

İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEMİNLERİN YAŞLANMASININ
DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan BiLAL

0909071003

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Geoteknik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Akın ÖNALP

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın konusu, yaşlanmanın etkisinin/etkilerinin dinamik deneyler üzerindeki etkisidir.

Karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim emeğinden, ilgisinden, tezin deney ve yazım sürecindeki desteğinden, hiç çekinmeden paylaştığı geniş bilgisinden ötürü danışman hocam Prof. Dr. Akın Önalp'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince deneylerimi gerçekleştirmemde yardımcı olan İKÜ'den laboratuvar arkadaşlarım Suat Yakut ve Aykut Aydın'a, tez yazımı boyunca çoğu konuda tartışmalarıyla ve tezdeki kullanılan materyallerle ilgili olarak destekte bulunan İnş. Yük. Müh. İ. Burak Duran ve İnş. Müh. Emre Erbek'e teşekkür ederim.

Son olarak, eğitimim boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Haziran 2011

Ozan BİLAL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
2. YAŞLANMA	1
2.1. Yaşlanmanın Mekanik Süreçleri	2
2.2. Yaşlanmanın Kimyasal Süreçleri	5
2.3. Yaşlanmanın Etkileri	9
2.3.1. Yaşlanmanın Kayma Modülüne Etkisi	10
3. SIVILAŞMA	16
3.1. Yaşlanmanın Kumlarda Sıvılaşma Direncine Etkisi	17
4. ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞINI ETKİLEYEN FİZİKSEL ÖZELLİKLER	20
4.1. Boşluk Oranı	20
4.2. Plastisite İndisi	21
4.3. Sıvılık İndisi	23
4.4. Doygunluk Derecesi	23
4.5. Dane Boyutu	24
4.6. Aşırı Konsolidasyon Oranı	25
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	26

5.1.	Deney Numunelerinin Hazırlanması	26
5.1.1.	Deney Numuneleri İçin Silt Temini	26
5.1.2.	Numune Hazırlama Yöntemleri	30
6.	YÖNTEM.....	32
6.1.	Bulamaç Yöntemiyle Numune Hazırlanması.....	32
6.2.	Numunelerin Saklanması ve Deneye Hazırlanması	33
6.3.	Deney Aletinin Özellikleri.....	33
6.4.	Sonuçların Analizi	36
6.5.	Deney Sonuçları.....	38
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
8.	KAYNAKÇA	47
EK – A		52
EK – B		80
EK – C		82
ÖZGEÇMİŞ.....		83

KISALTMALAR

CTX	: Dinamik üç eksenli hücre kesme deneyi
CSR	: Çevrimsel gerilme oranı
DDSS	: Dinamik basit kesme aleti
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Rijit Duvarlı Hücre Deneylerinde N_G Değerleri (Baxter, 1999).....	11
Tablo 2.2 Değişik Zeminler için N_G Değerleri	12
Tablo 5.1 Adapazarı doğal siltinin özellikleri (Tübitak 106M042)	28
Tablo 6.1 Yıkama Silti Deney Sonuçları	40
Tablo 6.2 Doğal Adapazarı Silti Deney Sonuçları.....	40
Tablo 6.3 Doğal Adapazarı Silti + Ağırlıkça %10 Bentonit Numuneleri	41

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Geciktirilmiş sıkışmanın etkisi (Bjerrum, 1967)	3
Şekil 2.2 Üç-eksenli deneyler sonucu ince sıkı kumda gözlenen genişlemeler (dilatasyon) ...	4
Şekil 2.3 Genç ve Yaşlı %18 Bentonit Karışımları SEM Fotoğrafları	5
Şekil 2.4 Titreşimli plaka deneyinin sonuçları (Denisov ve Reltov, 1961)	7
Şekil 2.5 Yaşlanmanın nehir kumunun penetrasyon direnci üzerindeki etkisi (Joshi vd., 1995)	8
Şekil 2.6 Yaşlanmanın Ham Nehri Kumunda Yaşlanma-Şekil Değiştirme Özellikleri Üstündeki Etkisi (Daramola, 1980).....	9
Şekil 2.7 Kumun Kayma Modülünde Zamanla Artış (Afifi ve Woods, 1971)	10
Şekil 2.8 Killer İçin Kayma Modülü Artışı (Kokusho, 1987) ve Kum Numune Verileriyle Desteklenmiş (Jamiolkowski, 1996) Noktalamalar	12
Şekil 2.9 Kumda Yapay Önkonsolidasyon Basıncının Oluşması (Schmertmann, 1991)	13
Şekil 2.10 Yol Temel Gereci Üzerinde Yapılan Basit Kesme Deneylerinde Yaşlanmanın Etkisi (a) Beklemeden Sonra Kayma Modülünde Artışlar (b) Birim Hacim Ağırlıkta Değişim (Pender vd., 1992)	14
Şekil 2.11 Kaolinde Kayma Modülünde Değişim (a) Konsolidasyon verileri (b) Kilin G_{max} 'inin zamanla artışı (Afifi ve Richart, 1973).....	15
Şekil 3.1 Doygun Kumda Dane Diziliminin Dinamik Yüklemeden Etkilenmesi (Japonya Kıyısı ve Liman Araştırma Enstitüsü (PHRI), 1997).....	17
Şekil 3.2 Yaşlanmanın Etkisiyle Sıvılaşma Direncinin Artışı (Seed, 1979).....	18
Şekil 3.3 Örselenmiş ve Örselenmemiş Numunelerin Çevrimsel Dayanımının Karşılaştırması (Ishihara, 1985)	18
Şekil 3.4 Tapo Vadisi Kumlarının Örselenmemiş ve Yeniden Oluşturulmuş Numunelerinde Çevrimsel Yükleme ile Oluşan Boşluk Suyu Basınçlarının Karşılaştırması (Arango ve Migue, 1996)	19
Şekil 4.1 Boşluk Oranının Kayma Modülüne Etkisi (Wichtmann vd., 2004)	21
Şekil 4.2 Çevrimsel Gerilme Oranına Plastisitenin Etkisi (Özay ve Erken, 2003)	22
Şekil 4.3 Plastisite indisinin dinamik dirence etkisi (Prakash ve Guo, 1998).....	22
Şekil 4.4 Sıvılaşmanın olduğu çevrim sayısına doygunluk derecesinin etkisi (Martin vd., 1978)	23
Şekil 4.5 Sıvılaşabilir Zeminlerin Dane Dağılımı	24
Şekil 4.6 Düşük plastisiteli ince dane içeriğinin, kumların sıvılaşması üzerindeki etkisi	24
Şekil 4.7 CSR- N_{cyc} arasındaki ilişki (Puri, 1984)	25
Şekil 4.8 OCR'nin sıvılaşmaya etkisi (Ishihara, 1977).....	25
Şekil 5.1 Adapazarı Siltinin Doğal Durumdaki ve İşlem Sonrasındaki Dane Dağılım Eğrileri .	28
Şekil 5.2 Bentonitin dane dağılım eğrisi.....	29
Şekil 5.3 Ağırlıkça %10 Bentonit Eklendi Doğal Adapazarı Siltinin dane dağılım eğrisi ..	30
Şekil 5.4 Bentonitin Akma Doğrusu	30
Şekil 6.1 Bulamaç Yöntemiyle Hazırlanan Numunelerin Saydam Plastik Hücrede Konsolide Edilmesi	32
Şekil 6.2 Kayma Deformasyonuna Dayalı Problem Çözümü İçin Kullanılacak Deney Sistemi	34

Şekil 6.3 Basit kesme aparatları (a) NGI tipi (b) Cambridge tipi	35
Şekil 6.4 Solda SGI (Kjellmann, 1951) ve Sağda NGI (Bjerrum, 1966) tipi kesme sistemleri	35
Şekil 6.5 DSS aleti ve deney numunesi	36
Şekil 6.6 Omurga eğrisi, G_{max} ve G_{sec} (Kramer, 1995)	37
Şekil 6.7 Kayma modülünün(G_{sec}) hesaplanması	37
Şekil 6.8 Tipik DSS Grafikleri - 7 günlük Doğal Adapazarı Silti (Sıvılaşma oluşmuş).....	38
Şekil 6.9 Yaşlanmanın mekanik ve dinamik özelliklere etkisi (Doğal Adapazarı Silti).....	42
Şekil 6.10 Doğal Siltin Kayma modülünde değişim.....	43
Şekil 6.11 Yıkama Silti Kayma Modülünde değişim	43

SEMBOL LİSTESİ

G	: Kayma modülü
$G_{\max}$	: Maksimum kayma modülü
$G_{\sec}$	: Kiriş kayma modülü
τ	: Kayma gerilmesi
γ	: Kayma birim şekil değiştirmesi
η	: Sönüm oranı
r_u	: Boşluk suyu basıncı oranı
σ_0'	: Efektif gerilme
σ_3	: Çevre basıncı
σ_c	: Ön konsolidasyon basıncı
ϵ_z	: Eksenel birim kısalma
ν	: Poisson oranı
K_0	: Sükunette yanal toprak basıncı katsayısı
N	: Çevrim sayısı
$N_{ru=1}$	: Boşluk suyu basıncı oranının 1 olduğu çevrim sayısı
$N_{\% \pm 5 \gamma}$	: Toplam kayma birim şekil değiştirmenin %10 olduğu çevrim sayısı
f	: Frekans
w_n	: Doğal su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
I_P	: Plastisite indisi
I_L	: Sıvılık indisi
D_{50}	: Ortalama dane çapı
e	: Boşluk oranı
G_s	: Özgül ağırlık
$\%FC$	: Yüzde ince içeriği
$\%C$	: Yüzde kil içeriği
C_c	: Sıkışma indisi

ÖZET

Bu tez Sakarya ve İstanbul Kültür Üniversitelerinde uzun yıllardır ince daneli zeminlerin özelliklerine yönelik yürütülmekte olan araştırmalar kapsamında yapılan bir çalışmanın ürünüdür. Özelde, siltlerin dinamik özelliklerinin yaşlanma ile değişebilirliği değerlendirilmiştir.

