz kalan kesitte kum temel tabakasında rölatif sıkılık arttığından kesitte oluşan hasar oranı daha sınırlı kalarak deney sonunda %30 seviyesine ulaşmıştır(Şekil 5.96). Kret kotunun deney sonunda su seviyesine altına inerek 68cm’ ye düştüğü görülmektedir.



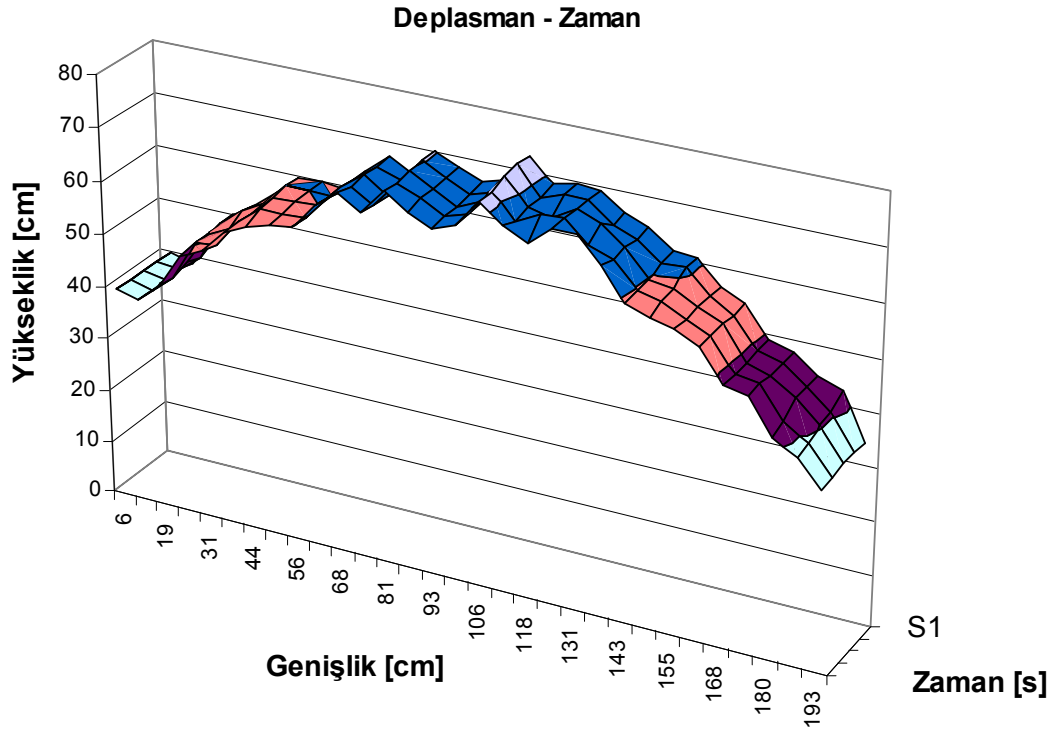
Şekil 5.95 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-3b)



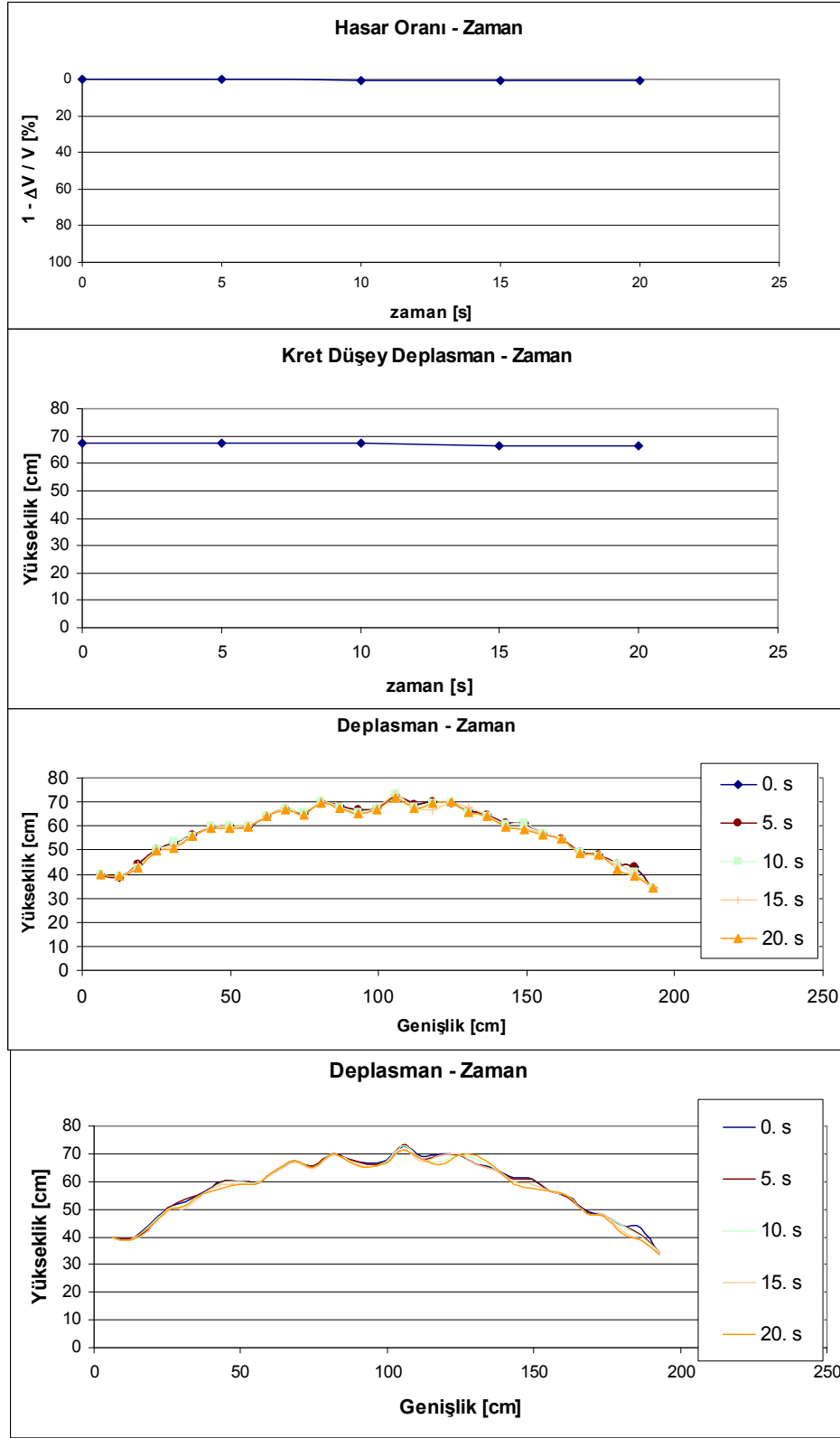


Şekil 5.96 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-3b)

Deney 3c'de daha önce maruz bırakıldığı çevrimli yükleme etkisinde deforme olan kesit onarılmadan yeniden çevrimli harekete tabi tutulmuştur. Üçüncü kez uygulanan tekrarlı hareket nedeniyle kesitte oluşan deplasmanlar çok sınırlı olmuştur(Şekil 5.97). Deney sonunda 3cm kadar düşme meydana gelmiştir(Şekil 5.98).

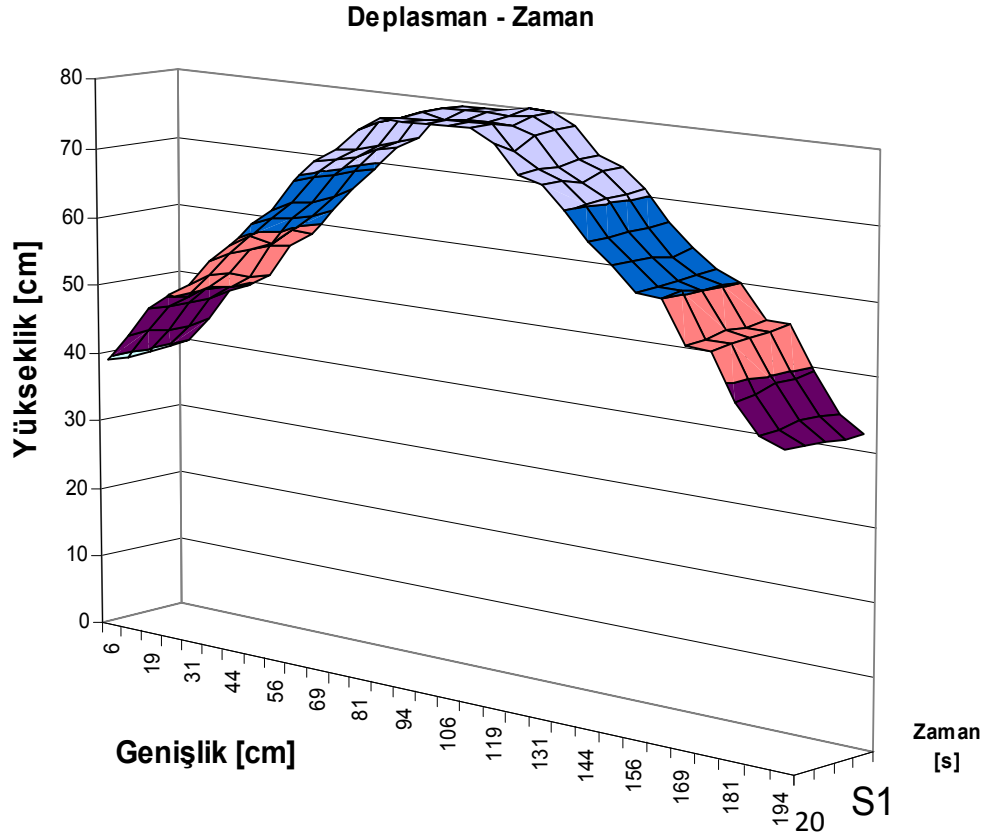


Şekil 5.97 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-3c)



Şekil 5.98 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-3c)

Model 4 deneyinde, dalgakıran kesitinin düşük ivme değerlerindeki davranışı incelemek üzere 0.11g ivme büyüklüğüne sahip tekrarlı hareket uygulanmıştır. Kum temel tabakasında sıvılaşma davranışı meydana gelmediği gibi dalgakıran kesitinde de şekil değiştirme gözlenmemiştir(Şekil 5.99, Şekil 5.100 )

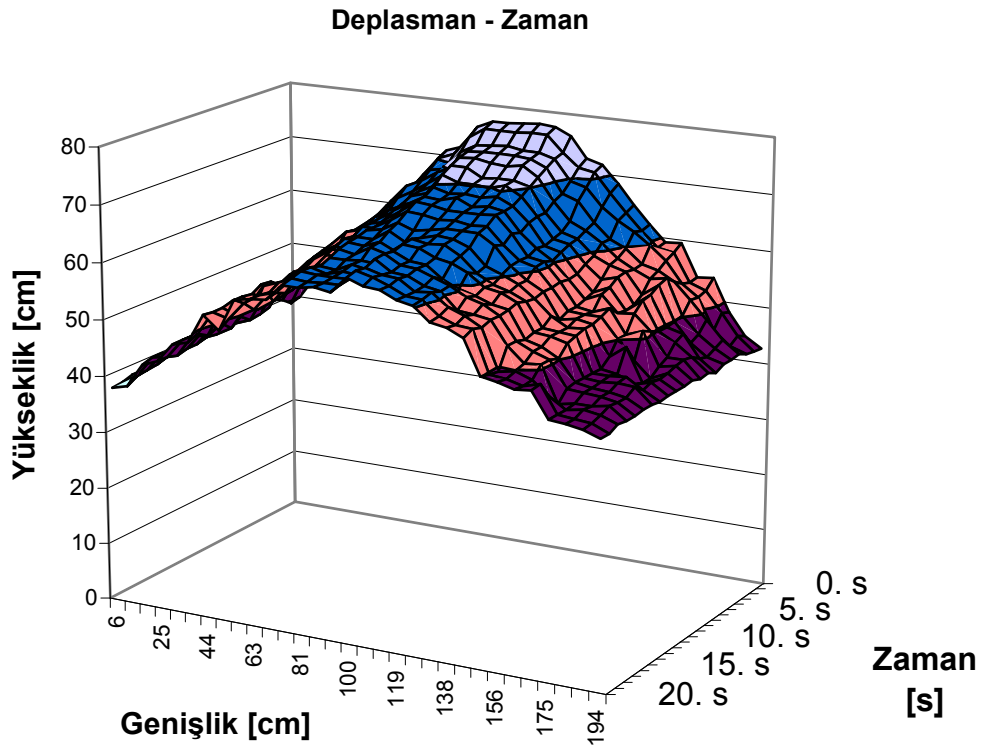


Şekil 5.99 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney durumu-4)

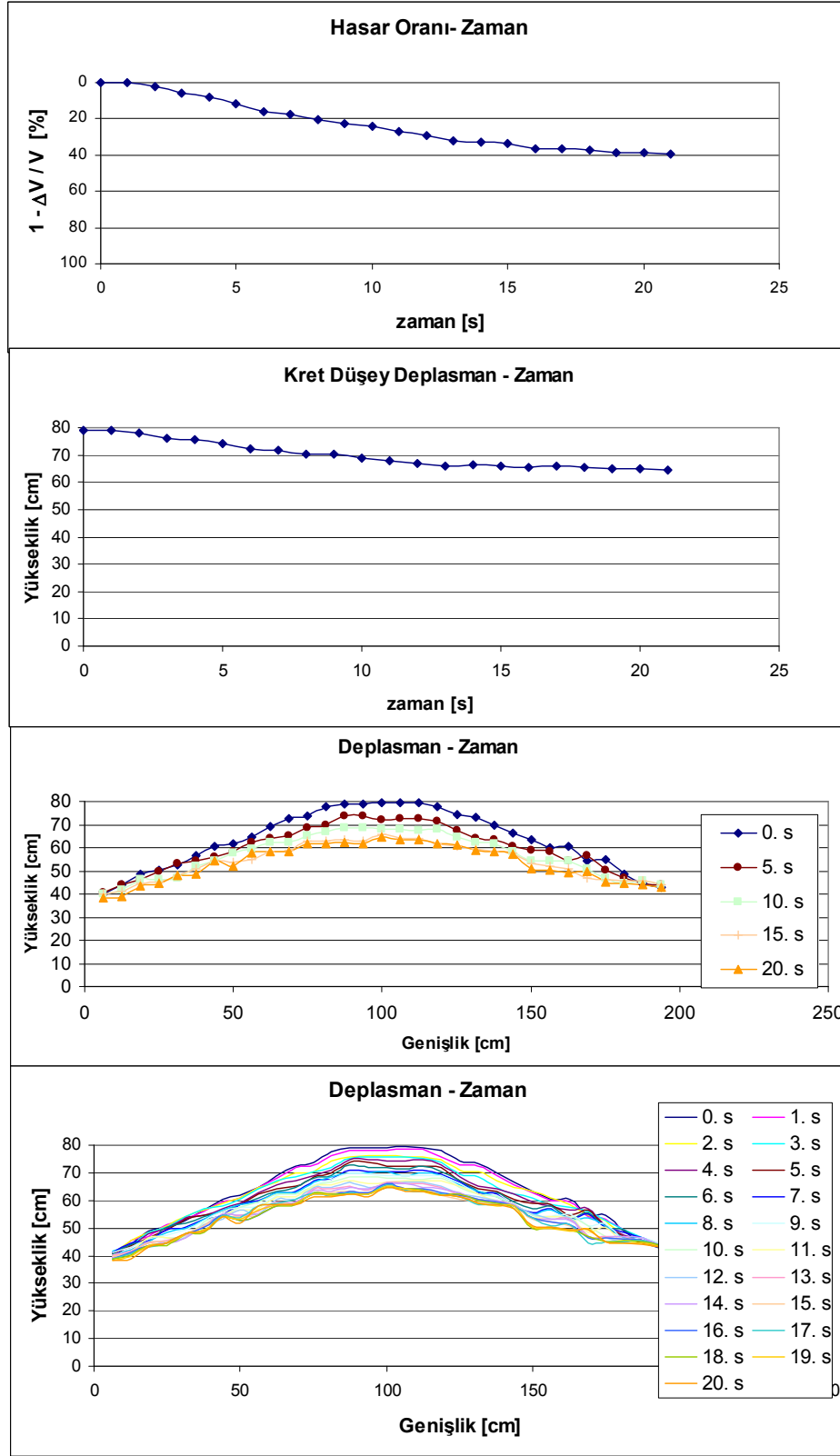


Şekil 5.100 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-4)

Model 5 deneylerinde, Deney 4’de, düşük ivme altında sarsıntıya tabi tutulan ve kesitte şekil değiştirme gözlenmeden dalgakıran üzerinde daha şiddetli tekrarlı hareketler uygulanmıştır. İvme büyüklüğü 0.17g olan Deney 5a’da, şekil değiştirmeler meydana gelmiştir(Şekil 5.101). İlk 6 saniye sonunda hasar oranının yarısı gerçekleşmiş, deney sonunda %40 seviyesine ulaşmıştır(Şekil 5.102). Kretin yaptığı düşey deplasmanlar ilk 7 saniyede hızla artarak kret kotu 80cm’den 70cm’ye inmiş, deney sonunda ise 65cm’ye düşmüştür.

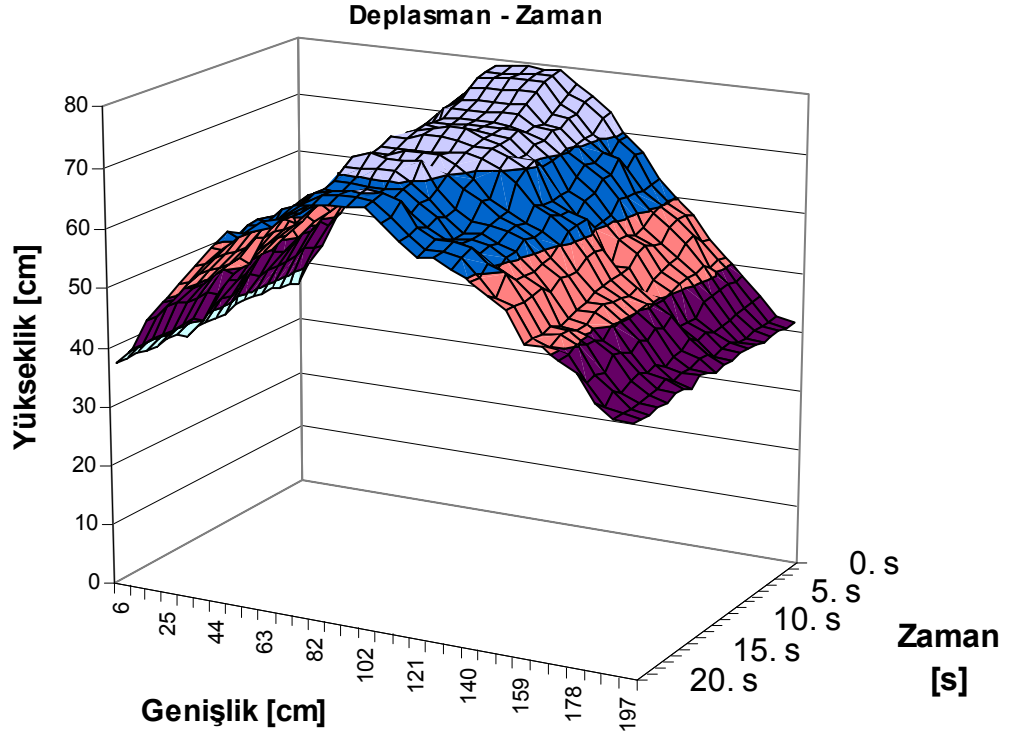


Şekil 5.101 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5a)



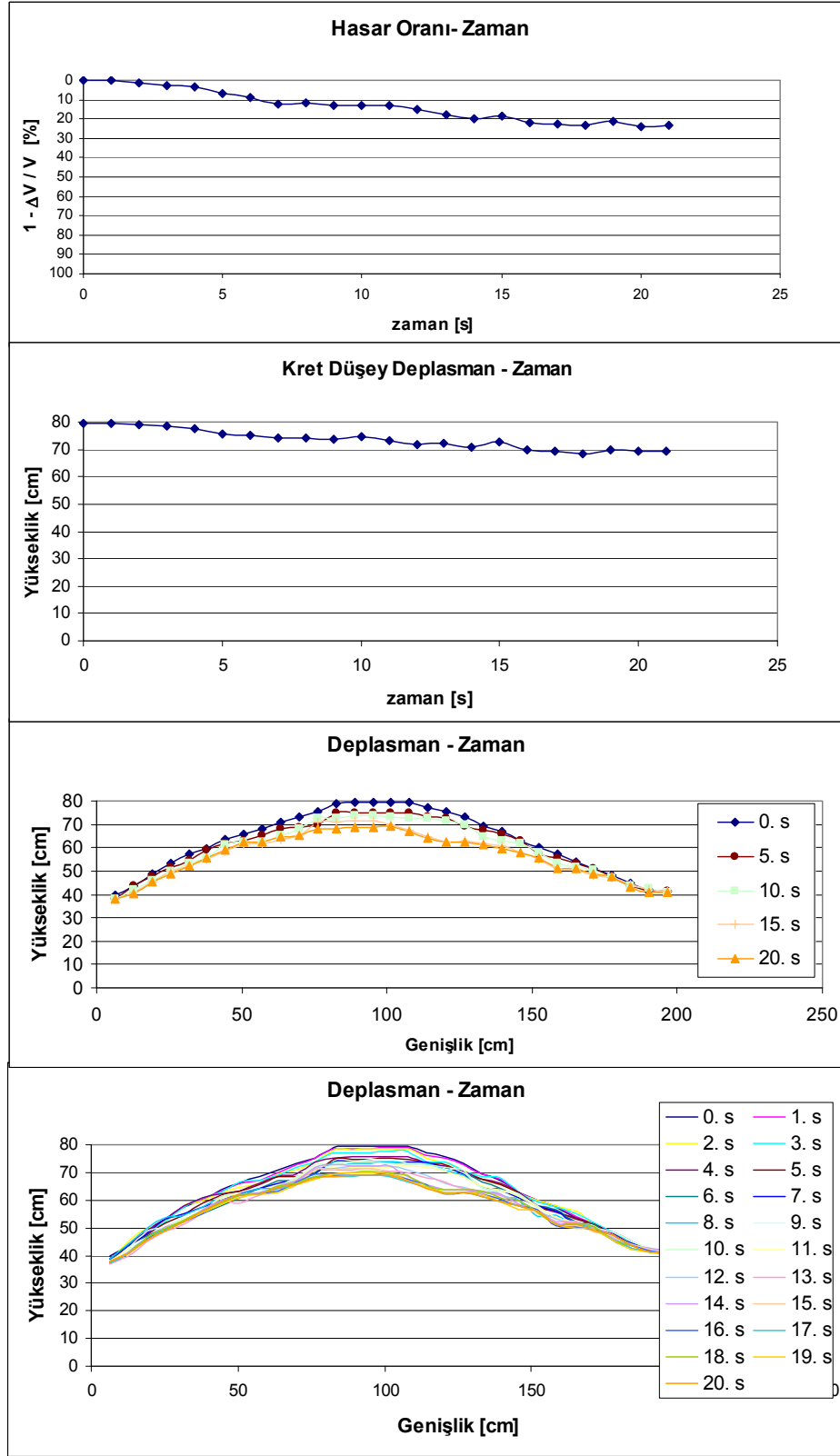
Şekil 5.102 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5a)

Deney 5b'de, bir önceki deneyde deforme olan kesit onarılı olarak daha yüksek ivme büyüklüğünde (0.27g) çevrimli hareket uygulanmıştır. Kesitte meydana gelen deplasmanlar zamana bağlı olarak (Şekil 5.103) gösterilmiştir. Daha önce sarsıntıya maruz kaldığından oluşan şekil değiştirmeler sınırlı kalmıştır. Onarılmış kesitteki hasar oranı deney sonunda %22 seviyesine ulaşmış, kret kotu deney sonunda 69 cm'ye inmiştir (Şekil 5.104).



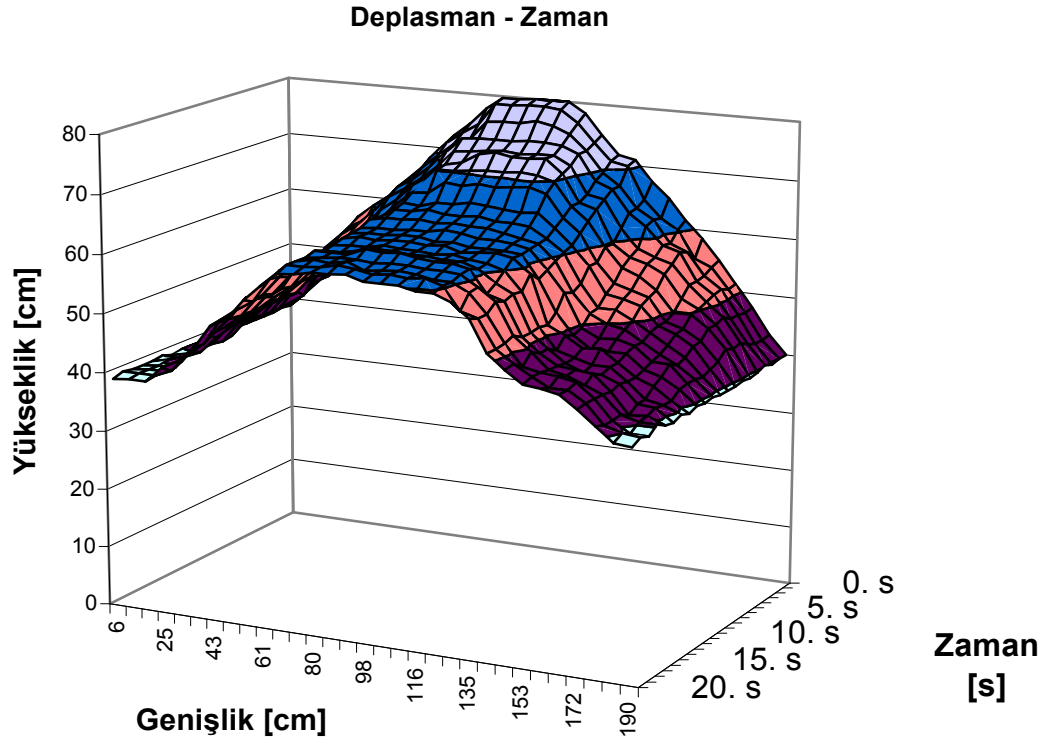
Şekil 5.103 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5b)



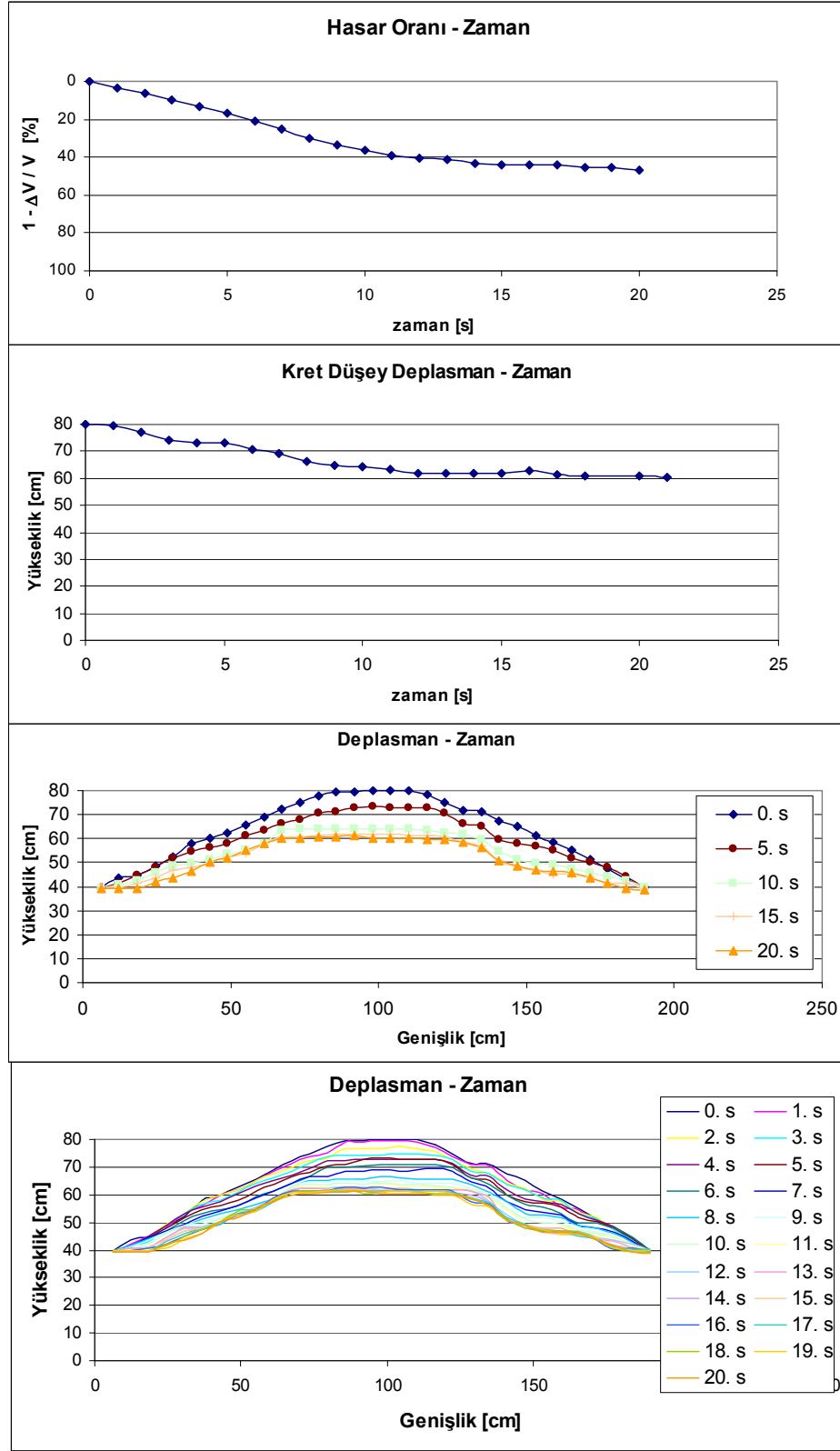


Şekil 5.104 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-5b)

Model 6 deneyleri, içine PVD yerleştirilmiş kum temel tabakası üzerinde oluşturulan dalgakıran kesitine değişik büyüklükte ivme değerlerine sahip tekrarlı gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Deney 6a'da, 0.15g ivmeli çevrimli yükleme boyunca meydana gelen deplasmanlar(Şekil 5.105)'te gösterilmiştir. Kesitteki meydana gelen hasarın büyük bölümü ilk 10 saniyede gerçekleşmiş, deney sonunda hasar oranı %45 seviyesine ulaşmıştır(Şekil 5.106). Kret kotu ise ilk 10 saniyede 65cm deney sonunda ise 60cm'ye düşmüştür.