Dokunan metal ve kaya yüzeylerinde soğuk kaynak, kum/silt ve killerde bekleme sonucu beliren yapışma olarak nitelendirilen fiziksel olayın laboratuvar koşullarında bekletilen numunelerde belirip belirmediğini incelemek için sürdürülmüştür. Zira, araziden özenle alınmış numuneler laboratuvarında deney için bekletildiğinde ‘bayatlar’ ise araştırmacıyı yanıltabilecek sonuçlara varılması olasılığı doğabilecektir.

Yapılan literatür taraması kumlarda yaşlanmanın, statik ve dinamik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğine yönelik bilgiler sağlamıştır. Ancak, benzer geniş bilgiler killi zeminler için elde edilememiştir. Bu noktadan çıkarak tez kapsamında, bekletilmiş ince daneli numunelerde özellikle dinamik özelliklerin yaşlanma/bayatlama ile ne denli değiştiği değerlendirilmiştir. Ağırlıklı olarak silt içeren numunelere bentonit katılarak karışımlar hazırlanmış (yaklaşık %15 kil içeriği), bunların dinamik davranışı değerlendirilmiştir. Dinamik davranışı en iyi yansıtan özellik kayma modülü olduğundan bu parametre esas ölçüt olarak alınmıştır. Dinamik kayma modülü ölçümleri, 100 kPa’a konsolide edilmiş bulamaçların dinamik basit kesme aletinde $f=0.5$ Hz, $CSR=0.35$ seçilmesiyle yapılmıştır.

Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, Adapazarı siltinin doğal durumda ve içeriğindeki kum-kil malzemesi elendikten sonra geriye kalan yıkama siltinin bentonitle karıştırıldığında, yaşlanmadan ötürü dinamik deneyler açısından dramatik değişiklikler göstermediği, numunelerin laboratuvar koşullarında bekletilmesinden ötürü dinamik deneylerin sonuçlarını çok etkilemediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, numunelerin doğal su muhtevasını koruması da önemli bir koşul olarak, yapılan deneylerin sonuçlarından görülmüştür. Öte yandan, yaşlanmayla birlikte deney setlerinde pH’da düşüş, σ_c değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yaşlanma, Sıvılaşma, DDSS, Silt, Adapazarı Silti, pH, Kayma modülü.

ABSTRACT

Researcher often doubt as to whether their undisturbed samples kept in the laboratory for extended periods change their properties by ageing. This research program has attempted to determine whether the mechanical properties of the liquefiable clayey silts of Adapazari are altered while waiting to be tested in the laboratory. A literature survey conducted has indicated that sands age within hours with the result that their shearing resistance undergoes notable increases. Similar findings were not so abundant for clays.

Samples of infamous Adapazari silt mixed with bentonite and kept in the laboratory for periods up to 200 days were tested in the dynamic simple shear apparatus and in the oedometer to check whether ageing influenced their behaviour.

Ageing was effected by reconstituting samples with varying percentages of bentonite up to 15%. The samples were hermetically sealed, kept in water to be followed by brief cooling and then kept in room temperature and the refrigerator for weekly cycles before testing them with intervals of one week to 400 days.

The compressibility appeared to be unchanged in the aging process whereas the preconsolidation pressure increased markedly during consolidation testing. This finding suggested that some bonding had taken place in the ageing process under static conditions. The increases measured in the pH values by time was interpreted as a confirmation of the process.

When however the shear moduli were measured ($\sigma_n=100$ kPa, $f=0.5$ Hz, $CSR=0.35$), no notable increases were observed in any of the mixes suggesting that dynamic loading obscured the changes due to the thixotropic property of bentonite used in the mixtures. Hardened bentonite subjected to dynamic loads possibly reverted to semi liquid consistency.

A general conclusion was thus reached suggesting that any improvement in the mechanical property was invalidated by imposing dynamic stresses in the soil matrix.

Keywords : Ageing, Liquefaction, Adapazari, Dynamic Simple Shear, Silt, pH, Shear Modulus

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı; doğal ortamından alınmış ve/veya belirli yöntemlerle kıl-kum içeriğinden arındırılmış, bentonit eklenmiş Adapazarı siltlerinin laboratuvar koşullarında hazırlanarak, yaşlanma etkisinin dinamik deneylerde ne kadar etkin olduğunu, ayrıca araziden alınmış numunelerin laboratuvarda kendi ağırlıkları altında bekletilmesinin dinamik deneyler açısından ne kadar etkili olduğunu gözlemlemektir.

2. YAŞLANMA

“Bu dünyada her şeyin en azından tek bir ortak noktası vardır – her şey zamanla değişir. Bütün zeminler yaşlanır ve değişir.” diyerek başlıyor Schmertmann, 1991 yılında yazdığı makalesine. Yaşlanma etkisi, 1960’lardan (Mitchell, 1960) günümüze kadar geniş olarak bilinen bir kavram ve birçok araştırmacı tarafından halen üstünde çalışılan bir konudur Yaşlanma (*ageing*) kavramı önceleri; geciktirilmiş sıkışma (*delayed compression*) (Bjerrum, 1973), yaşlanma katılaşması (*age hardening*) (Zeevaert, 1983), ve yapılaşma(*structuration*) (Leroueil vd., 1996) gibi adlandırmalara da sahiptir.

Yaşlanma etkilerinin, tarihsel açıdan bakılırsa, ilk olarak incelenmeleri; Youd ve Hoose (1977) ve Youd ve Perkins (1978) tarafından sıvılaşma direncinin, kumların jeolojik yaşlarının artmasıyla birlikte arttığı konusundaki gözlemleriyle başlamıştır. Onların bulgularına bağlı kalarak; son birkaç yüzyıl içinde oluşmuş çökellerin, Holosen dönemine göre sıvılaşmaya daha yatkın olduğu gözlemlenmiş, Pleyistosen çökellerinin daha dirençli ve Pleyistosen-öncesi çökellerinin daha da dirençli hatta sıvılaşmaya karşı bağışıklığı olduğu gözlemlenmiştir.

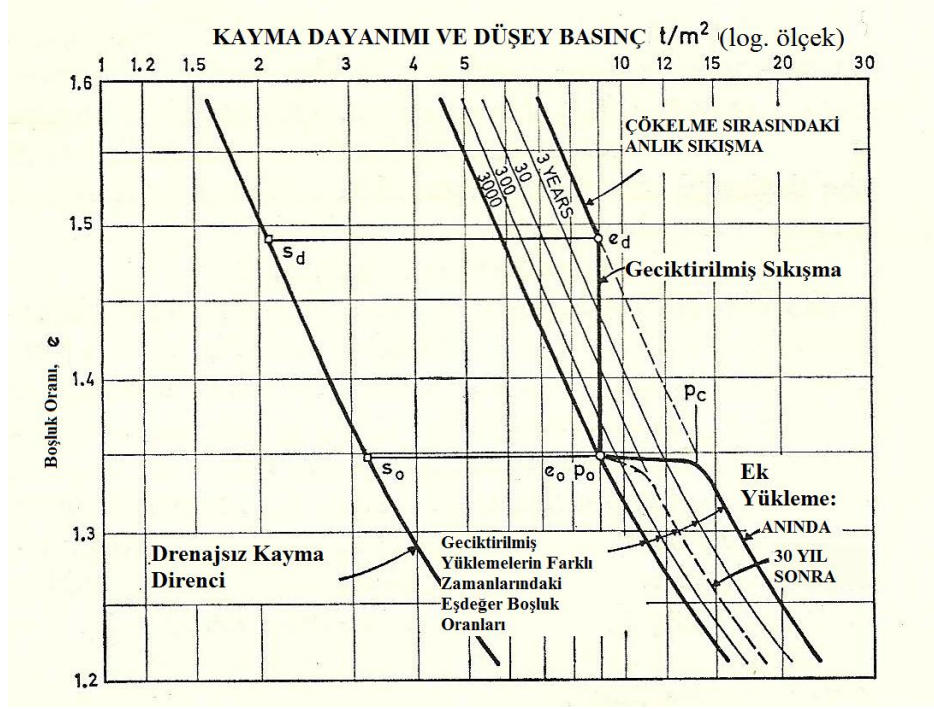
Mitchell ve Solymar (1984) ve Mitchell (1986) laboratuvar ve arazide yapılan deneylerin karşılaştırılması sonucunda penetrasyon direncinin, genç kum birikimlerinde zamanla arttığını gözlemlemiştir.