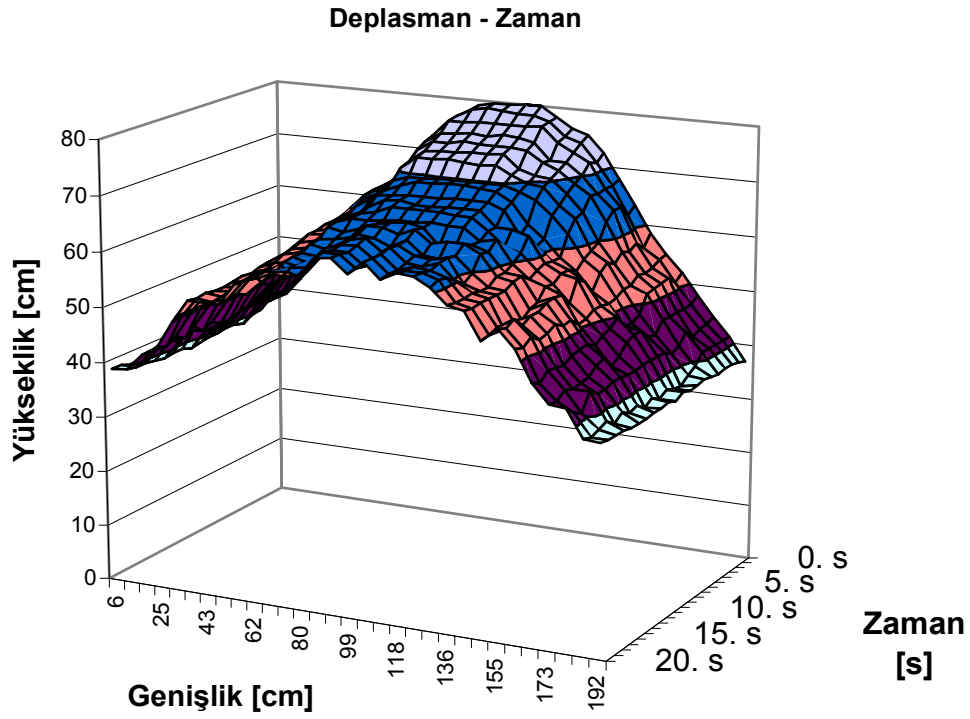


Şekil 5.105 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6a)

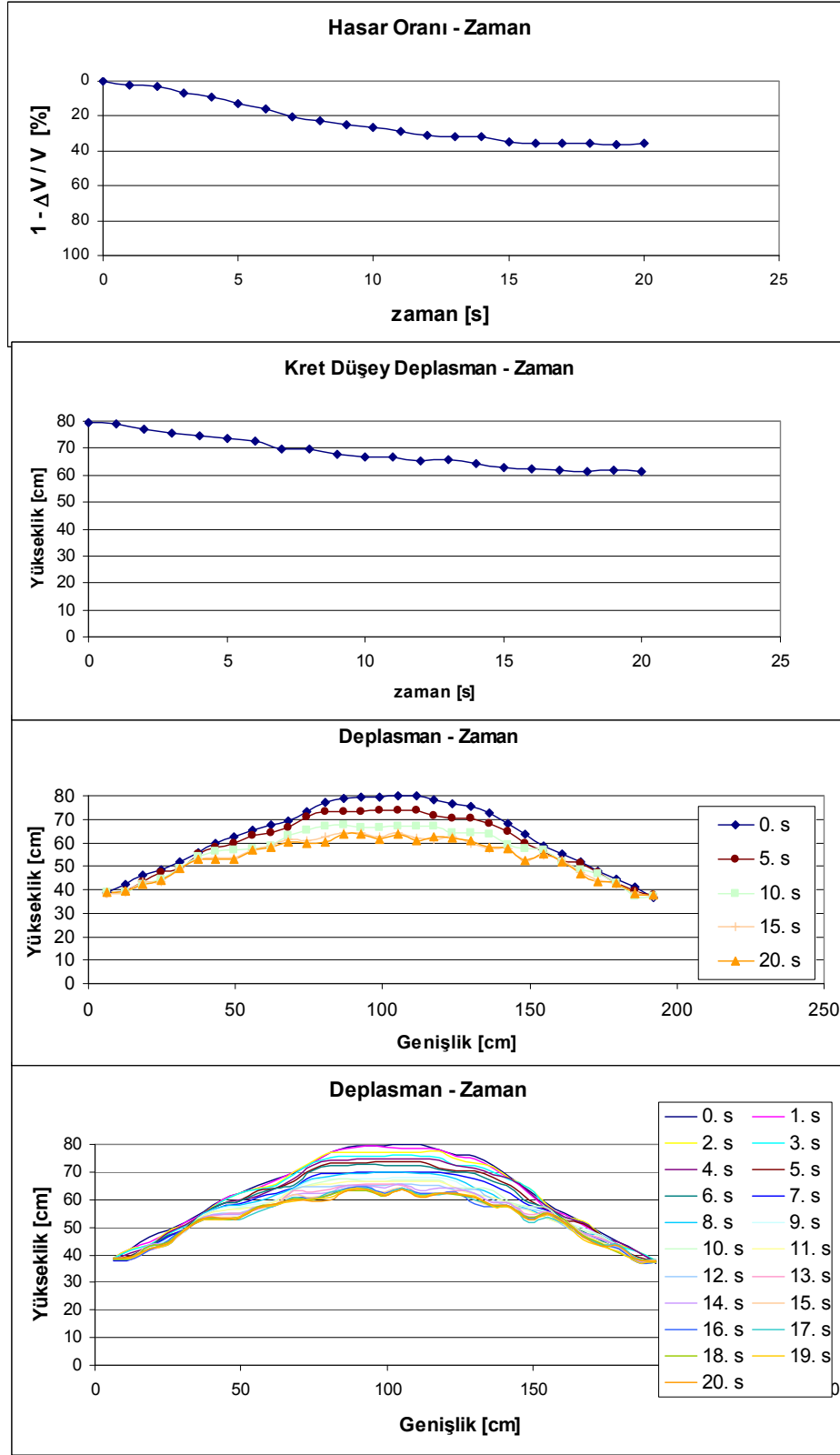


Şekil 5.106 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6a)

Deney 6b'de, bir önceki deneyde deforme olan kesit onarılarak daha büyük ivmeye sahip tekrarlı harekete tabi tutulmuştur. Tüm deney boyunca kesitte oluşan deplasmanlar toplu olarak üç boyutlu grafikte gösterilmiştir(Şekil 5.107). İkinci kez tekrarlı harekete mazruz bırakılmış olduğundan kesitte oluşan şekil değiştirmeler, uygulanan daha yüksek ivmeye (0.25g) rağmen bir önceki deneyden daha az olmuştur. İlk 12 saniye sonunda kesitteki maksimum hasar oranına ulaşılmıştır(Şekil 5.108). Deney sonundaki hasar oranı %37 olmuş, kret kotu ise 62cm'e inmiştir.

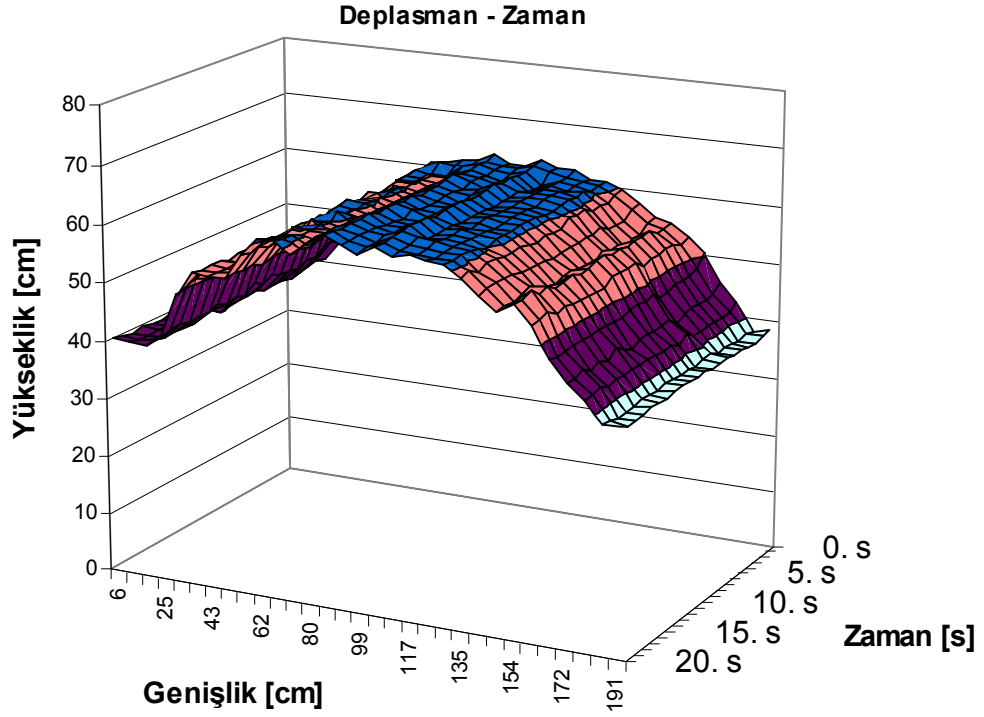


Şekil 5.107 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6b)

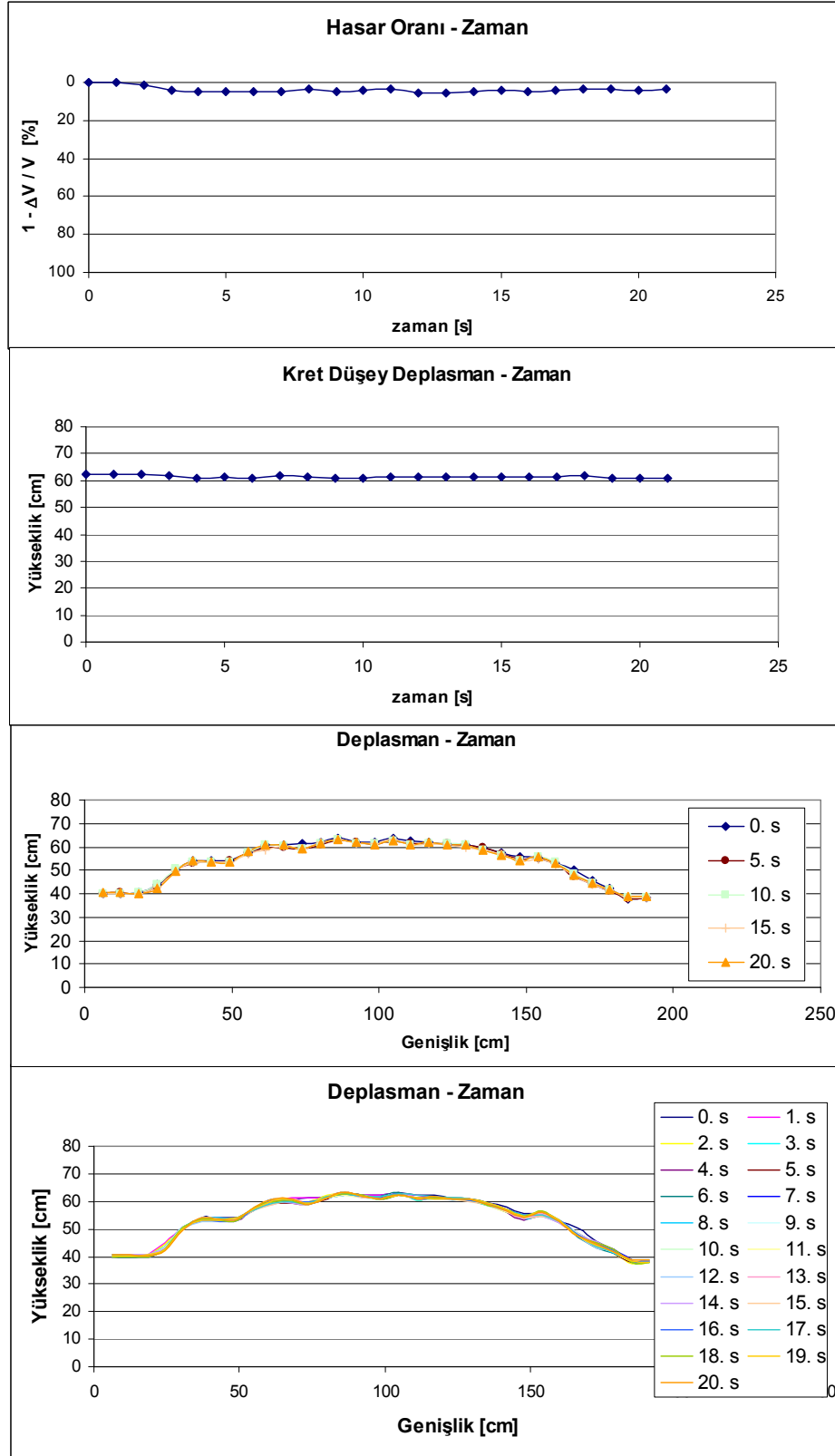


Şekil 5.108 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6b)

Deney 6c'de ise bir önceki deneyde deforme olan kesit onarılmadan 0.19g maksimum ivme değerine sahip çevrimli harekete tabi tutulmuştur. Deney kesiti daha önce iki defa sarsıntıya uğramış olduğundan deplasmanlar çok sınırlı kalmıştır. Zamana bağlı deplasmanlar Şekil 5.109'da gösterilmiştir. Dalgakıran kesitinde oluşan hasar oranı %5 seviyesinde kalmıştır. Kret kotu 61 cm seviyelerine inmiştir(Şekil 5.110).

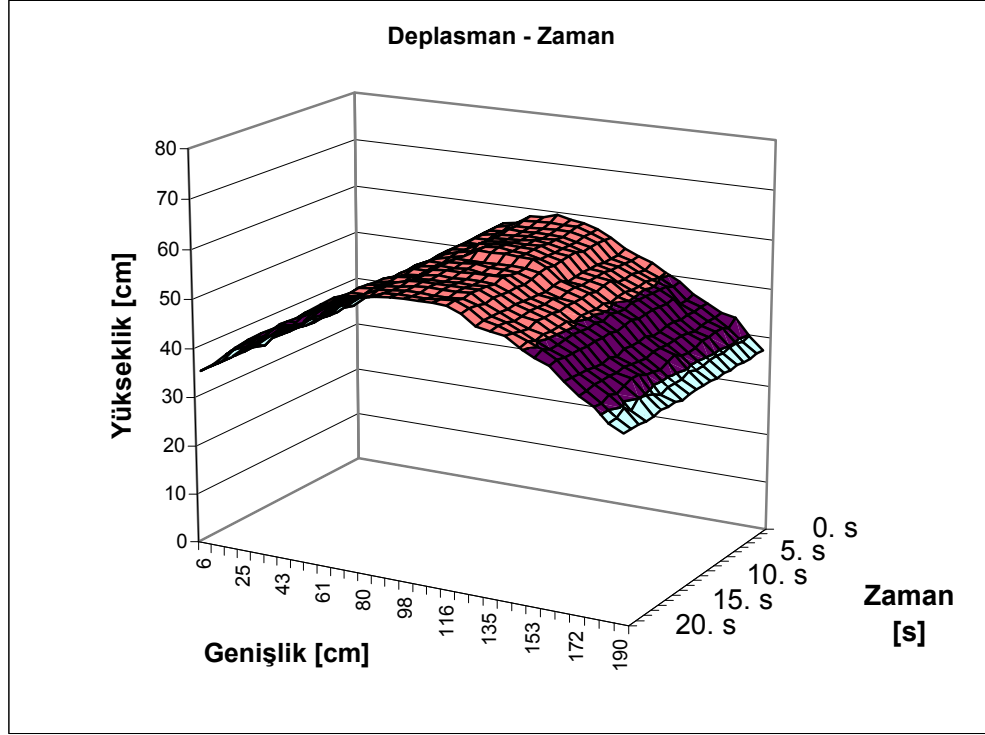


Şekil 5.109 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6c)



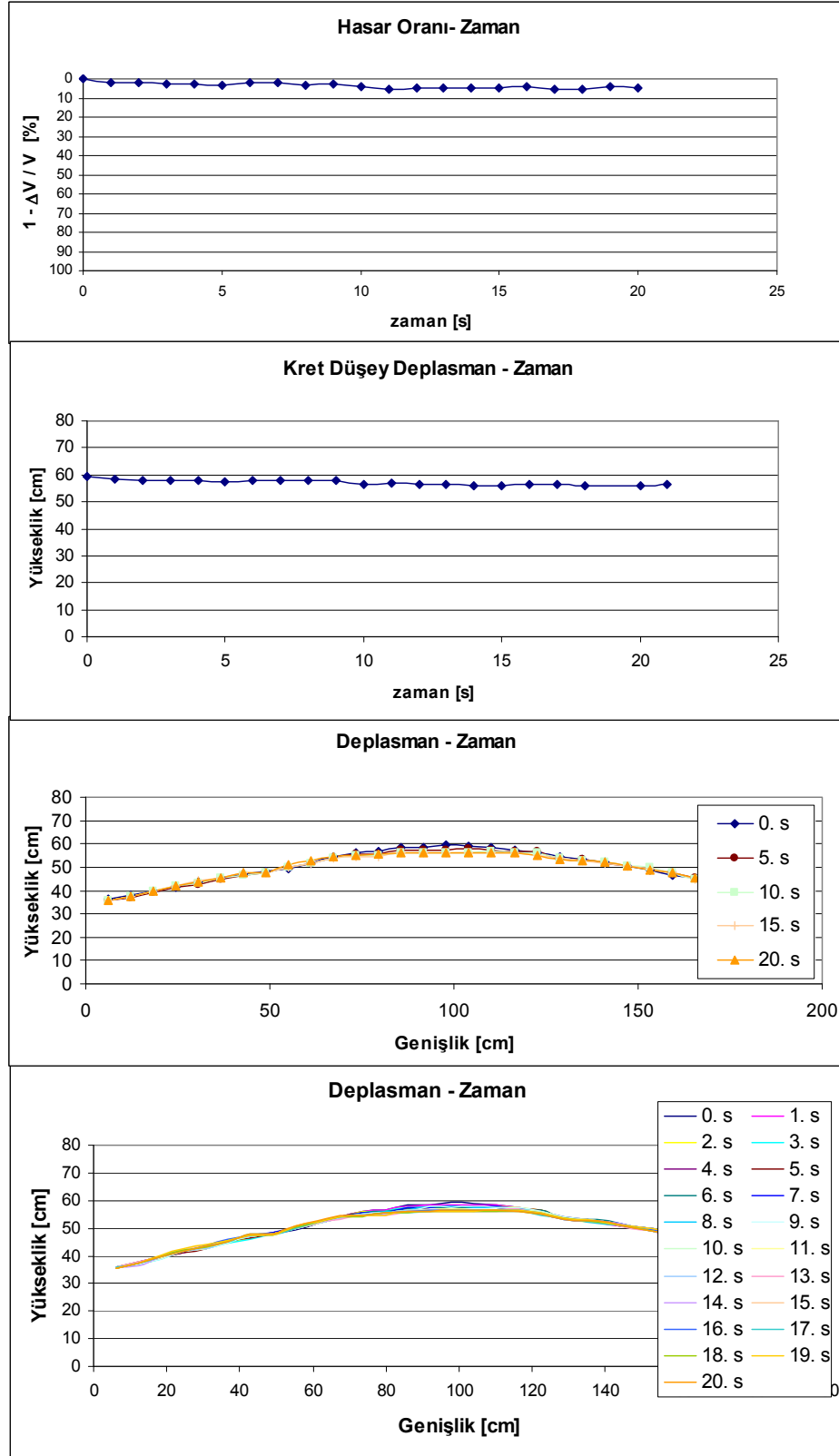
Şekil 5.110 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6c)

Deney 6d'de, bir önceki deney sonunda deforme olan kesit 0.34g ivme ile yeniden çevrimli harekete tabi tutulmuştur. İvme büyüklüğünün artmış olmasına rağmen daha önce üç defa tekrarlı hareket maruz kaldığından deplasmanlar çok sınırlı kalmıştır. Dalgakıran kesitinin zaman bağlı yaptığı deplasmanlar Şekil 5.111'de gösterilmiştir. Kesitte oluşan hasar oranı %5 seviyelerine ancak ulaşabilmiş, kret kotu ise 57cm'ye inmiştir (Şekil 5.112).



Şekil 5.111 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6d)





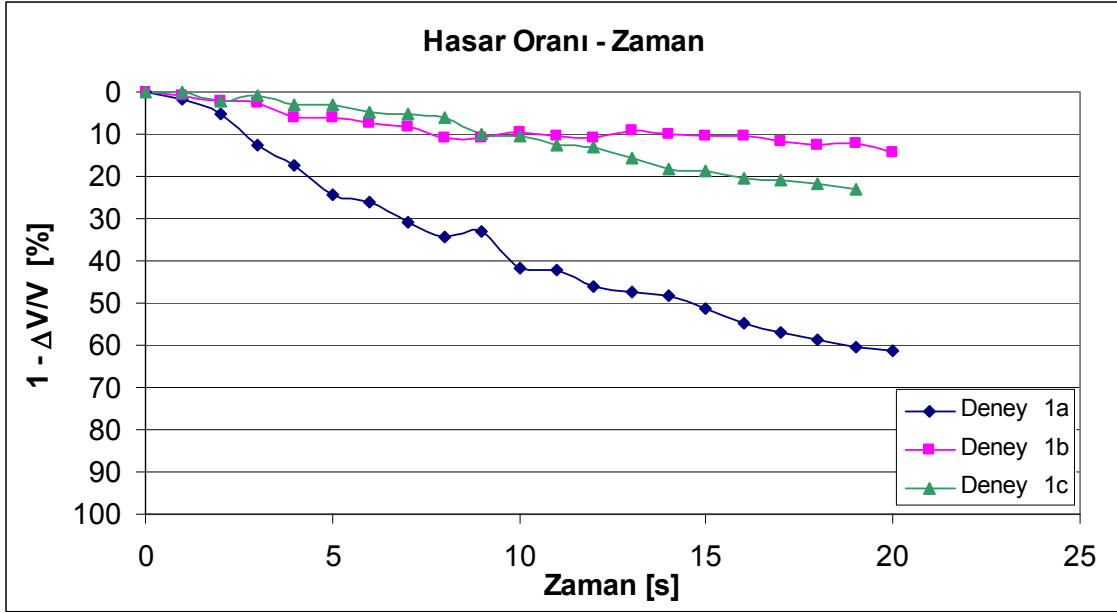
Şekil 5.112 Dalgakıran kesitinde zamana bağlı oluşan deplasmanlar (deney-6d)

### 5.4.3 Dalgakıran Kesitinde Oluşan Deplasmanların İrdelenmesi

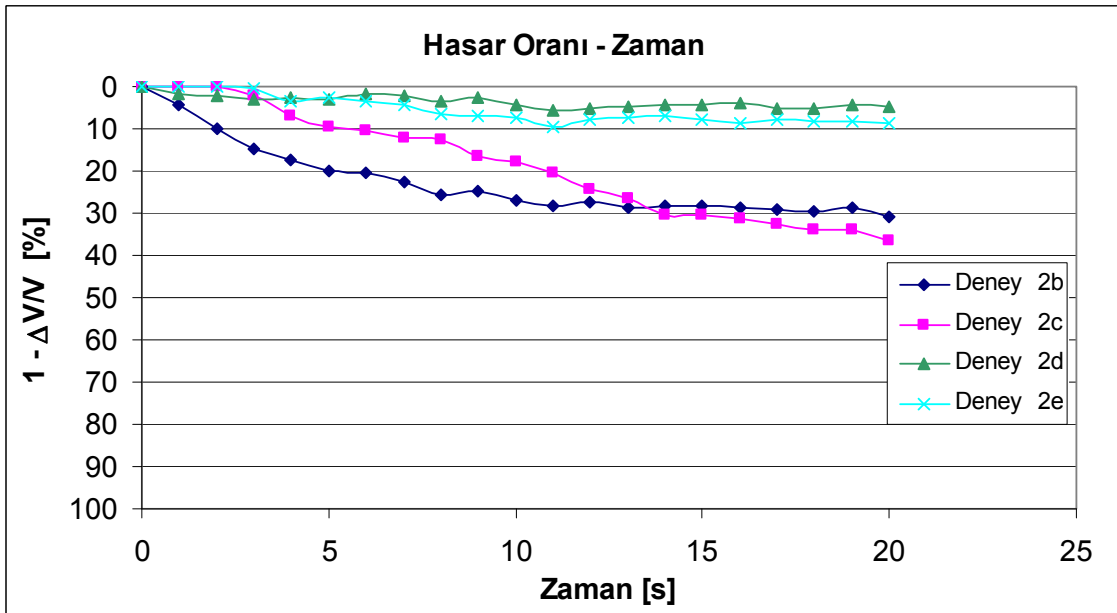
Model deneylerde tabanda uygulanan farklı ivme büyüklüklerinde zamana bağlı olarak dalgakıran kesitinde oluşan deplasmanların irdelenmesi için gerçekleştirilen altı farklı model deney kendi içerisinde irdelenerek orijinal kesite uygulanan tekrarlı yükleme ile onarılmış ve deforme olmuş kesite uygulanan yükleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneylerde orijinal kesite ilk yüklemeye uygulanan farklı ivme büyüklüğündeki hareketlerde gözlenen deplasmanlar incelenmiştir.

Orijinal kesit, onarılmış kesit ve deforme olmuş kesitin davranışlarını karşılaştırmak için Model 1 deneyleri olan 1a,1b ve 1c deneylerinde tabanda uygulanan tekrarlı hareket nedeniyle oluşan hasar oranları aynı grafik üzerinde (Şekil 5.113)'te gösterilmiştir. Orijinal kesit üzerinde yapılan ilk yükleme sonunda hasar oranı %60 seviyesine ulaşmış, deforme olan kesit onarılarak yeniden yüklendiği (Deney 1b) durumda ise hasar oranı azalarak %15 olmuştur. İlk yükleme ile kum temel tabakasının rölatif sıkılığı arttığından, tekrarlı hareketin yarattığı gerilmeler nedeniyle oluşan artık boşluksuyu basıncı sınırlı seviyede kalarak, efektif gerilmedeki düşüş sınırlı olmuş, dolayısıyla dalgakıran kesitinde oluşan deplasmanlar ilk yüklemeye oranla daha küçük olmuştur. Deforme olan kesite uygulanan üçüncü yüklemeye ise sıkılık derecesi artmış kum temelde boşluk suyu basıncı artışlarının sınırlı olmasına karşın uygulanan ivme büyüklüğü arttığından %22 seviyesinde hasar oranı ortaya çıkmıştır.

Model 2 deneylerinde, sıvılaşma gerçekleşmiş tabaka üzerine yerleştirilen dalgakıranın, davranışları incelenmiştir. Deney2b'de, dalgakıran kesiti daha önce sıvılaştıran tabaka üzerine yerleştirildiğinden gerçekleşen hasar oranı ilk 12 saniye sonunda tamamlanarak %30 seviyesinde kalmıştır(Şekil 5.114). Deney 2c'de ise deforme olan kesit onarılmadan yeniden daha büyük ivmeye sahip tekrarlı gerilmeye maruz bırakıldığından, hasar oluşması daha geç başlamasına karşın %35 seviyesine ulaşmıştır. Deney 2d ve Deney 2e'de ise kum temel tabakası daha önceki dinamik yüklemelerde sıkıştığı için, sınırlı miktarda şekil değiştirmeler oluşmuş ve hasar oranı %5-%8 seviyelerinde kalmıştır



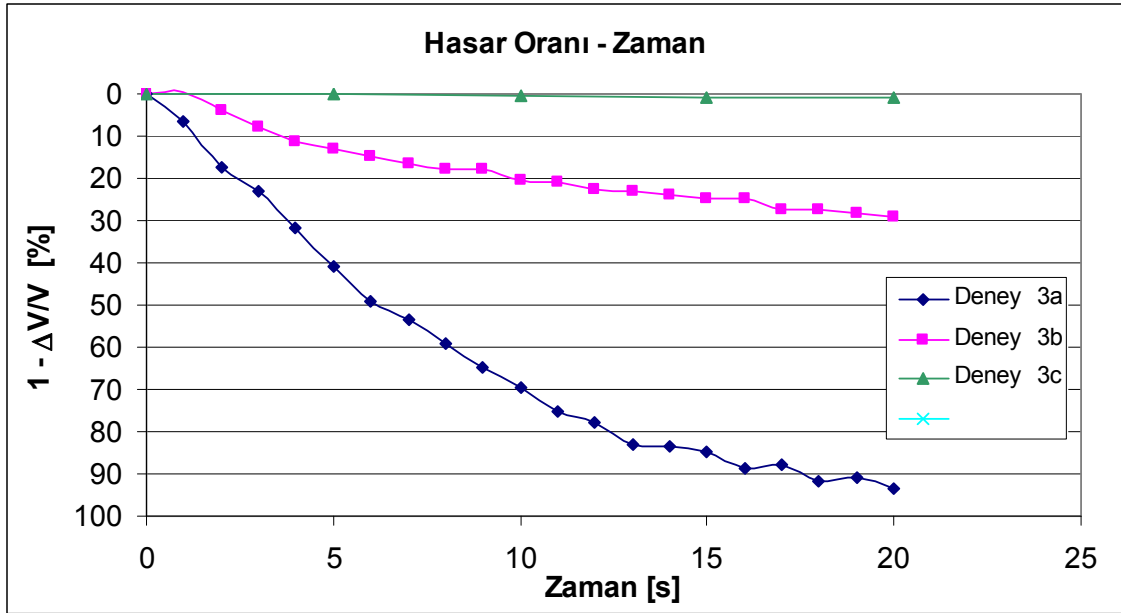
Şekil 5.113 Model 1 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değişirme



Şekil 5.114 Model 2 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değişirme

Model 3 deneylerinde daha önceki deneylerde uygulanan tekrarlı hareketlerden daha büyük bir ivme büyüklüğüne sahip çevrimli hareketler uygulanmıştır(Şekil 5.115).

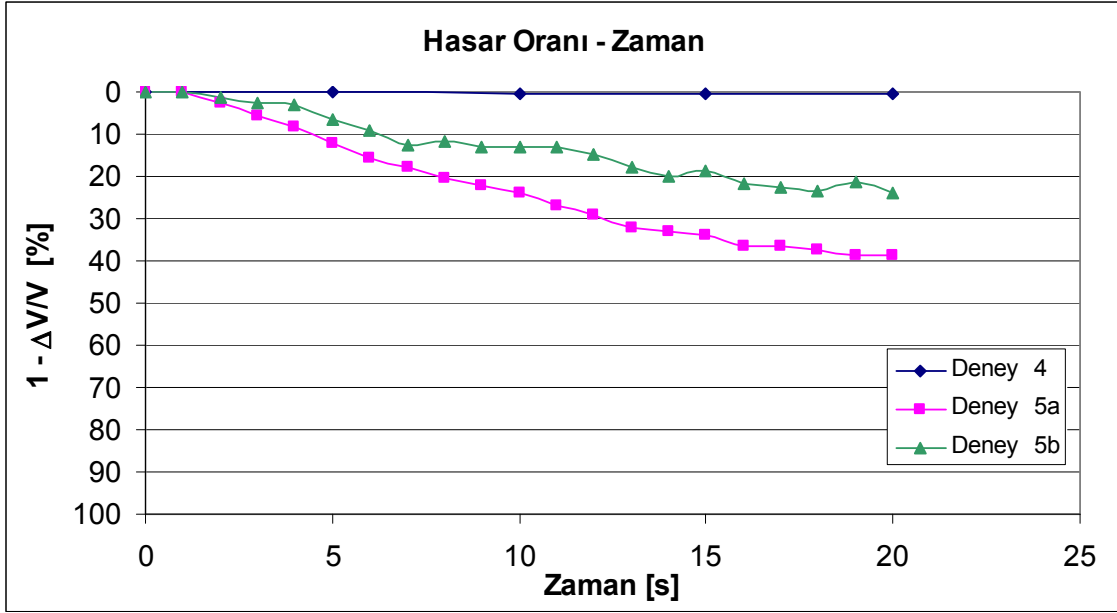
Deney 3a'da, 0.40g maksimum ivmeye sahip tekrarlı hareket uygulandığında kesitte büyük oranda göçme yaşanarak hasar oranı % 95 seviyesine ulaşmıştır(Şekil 5.115). Dalgakıran kesiti onarılarak yeniden çevrimli hareket uygulanmıştır. Deney 3b'de kum tabakası daha önce sıkıştığından ve daha küçük bir ivmeye sahip (0.29g) tekrarlı harekete maruz bırakıldığından, meydana gelen hasar oranı %30 seviyesinde kalmıştır. Deforme olan kesit üzerinde (Deney 3c) yaklaşık aynı şiddette bir dinamik yükleme uygulandığında ise dalgakıran kesitinde ölçülebilir bir hasar meydana gelmemiştir.