Yaşlanma üzerine yapılan birçok arazi deneyi ve laboratuvar çalışmasına rağmen yine de bu olayı etkileyen mekanizma(lar) hakkında belirsizlikler bulunmaktadır. Yaşlanmaya sebep olan bu mekanizmaları anlamamanın; dayanımın, şekil değiştirmenin ve onların zamanla değişiminin üzerinde önemli etkisinin/etkilerinin olduğu; tasarım, zemin güçlendirmenin tesbiti ve çakma kazık kapasitesinin belirlenmesi gibi konularda tesiri vardır. Yaşlanmanın nedenleri Mitchell ve Soga tarafından (2005); mekanik, kimyasal ve biyolojik olarak tanımlanmıştır. Biyolojik süreçler üzerinde az araştırma yapıldığı için bu tez kapsamında sadece mekanik ve kimyasal süreçler ele alınacaktır. (Mitchell ve Soga, 2005).

2.1. Yaşlanmanın Mekanik Süreçleri

Zeminlerin yaşlanmasının mekanik etkiler (yük, gerilme) altında gerçekleştiğinin varsayıldığı süreçler, yaşlanmanın mekanik süreçleri altında incelenmektedir.

Bjerrum 1967 yılında yapılan 7. Rankine konferasında geciktirilmiş sıkışmadan kaynaklanan yaşlanmayı göstermiştir (Şekil 2.1). Buna göre killer belirli yükler altında bekletildiğinde yaşlanmış killerde gözlemlenen davranışları göstermiştir. Eğer 3 yıllık bir numune yük altında bekletilirse, 3000 yıllık numune gibi davranış göstereceği bulgulanmıştır.



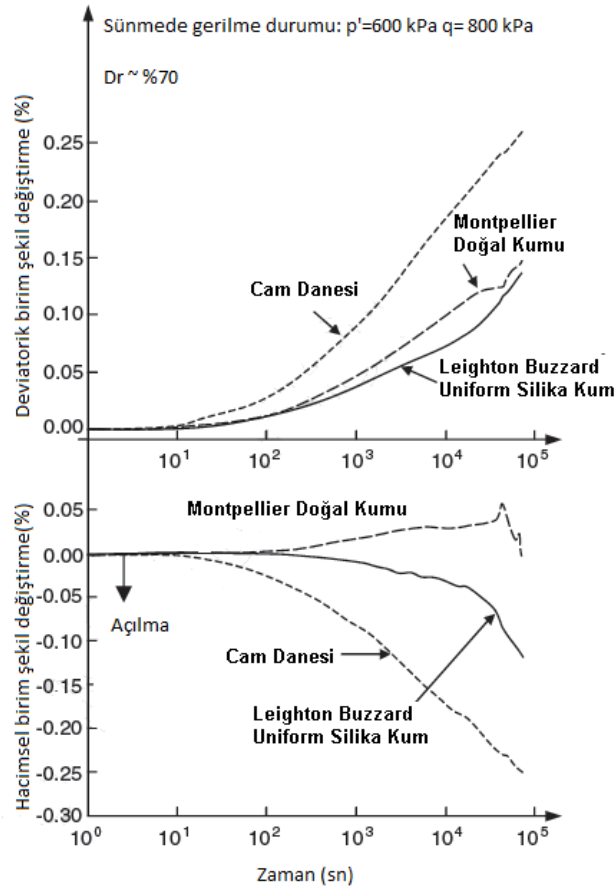
Şekil 2.1 Geciktirilmiş sıkışmanın etkisi (Bjerrum, 1967)

İkincil konsolidasyon (sünme), Mesri vd. (1990) ve Schmertmann (1991) tarafından, mühendislik zaman ölçeği içinde, yaşlanmanın ana faktörü varsayılmıştır. Dayanım ve rijitlikteki artışın, yalnızca ikincil sıkışmalar sonucu artan yoğunluktan değil, danelerin yeniden dizilmesi sonucu artan makrokilitlenmeden ve yüzeysel pürüzlülüğün getirdiği mikrokilitlenmeden kaynaklandığı öne sürülmüştür (Dexter ve diğ., 1988). Bu durum, bir bağlayıcı bulunmadığı halde çekme kuvvetlerine direnç gösteren kenetlenmiş kumların bulunmasıyla da desteklenmiştir (Barton, 1993; Richards ve Barton, 1999).

İzotrop koşullarda yüklenen cam boncukların rijitliğinde bir artış gözlemlenmezken (Losert vd., 2000), doğal kumun dayanım ve rijitliğinde artış gözlemlenmiştir (Daramola, 1980; Human, 1992). Bu artışlar izotrop koşullarda bile gözlenmiştir ve bunun nedeninin köşeli (pürüzlü, *angular*) danelerin, birbirlerine anizotrop bir dokuda kilitlenmiş olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Daha köşeli danelerin, malzemeleri sünmeye karşı daha hassas hale getirdiği gözlemlenmiştir (Mejia vd., 1988; Human, 1992; Leung vd., 1996). Kuwano (1999) tarafından yapılan izotrop basınçlı deneylerde, köşeli danelerin genellikle anizotrop dokuda olma özelliği gösterme eğiliminden dolayı radyal şekil değiştirmelerinin, eksenel şekil değiştirmelerine göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Köşeli daneler, sünmenin daha uzun sürmesine ve sağlam bağlantılarından kaynaklanan kilitlenmeden dolayı

önemli yaşlanma etkilerine yol açabilmektedir. Küresel daneler silindirik danelerden daha kolay yer değiştirebildiği için (Oda, 1972), küresel daneler sabit duruma gelene kadar başlangıçta çok hızlı süner. Bundan dolayı küresel daneler üzerindeki yaşlanma etkisi, yeni bir gerilme durumunda hızla kaybolma eğilimindedir.

Arazi verilerinden çıkarılan sonuca göre, orta sıkı kumlarda yapılan çakma kazıkların sıkı kumlarda yapılanlara göre daha iyi yerleştiği görülmüştür (York vd., 1994). Şekil 2.2’de görüldüğü üzere sıkı kumlarda sünme sırasında uygulanan gerilme seviyesine bağlı olarak, zamanla dilatasyon(açılmalar) gözlemlenmiştir (Bowman ve Soga, 2003).



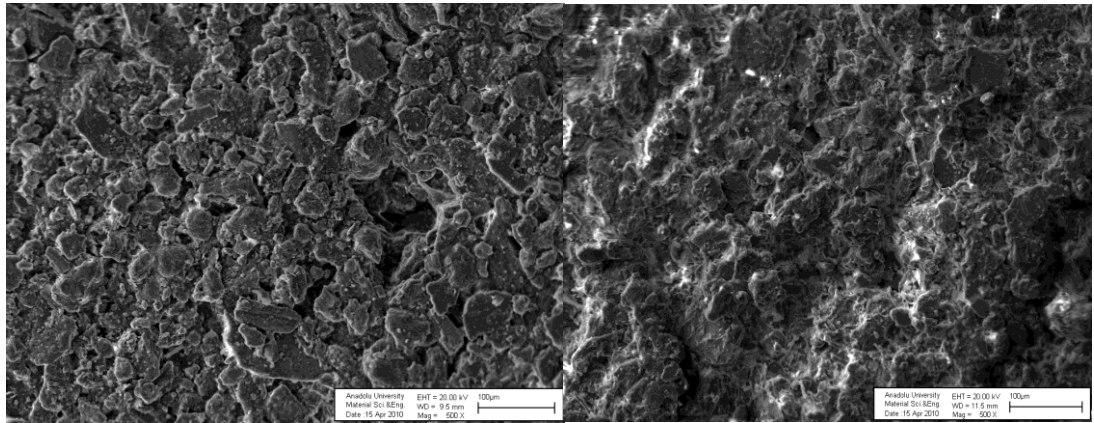
Şekil 2.2 Üç-eksenli deneyler sonucu ince sıkı kumda gözlenen genişlemeler (dilatasyon)
(Bowman ve Soga, 2003)

Başlangıçta numunede hacim azalması gözlenirken, bir noktadan sonra sünme vektörünün yönü değişmiş ve açılmalar başlamıştır. Benzer gözlemler Murayama vd. (1994), Lade ve Lui (1998) tarafından da yapılmıştır. Bu gözlemlerin ışığında yüksek bağıl yoğunluktaki kumların, parçacıkların birbirleri arasındaki kenetlenme arttıkça,

daha düzenli bir hale gelecekleri öne sürülmüştür (Bowman, 2002). Arazide yapılan dinamik kompaksiyon ve uygulanan yüksek kayma gerilmelerinin sonucunda, deneyin yapıldığı noktaya yakın bölgelerde aşırı oturmaların gözlemlendiği ve buna bağlı olarak kumların rijitliğinde ve dayanımında artış olması, laboratuvarında yapılan deneylerdeki başlangıç sıkışmasından sonra başlayan açılmalarla uyumluluk göstermiştir (Dowding ve Hryciw, 1986; Thomann ve Hryciw, 1992; Charlie vd., 1992).