Şekil 5.115 Model 3 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiştirmeler

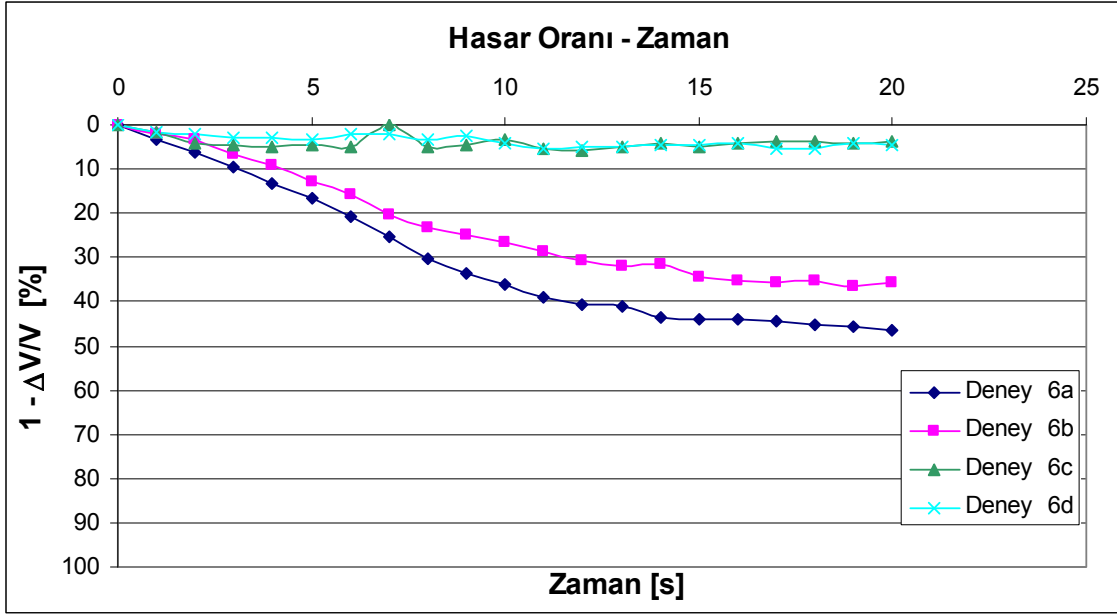
Model 4 deneyinde dalgakıranın hafif bir sarsıntı etkisinde (0.11g) dinamik davranışı incelenmiştir. Uygulanan çevrimli hareketin enerjisi temelde sıvılaşma ve gövdede yer değiştirmeler oluşmasına yol açacak seviyede olmadığından kesitte belirgin bir hasar oluşmamıştır(Şekil 5.116).

Model 5 deneylerinde uygulanan ivme büyüklüğü artırılmış, Deney 5a'da 0.17g ivme etkisinde %40 seviyelerinde hasar oranı oluşmuştur. Deney 5b'de ise kesit onarılarak 0.27g ivme büyüklüğüne sahip tekrarlı yükleme uygulanmış, kum temel daha önceki dinamik yüklemeler sırasında sıkıştığı için hasar oranı azalarak %22 seviyesinde kalmıştır (Şekil 5.116)



Şekil 5.116 Model 4 ve Model 5 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiştirmeler

Model 6 deneylerinde temel zemini içine yerleştirilen PVD'ler ile tekrarlı yükleme sırasında kum temel tabakasında oluşacak artık boşluksuyu basıncının daha hızlı sönümlenmesinin sağlanarak kesitte oluşacak deplasmanların azaltılması araştırılmıştır. Deney 6a'da kesitte meydana gelen hasar oranı %45 seviyesinde olmuştur(Şekil 5.117). Daha sonra kesit onarılarak tekrarlanan deneyde (Deney 6b) kum tabakasının rölatif sıkılığının artması nedeniyle hasar oranı azalarak %37 seviyesine gerilemiştir. Deney 6c ve Deney 6d'de ise deforme olan kesitin davranışı araştırılmıştır. Uygulanan ivmenin 0.19g ve 0.34g olduğu bu deneylerde daha önce iki kere tekrarlı yüklemeye maruz kalmış temel zemininin sıkışmış olmasından dolayı hasar oranı %5 seviyesinde kalmıştır.



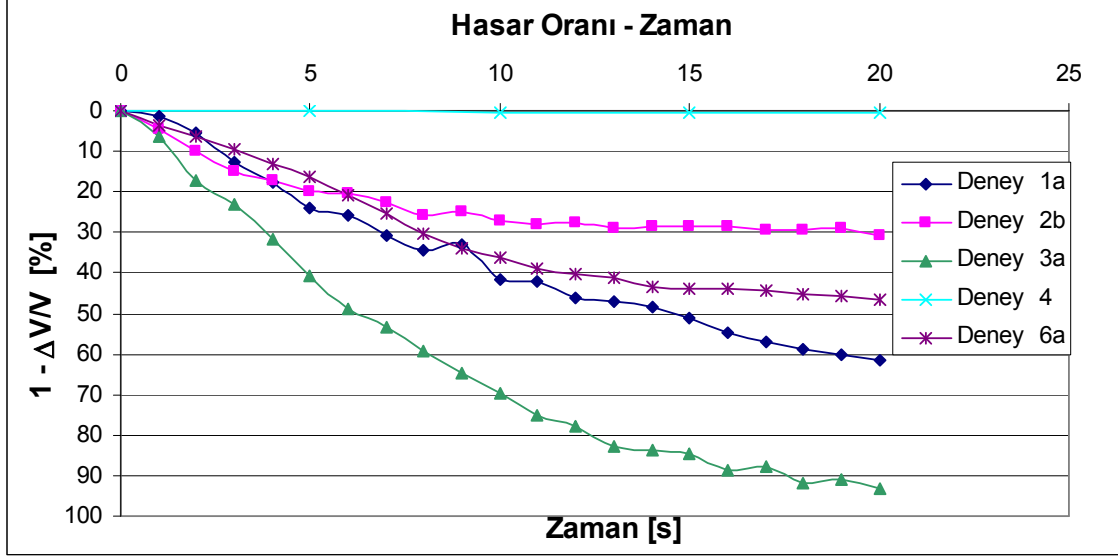
Şekil 5.117 Model 6 deneylerinde dalgakıran kesitinde oluşan hacimsel şekil değiştirmeler

Model deneylerde orijinal (daha önce dinamik yüklemeye maruz kalmamış) kesitlere farklı ivme büyüklüklerinde tekrarlı yüklemeler uygulanmıştır. ( 1a, 2b, 3a, 4 ve 6a) Uygulanan ivme büyüklüğüne bağlı olarak büyük oranda hasar meydana geldiği ve hasar oranının %60 seviyesinden % 95 seviyesine yükseldiği görülmektedir. Sıvılaşabilen kesit üzerine yerleştirilmiş dalgakıran ile daha önce sıvılaşma geçmişi olan kum tabaka üzerine yerleştirilen dalgakıran kesitlerinin dinamik davranışları karşılaştırıldığında daha önce tekrarlı gerilme yaşamış olan kesitte rölarif sıklık arttığından kesitte oluşan hasar oranının yarı yarıya azalarak %60 seviyesinden %30 seviyesine gerilediği görülmektedir(Şekil 5.118). Bunun ana nedeninin, temel zeminini oluşturan kum tabakasının sıklık derecesinin daha önce maruz kaldığı dinamik yükler etkisinde artmış olması olduğuna inanılmaktadır. Ancak dalgakıran kesitinde de daha önceki yüklemeler etkisi ile daha sıkı yerleşme olması mümkündür.

Temel zeminine PVD yerleştirilmiş kum kesit üzerine yerleştirilen dalgakıran davranışı incelendiğinde ise (Model 6) nihai hasar oranında bir miktar azalma görülmekle birlikte bu azalmanın belirgin olmadığı gözlenmektedir.

Dolayısıyla sıvılaşabilen tabakalar üzerindeki dinamik davranışının iyileştirilmesine çözüm önerisi olarak düşünülen PVD' lerin kum tabaka içerisine yerleştirilmesinin katkısı sınırlı

olmuştur. Deneylerde PVD 'lerin yerleşim aralıklarının PVD performansına büyük oranda etkilediğinden farklı yerleşim şartlarında deneylerin tekrarlanması düşünülebilir.

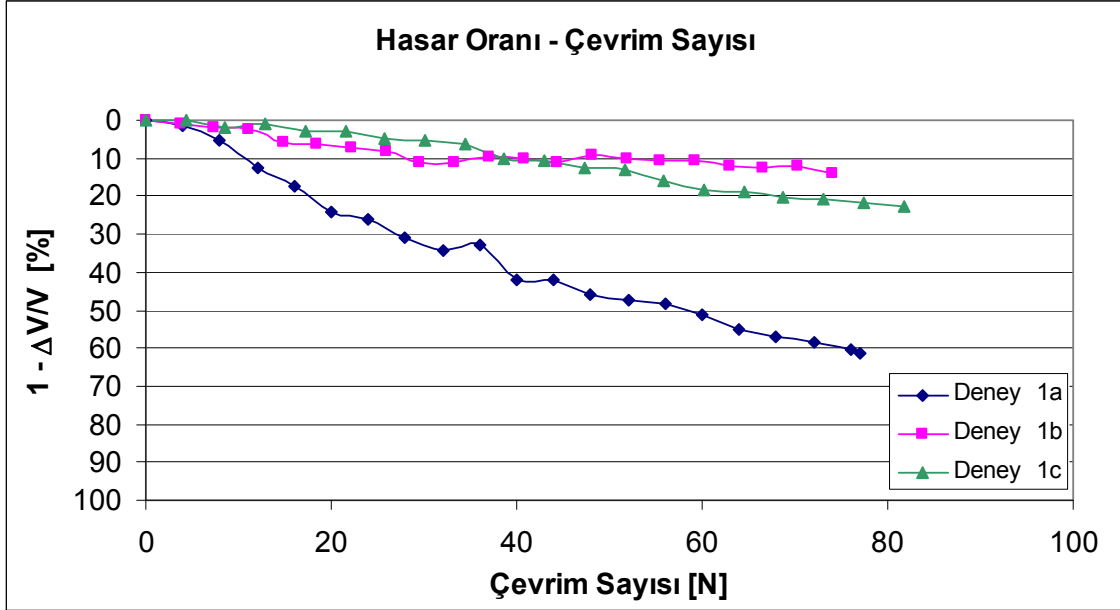


Şekil 5.118 Orjinal dalgakıran kesitinde farklı şiddette dinamik yüklemeler etkisinde oluşan hacimsel şekil değiştirmelerin karşılaştırılması

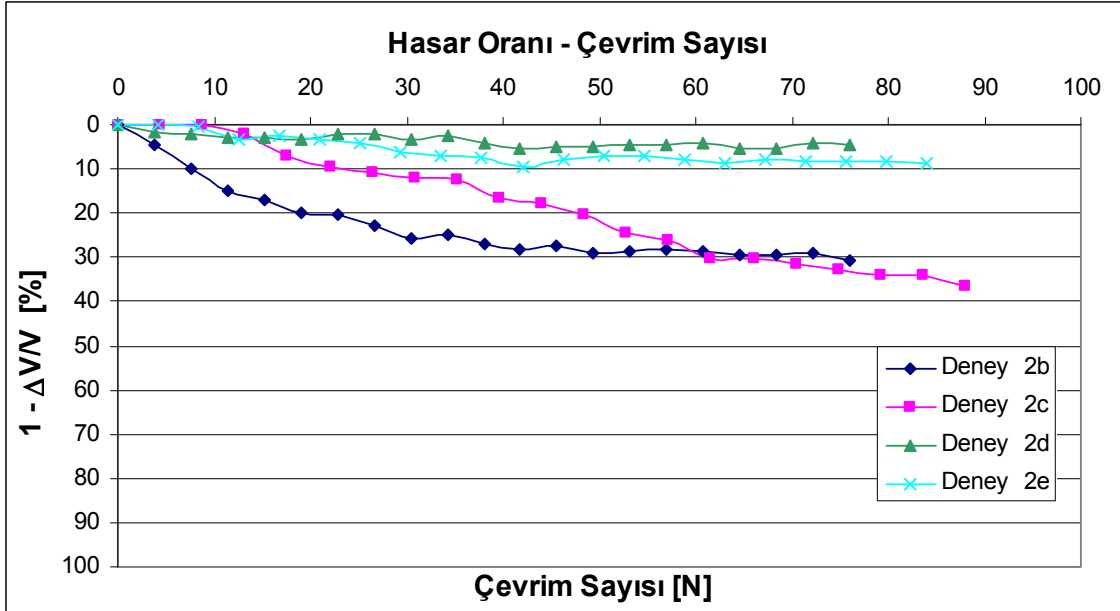
#### 5.4.4 Hasar Oranı Çevrim Sayısı İlişkisi

Model deneylerde meydana gelen hasarın yük çevrim(tekror) sayısı ile ilişkisi Şekil 5.119-Şekil 5.123 'te gösterilmiştir. Model 1 deneylerinde, yaklaşık olarak 80 -100 çevrim boyunca tekrarlı hareket uygulanmıştır(Şekil 5.119). Orjinal kesitte dalgakıran şekil değiştirmeleri 4 çevrim sayısında başlayarak 40 çevrim sayısına kadar hızlıca artmış, 80 çevrim sayısına kadar hızı azalarak devam etmiştir. Onarılmış kesitte ise 8 çevrimden itibaren hareket başlamış 30 çevrimden sonra hasar oranı yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Deforme kesitte ise 10 çevrimden itibaren başlayan hasar 80 çevrime kadar artarak devam etmiş sonra sabit kalmıştır.

Model 2 deneylerinde orjinal kesitte 4. çevrimde başlayan hasar 40. çevrime kadar arttıktan sonra çevrim sayısı artmasına rağmen hasar oranı sabit seviyede kalmıştır(Şekil 5.120). Deforme kesitte (2c) hasar 13. çevrimden başlamış ve 60. çevrime kadar devam etmiş daha sonra artış hızı azalmıştır. Onarılmış kesitte hasar oranı 6. çevrimde başlamış ancak hasar sınırlı seviyede kalmıştır. Dördüncü kez sarsıntıya tabi tutulan kesitte (2e) hasar oluşması 12.çevrimden itibaren başlayarak 40. çevrime kadar sınırlı düzeyde arttıktan sonra hasar oranı sabit kalmıştır.



Şekil 5.119 Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model1)



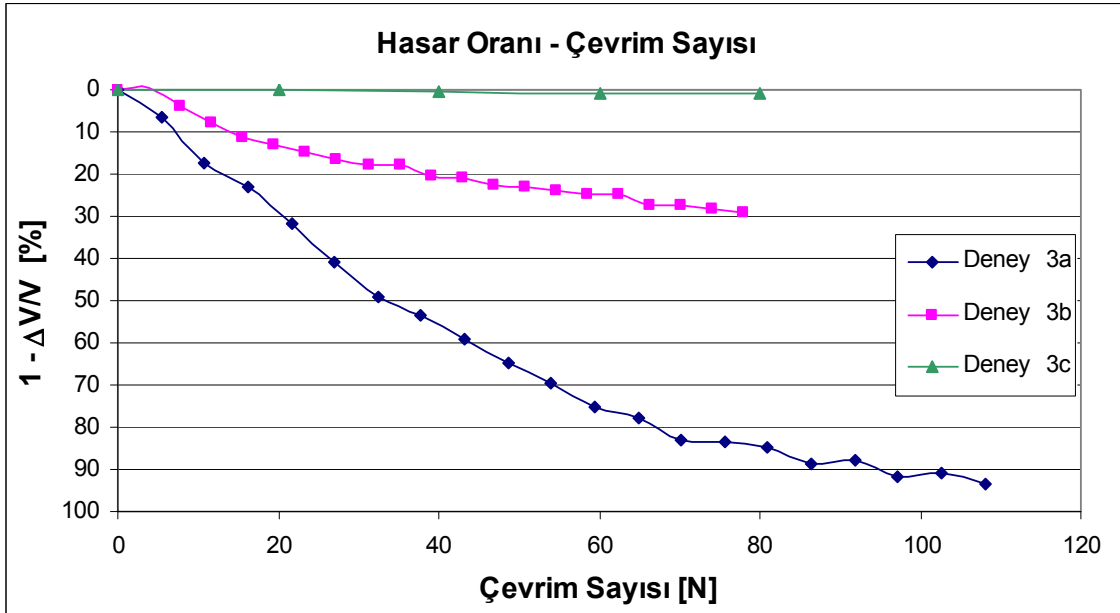
Şekil 5.120 Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 2)

Model 3 deneylerinde(Şekil 5.121) uygulanan yüksek ivme nedeniyle hasar oranı 1. çevrimden itibaren hızla artmış ve kesitte büyük oranda hacim kaybı meydana gelmiştir.

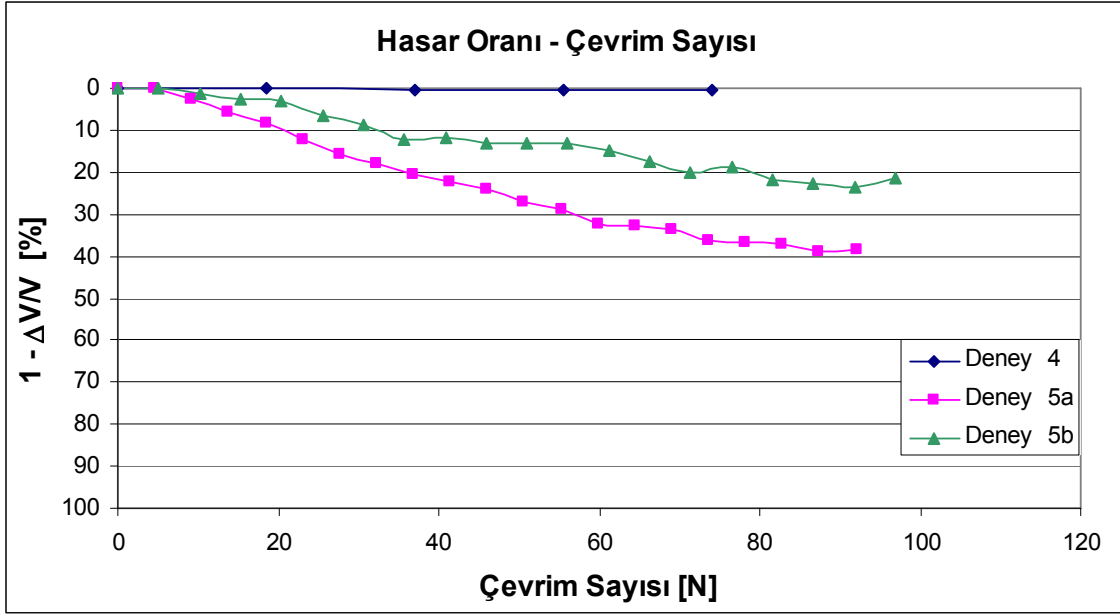


Onarılan kesitte (3b) ise hasar 7. çevrimden başlayarak 40. çevrime kadar artmış, daha sonra artış hızı azalarak 80. çevrime kadar hasar devam etmiştir. Onarılmış kesitte(3c) ise daha önce iki kez yüksek ivme büyüklüğünde tekrarlı hareket uygulandığından 80. çevrime kadar devam eden dinamik yükleme altında belirgin bir hasar oluşmamıştır.

Model 4 deneyinde 0.11g ivme büyüklüğünde hafif şiddette bir tekrarlı hareket uygulandığından 80 çevrim yükleme altında hasar oluşmamıştır(Şekil 5.122). Daha sonra ivme büyüklüğü artırılarak yapılan 5a deneyinde 5. çevrimden itibaren hasar başlamış, 60. çevrimden sonra yaklaşık sabit seviyede kalmıştır. Onarılmış kesitte ise(5b) hasar oranı 10. çevrimden itibaren başlayarak bir önceki deneye göre düşük hızda devam etmiştir.

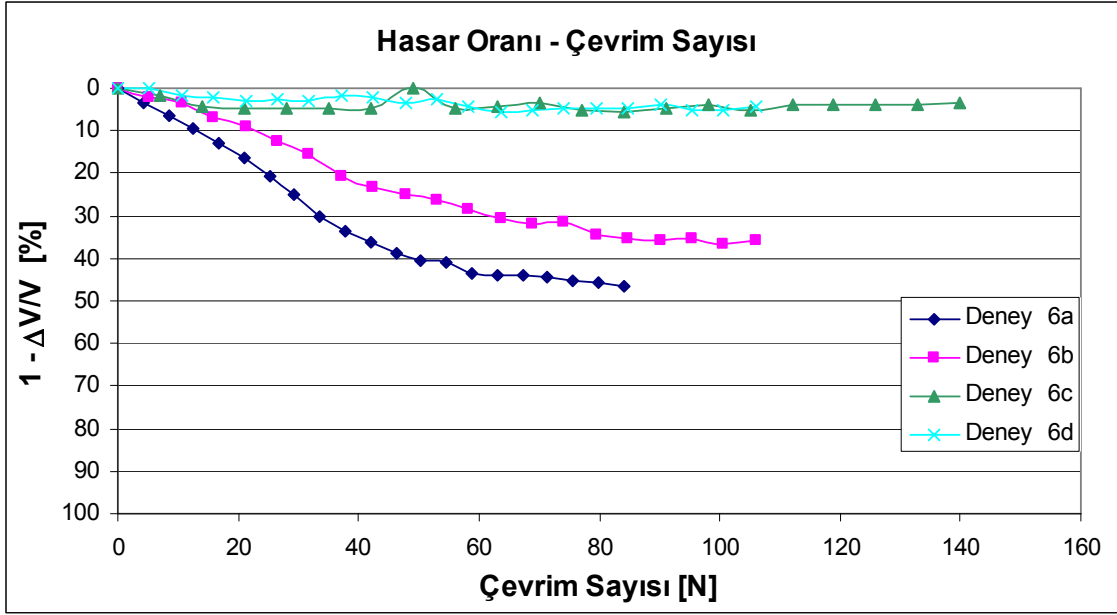


Şekil 5.121 Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 3)



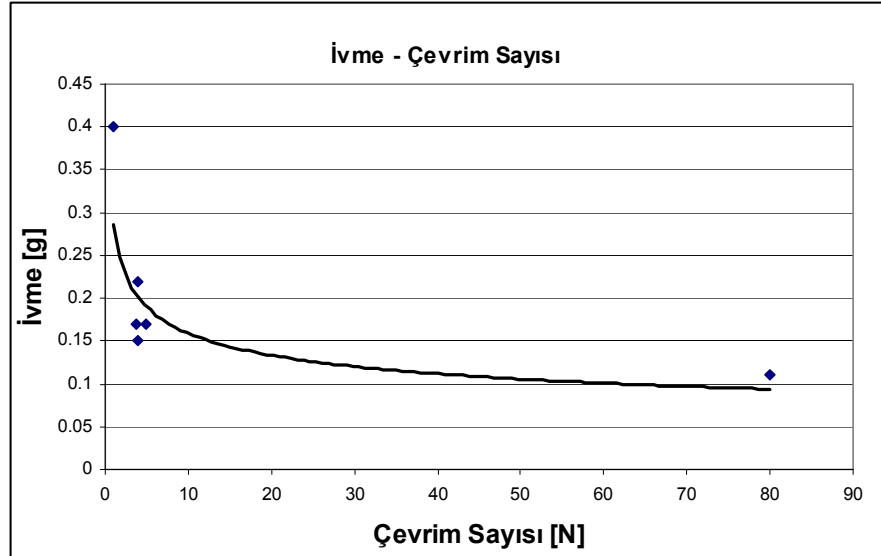
Şekil 5.122 Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 4 ve 5)

Model 6 üzerinde yapılan 6a deneyinde hasar oluşması 4. çevrimden itibaren başlayarak 45 çevrime kadar arttıktan sonra 65 çevrimden itibaren yaklaşık sabit seviyede kalmıştır(Şekil 5.123). Onarılan kesitte(6b) hasar 8. çevrimden itibaren başlamış, bir önceki deneye göre daha düşük hızda devam ederek 60. çevrimden sonra yaklaşık sabit seviyede devam etmiştir. Deforme olan kesite(6c ve 6d) uygulanan tekrarlı hareketler sonrasında hasar oluşması 10. çevrimde başlamış ancak sınırlı düzeylerde kalmıştır.



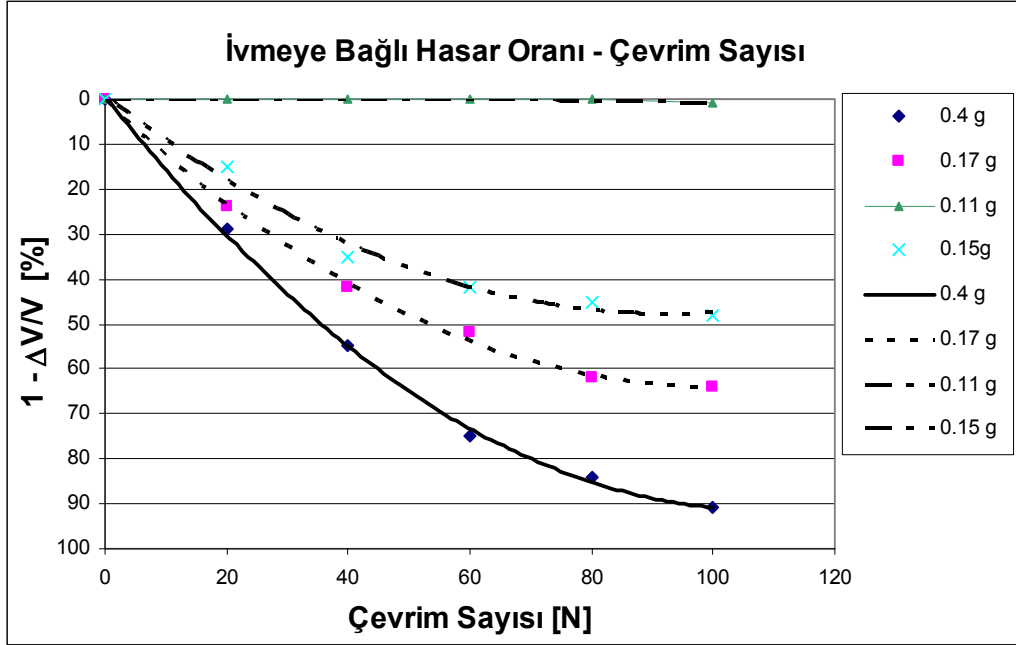
Şekil 5.123 Hasar oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Model 6)

Model deneylerde dalgakıran kesitlerine tabanda uygulanan yatay ivme nedeniyle oluşan hasar başlangıcına yolaçan yatayivme - çevrim sayısı ilişkisi Şekil 5.124' te gösterilmiştir. Kesitte meydana gelen hasarın artan ivme ile birlikte ilk çevrimden itibaren başladığı görülmektedir. Uygulanan yatay ivme değeri azaldıkça kesitte hasar oluşması için gerekli çevrim sayısı artmaktadır.



Şekil 5.124 Dalgakıran kesitinde hasar başlangıç eğrisi

Dalgakıran kesitinde uygulanan ivme şiddeti ve çevrim sayısına bağlı olarak gelişen hasar oranı Şekil 5.125' te gösterimiştir. Dalgakıran kesitine uygulanan ivme şiddeti arttıkça hasar oranı ilk çevrimlerden itibaren hızla artmaktadır. 0.40 g ivme büyüklüğü ile 0.17g ivme büyüklüklerinde görülen hasar oranları karşılaştırıldığında, 100 çevrim sonunda kesitte görülen hasar seviyesinin yaklaşık iki kat olduğu görülmektedir. İvme şiddeti 0.40g seviyesinde olduğunda kesitte büyük oranda hasar görülmekte, ivme şiddeti 0.15 g seviyesinde iken hasar oranı 100 çevrim sonunda %45 seviyelerine ulaşmaktadır. İlk 20 çevrim sayısında kesitte görülen hasar oranları incelendiğinde, 0.15g maksimum ivme değerinde %15 hasar oranına ulaşılırken, ivme şiddeti 0.40g büyüklüğüne çıktığında kesitte görülen hasar oranı iki kat artarak %30 seviyelerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.125 İvmeye bağlı hasar oranı - çevrim sayısı ilişkisi

#### 6.1 Giriş

Fiziksel model deneyi uygulanan sıvılaştırılabilir kum zemine oturan dalgakıran kesitinin dinamik (tekrarlı) yükler etkisinde davranışının incelenmesi amacı ile DIANA Sonlu Elemanlar Programı ile sayısal analizler iki ana başlık altında sayısal analizler yapılmıştır.

##### A)Elastik Analizler

- i) Kuru hal( Mohr Coulomb Malzeme Modeli) statik analiz
- ii) Su altında statik analiz
- iii) Özdeğer analizi(Kuru Hal)
- iv) Özdeğer Analizi ( Su – yapı etkileşimi dikkate alınarak)

##### B) Nonlineer Dinamik Analiz

- i) Dinamik Davranış Analizi (Duncan-Chang Malzeme Modeli)
- ii) Sıvılaştırma Analizi

#### 6.2 Elastik Analizler

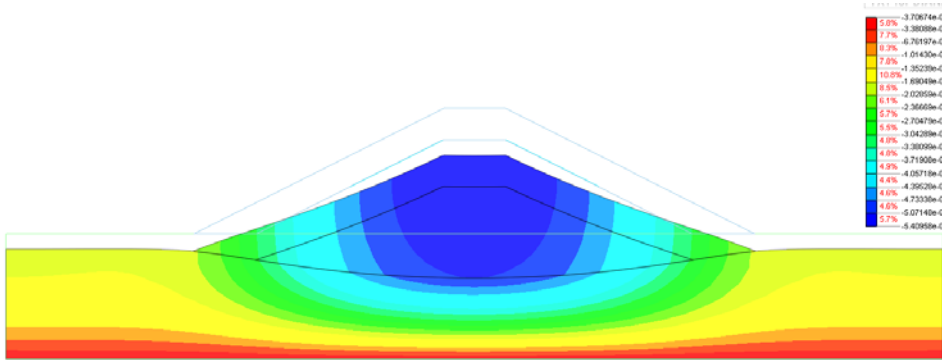
Dalgakıran kesiti ve sıvılaştırılabilir tabakadan oluşan model deney sisteminin davranışına ilişkin ön değerlendirmeler yapabilme amacı ile önce kuru halde elastik analizler yapılmıştır. Daha sonra sistemin kendi ağırlığı ve su basıncı altında, Mohr Coulomb malzeme modeli kullanılarak elastik analizler gerçekleştirilmiştir.

Kum tabaka, dalgakıran çekirdek bölgesi ve anroşman için kullanılan malzeme parametreleri aşağıda verilmiştir(Çizelge 6.1).

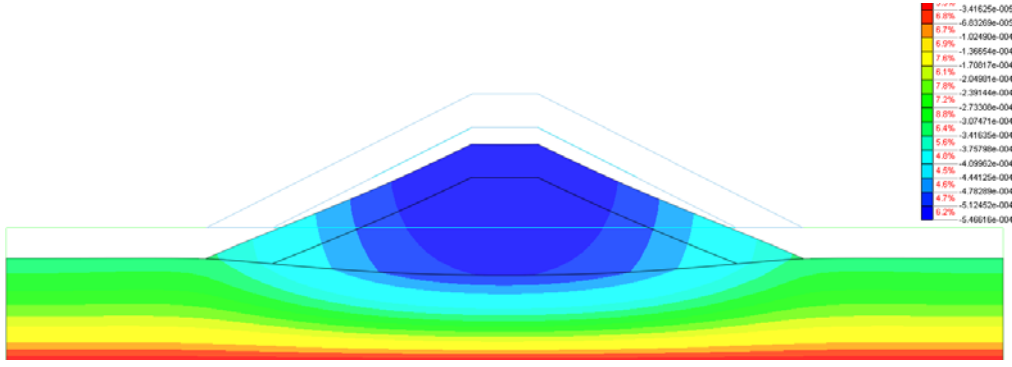
Çizelge 6.1 Malzeme Parametreleri(elastik statik analiz)

$E_{\text{kum}} = 5 \text{ MPa}$	$\phi = 35^\circ$	$\psi = 5^\circ$	$\gamma = 19.1 \text{ kN/m}^3$	$\nu = 0.35$
$E_{\text{çekirdek}} = 30 \text{ MPa}$	$\phi = 42^\circ$	$\psi = 10^\circ$	$\gamma = 18.75 \text{ kN/m}^3$	$\nu = 0.25$
$E_{\text{anrş}} = 30 \text{ MPa}$	$\phi = 46^\circ$	$\psi = 10^\circ$	$\gamma = 18.15 \text{ kN/m}^3$	$\nu = 0.2$

Statik durumda kuru halde ve su altında yapılan linear analize göre krette meydana gelen deplasmanlar sınırlı düzeyde kalmıştır. Maksimum düşey deplasman krette 0.0541mm olarak hesaplanmıştır(Şekil 6.1). Suyun olması halinde yapılan toplam gerilme analiz sonuçlarına göre max düşey deplasman 0.0546 mm olarak hesaplanmıştır(Şekil 6.2).



Şekil 6.1 Kuru hal durumu için statik durumda düşey deformasyon dağılımı



Şekil 6.2 Su altında statik durumda düşey deformasyon dağılımı

### 6.2.1 Özdeğer Analizi:

Dalgakıran ve sıvılaşılabilen tabakadan oluşan sistemin doğal frekanslarının bulunması amacıyla özdeğer analizleri yapılmıştır. Öncelikle kuru haldeki duruma ait özdeğer analizi gerçekleştirilmiş, daha sonra su altındaki davranışa ait doğal frekanslar hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için dalgakıran modelinin çok rijit bir temel üzerine oturması durumu için analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Özdeğer analizinde kullanılan modelde kullanılan malzeme parametreleri

	Temel	Çekirdek	Anroşman
YUMUŞAK TEMEL ZEMİN	E=50.000kPa	E=450.000kPa	E=500.000kPa
	$\gamma_k = 15.15 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_k = 14.45 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_k = 13.35 \text{ kN/m}^3$
	$\gamma_d = 19.15 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_d = 18.75 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_d = 18.15 \text{ kN/m}^3$
	c= 1kPa	c= 1kPa	c= 1kPa
	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 42^\circ$	$\phi = 44^\circ$
	v= 0.35	v= 0.25	v= 0.20
RİJİT TEMEL ZEMİN	E=500000kPa	E=450000kPa	E=500000kPa
	$\gamma_d = 19.15 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_k = 14.45 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_k = 13.35 \text{ kN/m}^3$
		$\gamma_d = 18.75 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_d = 18.15 \text{ kN/m}^3$
	c= 1000kPa	c= 1kPa	c= 1kPa
	$\phi = 45^\circ$	$\phi = 42^\circ$	$\phi = 46^\circ$
	v= 0.15	v= 0.25	v= 0.20

Kuru durumda birinci moda ait hakim frekans değeri 53.76Hz olarak hesaplanmıştır(Çizelge 6.3), ilk on moda ait şekiller Şekil 6.3 ‘de gösterilmiştir.Hakim frekanslar Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.3 İlk 10 moda ait hakim frekanslar(kuru durumda)

	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	6.Mod	7.Mod	8.Mod	9.Mod	10.Mod
Hz	14.90	22.86	26.22	32.35	35.33	35.48	38.12	40.49	41.53	43.23

Modelin su altındaki davranışını incelemek için su yapı etkileşimini dikkate alan sayısal analiz çalışmaları yapılmıştır. Temel zemini üzerinde 30 cm yüksekliğindeki suyun oluşturacağı ek kütlelerin yaratacağı hidrodinamik kuvvetlerin sistemin doğal frekansına olan etkisi araştırılmıştır. Westergaard tarafından[5] çalışmasında, gecirimsiz ve düşey bir yüzeye sahip bir baraj gövdesinde suyun yaratacağı hidrodinamik kuvvetleri yüksekliğe bağlı olarak dikkate alabilen bir formül önermiştir. Oluşacak bu ek kütle DIANA sonlu elemanlar programında[71] flow eleman olarak tanımlanmış, su yapı etkileşimini dikkate alınabilmesi için arayüzey (interface) elemanlar kullanılmıştır. Yapılan özdeğer analiz sonuçlarına göre birinci hakim modun 37.39 Hz değerine ulaştığı görülmüştür(Çizelge 6.4). Ayrıca ilk moda ait şekiller incelendiğinde(Şekil 6.4), sistem kuru durumda iken hakim hareket yanal yönde ötelenme olurken, su altındaki durumda yanal ötelenme ile birlikte suyun etkisi ile topuk bölgesinde göçme görülmektedir.

Çizelge 6.4 İlk 10 moda ait hakim frekanslar

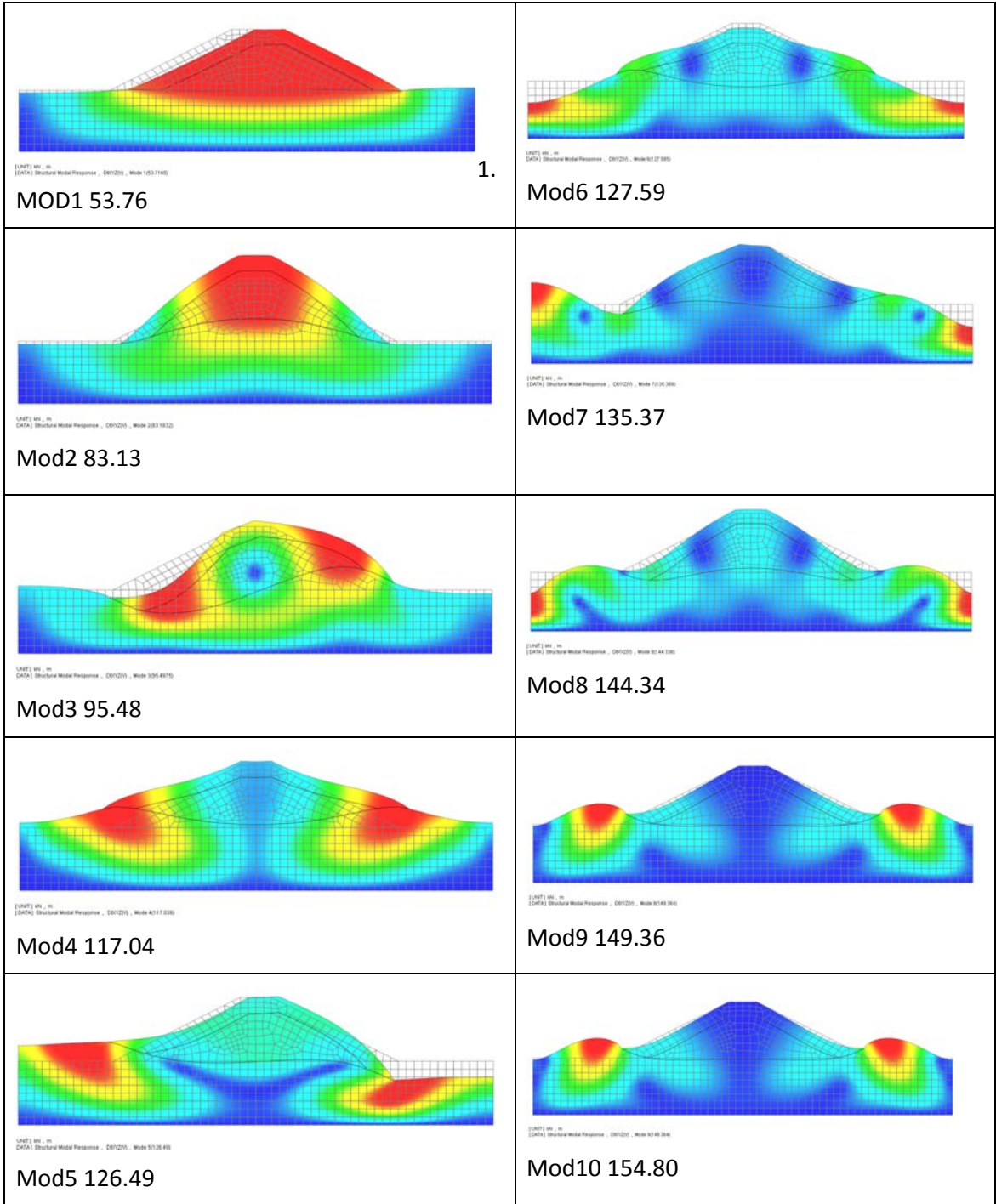
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	6.Mod	7.Mod	8.Mod	9.Mod	10.Mod
Hz	37.39	42.98	48.67	54.60	56.14	65.21	68.13	73.87	83.04	94.79

Su altında, dalgakıran kesitin rijit bir temel üzerinde olması durumunda göstereceği davranış ve doğal frekansın belirlenmesi amacıyla temel zemininin rijitlik ve mukavemet parametreleri  $E=500\text{MPa}$ ,  $c=1000\text{kPA}$   $\phi=45^\circ$  ' ye artırılarak analizler tekrarlanmıştır. Bu durumda kesitin doğal frekansı 149Hz olarak elde edilmiştir(Çizelge 6.5). İlk 10 moda ait şekiller Şekil 6.5'da gösterilmiştir.

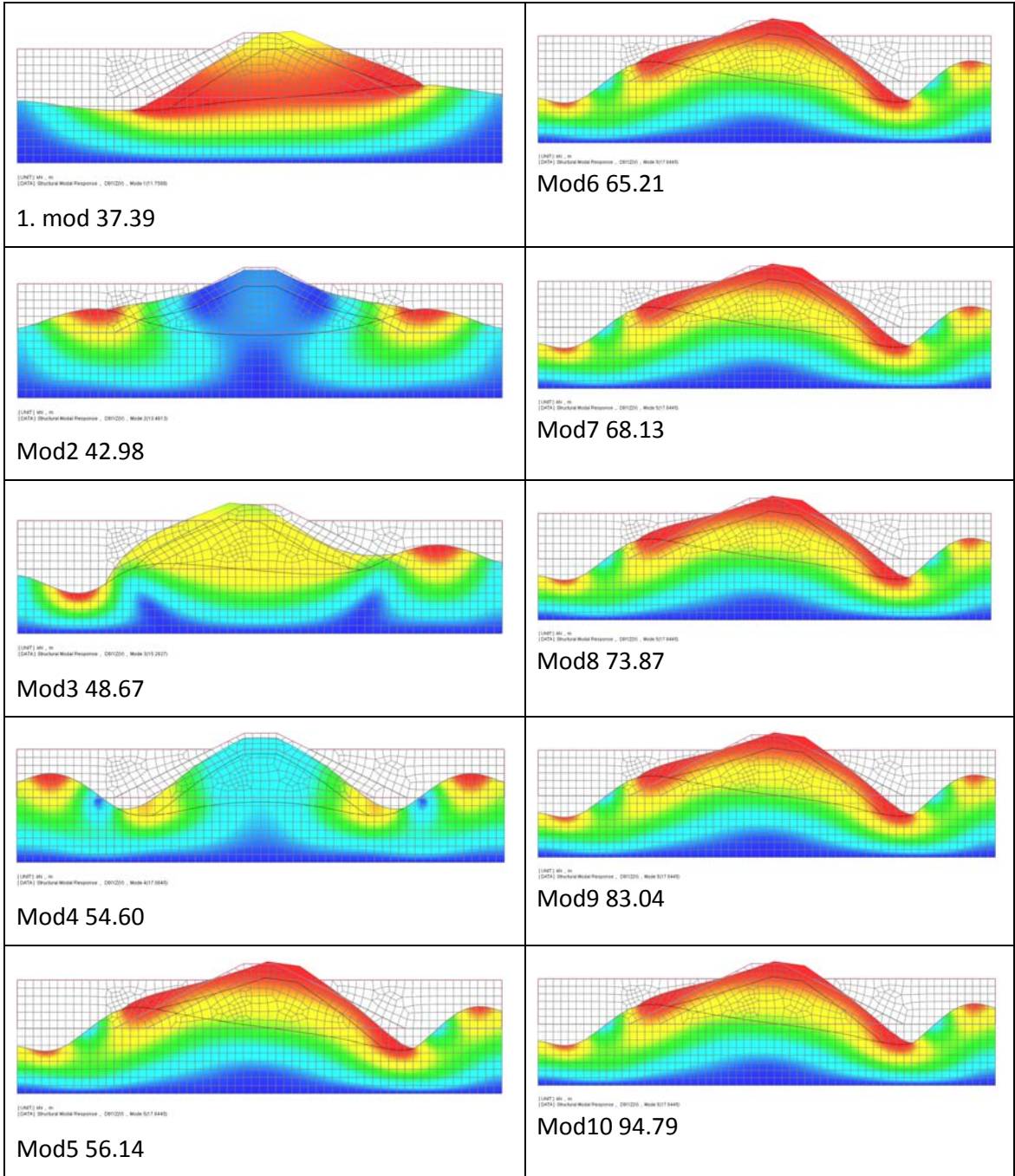
Çizelge 6.5 Rijit temele sahip sistemin İlk 10 moduna ait hakim frekanslar(su altında)

	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	6.Mod	7.Mod	8.Mod	9.Mod	10.Mod
Hz	149.3	153.06	167.45	184.22	193.33	222.56	230.93	254.32	277.652	293.159

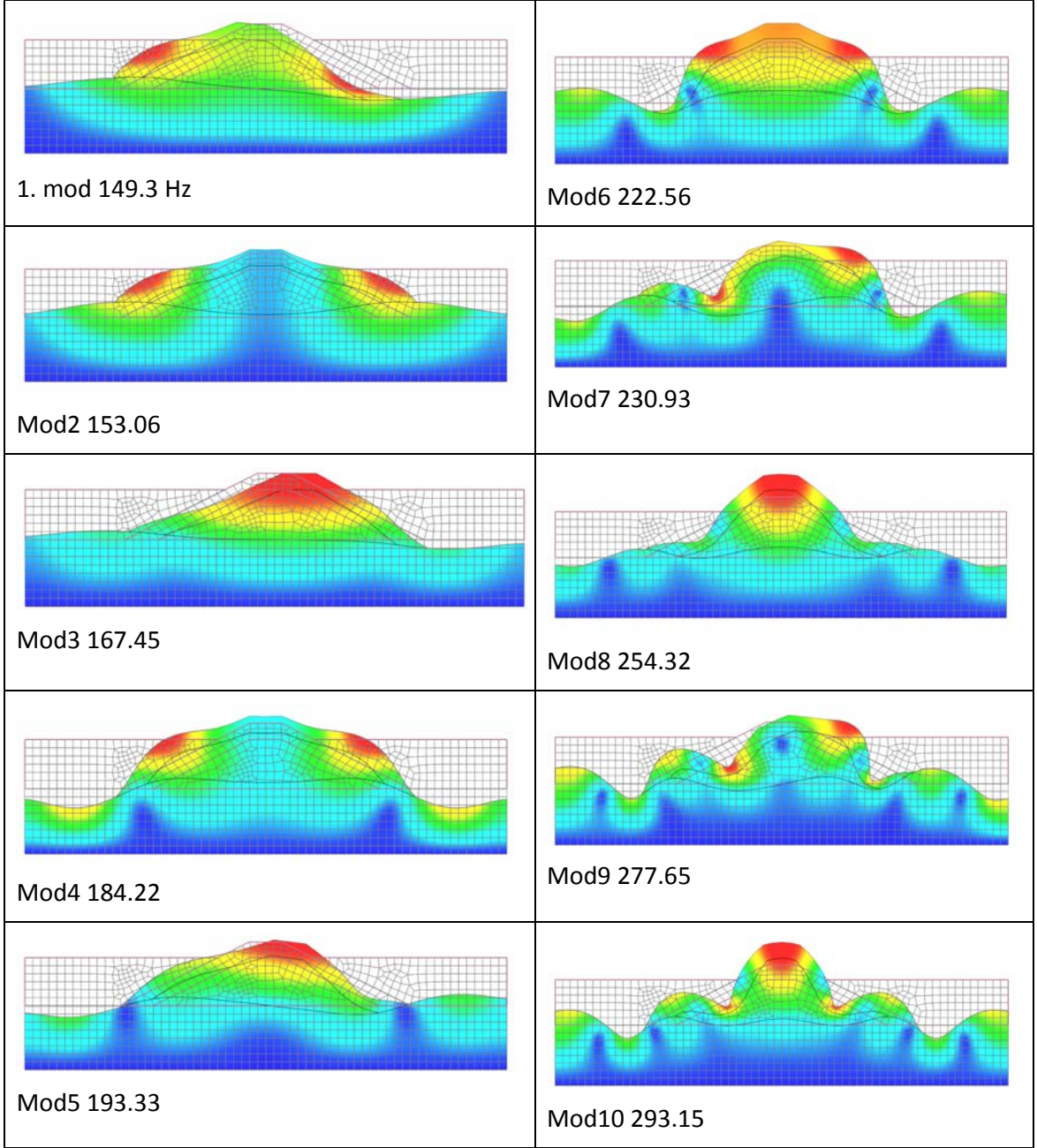




Şekil 6.3 Kuru haldeki sistemin ilk 10 moduna ait şekiller



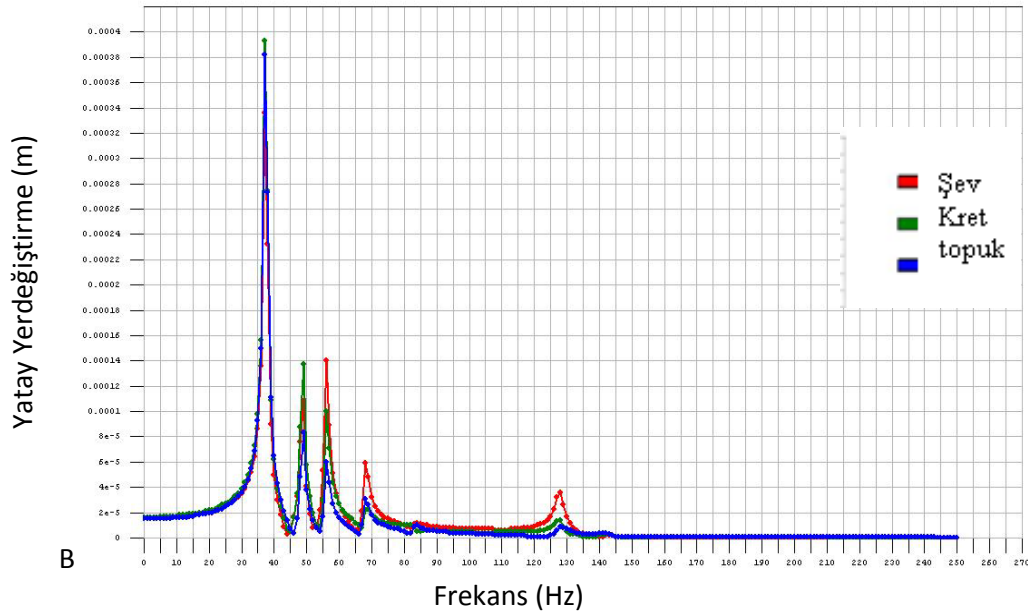
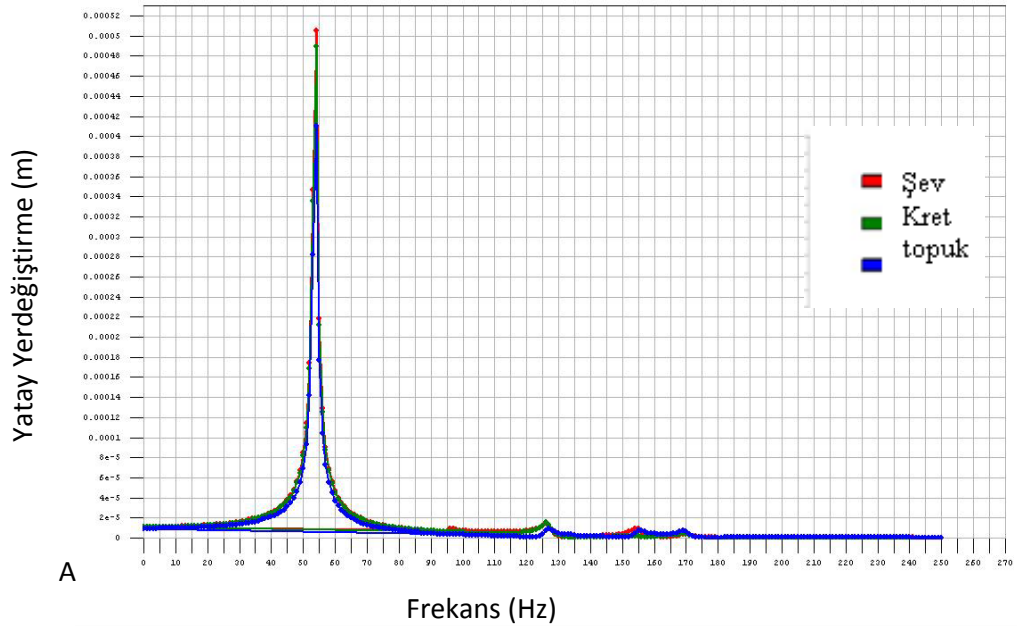
Şekil 6.4 Su-yapı etkileşimli durum için ilk 10 moda ait şekiller



Şekil 6.5 Rijit temel durumunda ilk 10 moda ait şekiller

Ayrıca model deney sisteminin frekansa bağlı modal tepkilerini ortaya çıkarmak için modal tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Dalgakıran kretinde, şevinde ve topukta olmak üzere 3 nokta için frekansa bağlı düşey deplasman modal tepkileri kuru durum ve su altındaki durum için analiz edilmiştir.(Şekil 6.6).

Modal düşey deplasman tepki diyagramları incelendiğinde, kuru durumda doğal hakim frekans olan 53 hz civarında şev, kret ve topuk noktalarının yatay deplasman tepkileri benzer oranda artmıştır. Su altındaki durumda ise doğal hakim frekans olan 37 Hz civarında deplasman tepkisinin artmakta olduğu, bunun yanında ikinci ve üçüncü moda ait frekanslarda ise şev ve krette yatay deplasman tepkisi belirgin olduğu gözlenmektedir.



Şekil 6.6 Modal yatay deplasman tepkisi- frekans a)kuru durumda b) su altındaki durumda

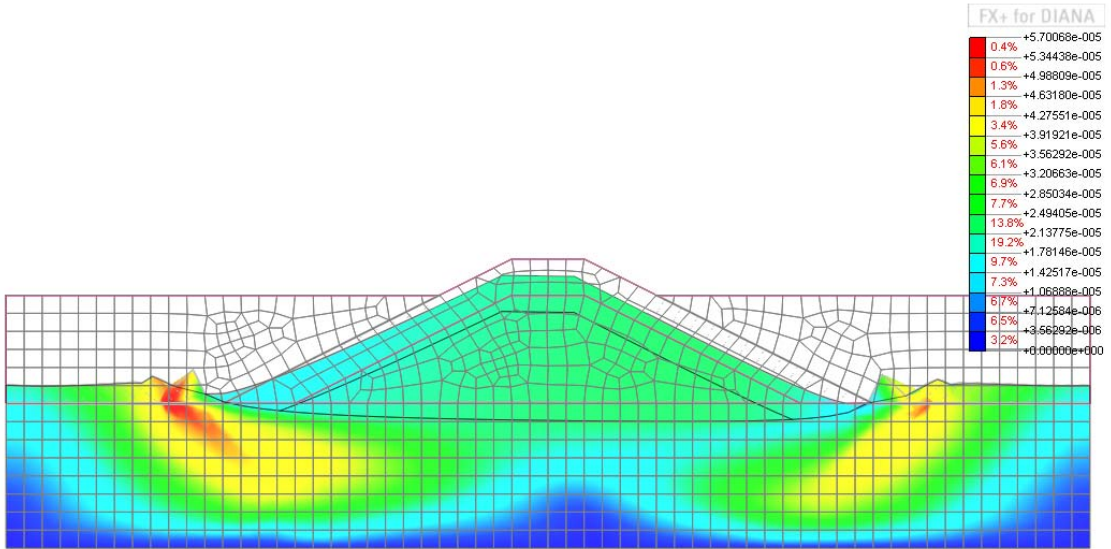
## 6.3 Dinamik Analiz

### 6.3.1 Nonlineer Analiz

DIANA sonlu eleman programı[71] ile Duncan-Chang nonliner malzeme modeli(hiperbolik model)[65,71] kullanılarak nonlineer analizler yapılmıştır. Hiperbolik modelde artımsal olarak şekil değiştirmeler arttıkça elastisite modülü değiştirilmektedir. Analizde kullanılan ivme - zaman kaydı daha önce yapılan deney çalışmalarında ölçülmüş taban kayıtlarından seçilmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri (Çizelge 6.6) Model deney kesitinin su altındaki durumu için non lineer analizler yapılmıştır. Kesite, tabanda 10 saniye uzunluğunda 0.17g maksimum ivmeye sahip deneysel ivme taban kaydı uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde deplasmanların oldukça sınırlı çıktığı görülmektedir(Şekil 6.7). Hiperbolik model parametrelerine ait ayrıntılı çalışma yapılamadığından seçilen parametrelerin değerlerinin yüksek alınmış olabileceği düşünülmektedir. Kesitin 10 saniye sonunda yapmış olduğu deplasman şekli incelendiğinde dalgakıran kesitinin kum zeminle birlikte oturma yaptığı, topuk kısmında ise kabarma oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 6.6 Nümerik modelde kullanılan dalgakıran kesitine ait malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Çekirdek	Anroşman	Kum
Elastisite Modülü, E( MPa)	80	100	20
Poison oranı ( $\nu$ )	0.25	0.20	0.35
Yükleme boşaltma Modülü Eur( Mpa)	400	500	100
Suya doymun birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	18.7	18.1	19.1
Referans Gerilme ( kPa)	100	100	100
Gerilme Şekil değiştirme üstel fonk. expN	0.5	0.5	0.5
Yükleme boşaltma üstel fonk expM	0.5	0.5	0.5
Min. Tanjant modülü E <sub>tmin</sub>	800	1000	200
Min basınç gerilmesi S <sub>cmin</sub>	10	10	10
Göçme oranı (R <sub>f</sub> )	0.9	0.9	0.9
$\phi$	42	46	34



Şekil 6.7 10s. sonunda oluşan deplasmanlar

## 6.3.2 Sıvılaşma Analizi

### 6.3.2.1 Giriş

Model deneylerde dalgakıran temel zemininde gözlemlenen boşluksuyu artışı ve sıvılaşma davranışının sayısal olarak modellenmesi amacı ile DIANA Sonlu Elemanlar yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımında kullanılan bünye modeli için gerekli malzeme özellikleri, kullanılan kum malzemesi için kesme deneyi sonuçlarından yararlanılarak seçilmiştir. Parametrik çalışmalar tamamlandıktan sonra model deney kesitinin sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Model deneylerin DIANA ile gerçekleştirilen nümerik analiz çalışmaları ve sonuçları model deney gözlemleri ile karşılaştırılması aşağıda sunulmuştur.

### 6.3.2.2 Nümerik Analizde Kullanılan Towhata-lai Bünye Modeli

Towhata-lai bünye modeli[71], kumların drenajsız koşullarda gerçekleştirilen dinamik laboratuvar deney gözlemlerine dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu modelde, kumların iki boyutlu drenajsız koşullardaki davranışı plastisite teorisine dayanarak modellenmekte, zeminde sıvılaşma sırasında kayma deformasyonlarının ve hacimsel deformasyonların birlikte olduğu kabulü yapılmaktadır. Towhata-lai bünye modeli drenajlı analizler ve üç boyutlu analizler yapılmasına imkan tanımamaktadır.

Modelde kullanılan gerilme şekil değiştirme ilişkisi

$$\begin{pmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{xy} \end{pmatrix} = -B \left[ \varepsilon_p - (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})^2 \right] \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^I Q_i (\gamma_i) \Delta \theta_i \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ -\cos \theta_i \\ \cos \\ \sin \theta_i \end{pmatrix} \quad (6-1)$$

ile tanımlanmaktadır

Burada  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{xy}$ ; toplam gerilmeleri,  $\varepsilon$ ; toplam şekil değiştirmeleri ve  $\varepsilon_p$  ise plastik hacimsel şekil değiştirmeleri,  $Q_i$ ; kayma gerilmesini,  $\gamma$ ; kayma şekil değiştirmesini,  $\theta$ ; asal gerilme rotasyonunu dikkate alan farklı kayma mekanizmalarının gözönüne alındığı açıyı ifade etmektedir. Denklemden kullanılan  $B$  parametresi ise efektif gerilmenin rijitliğe katkısı olarak

$$B = \frac{(0.5K_{ref})^2}{|\sigma'_{ref}|} \quad (6-2)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada  $\sigma_{ref}$ ; referans efektif gerilmeyi,  $K_{ref}$ ; referans efektif gerilmedeki hacim modülüdür.

Denklemden ilk bileşen izotropik bileşen ikinci bileşen ise deviatorik bileşen olarak tanımlanmaktadır.

### **İzotropik Bileşen**

İai tarafından [72] çalışmasında artık boşluksuyu basıncı ile kayma şekil değiştirmesi arasında ilişkiyi tanımlayacak olan sıvılaştırma yüzeyini ve sıkıştırma zonu ile genişleme zonunu birbirinde ayıran faz dönüşüm çizgisini tanımlamıştır. Tekrarlı yüklemeler sırasında oluşan efektif gerilme izi bu çizgiye ulaştığında, artık boşluk suyu basınçları ve plastik şekil değiştirmelerde büyük oranda artış meydana gelmektedir. Faz dönüşüm çizgisinin yatayla yaptığı açı, faz dönüşüm açısı( $\phi_p$ ) olarak tanımlanmaktadır.

Gerilme uzayı normalize edildiğinde efektif ortalama gerilme oranını ifade eden  $S$  ve deviatorik gerilme oranını ifade eden  $r$

$$S = \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m,o}} \quad r = \frac{\tau}{\sigma'_{m,o}} \quad (6-3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.  $S$ , anlık efektif gerilmenin başlangıç izotropik efektif gerilmeye oranını ifade etmekte,  $r$  ise kayma gerilmesinin başlangıç izotropik efektif gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır.  $S$  deki değişim  $r$  ye bağlı olarak aşağıdaki eşitlik(7.4) ile tanımlanmaktadır.