Mekanik yaşlanmadan kaynaklanan dayanımdaki ve rijitlikteki artışın baskın olarak, önceden zemine uygulanan yük ile aynı yönde olduğunda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Howie vd., 2002). Yükler; kuma, kayma gerilmesine dik olarak uygulandığında ise sünme sırasındaki dayanımda ve rijitlikte bir artış gözlemlenmemiştir (Losert vd. 2000).

Yaşlanmanın dokuya olan etkisini araştırmak amacı ile bentonit eklenmiş silt numunelerin taramalı elektron mikroskobu(SEM) ile fotoğrafları alınmıştır. Yaklaşık 10 ay bekletilmiş numunelerde silt danelerinin görünümünde belirgin bir değişiklik gözlemlenmekle birlikte (Duran, 2010) bunun bir tür bağlanma ve/veya çökelmeyi gösterdiği konusunda görüş belirtmek için ileri çalışmalar gerekmektedir.



a) %18 Genç Bentonit

b) %18 Yaşlı Bentonit

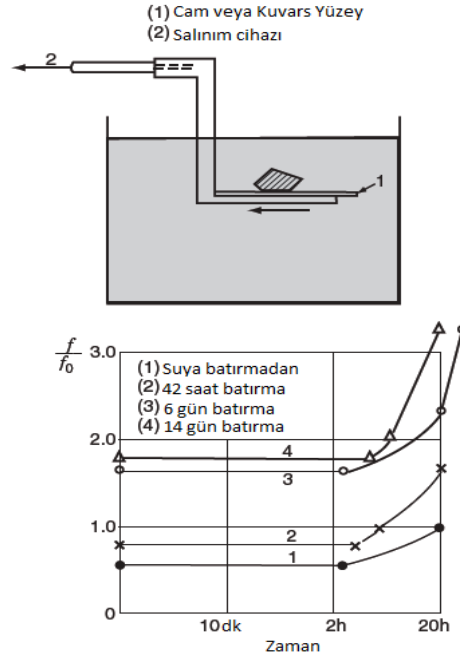
Şekil 2.3 Genç ve Yaşlı %18 Bentonit Karışımları SEM Fotoğrafları

2.2. Yaşlanmanın Kimyasal Süreçleri

Kimyasal süreçler, yaşlanmanın olası nedenlerinden biri olarak görülmüştür. Tarihsel olarak kumlardaki yaşlanmanın sebebi olarak, Schmertmann (1991) tarafından öne

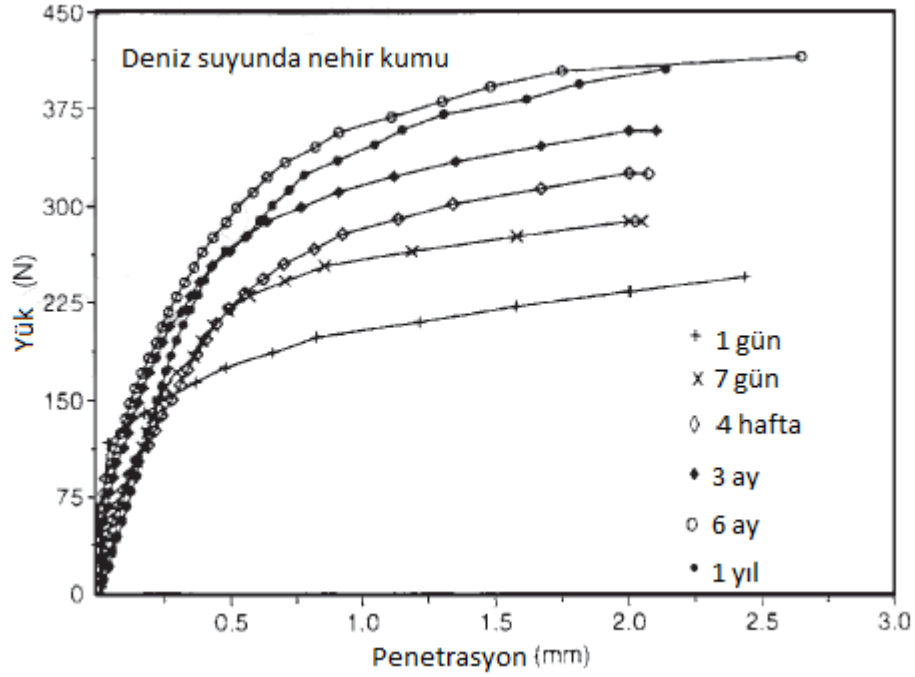
sürülen, bilinen en yaygın teori “daneler arası bağ kurma” olarak kabul görmüştür. Terzaghi, arazide oluşan yaşlanma etkisinden kaynaklanan önkonsolidasyon basıncıyla bağlantılı olarak “bağ kuvvetleri”ni göstermiştir (Schmertmann, 1991). Bu mekanizma, zeminin kayma direnci açısını etkilemeden, kohezyonunu artıran bir çeşit çimentolanma olarak değerlendirilmiştir. Schmertmann (1991) ayrıca peltecilik’in (*thixotropy*) zeminlerdeki etkisinden de bahsetmiştir. Peltecilik ASTM D653’e göre şöyle tanımlanmıştır: “*Malzemenin göreceli olarak kısa süre beklemesiyle rijitlik kazanmasını sağlayan özelliktir, ancak herhangi bir dinamik etki altında malzeme yeniden çok yumuşak bir kıvama ya da yüksek viskoziteli akışkana dönüşebilir. Bu süreçler tamamen tersinirdir.*” Bu mekanizmanın daha çok, yüksek boşluk oranlarına sahip killerde veya çok düşük efektif gerilmeler altındaki killerde gerçekleştiği düşünülmektedir ve tiksotropik (peltecil) yaşlanmanın geçerli olduğu asgari gerilme ise yaklaşık olarak 20 kPa olarak belirlenmiştir. Tiksotropik yaşlanmayı sağlayan enerjinin içsel özellik olduğu yani killer arasındaki kolloidal kuvvetlerden kaynaklanan bir çekimden oluştuğu varsayılmıştır. Tiksotropi ile mekanik-kimyasal yaşlanma süreçleri, aynı niteliksel yaşlanma etkileri olsalar da, farklı nedenlerden dolayı ortaya çıkarlar ve tiksotropik etkiler, mekanik-kimyasal yaşlanmaya göre çok daha zayıf bir şekilde etkilerler (Schmertmann, 1991).

Öte yandan, Denisov ve Reltov (1961) kuvars danelerinin zamanla cam yüzeyine yapıştığını göstermişlerdir. Bunu göstermek için camın üzerine koydukları kum danelerini hareket ettirmek için gerekli kuvvet ölçülmüştür (Şekil 2.4). Kuru daneler cam yüzey üzerinde çeşitli zaman aralıklarında bekletilmiş ve cam yüzey titreşim başlamadan önce yine değişken zamanlarda suya batırılmıştır. Kum danelerinin hareket etmesi için gerekli kuvvetin, bekletilen 15 gün boyunca sürekli arttığı gözlemlenmiştir. Çimentolayan etmenin, amorf yapıda olan ve parçacık dokunma noktalarında çökel biçiminde birikebilen silika-asit jeli olduğu düşünülmüştür. Artan dayanımın sebebinin, silis çözeltisinden ve sıkışmanın basıncından dolayı oluşan aşırı kristallenmeden kaynaklandığı bulunmuştur (Mitchell ve Solymar, 1984).



Şekil 2.4 Titreşimli plaka deneyinin sonuçları (Denisov ve Reltov, 1961)
(f/f_0 kum ile cam plaka arasındaki bağ kuvvetinin oranı.)