Eger  $r < \frac{2}{3} \sin \phi_p S_0$  ise  $S = S_0$

Eger  $r > \frac{2}{3} \sin \phi_p S_0$  ise

$$S = \frac{\sin \phi_r - \frac{1}{3} \sin \phi_p}{\sin \phi_f} S_0 + \sqrt{\left( \frac{\frac{1}{3} \sin \phi_p}{\sin \phi_f} S_0 \right)^2 + \left( \frac{r - \frac{2}{3} \sin \phi_p S_0}{\sin \phi_f} \right)^2} \quad (6-4)$$

Burada  $\phi$ ; göçme anındaki içsel sürtünme açısını ifade etmektedir.  $S_0$  parametresi ise kayma işinin fonksiyonu olarak

$$S_0 = 1.0 - 0.6 \left( \frac{w}{W_1} \right)^{P_1} \quad (\text{Eger } w < W_1)$$

$$S_0 = (0.4 - S_1) \left( \frac{w}{W_1} \right)^{P_2} + S_1 \quad (\text{Eger } w > W_1) \quad (6-5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu ifadede yer alan  $S_1$ ,  $W_1$ ,  $P_1$ , ve  $P_2$  kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma davranışını tanımlayan parametrelerdir.  $w$  parametresi ise normalize kayma şekil değiştirmesi işi olup (6-6) ile tanımlanmaktadır.

$$w = \left( \frac{W_s}{W_n} \right) = \frac{W_s}{\frac{(-\sigma'_{m.0} \sin \phi_r)^2}{2G_0}} \quad (6-6)$$

Kayma modülü, referans efektif gerilmedeki referans kayma modülünün oranı olarak

$$G = G_{ref} \sqrt{\left( \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m.ref}} \right)} \quad (6-7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Kayma işindeki artış,

$$dW_s = \left( \left( \frac{\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy}}{2} \right) d(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) + \tau_{xy} d\gamma_{xy} \right) - c_1 \left| \tau \left( \frac{\tau}{G} \right) \right| \quad (6-8)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlikte birinci terim kayma şekil değiştirmesi işini, ikinci terim kayma işindeki artış negatif olduğunda kayma işini sınırlayan, elastik iş artışını tanımlamaktadır.  $C_1$  parametresi plastik şekil değiştirmelerden ötürü artık boşluk suyu basınçlarının oluşmasının sınır değeri olan bir malzeme parametresi olarak tanımlanmıştır.

## Deviatorik Bileşen

Bünye modelinde yeralan ikinci bileşen birçok virtuel kayma mekanizmalarından oluşan yaylar ile ifade edilmektedir. Yayların her birinin kayma gerilmelerine yaptığı katkı  $\xi$ ; normalize virtuel kayma şekil değiştirme ve  $\eta$ ; normalize virtuel kayma gerilmesi ile

$$\xi = \frac{\gamma_i}{\gamma_v} \quad \text{ve} \quad \eta = \frac{Q_i}{Q_v} \quad (6-9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (7.11) eşitliğinde yeralan normalizasyon parametreleri ise

$$Q_v = \frac{\tau_m}{2} \quad \text{ve} \quad \gamma = \pi \frac{Q_v}{G} \quad (6-10)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Kayma gerilmesi ( $\tau_m$ ) ve kayma modülü ( $\gamma$ ) ise

$$S_0 < 4 \text{ ise } \tau_m = (-\sigma'_{m.0} \sin \phi_f) S, \quad G = \frac{\tau_m}{\gamma_{m.0}}, \quad \gamma_m = \gamma_{m.0}$$
$$S_0 > 4 \text{ ise } \tau_m = (-\sigma'_{m.0} \sin \phi_f) S + \Delta \tau_m, \quad G_m = \frac{\tau_m}{\gamma_m}, \quad \gamma_m = \left( \frac{S}{0.4} \right) \quad (6-11)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $\gamma_{m.0}$  ve  $\tau_m$  değerleri

$$\gamma_{m.0} = \frac{-\sigma'_{m.0} \sin \phi_f}{G_0}$$
$$\Delta \tau_m = (\sin \phi_f - \sin \phi_p)(0.4 - S)(-\sigma_{m.0}) \quad (6-12)$$

ile ifade edilmektedir. Kayma şekil değiştirmesindeki artış

$$\gamma_i = \cos \phi_i (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) + \sin \phi_i \gamma_{xy} \quad (6-13)$$

ile ifade edilmektedir.

## Başlangıç Yükleme ve Boşaltma

Başlangıç yüklemesi durumunda normalize gerilmeler ve şekil değiştirmeler

$$\eta = \frac{\xi}{1 + |\xi|} \quad (6-14)$$

ile ifade edilmektedir.

Boşaltma durumundaki normalize gerilmeler ve şekil değiştirmeler ise

$$\frac{\eta - \eta_B}{2b} = \frac{\frac{\xi - \xi_B}{2a}}{1 + \left| \frac{\xi - \xi_B}{2a} \right|} \quad (6-15)$$

ile tanımlanmaktadır. Eşitlik (6-15) 'de kullanılan a ve b parametreleri deneysel olarak çıkarılmaktadır. Yeniden yükleme evresindeki normalize gerilme ve şekil değişimleri ise

$$\frac{\eta - \eta_r}{2bc} = \frac{\frac{\xi - \xi_r}{2ac}}{1 + \left| \frac{\xi - \xi_r}{2ac} \right|} \quad (6-16)$$

ile ifade edilmektedir. C, yeniden yüklemenin dönüş noktasına en yakın yere varmasını sağlayan parametre olarak tanımlanmaktadır.

### 6.3.2.3 Model Deney Parametrelerinin Elde Edilmesi

Laboratuvar deney modellerinin davranışının DIANA sonlu elemanlar yazılımı ile analizlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılacak malzeme parametrelerinin belirlenmesi için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda laboratuvarında gerçekleştirilen çevrimli basit kesme deneyleri modellenmiştir. Parametrik çalışmada, sıvılaşma parametrelerindeki değişiminin, artık boşluksuyu basıncı gelişimine etkileri incelenmiştir.

Sıvılaşma analizlerini gerçekleştirmek için gerekli parametreler; elastisite modülü, referans efektif gerilme, başlangıç kayma modülü, hacim modülü, suyun hacim modülü, porozite, Poisson oranı, su altında birim hacim ağırlık, içsel sürtünme açısı, faz dönüşüm açısı ve sıvılaşma parametreleri olan W1, C1, S1, P1 ve P2 'dir.

Zeminin rijitlik parametreleri olan referans kayma modülü ( $G_{ref}$ ), referans hacim modülü  $K_{ref}$  ve elastisite modülü (E) (6-17)-(6-19) eşitlikleri ile hesaplanmıştır.

$$G_{ref} = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sqrt{p_{ref}} \quad (6-17)$$

Burada  $p'_{ref}$ , incelenen derinlikteki düşey efektif gerilme (kPa) değeri olarak alınır

$$K_{ref} = \frac{2G_{ref}(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} \quad (6-18)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (6-19)$$

Zeminin su altındaki birim hacim ağırlığı

$$\gamma' = \gamma_d - \gamma_w \quad (6-20)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada,  $\gamma_w$ , suyun birim hacim ağırlığı ve  $\gamma_d$  ise suya doymun birim hacim ağırlığıdır ve

$$\gamma_d = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} \quad (6-21)$$

ile hesaplanır. Burada  $G_s$ , danelerin özgül yoğunluğunu,  $e$  ise boşluk oranını ifade etmektedir.

Kumun porozitesi ise kumun rölatif sıklık oranında göre hesaplanan boşluk oranına bağlı olarak

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (6-22)$$

ile hesaplanmıştır. İçsel sürtünme açısı laboratuvar deneylerinden elde edilmiş, faz dönüşüm açısı ise Ishiara ve Towhata tarafından [73] çalışmasında önerilen eşitlik (6-23) ile hesaplanmıştır.

$$\phi_p = \tan^{-1}(0.875 \tan \phi_f) \quad (6-23)$$

### **Sonlu Elemanlar Modeli**

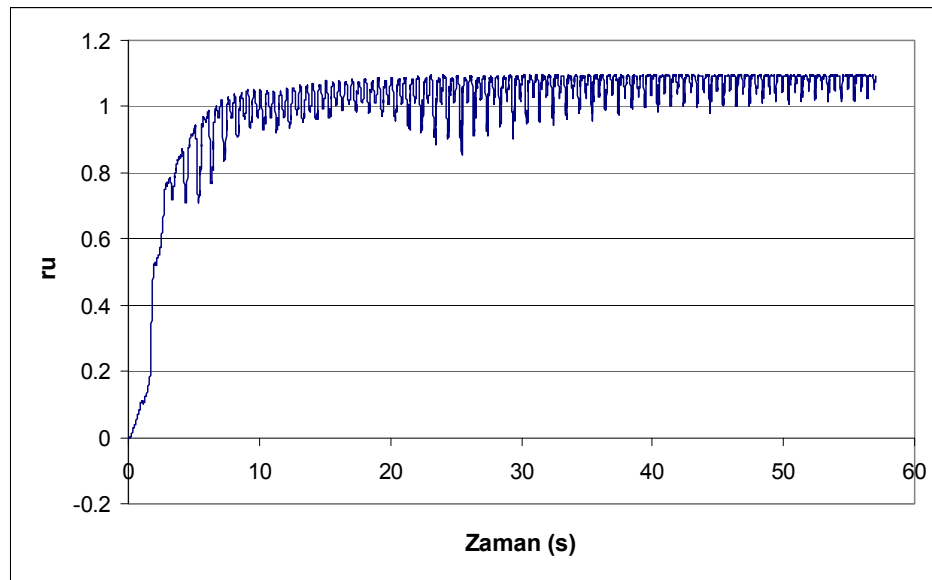
Parametrik çalışmanın yapılacağı çevrimli basit kesme deneyinde, kullanılan kum malzemesi, 2.6cm yüksekliğinde, 6.3 cm çapındaki çevrimli basit kesme ringi içerisine suya yağmurlama tekniğiyle %40 rölatif sıklıkta hazırlanarak 1 Hz frekansında, 50 kPa düşey gerilme altında 0.2 çevrimli gerilme oranında yüklenmiştir. Deneyin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesinde, 8QEPS dört nodlu düzlem şekil değiştirme elemanları kullanılmıştır. Tabanda yer alan nodlar yatay ve düşey hareketleri tutulmuş, tepe nodları ise düşeyde tutulu, yatayda ise serbest bırakılmıştır. Tepedeki iki nodun birbirlerine tutulu olarak birlikte hareket etmesi sağlanmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.7 de, deneyde ölçülen  $r_u$  zaman değişimi ise Şekil 6.8'de verilmiştir.

### **Parametrik Çalışmalar**

Sıvılaşma analizlerinde kullanılacak parametrelerin değişimlerinin analizler üzerine etkileri laboratuvarda gerçekleştirilen çevrimli basit kesme deneyi için yapılan nümerik model

üzerinde incelenmiştir. Sıvılaşma parametreleri olan  $C1$ ,  $W1$ ,  $P1$ ,  $P2$ ,  $S1$  değerlerinin değişimini incelemek için , nümerik analizde bir parametrenin değeri değiştirilmiş, diğer dört parametrenin değerleri sabit tutulmuştur. Nümerik modelde kullanılan  $C1$ ,  $W1$ ,  $P1$ ,  $P2$ ,  $S1$  parametrelerinin literatürde kullanılan değer aralıklarındaki değişimi incelenerek boşluksuyu basıncı oranı- zaman değişimine etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

$C1$  parametresinin değerinin 1 ile 1.8 arasındaki değişimi üç adımda araştırılmıştır(Şekil 6.9)  $C1$  parametresinin aldığı değişik değerlere göre artık boşluksuyu basıncı oranı zaman grafiği incelendiğinde,  $C1$  değerinin çevrimli hareketin başlarında  $r_u$  artışının daha geç başladığı , zamanla farkın azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.8Çevrimli basit kesme deneyinde elde edilen  $r_u$ -zaman

Çizelge 6.7 Nümerik modelde kullanılan malzeme özellikleri(Çev.Bas.Kes.Deneyi))

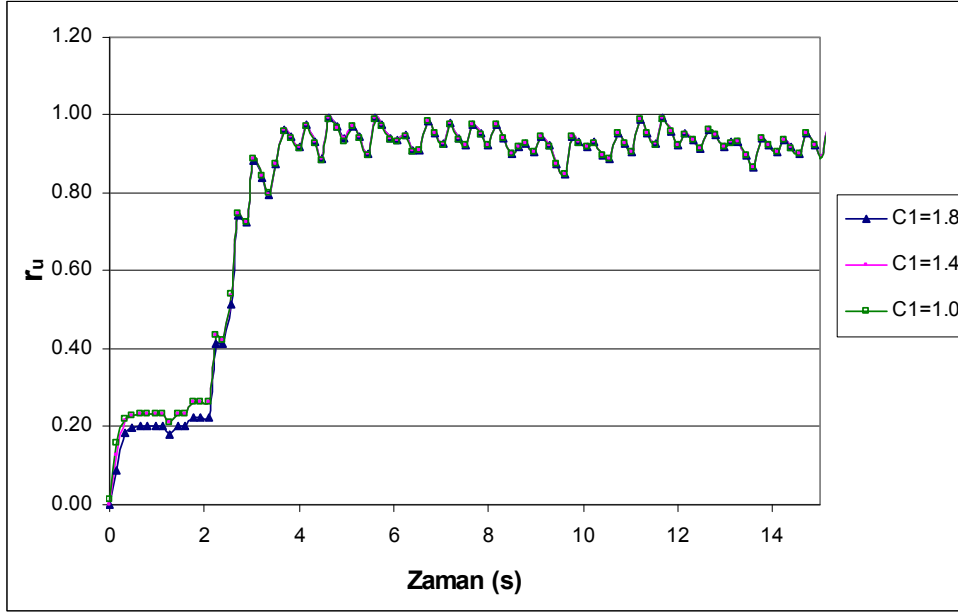
Malzeme Özelliği	Dr=%40
Elastisite Modülü, E( kPa)	50000
Poison oranı ( $\nu$ )	0.35
Suya doymun birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	19.5
Suya doymun birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	9.68
Referans düşey Gerilme ( kPa)	50
Referans gerilmedeki Kayma Modülü, Gref( kPa)	62900
Referans gerilmedeki Hacim modülü Kref (kPa)	82100
Porozite (n)	0.425
$\phi_F$	33
$\phi_P$	28.6

$r_u$  zaman ilişkisi, W1 değerlerinin 1 ile 7 arasındaki değişimi için incelenmiştir(Şekil 6.10). W1 değeri arttıkça  $r_u$  oranı ilk çevrimlerden itibaren hızla artış göstermekte, W1 değeri küçüldükçe  $r_u$  değerlerindeki artış gecikmeli oluşmaktadır.

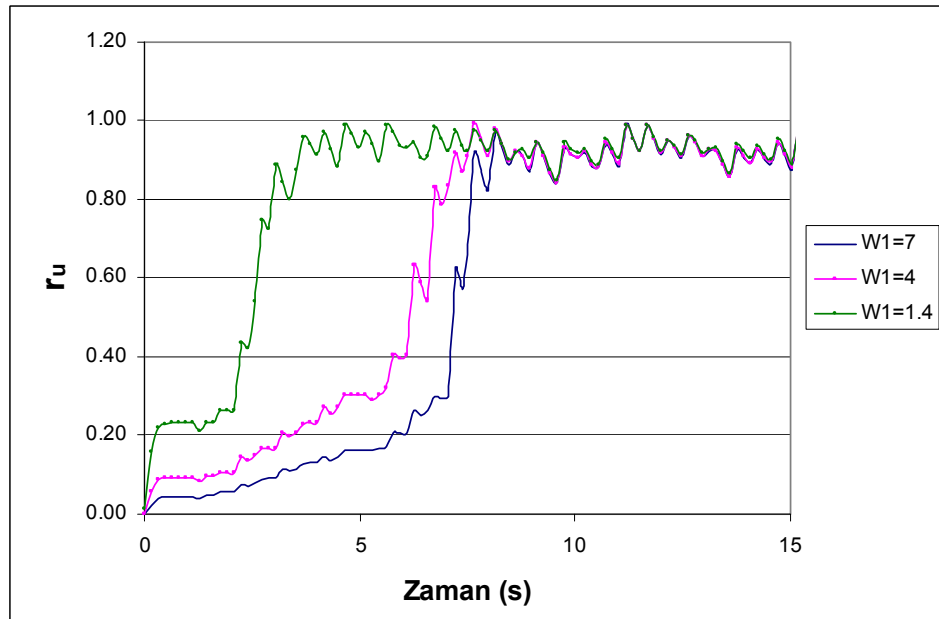
P1 parametresinin değerlerinin 0.4 ile 1 arasında değişiminin boşluksuyu basıncı oranı üzerindeki etkileri incelendiğinde(Şekil 6.11), P1 değeri arttıkça ilk beş saniye içerisinde  $r_u$  oluşumu gecikmekte, ancak 5.nci saniyeden sonra maksimum  $r_u$  değerinde değişiklik olmamaktadır.

P2 değişimleri incelendiğinde, 0.9- - 2.0 arasında  $r_u$  oranlarında bir değişiklik olmazken P2 değerinin 10 a çıkması halinde  $r_u$  2-5 saniyeleri arasında daha düşük değerler almakta, 5. saniyeden sonra maksimum  $r_u$  değerinde çok az fark oluşmaktadır(Şekil 6.12),

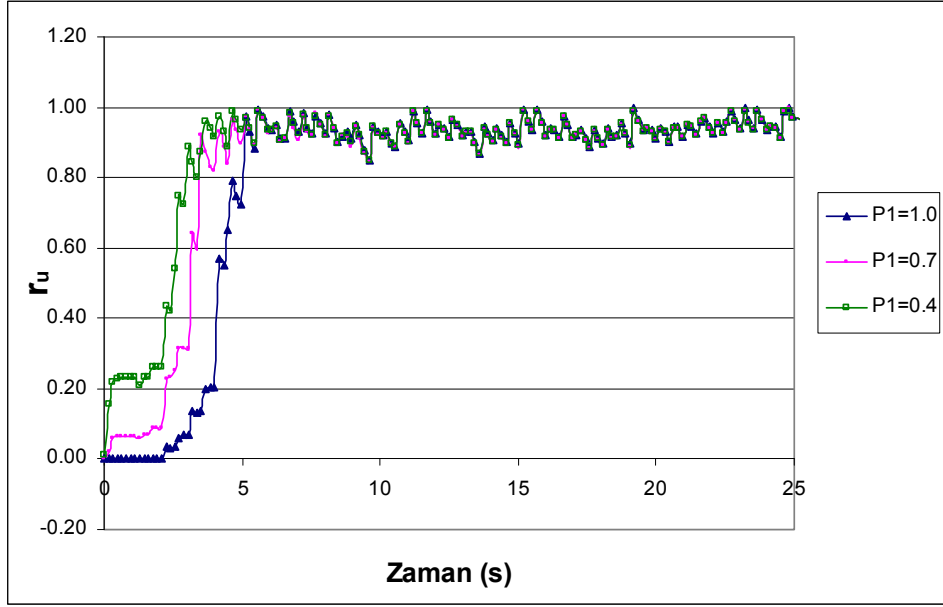
S1 parametresinin 0.0035-0.01 aralığındaki değişimlerin etkisi incelendiğinde(Şekil 6.13)S1 değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumunda fazla etkili olmadığı görülmüştür.



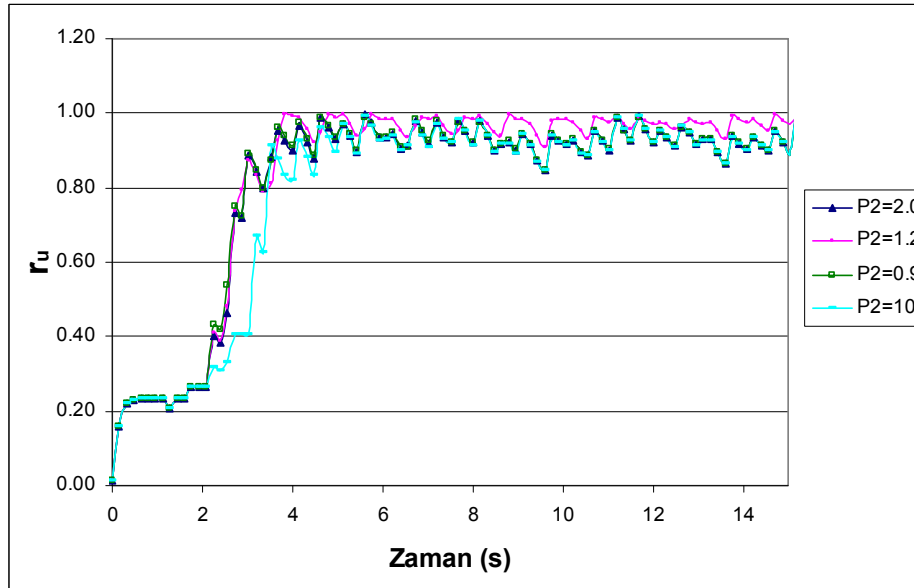
Şekil 6.9 C1 değişimine göre  $r_u$ -zaman ilişkisi



Şekil 6.10 W1 değişimine göre  $r_u$ -zaman ilişkisi

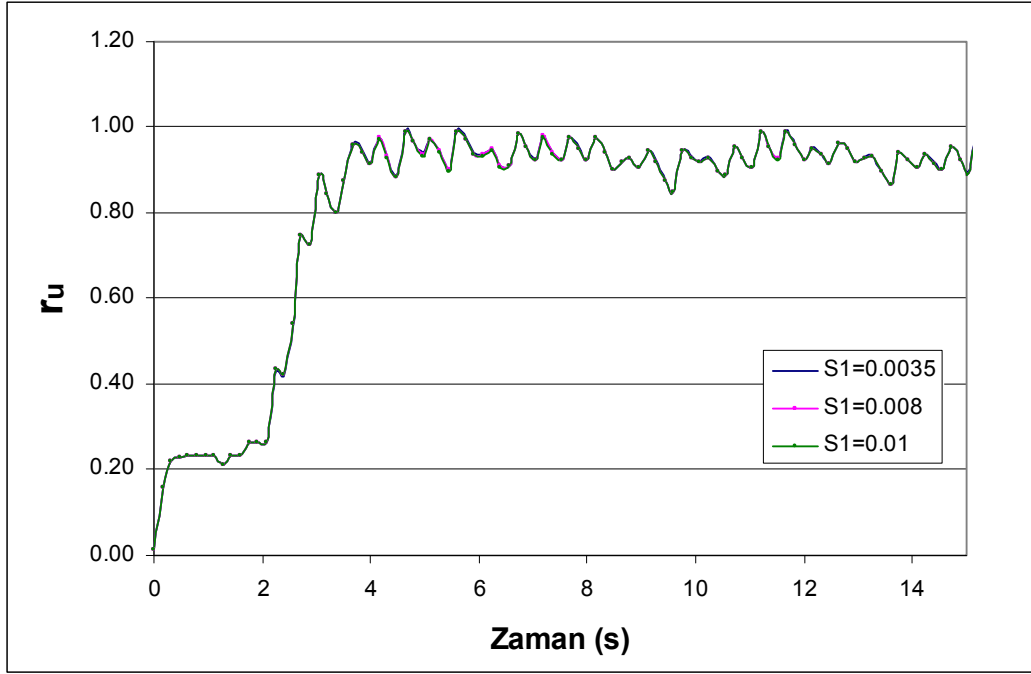


Şekil 6.11 P1 değişimine göre  $r_u$ -zaman ilişkisi



Şekil 6.12 P2 değişimine göre  $r_u$ -zaman ilişkisi



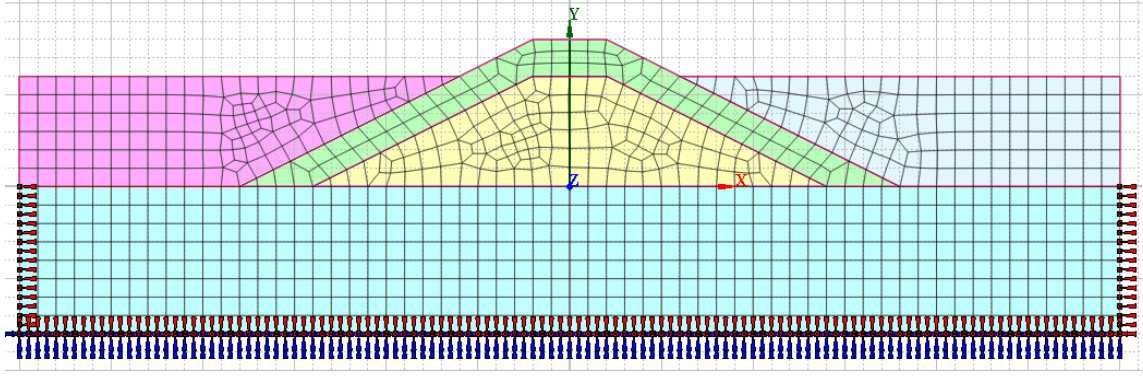


Şekil 6.13 S1 değişimine göre  $r_u$ -zaman ilişkisi

#### 6.3.2.4 Model deneyler dinamik davranışının analizi

Laboratuar model deneylerin gerçekleştirildiği sıvılaşılabilen tabakalar üzerinde yeralan dalgakıranların dinamik davranışı DIANA sonlu elemanlar programıyla gerçekleştirilmiştir. Analizler iki boyutlu olarak düzlem şekil değiştirme prensiplerine göre yapılmıştır. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı Şekil 6.14 'te gösterilmiştir. Kum tabakasında sıvılaşma analizi gerçekleştirebilmek için Towhata-lai bünye modeli kullanılırken, dalgakıran kesiti için ise Dunchan-Chang modeli kullanılmıştır. Ortamdaki su akım elemanı olarak modellenmiş dalgakıran kesiti ve kum tabaka ile etkileşimini dikkate alabilmek için kesişim yüzeyine interface elemanlar yerleştirilmiştir. Analizlerde sınır şartları olarak model deney kesiti tabanında yatay ve düşey deplasmanlar tutulu olarak alınmış, kesit kenarında ise yatayda tutulu, düşeyde ise deplasmana izin verilir şekilde sınır şartları atanmıştır.

Model deney kesitinin analizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak başlangıç gerilmeleri  $K_0$  koşullarında statik analizi ile belirlenmiştir. Başlangıçta deplasmanlar sıfırlanarak kesitteki gerilmeler belirlenmiş ve ikinci adımda başlangıç koşulu olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.14 Nümerik analizde kullanılan sonlu elemanlar ağı

Ardından model deney kesitinin çevrimli yüklemeler altındaki dinamik davranışı kullanılan çevrimli girdi hareketine göre nonlineer dinamik analizler ile incelenmiştir. Dinamik analizlerde tekrarlı hareket olarak, 1000 adımdan oluşan ve  $\Delta t=0.01$  örnekleme aralığına sahip, model deneylerde kum temel tabanında uygulanan ivme kayıtları kullanılmıştır. Dinamik nonlineer analizlerde zaman tanım alanında integrasyon için Wilson Teta metodu kullanılmış, iterasyonlar için ise Newton-Raphson yöntemi seçilerek her adımda 10 iterasyonda yakınsama kriteri gözetilmiştir. Analizler sonucunda artık boşluksuyu basınçları model deneylerde alınan ölçüm noktalarının koordinatlarında alınarak ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Sonlu eleman analizlerinde kum tabakası için kullanılan malzeme parametreleri ile dalgakıran kesiti için kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.8 ve Çizelge 6.9 'da verilmiştir.

Çizelge 6.8 Nümerik modelde kullanılan kum tabakasına ait malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Dr=%40	Sıvılaşma Parametreleri	
Elastisite Modülü, E( kPa)	50000	P1	0.5
Poison oranı ( $\nu$ )	0.35	P2	0.72
Suya doymun birim hacim ağırlığı ( $kN/m^3$ )	19.5	W1	1.5
Suya doymun birim hacim ağırlığı ( $kN/m^3$ )	9.68	S1	0.0005
Referans düşey Gerilme ( kPa)	7.74	C1	1.9
Kayma Modülü, Gref( kPa)	22664		
Hacim modülü Kref (kPa)	49106		
Porozite (n)	0.425		
$\phi_F$	33		
$\phi_P$	28.6		

Çizelge 6.9 Nümerik modelde kullanılan dalgakıran kesitine ait malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Çekirdek	Anroşman
Elastisite Modülü, E( MPa)	80	100
Poison oranı ( $\nu$ )	0.25	0.20
Yükleme boşaltma Modülü Eur( MPa)	400	500
Suya doymun birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	18.7	18.1
Referans Gerilme ( kPa)	100	100
expN	0.5	0.5
expM	0.5	0.5
Etmin( Mpa)	800	1000
Scmin	10	10
rf	0.9	0.9
$\phi$	42	46

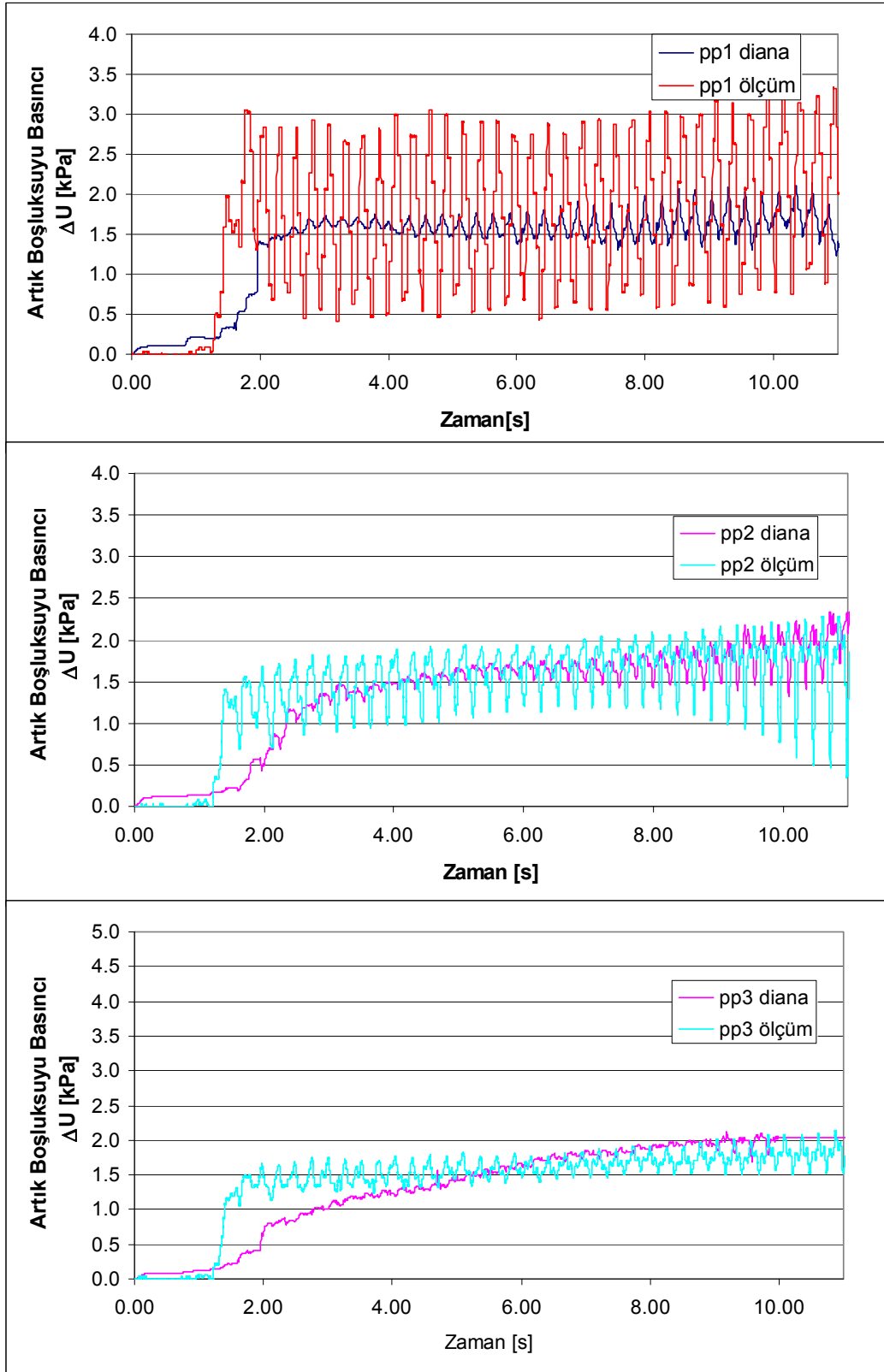
### Analiz Sonuçları

Model deneylerde orjinal kesitlere ilk yüklemelerin yapıldığı Deney1a, Deney 3a, Deney 4a, Deney 5a durumları için model deneylerin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde çevrimli hareket olarak model deneylerin tabanında uygulanan tekrarlı hareketlerin ivme kayıtları kullanılmıştır. Nümerik analizler sonucunda artık boşluksuyu basınçlarının zaman bağlı davranışları 10 saniye için, model deneylerde kullanılan sensörlerin ölçüm koordinatlarında olacak şekilde elde edilmiştir.