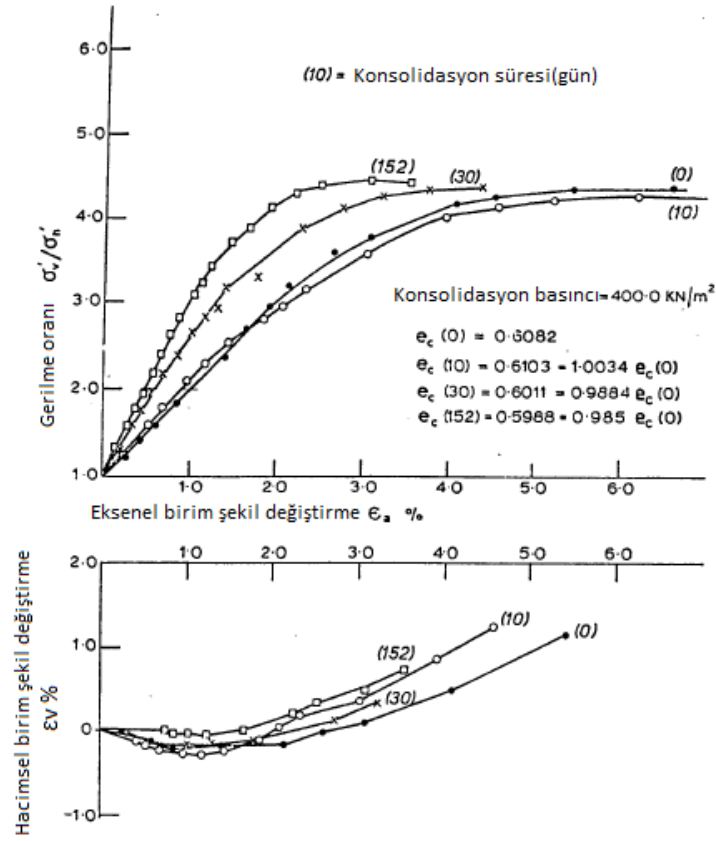
Kimyasal mekanizmanın yaşlanma üzerinde önemli etkisi olduğunu Joshi vd. (1995) göstermiştir. Yaptığı çalışma, farklı kumlarda (nehir ve deniz) ve farklı su bileşimlerinde (deniz suyu, havası alınmış su ve musluk suyu) zamanın penetrasyon direnci etkisi üzerindeki etkisini bulmak olmuştur. Penetrasyon direncini ölçmek için; 360mm çapındaki PVC (Polivinyl Chloride) aparatlarının içine numuneler hazırlanmıştır. Ayrı ayrı hazırlanan bu numunelerin üstlerine batırılan, merkezden eş-uzaklıktaki 4 adet penetrasyon iğne elemanı kullanılmıştır. 100 kPa, 7.8 N ağırlık eşdeğerine yükledikten sonra, 2 yıla kadar bekleyen numunelerin penetrasyon dirençleri ölçüldüğünde; bütün durumlarda dayanım ve rijitlikte artış gözlemlenmiştir (Şekil 2.5). Buradan, yaşlanma etkisinin batık durumdaki kumlarda, kuru kumlara oranla daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Elektron mikroskobu görüntülerinde, damıtılmış suda ve deniz suyunda bekletilen kum danelerinin arasında ve üstünde çökellerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Arıtılmış suda bekletilen nehir kumundaki çökellerin kalsiyum ve/veya silikadan oluştuğu; deniz suyundaki nehir kumundaki çökellerin ise sodyum-klorürden oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.5 Yaşlanmanın nehir kumunun penetrasyon direnci üzerindeki etkisi (Joshi vd., 1995)

Bunlara karşın, en azından kısa sürelerde, yaşlanmanın sebebinin çimentolanmadan kaynaklanmasının düşük olasılık taşıdığı durumlar da vardır. Örneğin; kuru kumlarda, dayanım ve rijitliğin zamanla artış gösterdiği pek çok durum bulunabilir (Human, 1992; Joshi vd., 1995; Losert vd., 2000). Silis ve diğer çimentolanma etkilerini barındıran solüsyon ve çökeltme reaksiyonlarını tetiklemek nem gerektirdiği için, kuru kumlarda çimentolanma bu yüzden pek olası değildir.

Mesri vd. (1990), yaşlanmada kimyasal etkilerin de sorumlu olduğu varsayımına karşı Daramola (1980)'nin üç-eksenli deney verilerini kullanmıştır. Şekil 2.6 yaşlanmanın rijitlik ve kayma direnci üzerindeki etkisini göstermektedir. Bunu kanıtlamak için aynı bağıl birim hacim ağırlık ve çevre basıncında ancak konsolidasyon evresinde bekletilme süreleri farklı (0, 10, 30 ve 152 gün) olan dört adet konsolidasyonlu-drenajlı deney yapılmıştır. Sonuçlar, konsolidasyon süresi arttıkça rijitliğin arttığı ve yenilmede birim şekil değiştirmenin düştüğünü göstermiştir. Kayma modülünde artış gözlenmesine karşın, yenilmede birim şekil değiştirme yaklaşık olarak %3'te kalmıştır. Mesri vd. (1990), bu tarz yüksek birim şekil değiştirmelerin çimentolanmayı engelleyeceğini öne sürerek karşı çıkmıştır ve rijitlikteki artıştan bir başka mekanizmanın sorumlu olabileceğini öne sürmüştür.



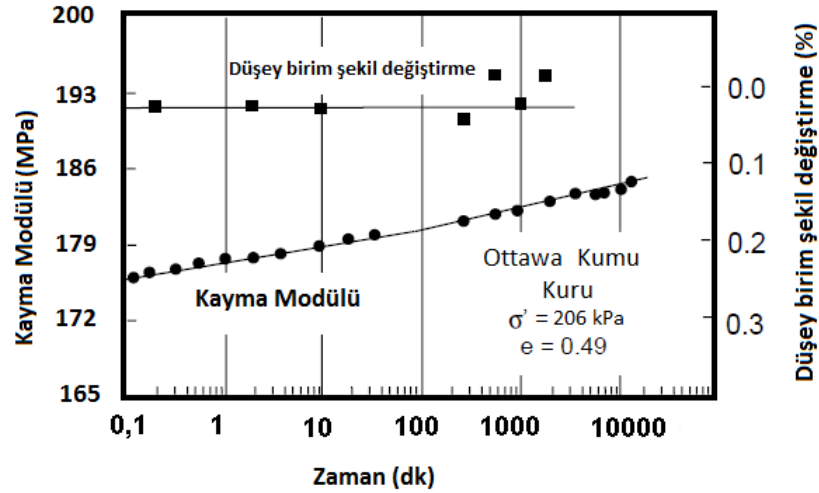
Şekil 2.6 Yaşlanmanın Ham Nehri Kumu yaşlanma-şekil değiştirme özellikleri üstündeki etkisi (Daramola, 1980)

2.3. Yaşlanmanın Etkileri

Birçok araştırmacı laboratuvar ve arazide, zeminlerin davranışında ve özelliklerinde zamanla bir değişimin olduğunu gözlemlemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yaşlanma ile birlikte; kuvars daneleri ve kuvars camı arasında adezyon gelişmesi (Denisov ve Reltov 1961), sıvılaşma direncinde artış (Mori, 1976; Seed, 1979; Youd ve Hoose, 1977; Youd ve Perkins, 1978; Ishihara, 1985), üç eksenli deneylerle ölçülen rijitlikteki artış (Daramola, 1980; Schmertmann, 1991), ısı iletkenliğinde artış (Brandon, 1985), kayma modülünde artış (Afifi ve Woods, 1971; Anderson ve Stokoe, 1978) gözlemlenmiştir. Bu tez kapsamında sadece yaşlanmanın kayma modülüne ve sıvılaşma direncine olan etkileri incelenecektir.

2.3.1. Yaşlanmanın Kayma Modülüne Etkisi

Düşük seviyeli birim şekil değiştirmelerdeki kayma modülü, G_0 , deprem mühendisliği ve zemin dinamiğindeki analizlerde önemli bir parametredir. G_0 değeri; boşluk oranı, çevre basıncı, zemin yapısı, doygunluk derecesi, sıcaklık, gerilme tarihçesi ve zaman gibi parametrelerin de dahil olduğu birçok parametreye bağlıdır. Afifi ve Woods (1971), G_0 değerini ölçmek için kum, silt ve kaolinit üzerinde rezonant kolon deneyleri gerçekleştirmiştir. Sabit bir çevre basıncının 70 gün boyunca uygulandığı deneyde, düşük birim şekil değiştirmelerdeki kayma modülünün, logaritmik zaman ölçeğinde doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ottawa kumu için bu artış, Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kumun kayma modülünde zamanla artış (Afifi ve Woods, 1971)

Kayma modülünde zamanla beliren artışın formülü Anderson ve Stokoe (1978) tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$G_0(t) = G_0(t_0) \left[1 + \left(N_G \log \left(\frac{t}{t_0} \right) \right) \right] \quad (2.1)$$

$G_0(t)$ = Herhangi bir zamandaki kayma modülü

$G_0(t_0)$ = Başlangıç anındaki(t_0) kayma modülü, genellikle 1000. dk’da alınır

N_G = Kayma modülünün, log-zaman ölçeğinde değişiminin eğimi.

Human'ın (1992), kuru kumlarda, piyezoseramik köprü elemanı (*bender element*) aleti kullanarak, üç eksenli olarak gerçekleştirdiği çalışmada; hücre basıncı 50 kPa'dan 300 kPa'a kadar artırılarak yapılan deneylerde N_G 'de bir artış gözlemlenmemiş ancak bağıl birim hacim ağırlık %78'den %48'e düşürüldüğünde N_G 'de artış belirmiştir. Anizotropluk açısından incelendiğinde σ'_3/σ'_1 farklı oranlarda (1, 0.7, 0.4) uygulanmıştır ve anizotropluk artırıldığında N_G değerinde bir azalma gözlemlenmiştir.

Baxter (1999) (Baxter ve Mitchell, 2004), 100 kPa altında 30-118 gün bekletilmiş numunelerde yaptığı deneylerde(Tablo 2.1) 22 adet sonuç elde etmiştir. Bulunan N_G değerlerinden 18'inde G_0 zamanla yükselmiş ve N_G değerleri % 0.1'den 4'e kadar değişkenlik göstermiştir. Diğer 4 deneyde ise, diğerleri tarafından bildirilen eğilimin tersine (Afifi ve Woods 1971; Anderson ve Stokoe 1978; Jamiolkowski, 1996) N_G değerinde %-0.1'den -0.7'ye azalım gözlemlenmiştir (Tablo 2.2).