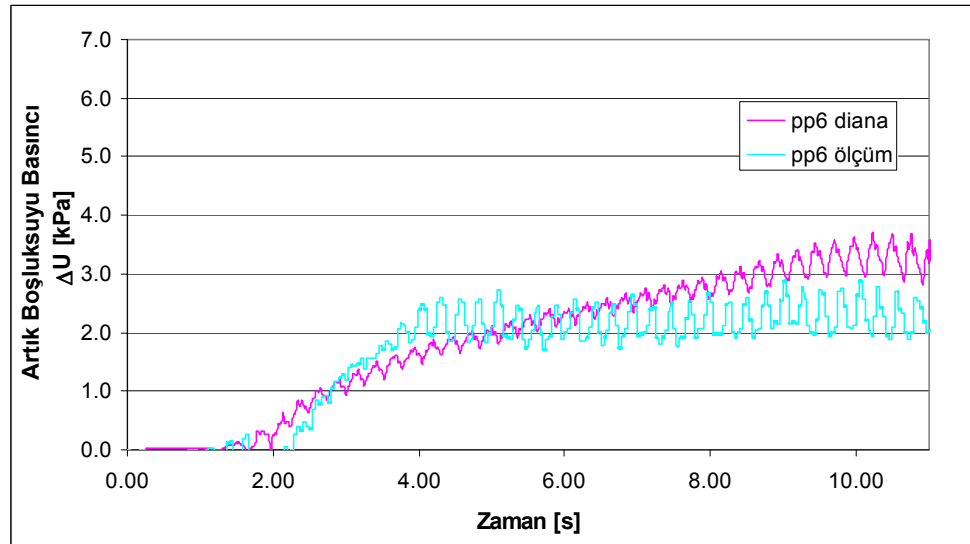
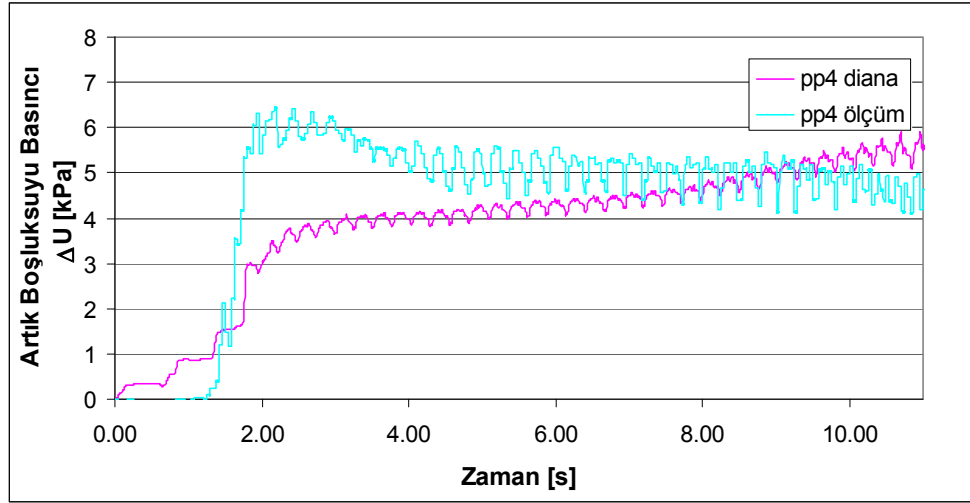
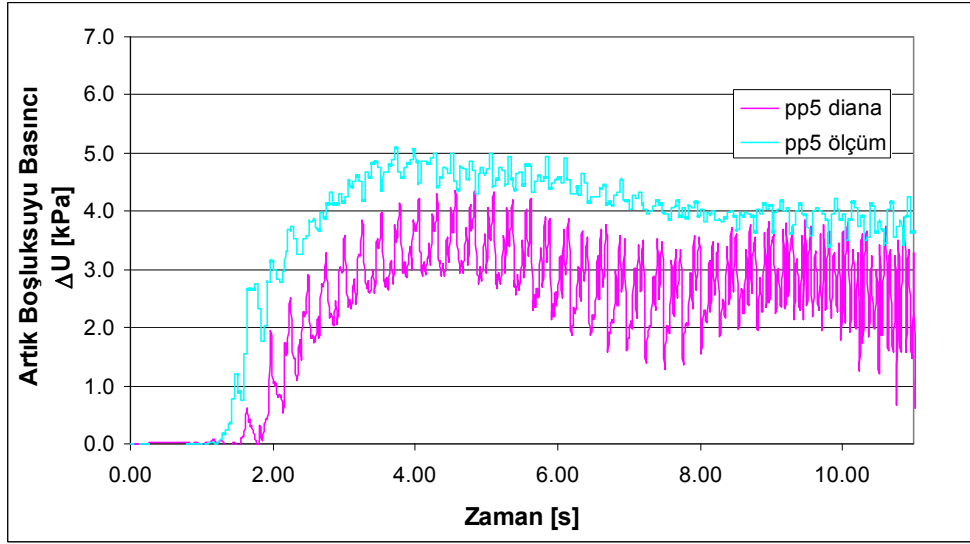
Analizlerden elde edilen artık boşluksuyu basınçlarının zamanla değişimi, model deneylerde elde edilen ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır(Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22). Nümerik çalışmalarda elde edilen artık boşluksuyu basıncı dağılımlarının genel olarak deney sonuçlarıyla uyumlu oldukları görülmektedir .

Deney1a da(Şekil 6.15, Şekil 6.16) genel olarak artık boşluksuyu basıncı gelişiminin gecikmeli olarak ölçüm seviyelerine geldiği görülmektedir. Yüzeğe yakın noktada olan PP3 sonuçları incelendiğinde analizlerde deney sonlarında yüksek değerler elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tabanda alınan tüm PP1 ölçüm sonuçlarını karşılaştırıldığında, nümerik analiz sonuçlarının dinamik hareketin başlarında daha büyük sonuç vermesine karşın daha sonra

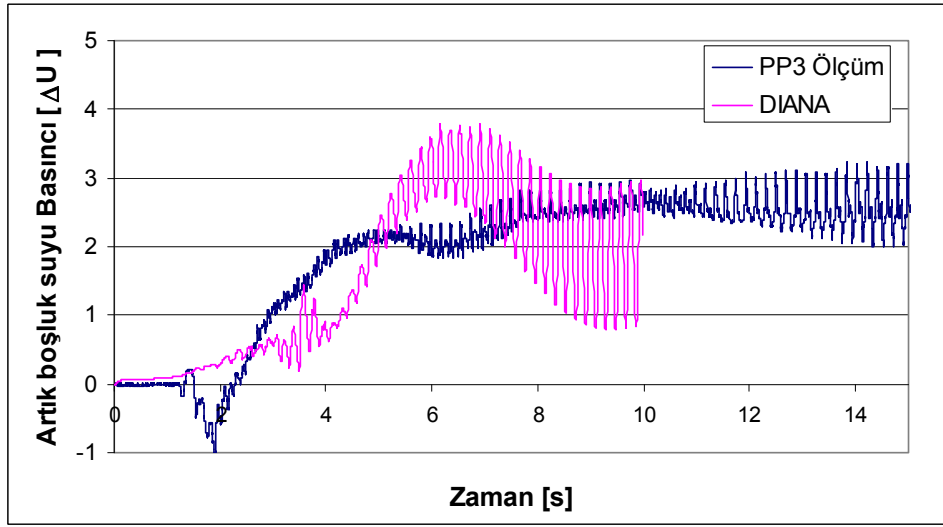
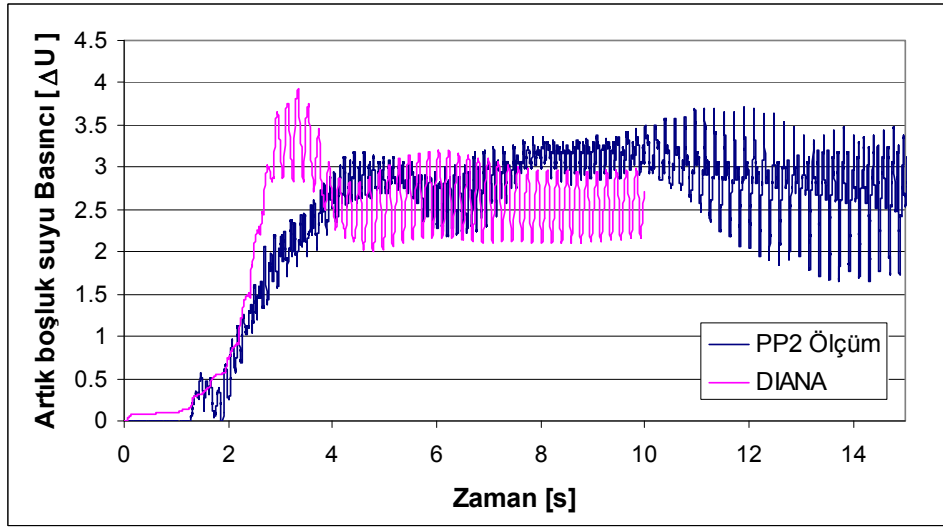
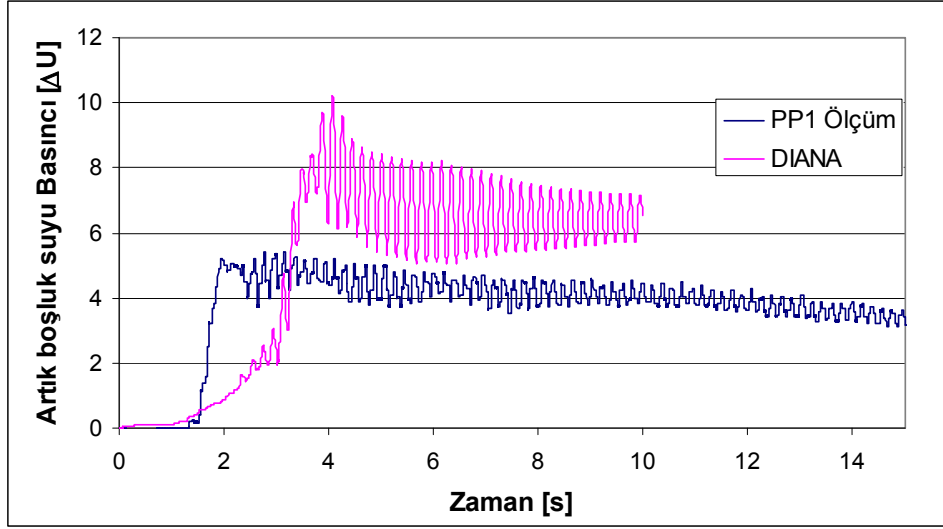
ölçümler ile aynı büyüklüğe ulaştığı görülmektedir. Topuk altında yeralan PP5 sensörü seviyesinde Diana sonuçlarının merteye olarak ölçüm sonuçlarına yakın ancak ölçümlerden bir miktar daha düşük sonuçlar verdiği görülmektedir. Açık alanda , üzerinde yükleme olmayan bölgede PP6 sensörü koordinatlarında elde edilen sonuçların ise ölçümlerle tam uyumlu olduğu görülmektedir. Diğer deneyler incelendiğinde, deney1a sonuçlarına benzer sonuçlar görülmektedir.



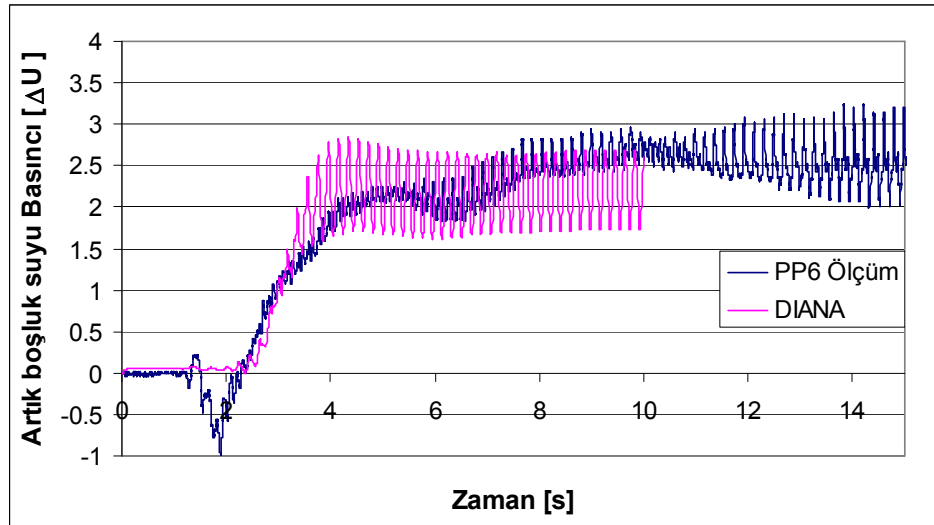
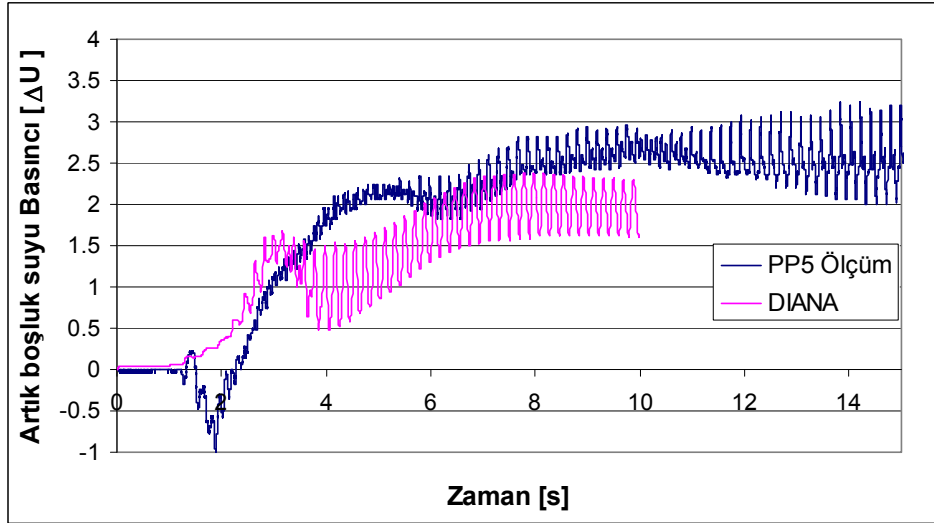
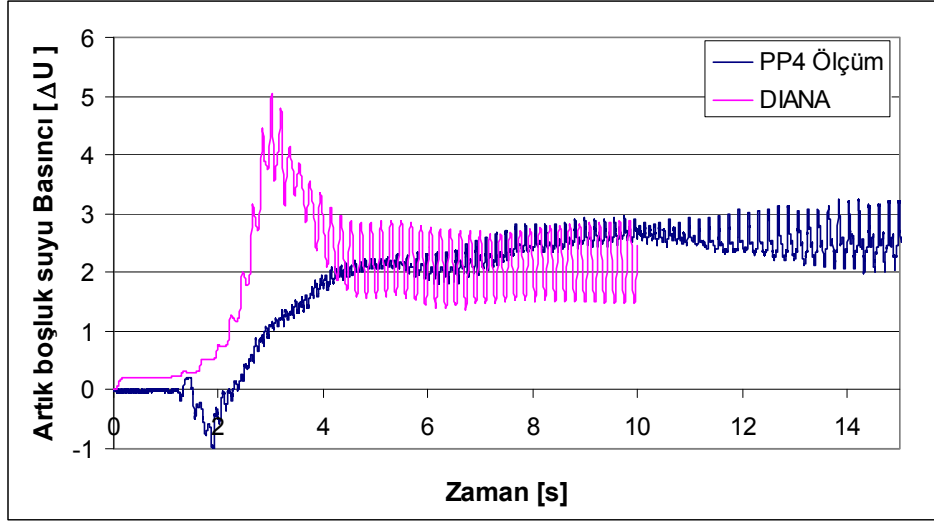
Şekil 6.15 Nümerik analiz sonuçları (deney 1a)



Şekil 6.16 Nümerik analiz sonuçları (deney 1a)

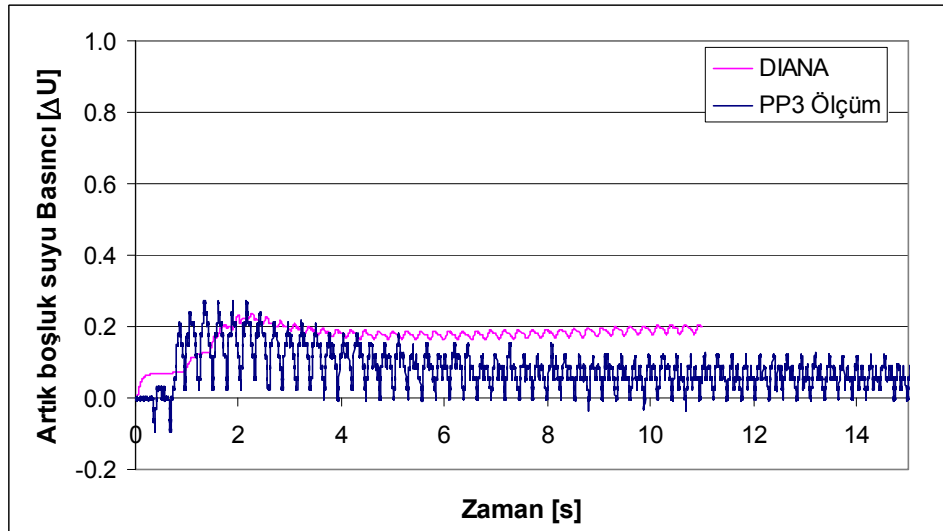
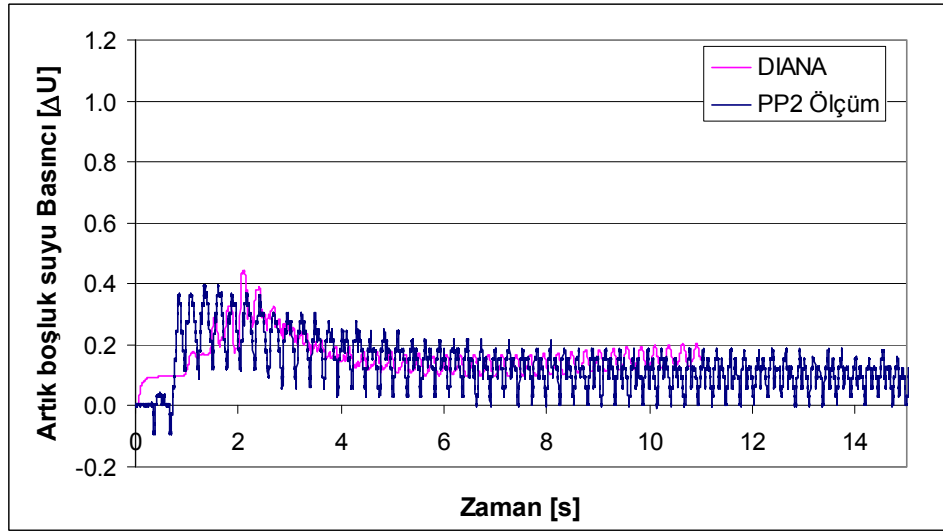
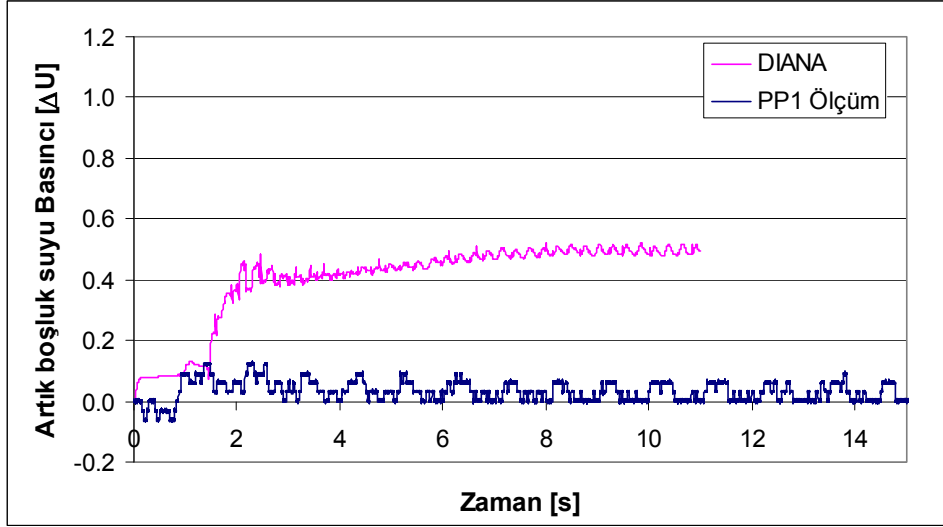


Şekil 6.17 Nümerik analiz sonuçları (deney 3a)

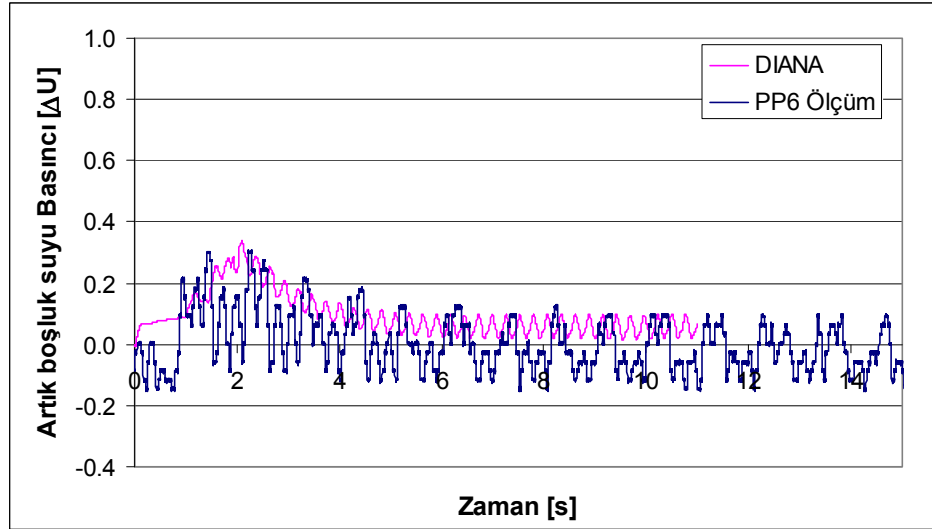
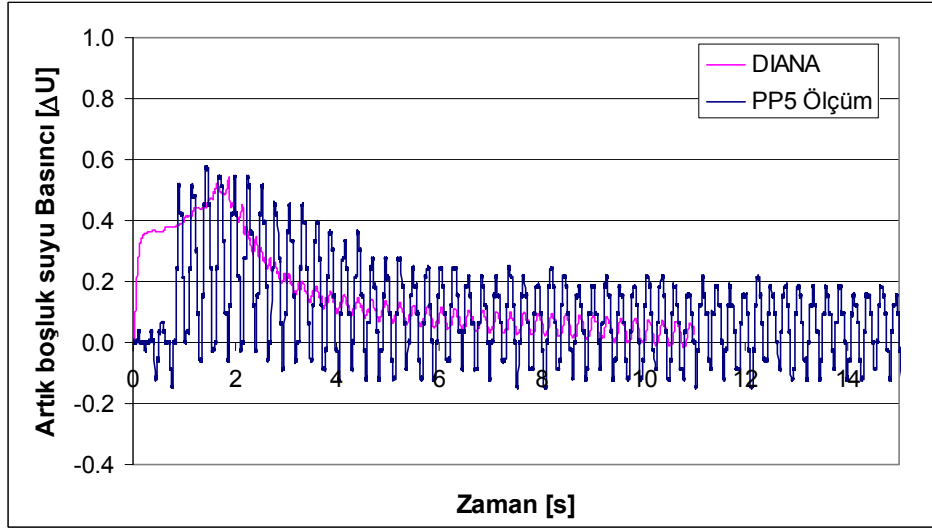
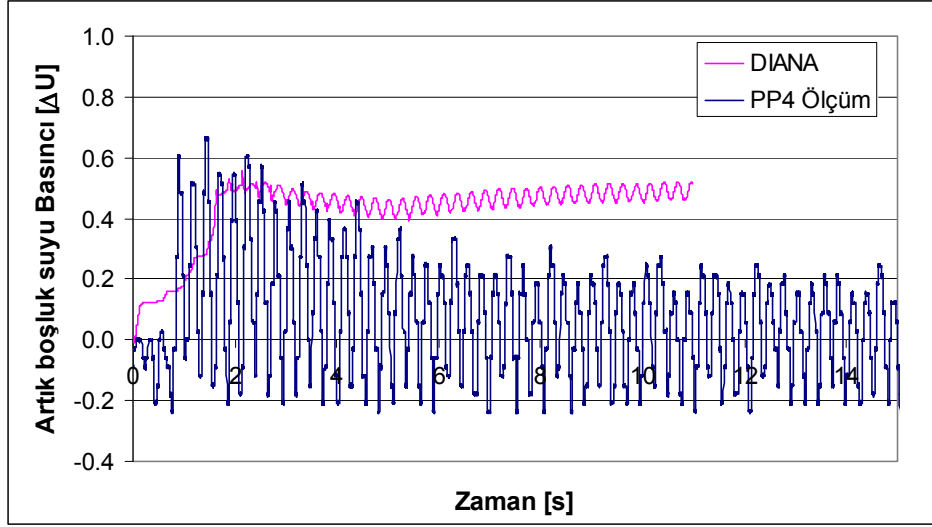


Şekil 6.18 Nümerik analiz sonuçları (deney 3a)

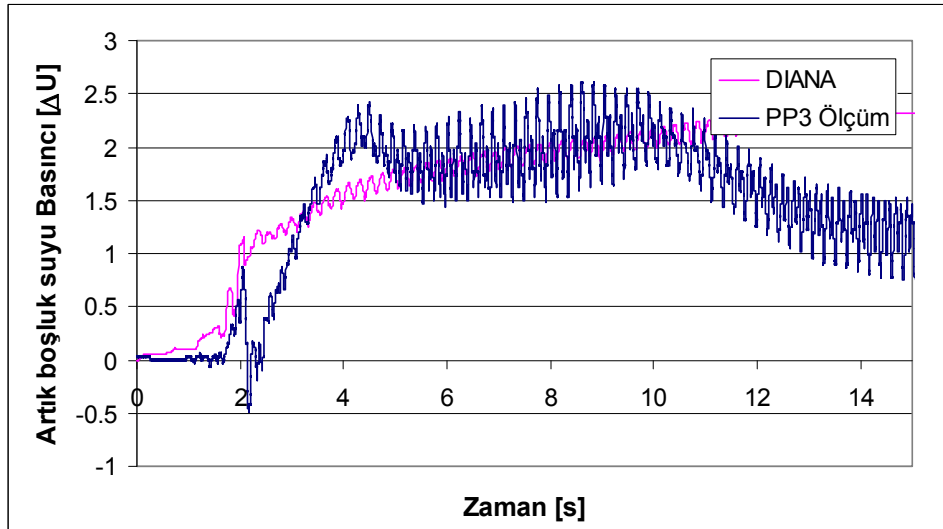
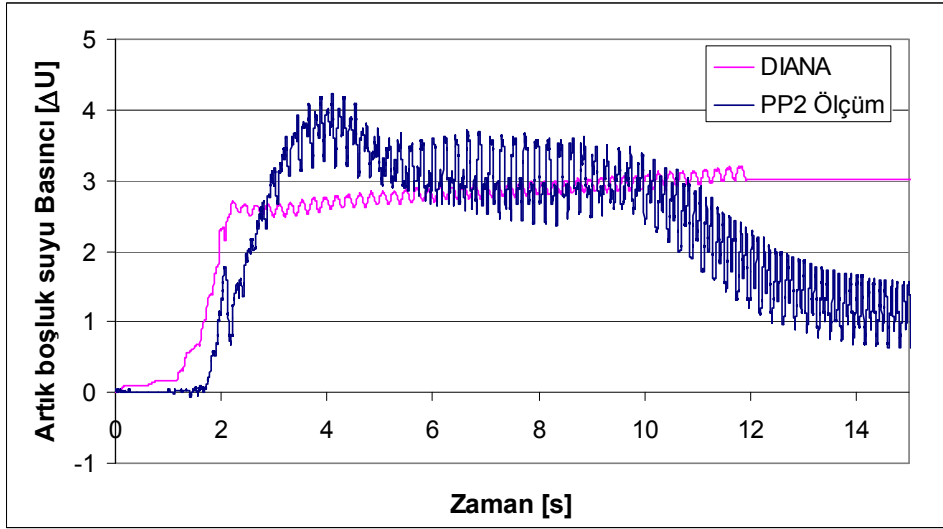
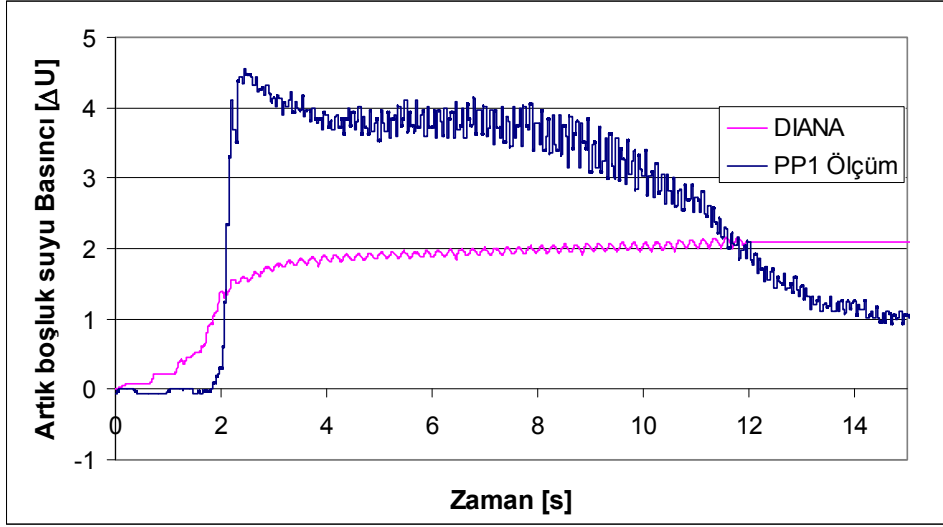