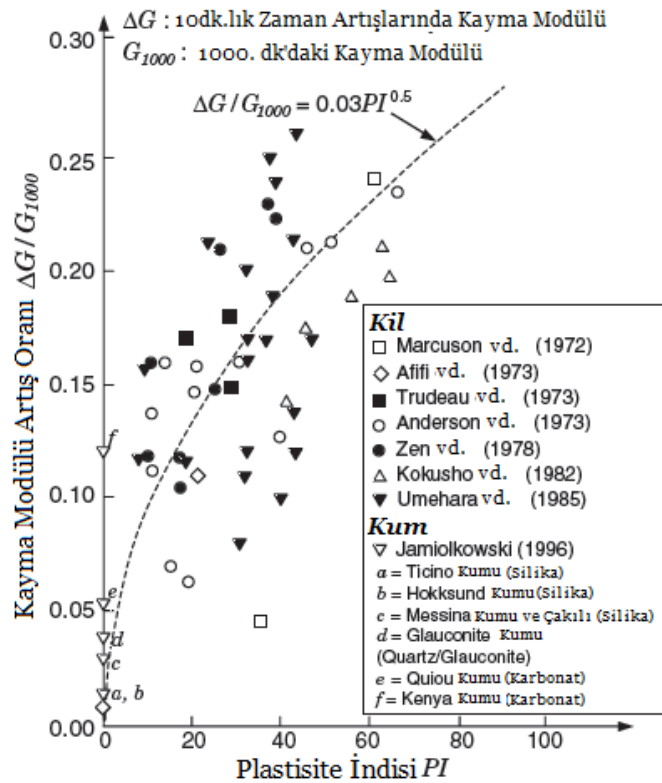
Tablo 2.1 Rijit Duvarlı Hücre Deneylerinde N_G Değerleri (Baxter, 1999)

EVANSTON KUMU					
Sıcaklık	Başlangıç Bağıl Yoğunluk (Dr_0)	N_G Değerleri (%)			
		Arı Su	Etilen Glikol	CO ₂ 'ye Doyurulmuş Su	Kuru
25°C	40%	1.7	0.5	1.8	---
25°C	80%	2.8	0.8	2.8	0.5
40°C	40%	1.6	0.1	---	---
40°C	80%	4.0	1.3	---	---
SIKI KUM					
Sıcaklık	Başlangıç Bağıl Yoğunluk (Dr_0)	N_G Değerleri (%)			
		Arı Su	Etilen Glikol	CO ₂ 'ye Doyurulmuş Su	Kuru
25°C	40%	-0.6	0.8	-0.7	---
25°C	80%	0.3	0.8	0.3	2.2
40°C	40%	-0.1	-0.7	---	---
40°C	80%	1.0	0.1	---	---

Tablo 2.2 Değişik Zeminler için N_G Değerleri
(Afifi ve Woods, 1971; Anderson ve Stokoe, 1978; Jamiolkowski, 1996)

Zemin Türü	N_G (%)	Notlar
Ticino kumu	1.2	Ağırlıklı Silika
Hokksund kumu	1.1	Ağırlıklı Silika
Messina kum ve çakılı	2.2-3.5	Ağırlıklı Silika
Messina kumlu çakılı	2.2-3.5	Ağırlıklı Silika
Glokonit Kumu	3.9	%50 Kuvars %50 Glokonit
Quiou kumu	5.3	Karbonatlı
Kenya kumu	12	Karbonatlı
Ottawa kumu	1-5	Silika

Kokusho (1987) tüm zeminlerde yaşlanma etkisinin, artan plastisite indisiyle arttığını göstermiştir (Şekil 2.8). Şekildeki veriler Jamiolkowski'nin (1996) değişik kumlar için bulduğu $\Delta G/G_{1000}$ değerleriyle desteklenmiştir. Buradan bulunan değerlere göre numunede ince malzeme oranı arttıkça yaşlanmanın etkisi, kayma modülü artışında baskın hale gelmektedir.



Şekil 2.8 Killeri için Kayma Modülü Artışı (Kokusho, 1987) ve Kum Numune Verileriyle Desteklenmiş (Jamiolkowski, 1996) Noktalamalar

Troncoso ve Garcés (2000), kayma dalgası yayılım yöntemiyle ölçülen kayma modüllerinin, kohezyonsuz zeminlerde (kumlar ve siltler), yaşlanmaya bağlı olarak arttığını gözlemlemiş ve aşağıdaki formülasyonları geliştirmişlerdir:

$$G_n = 117.24 * t^{0.67} \quad (8 \leq t \leq 41) \quad (2.2)$$

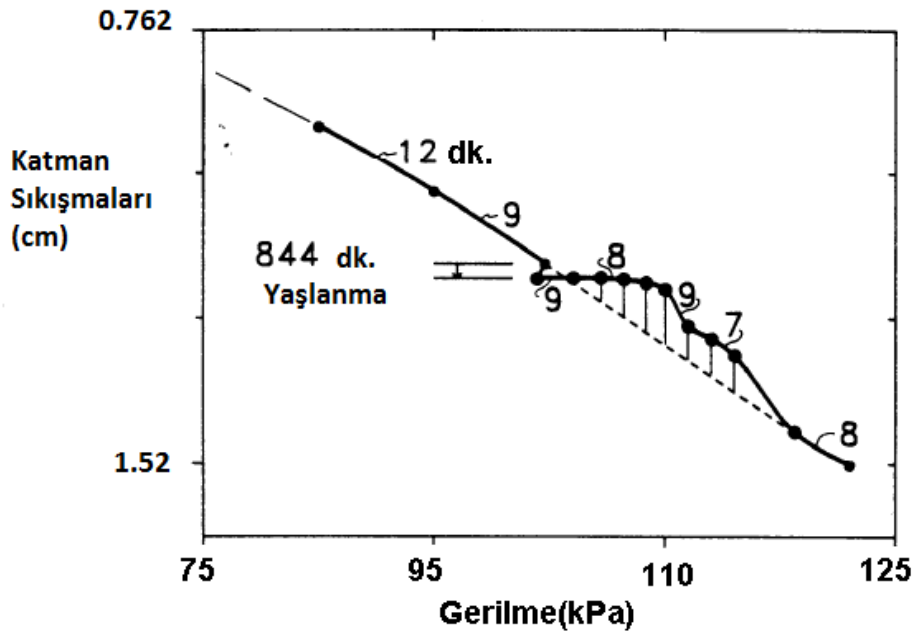
$$G_n = G / (\sigma_v^{0.5})$$

G = Kayma Modülü (kg/cm^2)

σ_v = Düşey efektif gerilme (kg/cm^2)

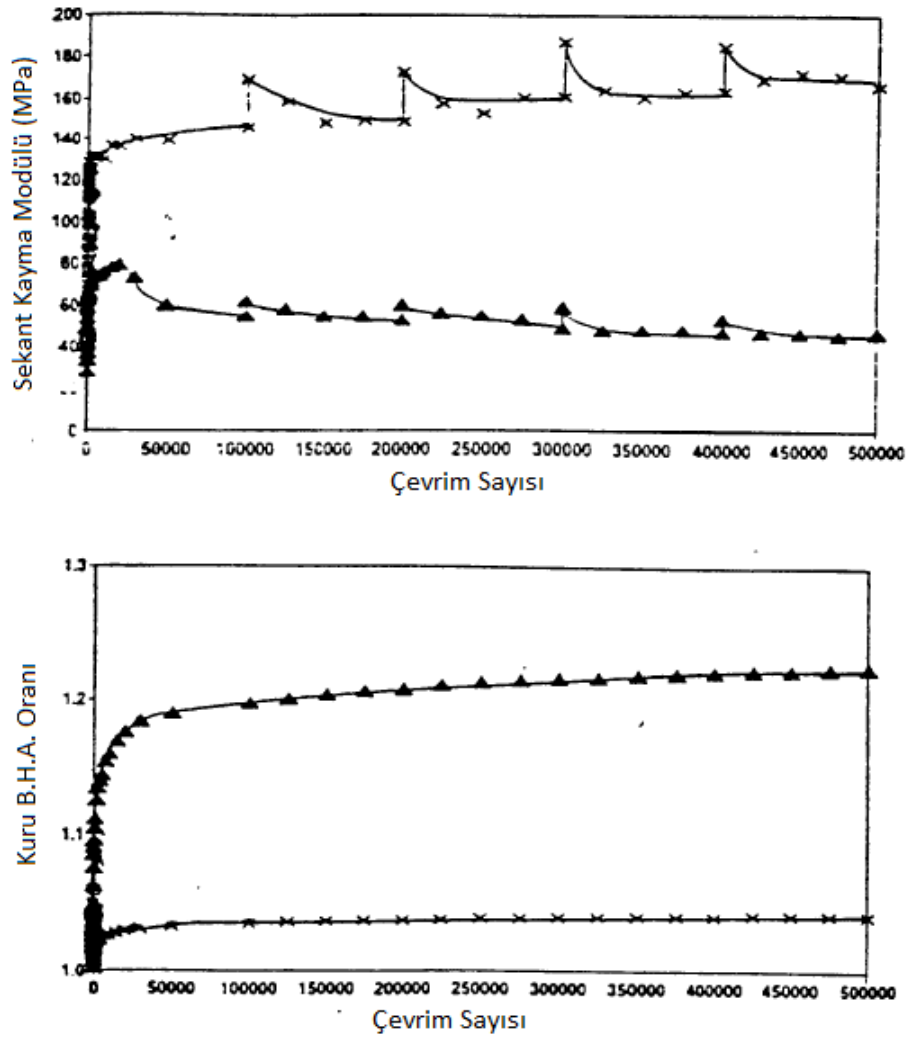
t = Zaman (yıl)

Schmertmann 1991 yılında, yaşlanmadan kaynaklanan yapay önkonsolidasyon basıncının kumlarda ilk defa ölçüldüğü yeni bir çalışmanın sonuçlarını sunmuştur. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi kumun rijitliği 844 dakika sonra önemli bir artış göstermiş ve bu etki kumun yapay önkonsolidasyon basıncı olan 110 kPa'a kadar devam etmiştir. Yapay önkonsolidasyon basıncı terimi ilk defa Leonards ve Ramiah (1960) tarafından, rijitlikteki düşüşe karşın önkonsolidasyon basıncındaki artışın ikincil sıkışmalar sırasında normal konsolide killerde ortaya çıkmasını göstermek için kullanılmıştır.