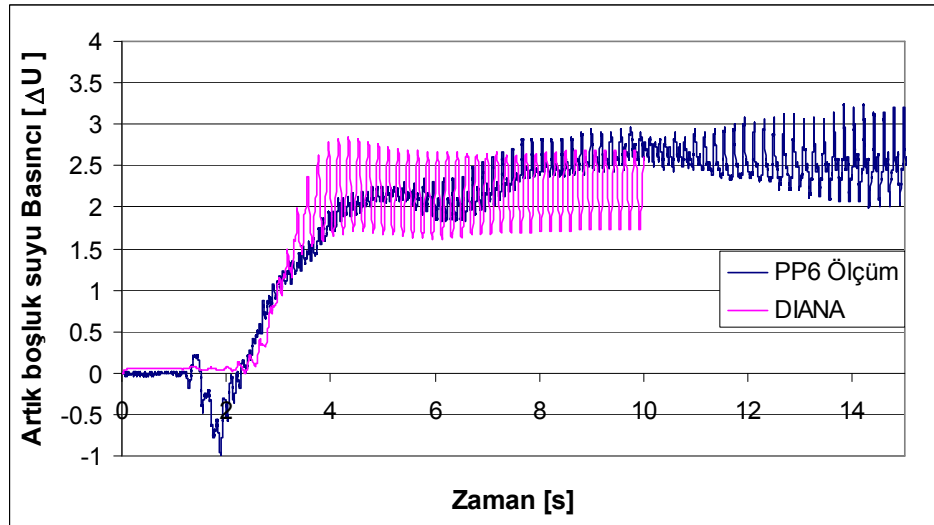
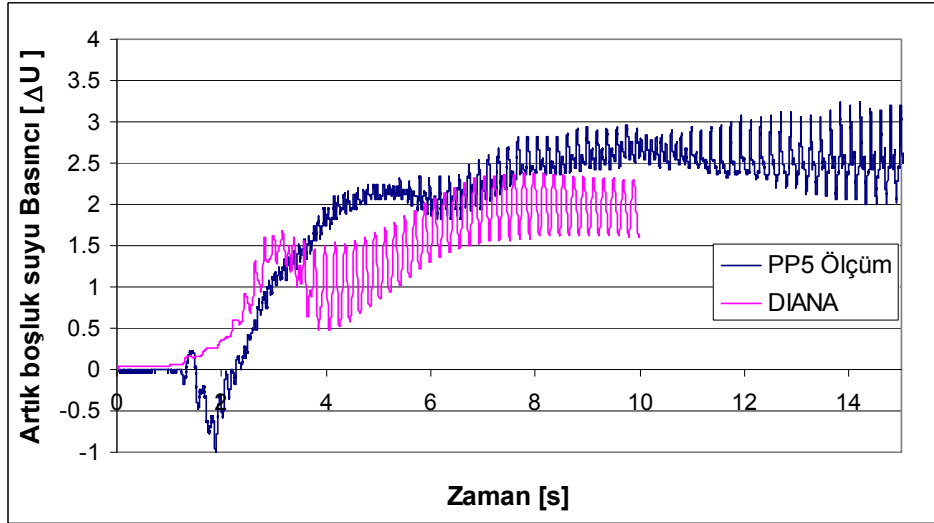
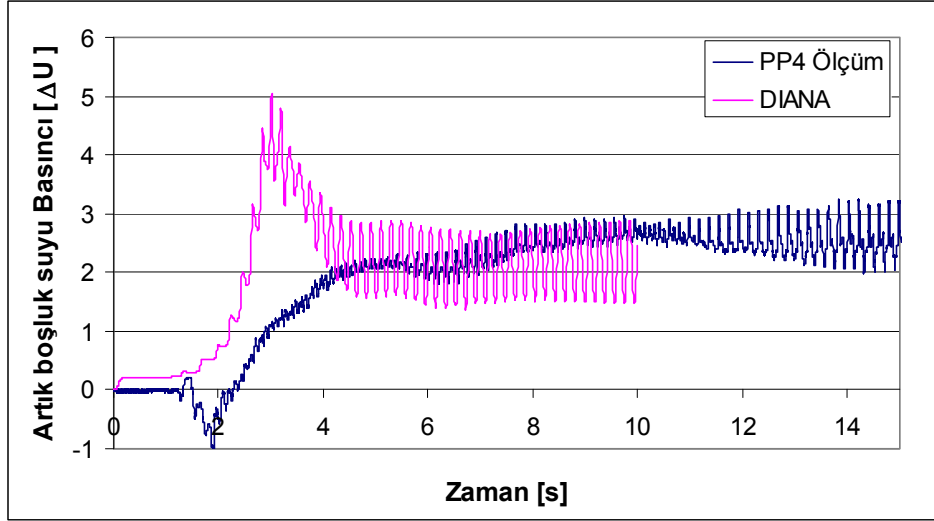
Şekil 6.19 Nümerik analiz sonuçları (deney 4)



Şekil 6.20 Nümerik analiz sonuçları (deney 4)



Şekil 6.21 Nümerik analiz sonuçları (deney 5a)



Şekil 6.22 Nümerik analiz sonuçları (deney 5a)

### SONUÇLAR ve ÖNERİLER

#### 7.1 Giriş

Dalgakıranlar gibi büyük deniz yapılarının depremler sırasında gösterebilecekleri davranışların laboratuvar deneyleri ile araştırılmasında zorluklar olduğu bilinmektedir. Arazideki zemin ve yükleme koşulları ile model deney koşulları arasındaki farklılıkların gözlemlenen davranışlar üzerinde önemli etkileri olacağı açıktır. Bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçların laboratuvar modeli kısıtları çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, model deneylerde gözlemlenen davranış biçimlerinin, sıvılaştırılabilir tabakalar üzerinde inşa edilecek dalgakıranların depremler sırasındaki olası davranışları üzerinde bazı önemli ipuçları verdiği inaniılmaktadır. Ancak bu gözlemlerden tasarıma yönelik sonuçlar çıkarılabilmesi için, dalgakıranlarda depremler sonrasında yerinde yapılacak ölçümler ve hasar gözlemleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Model deney gözlemlerinin aynı zamanda sayısal modelleme çalışmaları ile elde edilecek sonuçlarının kalibre edilmesi açısından da yararlı olduğuna inanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında suya doygun gevşek kumlu bir temel zemini üzerine inşa edilen dalgakıranların deprem esnasında maruz kaldıkları çevrimsel gerilme etkisi altındaki dinamik davranışları incelenmiştir. Tekrarlı gerilmelerden nedeniyle gevşek kum zeminde artık boşluksuyu basınçlarında meydana gelecek artıştan ötürü oluşacak sıvılaşma durumu ve bunun neticesinde oluşacak şekil değiştirmeler laboratuvarında büyük ölçekli model deneyler ile araştırılmıştır. Model deneylerde ayrıca tekrarlı yüklemeler uygulanan dalgakıran yapısının dinamik davranışı DIANA sonlu elemanlar programı yardımıyla yapılan analizlerle karşılaştırılmıştır.

Model deneyler iki ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 20 cm kalınlığında  $D_r=40$  sıklıkta 30 cm yüksekliğindeki su içerisine yağmurlama tekniğiyle hazırlanmış kum tabakasına, sarsma tankı tabanında 3Hz, 4Hz ve 5Hz frekanslarında 20 süre ile tekrarlı yatay yer değiştirmeler uygulanmıştır. Bu tekrarlı hareketlerde 0.09g, 0.22g ve 0.45g ivme değerlerinin uygulandığı ivme kayıtları Butterworth filtreleme tekniğiyle filtrelenmiş olarak sunulmuştur. Kum tabakası içerisinde üç farklı derinlikte yerleştirilen boşluksuyu basınç sensörleri yardımıyla dinamik yükleme sırasında oluşan artık boşluksuyu basınçları kaydedilmiştir. Deneysel sonuçlardan, derinlik arttıkça artık boşluksuyu basınç değerlerinin arttığı boşluksuyu basıncı oranları ( $r_u$ ) değerlerinde ise yüzeye yaklaşıldıkça artış meydana geldiği gözlenmiştir. Yüzeye yakın seviyelerde  $r_u$  oranları efektif gerilmenin düşük olması sebebiyle ilk çevrimlerden itibaren 1 değerine ulaşmıştır. Tabaka kalınlığının az ve efektif gerilmelerin düşük olması nedeniyle oldukça düşük ivme değerinde dahi  $r_u$  oranlarının yüksek değerle ulaştığı gözlenmiştir.

İkinci aşamada 30 cm yüksekliğindeki su içerisine suya yağmurlama tekniğiyle 40 cm kalınlığında ve %40 rölatif sıklıkta kum tabakası hazırlanmış, üzerine 40 cm yüksekliğinde, 1/2 kenar şev eğiminde dalgakıran kesiti oluşturularak toplam 18 adet model deneyler gerçekleştirilmiştir. Dalgakıran kesiti 30cm çekirdek bölgesi ile üzerinde 10 cm yüksekliğinde anroşman malzemesinden oluşmaktadır. Su yüksekliği ise dalgakıran tabanından 30cm yukarıdadır.

Model deneylerde, altı farklı durum için gerçekleştirilen on sekiz deney ile sıvılaşabilen kum tabaka üzerinde yer alan dalgakıranın dinamik davranışı incelenmiştir. Model deneylerde deney sistemi tabanında uygulanan tekrarlı yatay hareket ve kesit içerisinde oluşan ivme değerleri, deney sistemi tabanı ile kum tabaka yüzeyi, dalgakıran şev yüzeyi ve kretine yerleştirilen ivme ölçerler yardımıyla ölçülmüştür. Kum tabaka içerisinde oluşan artık boşluksuyu basınçları dalgakıran merkezi altında, kum temel tabakası tabanında, tabaka ortasında ve yüzeyinde, topuk altında temel tabanı ortasında ve açık alanda tabaka ortasında olmak üzere altı farklı noktada dinamik yükleme süresince ölçülmüştür. Deneyde meydana gelen şekil değiştirmeler ise saniyede bir kaydedilen jpg görüntüler üzerinden hazırlanan görüntü işleme yazılımıyla elde edilmiştir.

Model deneylerde elde edilen artık boşluksuyu basınçları ve  $r_u$  oranları, ivme ve şekil değiştirme sonuçlarının değerlendirilmesi ayrı bölümler halinde aşağıda sunulmuştur.

### **Artık Boşluksuyu Basınçları ve $r_u$ Sonuçları**

Model 1 üzerinde uygulanan, Deney 1a' da hazırlanan dalgakıran kesiti 0.17g maksimum ivme büyüklüğüne sahip çevrimsel gerilmeye maruz bırakılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Dalgakıran merkezi altında elde edilen boşluksuyu basınçları derinlikle artmış, topuk altında ise daha büyük boşluksuyu basınçları ölçülmüştür.  $r_u$  değerlerinin Dalgakıran merkezi altında 1.0 değerinin altında kalmış, topuk ve açıklıkta ise  $r_u$  değerleri 1 değerine ulaşması sebebiyle topuk altında sıvılaşma gerçekleşmiş, dalgakıran kesitinde büyük oranda göçme yaşanmıştır.

Deney 1b'de, daha önce dinamik yüklemeye maruz kalmış bir dalgakıranın daha şiddetli bir dinamik yüklemeye maruz kalması durumundaki davranışını gözlemlemek amacı ile, dalgakıran kesiti onarılarak daha büyük bir ivme değerinde(0.22g) tekrarlı gerilme uygulanmıştır. Bir önceki yükleme sonunda kum temel zemininin sıvılaşma sonrası sıkışması ve dalgakıran malzemesinin temel zemin içerisine batması sebebiyle daha düşük seviyed boşluksuyu basını artışları meydana gelmiş ve dalgakıran kesiti altında  $r_u$  oranları 0.20-0.30 seviyelerine kalmış, ancak topuk altında ve açıklıkta ise 1.0 değerine yaklaştığı gözlenmiştir.

Deney 1c'de, daha önce iki kere dinamik harekete maruz kalarak deforme olan dalgakıran yapısının, daha şiddetli bir sarsıntı altındaki dinamik altındaki davranışını incelemek amacı ile tekrar, 0.27g büyüklüğünde dinamik yükleme uygulanmıştır. Daha önceden maruz kaldığı çevrimli hareketler sıklık derecesi artmış olan kum temel tabakasında dalgakıran tabanı  $r_u$  oranlarının 0.35-0.40, temel altında ve açıklıkta ise 0.90 seviyelerinde oluşmasına yölaçacak mertebelerde boşlukusuyu basınç artışları meydana gelmiştir.

Model 2 deneylerinde, daha önce sıvılaşma yaşamış zemin tabakası üzerine inşa edilen bir dalgakıran kesitinin dinamik davranışını inceleme amacı ile öncelikle bir kum tabakası hazırlanarak 0.21g maksimum ivmeye sahip tekrarlı hareket uygulanmıştır(Deney 2a). Kum tabakasında ilk çevrimlerden itibaren artan  $r_u$  değerlerinin tabanda 0.90'a ulaştığı yüzeye yakın noktada ise 1.0 değerini aştığı gözlenmiştir. Deney 2b'de daha önce tekrarlı gerilmeye maruz bırakılmış kum tabaka üzerinde dalgakıran kesiti inşa edilerek 0.22g' lik çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Sıvılaşma sonrası sıkışmış zemin üzerine inşa edilmiş dalgakıran

altında oluşan maksimum  $r_u$  oranları tabaka tabanında ve ortasında sırasıyla 0.40 ve 0.65 olmuştur. Topuk altında ise maksimum  $r_u$  değerinin 0.80 seviyesine ulaştığı gözlenmiştir.

Deney 2c'de, bir önceki yükleme sonunda hasar örmüş olan dalgakıran kesiti onarılmadan 0.31g ivme büyüklüğüne sahip tekrarlı yükleme uygulanarak hasar görmüş dalgakıran davranışı incelenmiştir. Daha önce uygulanan tekrarlı yüklemeler neticesinde kum temel zemininin rölatif sıklığı artmasına karşın uygulanan ivme büyüklüğünün daha yüksek olmasından dolayı dalgakıran altında, tabanda 0.40, tabaka ortasında 0.70 ve yüzeyde 0.80 seviyelerinde, topuk altında ve açıklıkta tabaka ortasında 0.85-0.90 seviyesinde maksimum  $r_u$  değerlerine ulaşılmıştır.

Deney 2d'de, sıvılaşmış kum tabaka üzerine yerleştirilmiş ve daha önce uygulana çevrimli gerilmeler nedeniyle deformasyona uğrayan kesit onarılarak 0.25g ivme büyüklüğüne sahip tekrarlı hareket uygulanmıştır. Onarılmış kesitin temel zemini daha önce uygulanan tekrarlı hareketler nedeniyle rölatif sıklığı artmış olması nedeni ile dalgakıran altında ve açıklıkta  $r_u$  değeri 0.10 ve 0.20 seviyelerinde kalmıştır. Deney 2e'de daha önce üç kez çevrimli hareket uygulanmış ve bir önceki deney sonunda deforme olmuş kesite 0.33g lik maksimum ivmeye sahip tekrarlı hareket uygulanmıştır. Uygulanan çevrimli hareketin oldukça şiddetli olmasına karşın artık boşluksuyu basınçlar 0.50-0.70 kPa seviyelerinde ve  $r_u$  oranları da 0.15-0.22 seviyelerinde kalmıştır.

Model 3 deneylerinde, dalgakıran kesitinin daha önceki deneylerde uygulananlardan daha büyük ivme büyüklüğüne sahip çevrimli hareket etkisinde altında dinamik davranışı incelenmiştir. Uygulanan 0.40g'lik tekrarlı hareket altında topuk altı ve açık alandaki  $r_u$  değerleri tüm derinlik boyunca ilk çevrimden itibaren değerleri 1.0 seviyelerine ulaşmıştır. Dalgakıran merkezi altında ise tabanda 0.60 yüzeyde ise 0.80 arasında  $r_u$  değerleri oluşmuştur.

Deney3b'de tekrarlı yükleme altında deformasyona uğramış dalgakıran yapısı onarıldıktan sonra 0.29g büyüklüğünde ivmeye sahip tekrarlı hareket uygulanmıştır. İkinci kez uygulanan çevrimli hareket nedeniyle bir önceki deneye göre daha düşük artık boşluksuyu basınçları oluşmuş ve  $r_u$  oranı dalgakıran altında 0.15-0.25, topuk altında ise 0.50-0.90 seviyelerinde değerlere ulaşmıştır.



Deney 3c de deha önce iki kez şiddetli çevrimsel yükleme uygulanmış ve deforme olmuş dalgakıran yapısının yeniden tekrarlı harekete maruz kalması durumundaki davranışı incelenmiştir. 0.30g maksimum ivme altında oluşan artık boşluksuyu basınçları 0.50-1.00 kPa seviyelerine ancak ulaşırken dalgakıran altında 0.2 civarında, topuk altında 0.25-0.50 arasında  $r_u$  değerleri gözlenmiştir.

Model 4 deneyinde, dalgakıran yapısının düşük şiddette bir sarsıntı altındaki dinamik davranışı incelenmiştir. En büyük ivme değeri 0.11g olan tekrarlı hareket altında boşluksuyu basıncı artışlarının çok sınırlı kaldığı gözlenmiş,  $r_u$  değerlerinin ise dalgakıran merkezi altında 0.05 civarında, topuk altında 0.20 -0.40 seviyelerinde kalmıştır.

Deney 5a'da daha önce (Deney 4) düşük ivme değerinde temel zemininde sıvılaşma ve dalgakıran yapısında hasar gözlenmeyen kesite ivme büyüklüğü artırılarak yeniden tekrarlı hareket uygulanmıştır. 0.17g maksimum ivmeye sahip çevrimli hareket altında dalgakıran altında  $r_u$  değerleri 0.50-0.60, topuk altında 0.90-1.15, açıklıkta ise 1.25 seviyelerine ulaşmıştır. Deney 5b'de ise deforme olmuş kesit onarılarak yeniden 0.27 g büyüklüğünde çevrimsel hareket uygulanmıştır. Daha önce uygulanan tekrarlı hareket nedeniyle daha düşük boşluksuyu basıncı artışları gözlenmiştir. Dalgakıran altında 0.25-0.40 arasında, topuk altında ise 0.90- 0.95 seviyelerinde , açık alanda ise 1.0 civarında maksimum  $r_u$  değerine ulaşılmıştır.

Sıvılaşabilen tabaka üzerinde yeralan dalgakıranların uygulanan tekrarlı hareketler altındaki dinamik davranışının iyileştirilmesine yönelik olarak kum tabaka içerisine prefabrik düşey drenler (PVD) yerleştirilmesi durumunu incelemek amacı ile gerçekleştirilen Model 6a deneyinde, kum tabakasında oluşacak artık boşluksuyu basınçlarını sönmek için dalgakıran temel zeminine 45 cm aralıklı olarak PVDler yerleştirilmiştir. Bu kesite 0.15g büyüklüğündeki çevrimli hareket uygulanmış, dalgakıran altında 0.60-0.90 seviyelerinde, topuk altında ve açıklıkta ise 0.95 - 1.35 seviyelerine ulaşan  $r_u$  değerleri gözlenmiştir. Gerçekleştirilen bir model deney ile pvd'lerin performansı hakkında kesin yargıya varmak uygun olmasa da yapılan bu denemede  $r_u$  değerlerinde az da olsa düşme gözlenmiştir.

Deney 6b'de ise önce, yüklemeye deforme olmuştur kesit onarılarak yeniden 0.25g ivme büyüklüğüne maruz bırakılmıştır. İkinci kez uygulanan hareket nedeniyle  $r_u$  değerlerinde bir miktar azalma görülmüş ancak uygulanan ivme değerinin daha olması

olması sebebiyle  $r_u$  değerlerindeki azalma sınırlı olmuştur. Dalgakıran altında 0.40-0.90 topuk altında 0.85- 0.95, açıklıkta ise 1.4 seviyelerinde  $r_u$  değerlerine ulaşılmıştır.

Deney 6c'de daha önce iki kez tekrarlı hareket uygulanmış ve deformasyona uğramış olan kesitin yeniden ve daha büyük çevrimli gerilmeye maruz kalması durumunda dalgakıran kesitinin göstereceği dinamik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Ancak sarsma tankına güç iletim sistemindeki arıza nedeniyle düzgün bir tekrarlı hareket uygulanamayan bu deneyde güvenilir sonuçlar elde edilememiş,  $r_u$  dalgakıran altında 0.20-0.40 seviyesinde, topuk altında 0.30-0.75 seviyelerinde kalmıştır.

Deney 6d'de ise deformasyona uğramış kesite yeniden daha büyük ivme büyüklüğüne sahip tekrarlı hareket uygulanmıştır. Uygulanan ivme büyüklüğü 0.33g-0.40g seviyelerine çıkarılmasıyla  $r_u$  değerleri dalgakıran altında 0.25 -0.75 seviyelerinde, topuk altında 0.30-0.55 açıklıkta ise 0.55 seviyelerinde ölçülmüştür.

Çizelge 7.1'de model deneylerinde çevrimli yatay taban hareketi etkisi altında dalgakıran yapısı temel zeminini oluşturan kum tabakasının değişik noktalarında oluşan maksimum boşluksuyu basıncı oranı( $r_u$ ) değerleri topluca özetlenmiştir. Deneysel gözlemler topluca değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Dalgakıran gövdesi(merkezi) altında oluşan  $r_u$  değerlerinin topuk altında ve açık alanda yüze yakın derinliklerde oluşan değerlere göre daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bu gözlemlere göre sıvılaşabilen kum çökelleri üzerinde inşa edilecek dalgakıranlarda topuk bölgesinin stabilitesi kritik olmaktadır.
- 2) Dalgakıran modelinin bir çok kere dinamik yüklemeye maruz kaldığı durumlarda, ilk yüklemeden sonraki dinamik yükler altında oluşan  $r_u$  değerleri, ilk yükleme durumuna göre daha düşük olmakta ve yükleme tekrar sayısı arttıkça boşluksuyu basıncı artışları daha sınırlı kalmaktadır. Bunun temel nedeninin, oldukça ince bir kum tabakasından oluşan temel zemininin sıklık dereesinin tekrarlanan dinamik etkiler altında gittikçe artması olduğuna inanılmaktadır. Arazide bu olumlu etkisinin kalın zemin tabakaları üzerinde daha sınırlı olacağı açıktır. Ancak yine de dalgaların ve küçük depremlerin yarattığı çevrimsel yüklemelerin temel zemininin sıklık derecesini zamanla artmasına ve sıvılaşmaya bağlı hasarların azalmasına yolaçması beklenmektedir. Bu durumda dalgakıranlar için kısa süreli (inşaat sonrası) olacağı ve zamanla sıvılaşma kaynaklı

risklerde azalma olacağı söylenebilir.

- 3) Dalgakıran altında ve açık alanda oluşan boşluksuyu basıncı oranları karşılaştırıldığında genel olarak uygulanan çevrimli hareketin ivmesi arttıkça daha yüksek değerler olduğu gözlenmektedir. Ancak Deney 1a'da dalgakıran topuğu altında ve açık alanda diğerlerine göre çok daha büyük  $r_u$  değerlerine yolaçan boşluksuyu basınç artışları meydana gelmiştir. Bu durumun yüzeye yakın olarak yerleştirilen boşluksuyu basıncı ölçerlerin dinamik etkiler altında yer değiştirmiş olmasından ve/veya yüzeye yakın tabakaların çok gevşek olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.
- 4) Dalgakıran temelini oluşturan kum tabakası içine düşey prefabrik drenler(PVD) yerleştirilmesi durumunda sıvılaşma riskinin azaltılmasını araştırmaya yönelik olarak gerçekleştirilen az sayıda model deney gözlemleri, bu önlemin sınırlı düzeyde olumlu etkisi olabileceğini işaret etmektedir. Ancak PVD veya diğer zemin iyileştirme yöntemlerinin olası etkilerinin daha ayrıntılı araştırılması gerektiği açıktır.

#### **Çevrimli Yüklemeler Etkisinde Oluşan İvme Sonuçları**

Dalgakıran modellerine tabanda uygulanan çevrimli yatay yer değiştirmeler nedeniyle oluşan ivme değerlerini belirlemek için dalgakıran altında kum temel üzerinde, dalgakıran kretinde ve şevinde ivme ölçümleri alınmıştır. İvme kayıtları incelendiğinde, dalgakıranın değişik noktalarında oluşan maksimum ivme değerlerinin birbirinden farklı ve tabanda uygulanan ivmeden genellikle daha büyük oldukları gözlenmiştir. İvme kayıtları toplu olarak değerlendirildiğinde:

- 1) 40 cm kum temel tabakası yüzeyinde ölçülen ivme büyüklüğünün tabanda uygulanan ivme değerine oldukça yakın olduğu ve çoğunlukla 1.0-1.05 arasında olan sınırlı düzeyde ivme büyütmesi gerçekleştiği,
- 2) Dalgakıran şevinde ölçülen ivme değerlerinin tabanda uygulanan ivmeye göre 1.05-1.20 kat daha fazla olduğu,
- 3) En büyük ivme büyütmesinin dalgakıran kretinde 1.12-1.48 oranında meydana geldiği
- 4) Dalgakıran kesitinin ilk defa tekrarlı gerilmeye maruz kaldığı deneylerde daha büyük ivme büyütmelerinin meydana geldiği, deforme olmuş kesitin tekrar yüklendiği

deneşlerde ise daha küçük ivme büyütmesi meydana geldiği,

- 5) İvme büyütmelerinin model deney tabanında uygulanan ivme büyüklüğünden bağımsız olarak aynı seviyede gerçekleştiği,

gözlenmektedir. Model deneyde oluşturulan temel tabakası kalınlığı ve dalgakıran yüksekliğinin çok sınırlı olduğu gözönüne alındığında, gözlemlenen büyütmelerin gerçek boyutlarda dalgakıranlarda ancak sınırlı boyutta yol gösterici olacağı ancak dalgakıranlar inşa edildiği malzemeler ve boşluklu yapıları düşünöldüğünde ivme büyütmelerinin genellikle sınırlı olacağı ancak şev yüzeyinde oluşan ivmelerin yerel kopmalara yolaçma riskinin daha kritik olacağı söylenebilir.

Çizelge 7.1a Model deneylerde kum temel zemini tabakasında oluşan maksimum boşluksuyu basıncı oranı( $r_u$ ) değerleri

Model No	Deney No	Dinamik Yükleme	Uygulanan ivme (g)	Dalgakıran Merkezi Altında $r_u$			Topuk Altında $r_u$		Açık Alanda
				Taban	Ortada	Yüzeyde	Tabanda	Ortada	
1	(1a)	0.17g	İlk	0.40	0.40	0.45	1.90	3.60	2.00
	(1b)	0.22g	İkinci (onarılmış)	0.20	0.22	0.23	0.20	0.33	0.50
	(1c)	0.27g	Üçüncü (hasarlı)	0.35	0.40	0.40	0.80	1.30	1.60
2	(2a) <sup>(1)</sup>	0.21g	İlk (sadece temel)	2.20	1.10	0.90	2.10	1.00	0.80
	(2b)	0.22g	İkinci	0.45	0.65	0.55	0.65	0.80	0.60
	(2c)	0.31g	Üçüncü (hasarlı)	0.40	0.70	0.80	0.55	0.90	0.85
3	(2d)	0.25g	Dördüncü (onarılmış)	0.10	0.10	0.10	0.15	0.20	0.20
	(2e)	0.33g	Beşinci (hasarlı)	0.15	0.17	0.18	0.15	0.22	0.20
	(3a)	0.40g	İlk	0.70	0.60	0.80	1.00	1.50	1.70
3	(3b)	0.29g	İkinci (onarılmış)	0.15	0.25	0.25	0.50	0.90	0.90
	(3c)	0.30g	Üçüncü (hasarlı)	0.20	0.20	0.20	0.25	0.50	0.50

(1) Sadece 40 cm kalınlığında kum temel zemini tabakasına tekrarlı yükleme uygulanmıştır

Çizelge 7-1 b Model deneylerde kum temel zemini tabakasında oluşan maksimum boşluksuyu basıncı oranı( $r_u$ ) değerleri

Model No	Deney No	Dinamik Yükleme	Uygulanan İvme (g)	Dalgakıran Merkezi Altında $r_u$			Topuk Altında $r_u$		Açık Alanda
				Tabanda	Ortada	Yüzeyde	Tabanda	Ortada	
1	(4)	ilk yükleme	0.11g	0.05	0.05	0.05	0.20	0.40	0.20
				0.50	0.60	0.50	0.90	1.15	1.25
2	(5a)	ilk yükleme	0.17g	0.25	0.40	0.30	0.95	0.95	1.00
				0.60	0.65	0.90	0.95	1.15	1.35
3	(6a)	ilk yükleme	0.15g	0.40	0.50	0.90	0.85	0.95	1.40
				0.20	0.30	0.40	0.30	0.75	0.85
	(6b)	ikinci yükleme	0.25g	0.25	0.55	0.75	0.30	0.65	0.70
				0.25	0.55	0.75	0.30	0.65	0.70

(2) Güç iletim sistemindeki arızadan dolayı düzgün tekrarlı hareket uygulanmamıştır.

## **Dalgakıran Kesitinde Oluşan Şekil Değişiklikleri**

Model deneylerde tabanda uygulanan tekrarlı hareket etkisi altında kum temel tabakası içerisinde gelişen boşluk suyu basıncı artışı efektif gerilme seviyesinde azalmaya ve dolayısıyla kum temel tabakasında taşıma gücü kaybına neden olurken, dalgakıran kesitinde de sarsıntı etkisi ile yerdeğişikliklerin gerçekleşmesi söz konusu olabilmektedir. Bu etkiler sonucunda dalgakıran kretinde çökme, gövdenin temel zeminine gömülmesi ve yanal yayılması sonucunda su seviyesi üstü gövde hacminde azalma meydana gelmekte, ve dalgakıranın işlevini yerine getirememesine söz konusu olabilmektedir. Model deneylerde gözlenen davranış aşağıda özetlenmiştir.

Model 1 deneylerinde ilk yüklemeye yapılan çevrimli yüklemeye etkisinde dalgakıran kesitinde oluşan şekil değişikliklerinin yüklenme süresi uzadıkça arttığı gözlenmiştir. Kesitte oluşan hasar, deney sonunda %60 seviyesine gelerek dalgakıran kretinin su seviyesinin altına düşmesine yol açmıştır. Deforme olan kesit onarılarak yeniden yüklendiğinde hasar oranı %15'e gerilemiştir. İlk yüklemeye ile kum temel tabakasının sıklık derecesi arttığından dalgakıran kesitinde oluşan deplasmanlar ilk yüklemeye oranla küçük kalmıştır. Deney 1c'de üçüncü kez uygulanan tekrarlı yüklemeye olmasına karşın, uygulanan ivme büyüklüğü arttığından %22 seviyesinde hasar oranı ortaya çıkmıştır.

Model 2 deneylerinde sıvılaşmış kum temel üzerine inşa edilen dalgakıran kesitinde hasar oranı azalarak % 30 seviyesinde oluşmuştur. Daha sonra deforme kesit üzerinde uygulanan daha büyük ivmeye sahip tekrarlı yüklemeye sonucunda %35 hasar oranı ortaya çıkmıştır. Daha sonra kesit üzerine uygulanan (2d) ve deforme kesit üzerine uygulanan(2e) deneylerinde önceden birçok kere tekrarlı yüklemeye altında kaldığından hasar oranı %5-%8 seviyelerinde kalmıştır.

Yüksek şiddette tekrarlı yüklemeye uygulanan 3a deneyinde(0.40g) dalgakıran kesitinde büyük oranda göçme yaşanmış hasar oranı %95 seviyesine ulaşmıştır. Deformasyona uğramış kesit onarıldıktan sonra orta şiddette (0.29g) tekrarlı hareket uygulandığında(3b) hasar oranı düşerek % 30 seviyesinde gerçekleşmiştir. Deforme olan kesite yeniden yaklaşık aynı şiddette çevrimli yüklemeye uygulandığında ise(3c) dalgakıran kesitinde ölçülebilir şekil değişiklikleri meydana gelmemiştir.

Model 4'te hafif şiddette tekrarlı hareketlere maruz kalması halinde dalgakıranın dinamik davranışı incelenmiş, belirgin bir deformasyon oluşmamıştır.

Model 5 deneylerinde, hafif şiddeteki sarsıntı altında deforme olmayan kesite daha büyük şiddette ivme uygulandığında(0.17g) %40 seviyesinde hasar meydana gelmiş(5a) onarılmış kesite daha büyük ivme uygulanması sonucunda(5b) kesitte meydana gelen hasar oranı %22 seviyesinde kalmıştır.

Kum zemin içerisine PVD lerin yerleştirildiği Model 6 deneylerinde, 0.15g maksimum ivmeye sahip tekrarlı hareket uygulandığında(6a) hasar oranı %45 seviyesinde olmuş, onarılmış kesite uygulanan 0.25g ivme etkisinde(6b) hasar oranı azalarak %37 seviyesinde gerçekleşmiştir. Deforme olan kesite yeniden tekrarlı gerilmeler uygulandığında, (6c ve 6d) hasar oranı %5 mertebelerinde kalmıştır.

Çizelge 7.2 'de özetlenen model deneylerde oluşan kret düşey deplasmanı ve hasar oranı değerleri ve Çizelge 7.1'de verilen temel zemininde oluşan artık boşluksuyu basıncı oranları birlikte değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Genel olarak uygulanan ivme büyüklüğü arttıkça oluşan kret düşey deplasmanı ve hasar oranı artmaktadır.
- 2) Oluşturulan dalgakıran kesiti ilk defa tekrarlı yüklemeye maruz bırakıldığında daha büyük deplasmanlar ve hasarlar oluşmaktadır. Bu davranışın temel zemininde sıvılaşma oluşması durumları ile uyumlu olduğu gözlenmektedir.
- 3) Bu çalışmada gerçekleştirilen model deney gözlemleriyle sınırlı olmakla birlikte temel zemininde sıvılaşma durumunun ortaya çıkması, dalgakıran hasar oranını ve işlevini yitirmesi riskini artırmaktadır.
- 4) Dalgakıranların gövdesinin(deforme olmuş veya onarılmış) tekrar tekrarlı yüklenmeye maruz bırakılması durumunda kret düşey deplasmanları ve hasar derecesi oldukça sınırlı kalmaktadır. Bunun ana nedeninin temel zemininde önceki dinamik etkiler altında meydana gelen iyileşme olduğuna inanılmakla birlikte gövdenin daha sıkı yerleşmesinin de olumlu katkısı olabilir.



Çizelge 7.2 Model deneylerde gözlenen kret düşey deplasmanı ve hasar oranı değerleri

Model No	Deney No	Dinamik Yükleme	Uygulanan İvme (g)	Kret Düşey Deplasmanı <sup>(3)</sup>		Hasar Oranı <sup>(4)</sup> 1-ΔV / V (%)
				ΔH (cm)	ΔH / H (%)	
1	(1a)	İlk	0.17g	30	75	60
	(1b)	İkinci (onarılmış)	0.22g	6	15	15
	(1c)	Üçüncü (hasarlı)	0.27g	10	25	22
2	(2a) <sup>(1)</sup>	İlk(sadece temel)	0.21g	-	-	-
	(2b)	İkinci	0.22g	17	43	30
	(2c)	Üçüncü (hasarlı)	0.31g	10	25	35
	(2d)	Dördüncü(onarılmış)	0.25g	5	13	5
	(2e)	Beşinci(hasarlı)	0.33g	5	13	8
3	(3a)	İlk	0.40g	35	88	95
	(3b)	İkinci (onarılmış)	0.29g	12	30	30
	(3c)	Üçüncü (hasarlı)	0.30g	3	7.5	-
4	(4)	İlk yükleme	0.11g	-	-	-
5	(5a)	İlk yükleme	0.17g	15	38	40
	(5b)	İkinci yükleme	0.27g	11	28	22
6	(6a)	İlk yükleme	0.15g	20	50	45
	(6b)	İkinci yükleme	0.25g	16	40	37
	(6c) <sup>(2)</sup>	Üçüncü yükleme	0.19g	3	7.5	5
	(6d)	Dördüncü yükleme	0.34g	4	10	5

<sup>(1)</sup> Sadece 40 cm kalınlığında kum temel zemini tabakasına tekrarlı yükleme uygulanmıştır

<sup>(2)</sup> Güç iletim sistemindeki arızadan dolayı düzgün tekrarlı hareket uygulanamamıştır

<sup>(3)</sup> Hasar görmüş kesitlerde ilave düşey deplasman

<sup>(4)</sup> Hasar görmüş kesitlerde deforme hacime oranla hasar oranı

### **Hasar Oranı Çevrim Sayısı İlişkisi**

Model deneylerde meydana gelen hasarın yük-çevrim sayısı ile ilişkisi incelendiğinde, yapılan ilk yüklemelerde ilk çevrimlerden itibaren başlayan hasar 40. çevrimden sonra hızı azalarak devam etmiştir. Onarılmış dalgakıran kesitine tekrar dinamik yükleme uygulandığında ise hasar oluşmasının başlaması için gerekli çevrim sayısı 8'e yükselmiş, deforme olan kesitte ise 10. çevrim sayısından itibaren hasar başlamıştır.

Daha önce sivilaşmaya maruz kalmış bir tabaka üzerine yerleştirilmiş dalgakıran kesitinde 40 çevrime kadar az şiddette hasar oluşmuş, 40 çevrimden sonra ise hasar seviyesi sabit kalmıştır. Kesit onarıldığında ise 12 çevrimden başlayan hasar sınırlı düzeyde artarak sabit seviyeye ulaşmıştır.

Uygulanan tekrarlı gerilmenin şiddeti arttıkça hasar başlangıcı için gerekli çevrim sayısı 1 . çevrime kadar azalmıştır. İvme şiddeti azaldıkça hasar başlaması için gerekli çevrim sayısı artmış küçük ivmelerde yüksek çevrim sayısına ulaşılmasına rağmen hasar gözlenmemiştir.

Onarılmış kesitlerin davranışı incelendiğinde ise hasar oluşması ilk yüklenen kesitlere göre gecikerek başlamış 30 çevrimden sonra sabit kalmıştır.

Hasar başlangıcı için etkiyen ivme büyüklüğü ile gerekli çevrim sayısı arasında ilişkiyi gösteren bir grafik geliştirilmiştir. Ayrıca, değişik ivme şiddetlerinde oluşacak hasar oranı ile çevrim sayısı ilişkisini veren eğriler oluşturulmuştur. Bu eğrilerden belirli bir hasar seviyesine şiddetli bir ivme etkisinde çok daha az çevrimde ulaşılabilir. Örneğin, ivme büyüklüğü 0.40g seviyesinde iken ilk 20 çevrimde oluşan hasar oranının 0.15g büyüklüğündeki harekette meydana gelecek hasar oranının iki katı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde kesitte 100 çevrim sonunda iki kat hasar oranı farkı oluşmaktadır.

### **Sayısal Analiz Sonuçları**

Model deneylerde gözlenen davranışın sayısal analizi için DIANA sonlu elemanlar programından faydalanılmıştır. Sivilaşabilen tabaka üzerinde inşa edilen dalgakıran kesitinin dinamik yükler altındaki davranışına ilişkin ön değerlendirmeler yapabilmek için öncelikle elastik statik analizler yapılarak kendi ağırlığındaki şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Dalgakıran modellerinin kendi ağırlığı altında yaptığı şekil değiştirmeler elastik sınırlar içinde kaldığı, 0.05 mm seviyelerinde olduğu görülmüştür.

Model deney kesitinin dinamik yükler altındaki davranışını ortaya koymak için öncelikli olarak özdeğer analizi gerçekleştirilerek doğal hakim frekansları hesaplanmıştır. Model deney kesitinin kuru durumda, su altında doğal hakim frekansları belirlenmiştir. Su altındaki davranışın analizinde su-yapı etkileşimini dikkate alan bir sayısal model kullanılmıştır. Suyun yaratacağı hidrodinamik kuvvetler sisteme ek kütle olarak etkilediğinden doğal hakim frekansta yarattığı değişiklik ortaya konmuştur. Kuru halde hesaplanan doğal hakim frekansı 53Hz seviyelerinde olurken, su altındaki davranışına bakıldığında, sistemde yer alan su kütlelerinin yarattığı hidrodinamik kuvvetler nedeniyle doğal hakim frekansı 33 Hz seviyelerinde bulunmuştur. Ayrıca, hakim doğal titreşimlere ait modal şekillere bakıldığında, kuru durumda yatay deplasman yapma eğilimi görülürken su altındaki durumda suyun yarattığı ek kütleler nedeniyle yatay ötelenme ile birlikte topuk bölgesinde göçme davranışı görülmektedir.

Model deney kesitinin sahip olduğu doğal titreşim modlarında sistemin vereceği tepkiler modal tepki analizleriyle hesaplanmıştır. Modal tepki analizleri sonucuna göre kuru durumdaki sistemin vereceği tepkiler ile su altındaki yapının vereceği deplasman tepkileri dalgakıran kreti, şevi ve topuk olmak üzere üç farklı nokta için karşılaştırılmıştır. Kuru durumda sistemin hakim frekansı olan 53 Hz de deplasman tepkilerin üç nokta içinde yalnızca birinci modda oluştuğu, su altındaki durumda ise hakim frekans olan 33 Hz de yatay deplasman tepkilerinin arttığı, ayrıca ikinci üçüncü ve dördüncü hakim frekanslarda kret ve topukta modal tepkilerin oluştuğu görülmüştür.

Model deneyler için sınılaşma analizleri DIANA sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Programda sınılaşma davranışını modellemek için Towhata-lai bünye modeli kullanılmaktadır. Nümerik analizde sınılaşma parametreleri, daha önce laboratuarda yapılan çevrimli basit kesme deneylerinin modellenmesi ile elde edilmiştir. Öncelikli olarak parametrik çalışma yapılarak sınılaşma malzeme parametrelerinin davranışa olan etkileri incelenmiştir. Sınılaşma parametreleri C1, W1, P1, P2, S1 den oluşmaktadır.. C1 parametresinin değerinin artmasıyla  $r_u$  değerlerinde gecikmeli olarak artış görülmektedir. W1 değeri artmasıyla  $r_u$  artışı ilk çevrimlerden itibaren artmaktadır. P1 değerinin artması  $r_u$  nun daha uzun zamanda artmasına yol açmakta, P2 değerindeki artış,  $r_u$  değerinin daha geç oluşmasına ve değerinin az da olsa düşmesine neden olmakta iken, S1 parametresinin ise boşluksuyu basıncı gelişiminde etkisi olmadığı gözlenmiştir.

Laboratuar basit kesme deneyinin modellenmesi ile elde edilen malzeme parametreleri kullanılarak dalgakıran için sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Towhata-lai bünye modeli kullanılarak düzlem şekil değiştirme presiplerine göre iki boyutlu drenajsız analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ivme kaydı olarak deneylerde uygulanan kayıtlardan  $\Delta T=0.01$  saniye aralıklı 10 saniyelik kısmı kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen artık boşluksuyu basınçları deney sonuçları ile karşılaştırıldığında genel olarak uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Açık alandaki boşluksuyu basınçlarının nümerik sonuçlar ile tam uyumlu olduğu görülmektedir. Dalgakıran altında tabanda yapılan ölçümler ile Diana sonuçları karşılaştırıldığında, Diana sonuçlarının ölçüm değerlerinden bir miktar fazla değerler verdiği, tabaka ortasında ve yüzeyde ise daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Sıvılaşma bünye modelinde sıvılaşma davranışı sayısal olarak modellenenabilirken, sıvılaşma sonrası oluşan oturma davranışı modellenemediğinden dalgakıran kretinde oluşan şekil değiştirmeler deney sonuçlarıyla karşılaştırılamamıştır.

- [1] Chaney , R. C., ve Pamukcu, S. (1991). "Earthquake Effects on Soil-Foundation Systems, Part II," in Foundation Engineering Handbook, H.-Y. Fang, Ed. pp. 623-672.
- [2] Hyodo, M., Hyde, A. F.L., Yamamoto, Y., ve Fujii, T. (1999) "Cyclic Shear Strength of Undisturbed and Remolded Marine Clays" Soils and Foundation, Vol. 39, 45-58.
- [3] Youd, T. L., ve Idriss, I.M. (2001). "Liquefaction Resistance of soils: Summary report from the 1999 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Eval. of Liq. Resist. Soils", J. Geotech. And Geoenvir., ASCE, 27:297-313.
- [4] University of Washington,USA, <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>, Agustus 2011.
- [5] Memos C. ve Protonotarios J.N., (1992). "Patras Breakwater Failure Due To Seismic Loading", Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Coastal Engineering.
- [6] Westergaard H. M., (1938). "Water Pressures on Dams During Earthquakes", American Society of Civil Engineers, Transactions, vol. 98, (1933), pp. 18-433.Discussion, 434-472.
- [7] Zangar, C.N., (1952). "Hydrodynamic Pressures on Dams Due to Earthquake Effects", Engineering Monograph No. 11, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, May 1952.
- [8] Chopra, A. K., (1967). "Hydrodynamic Pressures on Dams During Earthquakes", J. Eng. Mech. Div., 93(6): 205–223.
- [9] Wang, H., Yang, C.V., Lamison, C. ve Chen, S.S., (1978). "Loadings on Rubble-mound Breakwaters Due to Earthquake", *Proc. Of the 16th Int. Conf. on Coastal Engr* (1978), 2244–2262.
- [10] Adalier, K., Elgamal, A.-W. ve Martin, G. R., (1998). "Foundation Liquefaction Countermeasures for Earth Embankments", J. Geotech. Geoenviron. Engr. ASCE 124(6):500–517.
- [11] Adalier, K., ve Sharp, M. K., (2002a). "Dynamic Centrifuge Modeling Of Earth Dams On Liquefiable Ground", Proc., 3rd U.S.–Japan Workshop on Advanced Research on Earthquake Engineering for Dams, San Diego.

- [12] Adalier, K., ve Sharp, M. K., (2004). "Embankment Dam on Liquefiable Foundation—Dynamic Behavior and Densification Remediation." *J. Geotech. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(11):1214-1224.
- [13] Elgamal, A., Parra, E., Yang, Z.,ve Adalier, K., (2002). "Numerical Analysis of Embankment Foundation Liquefaction Countermeasures", *Journal of Earthquake Engineering*,6(4): 447-471.
- [14] Yang, Z., Elgamal, A., Adalier, K., ve Sharp, M. (2004). "Effect of Container Boundary on Seismic Embankment Response in Centrifuge Model Tests.", *Proc., 11th Int. Conf. on soil Dynamics & Earthquake Engineering and 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*.
- [15] Wyllie, L. A., vd., (1986). "The Chile Earthquake of March 3, 1985", *Earthquake Spectra*, 2(2):293–371.
- [16] Iai, S., ve Kameoka, T., (1993). "Finite Element Analysis of Earthquake Induced Damage to Anchored Sheet Pile Quay Walls", *Soils Found.*,33(1): 71–91.
- [17] Iai, , S., vd., (1994). "Effects of Remedial Measures Against Liquefaction at 1993 Kushiro-Oki Earthquake", *Proc., 5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Counter Measures against Soil Liquefaction*, NCEER-94-0026, National Center for Earthquake Engineering Research, 135–152, Buffalo, N.Y.
- [18] Hall, J. F., vd.,(1995). "Northridge Earthquake of January 17, 1994" *Reconnaissance Rep., Vol. 1, Earthquake Spectra, Supplement C to Vol. 11*.
- [19] Sugano , T., Kaneko, H., ve Yamamoto, S., (1999). "Damage to port facilities. The 1999 Ji-Ji Earthquake, Taiwan, Investigation into the Damage to Civil Engineering structures", *J. Japan. Soc. Civ. Eng.*, 5-1–5-7.
- [20] Boulanger , R., Iai, S., Ansal, A., Cetin, K.O., Idriss, I.M., Sunman, B., ve Sunman, K., (2000). "Performance of Waterfront Structures", Chapter 13, in 1999 Kocaeli, Turkey, Earthquake Reconnaissance Report, Supplement A to Earthquake Spectra, Volume 16, T.L. Youd, J.-P. Bardet, J.D. Bray, Eds.,295-310.
- [21] Sümer , B. M., Kaya, A., ve Hansen, N.-E. O., (2002). "Impact of liquefaction on Coastal Structures in the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake", *Proc., 12th Int. Offshore and Polar Eng Conf., KitaKyushu, Japan, II*: 504–511.
- [22] Katopodi , I., ve Iosifidou, K., (2004). "Impact of the Lefkada Earthquake 14-08-2003 on Marine Works and Coastal Regions", *Proc., 7th Panhellenic Geographical Conf., Mytilene, Greece*, 363–370.
- [23] Sümer, B.M., Ansal, A., Cetin, K.O., Damgaard, J., Gunbak, A.R., Hansen, N.-E.O., Sawicki, A., Synolakis, C.E. Yalciner, A.C., Yuksel, Y. ve Zen, K., (2007b). "Earthquake-Induced Liquefaction around Marine Structures", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 133(1): 55-82.
- [24] Groot, M. B., Bolton, M. D., Foray, P., Meijers, P.,Palmer, A. C., Sandven, R., Sawicki, A. ve The, T.C., (2006 a). "Physics of Liquefaction Phenomena around

- Marine Structures”, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 132(4) 227-243.
- [25] LIMAS (2004). “LIMAS: Liquefaction around Marine Structures.” , The European Commission Research Directorate’s FP5 specific program “Energy, Environment and Sustainable Development,” Contract No. EVK3-CT-2000-00038.
- [26] Yuksel, Y., Alpar, B., Yalciner, A.C., Cevik, E., Ozguven O. ve Celikoglu, Y., (2003). “Effects of the Marmara Earthquake on the Marine Structures and Coastal Areas, *J. of Water and Maritime Engr* 156 :147–163.
- [27] Yalciner, A. C., Synolakis, A. C., Alpar, B., Borrero, J., Altinok, Y., Imamura, F., Tinti, S., Ersoy,Ş., Kuran, U., Pamukcu, S. ve Kanoglu, U., (2001). "Field Surveys and Modeling 1999 Izmit Tsunami", *International Tsunami Symposium ITS 2001*, Session 4, 4-6, Seattle, August 7-9, 557-563.
- [28] Safak, E., Erdik, E. Beyen, K. vd., (2000). "Recorded main shock and aftershock motions, 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, Reconnaissance Report", *Earthquake Spectra*, 16.
- [29] Gunbak, A.R., Muyesser, O. ve Yuksel, Y. (2000). "Damages Recorded at the Coastal and Port Structures around Izmit Bay under the 17th August, 1999 Earthquake", *PIANC Buenos Aires Conference*, 29.Nov., 2000, 1-19.
- [30] Yuksel, Y., Alpar, B., Yalciner, A., Cevik, E., Ozguven, O., ve Celikoglu, Y. (2001). "Effects of the Eastern Marmara Earthquake on the Marine Structures and Coastal Areas". *Proceedings of the Institution of Civil Eng. (ICE), Water and Marine Eng. Div., UK*.
- [31] Seed, H. B., (1968). "Landslides During Earthquakes Due to Soil Liquefaction" *J. Geotech. Engrg. Div. ASCE* 94(SM5), 1055–1123.
- [32] Seed, H. B., (1970). "Soil Problems and Soil Behavior" Chapter 10 of *Earthquake Engineering*, Wiegel R. L. (Ed.), Prentice-Hall Inc., NJ.
- [33] Matsuo, O., (1996). "Damage to river dikes," *Soils Foundations* 36(1):235–240.
- [34] Tani, S., (1991). "Consideration of earthquake damage to earth dam for irrigation in Japan", *Proc. 2nd Intl. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, S. Prakash, (Ed.), University of Missouri-Rolla, 1137–1142.
- [35] McCulloch, D. S. ve Bonilla, M. G., (1967). "Railroad Damage in the Alaska Earthquake", *J. Geotech. Engrg. Div. ASCE* 93(5):89–100.
- [36] Kawakami, F. ve Asada, A., (1966). "Damage to the Ground and Earth Structures by the Niigata Earthquake of June 16, 1964", *Soils Foundations* 6(1):14–30.
- [37] Tani, S., (1996). "Damage to Earth Dams", *Soils Foundations* 36(1): 263–272.
- [38] Arulanandan, K. ve Scott, R. F. , (1993). "Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems", *Verification of Numerical*

- Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems 1., Balkema, Brookfield, Rotterdam.
- [39] Arulanandan, K. ve Scott, R. F., (1994). "Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems", Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems Conference Proceedings, 2., (1994) Balkema, Rotterdam.
- [40] Kimura, T., Takemura, J., Hiro-oka, A., Okamura, M. ve Matsuda T., (1997). "Countermeasures against liquefaction of sand deposits with structures", Proceedings, 1st Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara, K. (Ed.), 3, pp. 1203–1224., Balkema, Rotterdam.
- [41] Finn, W. D. L., Ledbetter, R. H. ve Marcuson, W. F., (1994). "Seismic deformation in embankment and slopes," 2nd Seismic Short Course on Evaluation and Mitigation of Earthquake Induced Liquefaction Hazards, U. of Southern California, Los Angeles, CA.
- [42] Marcuson, W. F., Hadala, P. F. ve Ledbetter, R. H., (1996). "Seismic Rehabilitation of Earth Dams", J. Geotechnical Engineering ASCE 122(1), 7–20.
- [43] Adalier, K., (1996). "Mitigation of Earthquake Induced Liquefaction Hazards" Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.
- [44] Sharp, M. K., (2003). "Current USACE Research Efforts Related to Seismic Stability of Dams", The International Workshop on Seismic Stability of Tailings Dams Case Western Reserve University.
- [45] Memos vd., (2000). "Stability of Rubble Mound Breakwaters Under Seismic Action", Proceedings of Coastal Engineering Conf. ASCE, (2000) Sydney Avustralya
- [46] Cihan, K.,(2009). Taş Dolgu Dalgakıranların Sismik Davranışı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] Cihan, K. ve Yüksel, Y., (2011). "Behavior of Homogenous Rubble Mound Breakwaters Materials Under Cyclic Loads", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Available online 12 November 2011, in press.
- [48] Özener, P.,(2007). Depremde Tabakalı Kum Zeminde Oluşan Sıvılaşma ve Sıvılaşma Sonrası Davranışın Model Deneylerle Araştırılması,Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] Özener, P., Berilgen M. ve Özyayın, K.,(2009). "Investigation of Liquefaction and Pore Water Pressure Development in Layered Sands", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol.7/1 pages 199-219
- [50] Tonaroğlu, M., (2006). Sıvılaşmanın Nümerik Olarak Modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [51] Tonaroğlu, M., Özyayın, K. ve Dikmen, Ü.,(2010). "Seismic Analysis of Saturated Sand Deposits with Silt Layers", 5th International Conference On



Recent Advances In Earthquake Geotechnical Engineering, 24-29 Mayis 2010, San Diego, ABD.

- [52] PIANC (2001). Seismic design guidelines for port structures, Working Group No. 34 of the Maritime Navigation Commission, International Navigation Association, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [53] Casagrande, A., (1936). "Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills", Journal Boston Society Civil Engineers, 23(1): 13-32
- [54] Roscoe, K.H., Schofield, A.N. ve Wroth, C.P., (1958). "On the Yielding of Soils", Geotechnique, 8(1):22-53
- [55] Kramer, S. L., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice- Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [56] Poulos, S.J., (1981). "The Steady State of Deformation, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 107:5, 553-562.
- [57] Rauch, A. F., (1997). "EPOLLS: an Empirical Method for Predicting Surface Displacements Due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading In Earthquakes," PhD dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va.
- [58] Lee, K.L. ve Albasi, A., (1974). "Earthquake Induced Settlements in Saturated Sand", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100 (GT4): 387-406.
- [59] Seed, H.B., (1976). "Some aspects of Sand Liquefaction Under Cyclic Loading" Conference on Behaviour of off-shore Structures, The Norwegian Institute of Technology, Norway.
- [60] Özyaydın, K., (1982). Zemin Dinamiği, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları No.1, İstanbul.
- [61] Nagase, H. ve Ishihara, K., (1988). "Liquefaction-Induced Compaction and Settlement of Sand during Earthquakes", Soils and Foundations, 28(1): 65-76.
- [62] Ishihara, K. (1996). Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics", Oxford University Press, United States.
- [63] 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.
- [64] Janbu, N., Bjerrum, L. ve Kjaernsli, B., (1956). Veiledring ved losning av fundermenteringsopp-gaver, Norwegian Geotechnical Institute Publication No.16, Oslo.
- [65] Duncan, J. M. ve Chang, C. Y., (1970). "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1629-1653.
- [66] Faranke W. ve Kiesckbush, M.(1979). "A New Simple Shear Device" Geotechnical Testing Journal, 2(4)

- [67] Das, M. B., (1993). Principles of Soil Dynamics, Thomson Learning, Division of Brooks/Cole, Usa.
- [68] Hardin ve Black, (1963). "Elastic Wave Velocity in Granular Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 89(SM1):33-65.
- [69] Seed, H.B. ve Idriss, I.M., (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley, California.
- [70] Coelho, P. A. L. F., Haigh, S. K., ve Gopal Madabhushi, S. P., (2003). "Boundary Effect in Dynamic Centrifuge Modeling of Liquefaction in Sand Deposits," Proceeding of 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, 151–162.
- [71] TNO Building and Construction Research, (2005). DIANA User's Manual, Release 9.4.2, Delft, The Netherlands.
- [72] Iai, S., Matsunaga, Y., ve Kameoka, T., (1992). "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility", Soils and Foundations, 32(2): 1-15.
- [73] Ishihara, K. ve Towhata, I., (1982). "Dynamic Response Analysis of Level Ground Based on the Effective Stress Method." Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads eds. G.N. Pande and O.C.Zienkiewicz, New York, 133-172.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

<b>Adı Soyadı</b>	:Murat Ergenokon SELÇUK
<b>Doğum Tarihi ve Yeri</b>	:15.09.1977
<b>Yabancı Dili</b>	:İngilizce, Almanca
<b>E-posta</b>	:selcukme@yahoo.com

### ÖĞRENİM DURUMU

<b>Derece</b>	<b>Alan</b>	<b>Okul/Üniversite</b>	<b>Mezuniyet Yılı</b>
Y. Lisans	Deprem Mühendisliği	Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasat. Dep. Arş. Ens.	2004
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	1999
Lise	Fen Bilimleri	Kadıköy Anadolu Lisesi	1995

### İŞ TECRÜBESİ

<b>Yıl</b>	<b>Firma/Kurum</b>	<b>Görevi</b>
2005 -	Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fak., İnşaat Müh. Böl. Geoteknik ABD.	Araştırma Görevlisi
2004-2005	Alarko, Bakü Ceyhan Petrol Boru Hattı Prj.	Kontrol Mühendisi

2003 - 2004	Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rast.ve Dep.Arş.Ens. , Deprem Mühendisliği ABD.	Öğrenci Asistan
2002 - 2004	Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rast.ve Dep.Arş.Ens. Afete Hazırlık Eğitim Projesi	Eğitmen
2002 - 2003	Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rast.ve Dep.Arş.Ens. Afete Hazırlık Eğitim Projesi	Danışman Mühendis

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. 2011 “Sıvılaşabilen Tabakalar Üzerinde İnşa Edilen Dalgakıranların Depremler Sırasındaki Davranışı”, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, İstanbul(yayında)  
  
Murat E.Selçuk, Kutay Özaydın, Mehmet Berilgen
2. 2010 “İstanbul Tersiyer Çökellerinin Yeni Stratigrafisi ve Mühendislik Özellikleri”,Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 28, Sayı 4, 323-334, İstanbul  
  
M.Yıldırım,C., Akgüner, M. Tonaroğlu, M.E. Selçuk

### **Bildiri**

- 1.2011 “A Numerical Evaluation Of A Cover Embankment Model On Very Soft Halic Dredge Material”, ISSGME- The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,Fifth International Symposium on Deformation Characterictics of Geotematerials, Issue 1, Vol. 2, pp. 1136, Aug31-Sep3, 2011,Seoul  
  
Terzi, N.U., Selçuk, M.E., Şengül, T

- 2.2011 “Kum Zemin Üzerine İnşa Edilen Taş Dolgu Dalgakıranların Dinamik Davranışının Model Deneyler İle İncelenmesi”, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30Mayıs-3Haziran 2011, İstanbul
- Selçuk M.E, Özaydın K., Berilgen, M.
3. 2010 “Some Applications Of Wind Turbines In Turkey”The National Technical-Scientific Conference (With International Participation)"Modern Technologies For The Third Millennium", The fascicle of Constructions and Hydroedilitary Installations, Vol.XIII-2, Page:359-368 Nov.2010, University of Oradea, Romania
- Yıldırım M., Akgüner C., Tonaroglu, Selçuk, M.E., Yıldırım G.
- 4.2010 “İstanbul Tersiyer Çökellerinin Yeni Stratigrafisi ve Mühendislik Özellikleri”, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Issue 4, Vol. 28, pp. 323-334, (2010)
- Yıldırım,M., Akgüner, C., Tonaroğlu, M., Selçuk, M.E.,
5. 2007 “Kalın Zemin Çökellerinde Eşdeğer-Lineer Ve Non-Lineer Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması”, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı,16-20 Ekim, İstanbul
- Selçuk M.E, Kılıç H., Özaydın K.
6. 2005 “Yerel Zemin Koşullarının Belirlenmesinde Mikrotremor Ölçümlerinin kullanılması:Adapazarı Örneği”, Deprem Sempozyumu,23-25 Mart,1167-177,Kocaeli
- Siyahi, B., Selçuk, M.E..
7. 2005 “YASS'nın Drenaj Hendekleri ile Düşürülmesinin Bir Şev Duyarşılıığı Örneğinde İncelenmesi" Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi,İstanbul
- Terzi N.U., Selçuk M.E.,

8. 2005 Mikrotremorların Kullanımı ve Zemin Kayma Dalgası Hız Profiline Çıkarılması" , Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul

Selçuk M. E., Terzi N.U

### **Kitap**

1. 2009 "Structural Risk Mitigation Against Earthquake",  
  
Istanbul Seismic Risk Mitigation And Emergency Preparedness Project(ISMEP) Training Modules For Public Preparedness, Istanbul Special Provincial Administration Istanbul Project Coordination Unit  
  
Murat E.Selçuk, Cüneyt Tüzün, Ufuk Hancılar, Mustafa Erdik,
2. 2009 "Structural Retrofitting Against Earthquake",  
  
Istanbul Seismic Risk Mitigation and Emergency Preparedness Project(ISMEP) Training Modules for Public Preparedness, Istanbul Special Provincial Administration Istanbul Project Coordination Unit  
  
Cüneyt Tüzün, Ufuk Hancılar, Murat E. Selçuk, Mustafa Erdik
3. 2004 "Depreme Karşı Yapısal Bilinç Eğitimi El Kitabı",  
  
Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Afete Hazırlık Eğitim Programı,Boğazici Üniversitesi, American Red Cross and World Lutheran Relief (Danışman Yazar)
4. 2003 "Binaların Sırrı", Beyaz Gemi Yayıncılık, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Afete Hazırlık Eğitim Programı,Boğazici Üniversitesi, İstanbul (Danışman Yazar)