Şekil 2.9 Kumda Yapay Önkonsolidasyon Basıncının Oluşması (Schmertmann, 1991)

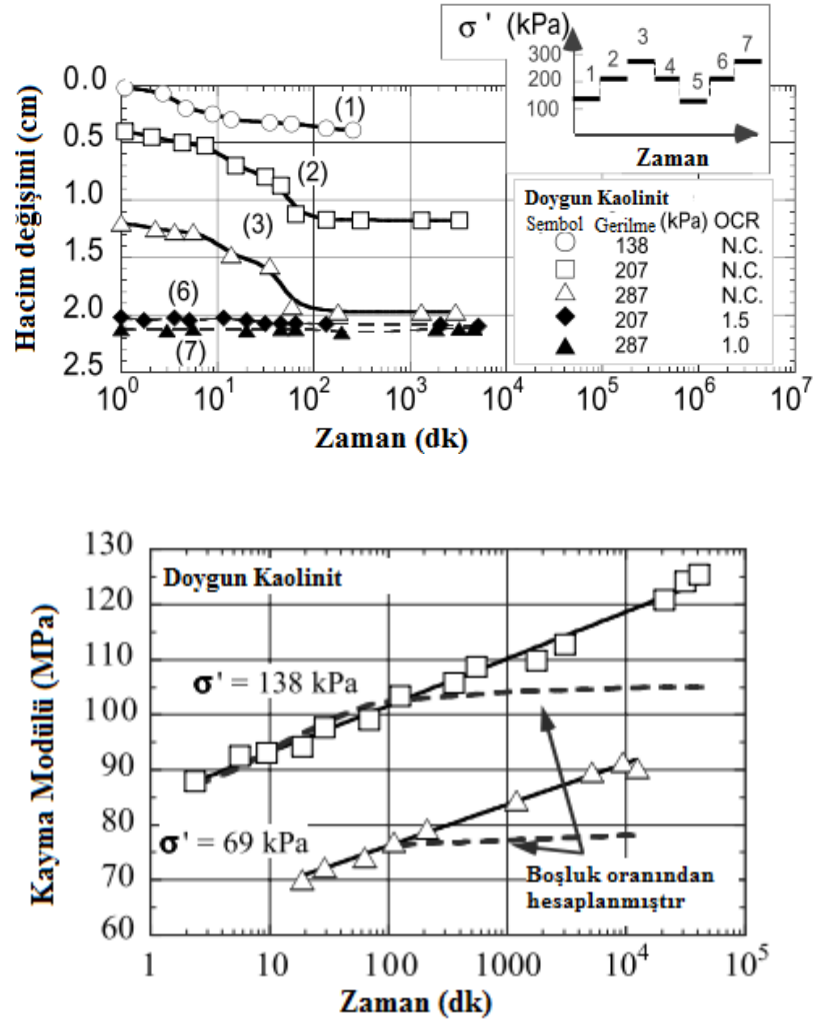
Pender vd. (1992) yol temeli malzemeleri üzerinde yaptığı tekrarlı basit kesme deneylerinde, birim hacim ağırlık ve rijitliğin değiştiğini göstermişlerdir. Şekil değiştirme kontrollü testlerde, 500,000 çevrime kadar çıkmıştır. Her gün 100,000 çevrim olacak şekilde 5 günde gerçekleştirilen deneylerde, bir sonraki aşamaya geçmeden önce, numuneler 1 gece bekletilmiş, yeni aşamaya geçmeden önce, her seferinde ölçülen sekant kayma modüllerinde %10-17 artışlar ölçülmüştür (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Yol Temel Gereci Üzerinde Yapılan Basit Kesme Deneylerinde Yaşlanmanın Etkisi (a) Beklemeden Sonra Kayma Modülünde Artışlar (b) Birim Hacim Ağırlıkta Değişim (Pender vd., 1992)

Afifi ve Richart (1973) rezonant kolon testleri yaparak yaşlanmanın killeri üzerindeki etkisini incelemek için kaolin üzerinde deneyler yapmıştır. Şekil 2.11’da görüldüğü gibi ardışık yükleme boşaltma döngüleri gerçekleştirilmiştir. Birincil konsolidasyona

100. dk'da ulaşılmıştır. Normal yüklenmiş killerin birincil konsolidasyonları da 100. dk'da bitmiş olmasına karşın, G_{max} 'ın artmaya devam ettiği gösterilmiştir.



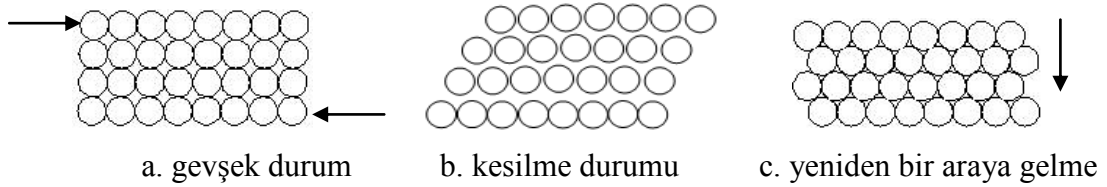
Şekil 2.11 Kaolinde Kayma Modülünde Değişim (a) Konsolidasyon verileri (b) Kilin G_{max} 'inin zamanla artışı (Afifi ve Richart, 1973)

3. SIVILAŞMA

Sıvılaşma; *herhangi bir zeminin, artan boşluk suyu basıncı dolayısıyla kayma direncinin düşmesiyle birlikte, zeminin katı durumdan sıvı duruma geçme süreci* olarak tanımlanmıştır (ASTM D653). Zemin tabakalarına deprem veya başka bir etkiden dolayı sismik kuvvet geldiğinde danelerin dengesi bozulmakta ve ince daneler, su ile birlikte yukarıya doğru hareket ederek zemin yüzeyine yönelmektedir. Sismik kuvvetler altında doymuş ve gevşek zemin daneleri daha sıkı duruma geçme eğilimine girerler. Görece drenajsız koşulda gerçekleşecek bu hacimsel azalmaya daneler arasındaki su engel olmaya çalışmakta, suyun sıkışabilirliği zemine oranla düşük, hatta sıfır olduğundan boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Boşluk suyu basıncının artmasıyla daneler birbirlerine değdiği noktalarda ayrılma eğilimine girmekte, bunlar su içinde askıda kaldığı veya yüzdüğünden dolayı sıvı gibi davranmaya başlamaktadır.

Çevrimsel yükler etkisinde davranışın incelenmesine ilk kez 1964 yılında Japonya-Niigata ve Kuzey Amerika-Alaska depremlerinde sıvılaşmaya bağlı olarak gözlenen zemin hareketleri ve yapısal hasar nedeni ile kumlu zeminlerin deprem sırasındaki davranışlarının incelenmesiyle başlanmıştır. Bu aşamada sıvılaşmanın sadece temiz (kil-silt içeriğinden arındırılmış) kumlara özgü olduğu düşünüldüğünden, konuyla ilgili olarak ilk çalışmalar laboratuvarda hazırlanmış kum numuneler üzerinde yapılmıştır (Peacock ve Seed, 1968; Finn vd., 1971; Ishihara ve Li, 1972; Mullilis vd., 1975). Ancak, daha sonraki yıllarda gerçekleşen depremlerde sıvılaşmanın ince daneli zeminlerde de oluşabileceği görülmüş ve birçok araştırmacı (Wang, 1979; Tohno ve Yasuda, 1981; Ishihara, 1984; Miura vd., 1995) tarafından bu yönde de çalışmalar yapılmış olup ince daneli zeminlerin kıvam limitleri, kil içeriği, doğal su muhtevası gibi fiziksel özelliklerinin sıvılaşma üzerinde etkisi incelenmiştir.

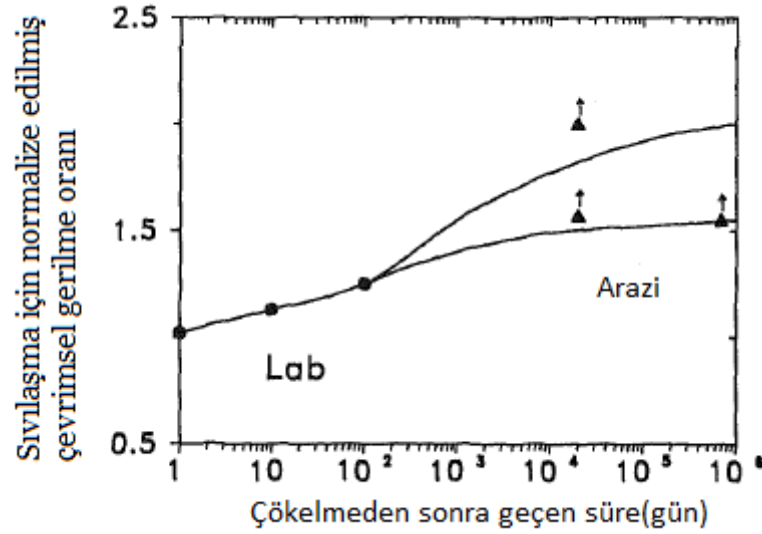
Danelerin, deprem kuvvetlerinden dolayı oluşan kayma gerilmesini almadan önceki durumda, kayma gerilmesini aldığı durumda ve kayma gerilmesini aldıktan sonraki durumda oluşan dizilimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.1a’da gevşek kumun depremden önceki dane dizilimi görülmektedir. Şekil 3.1b’de deprem etkisinden kaynaklanan kesme gerilmesi etkisi ile daneler arası temasın kaybolduğu görülmektedir. Bu evreye kadar danelerin birbirlerine teması ile aktarılmakta olan gerilmeler drenajsız durumda su tarafından karşılanacaktır. Sıvılaşma olarak nitelendirilen bu aşamada kayma direnci sıfır olan su, sistemdeki gerilmeleri karşılayamadığından ortamın birim hacim ağırlığının, doygun zemininkine eşit bir sıvı gibi davranması kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 3.1c’de görüldüğü gibi, dinamik/sismik yüklemenin sonlanmasından sonra denge yeniden sağlansa da yüzeyde önemli oturmalar belirecektir. Bu oturma-hacim azalmasının, zamanla dışarıya kaçan suyun hacmine eşdeğer olduğu söylenebilir .



Şekil 3.1 Doygun kumda dane diziliminin dinamik yüklemekten etkilenmesi (Japonya Kıyı ve Liman Araştırma Enstitüsü (PHRI), 1997)

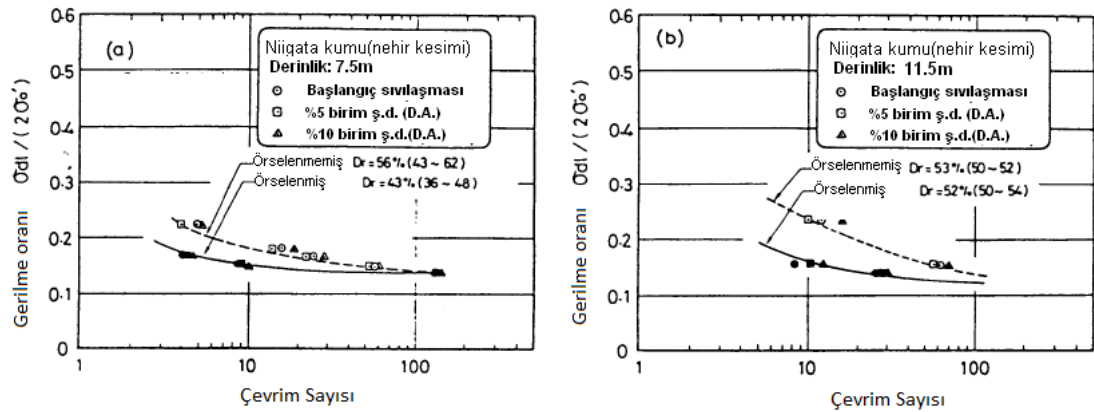
3.1. Yaşlanmanın Kumlarda Sıvılaşma Direncine Etkisi

Seed (1979) yaptığı çalışmada, yaşlanmanın kumların sıvılaşma direnci üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bağlı birim hacim ağırlığı %50 olan ve değişik sürelerde 155 kPa çevre basıncıyla konsolide edilen Monterey No.0 kumunda yaptığı CTX deneylerin sonuçlarında yaşlanma etkisini net bir şekilde gözlemlemiştir. Konsolidasyon süreleri 0, 1, 10, 100 gün olarak tutulmuştur. Sıvılaşma direncinde 10 gün sonunda %12, 100 gün sonrasında ise %25 artış gözlemlenmiştir. Bu veriler Şekil 3.2’deki gibi karşılaştırıldığında; Seed, doğal çökellerin, sıvılaşmaya karşı laboratuvarlarda hazırlanan numunelerden %75 oranında daha dirençli olduğu sonucuna varmıştır.



Şekil 3.2 Yaşlanmanın Etkisiyle Sıvılaşma Direncinin Artışı (Seed, 1979)

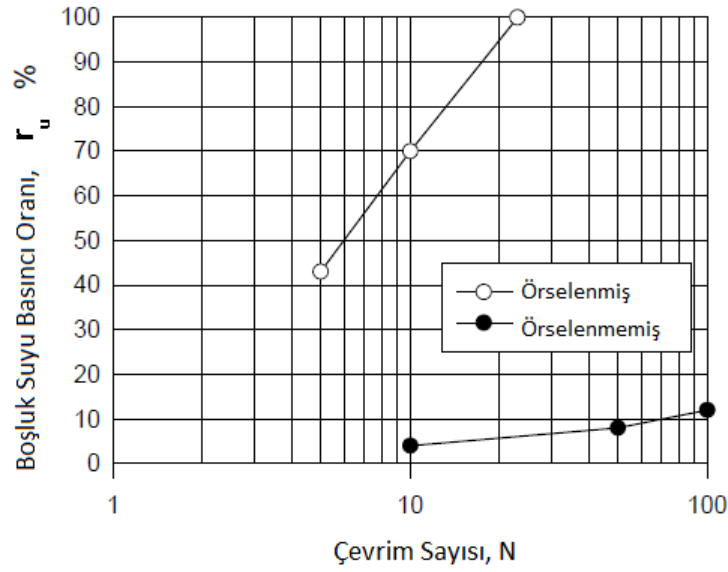
Ishihara (1985)'da yaşlanmanın sıvılaşma direncine etkisiyle ilgili örnekler göstermiştir. Ancak o, numuneleri laboratuvarında yaşlandırmak yerine (Seed, 1979), örselenmemiş numunelerle, yeniden oluşturulmuş Niigata kumlarını karşılaştırmıştır. Örselenmemiş numuneler, geniş çaplı numune alıcılarla alınmış ve deney sonuçları Şekil 3.3'de gösterildiği gibi çıkmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi örselenmemiş numunelerin çevrimsel kayma direnci, yeniden oluşturulmuş numunelerden yüksek çıkmıştır.



Şekil 3.3 Örselenmiş ve Örselenmemiş Numunelerin Çevrimsel Dayanımının Karşılaştırılması (Ishihara, 1985)

Arango ve Miguez (1996) 1994 Northridge depreminden etkilenmiş bir bölgedeki 10,000 yıllık kumların performansını araştırmıştır. Araştırma, sıvılaşmanın olduğu bölgelerin yakınlarındaki sıvılaşmaya eğilimli alanları bulmayı da hedeflemiştir.

Tapo Vadisi bu kriteri sağlamış, örselenmemiş ve yeniden oluşturulmuş numuneler üzerinde yapılan 18 adet CTX deneyi sonucu, çevrimler sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarının, örselenmemiş numunelerde daha düşük çıktığını göstermiştir (Şekil 3.4). Bunun sonucunda yaşlanmayla birlikte boşluk suyundaki artışlar azalmakta, zeminlerin sıvılaşmasında en önemli etkenlerden biri olan, efektif gerilmenin boşluk suyu basıncına oranı olarak tanımlanan r_u değerleri düşmektedir. Böylece yaşlanmış numunelerin sıvılaşmaya karşı direncinin arttığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 3.4 Tapo Vadisi Kumlarının Örselenmemiş ve Yeniden Oluşturulmuş Numunelerinde Çevrimsel Yükleme ile Oluşan Boşluk Suyu Basınçlarının Karşılaştırması (Arango ve Migue, 1996)

Artan dayanımın, danelerin temas noktasında oluşan çimentolaşmadan kaynaklandığı hipotezini doğrulamak için, Arango ve Migue (1996) Tapo vadisinden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde donma-çözülme deneyleri uygulamışlardır. Düşük ancak uniform birim şekil değiştirmeler sağlandığı için ve numune üzerinde bir değişiklik yapmadan hassas bağları kırabilmesi olasılığının yüksek olmasından ötürü seçilmiştir. Sonuçlar çevrimsel yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarının, donma-çözülme süreçleri sonrasında değişmediği ve yaşlanma etkisi olarak, daneler arası boşlukların dolması (*infilling*) ve/veya yüzeylerin aşırı kaplanmasından (*overgrowth*) oluşan kilitlenme olarak belirtilmiştir.

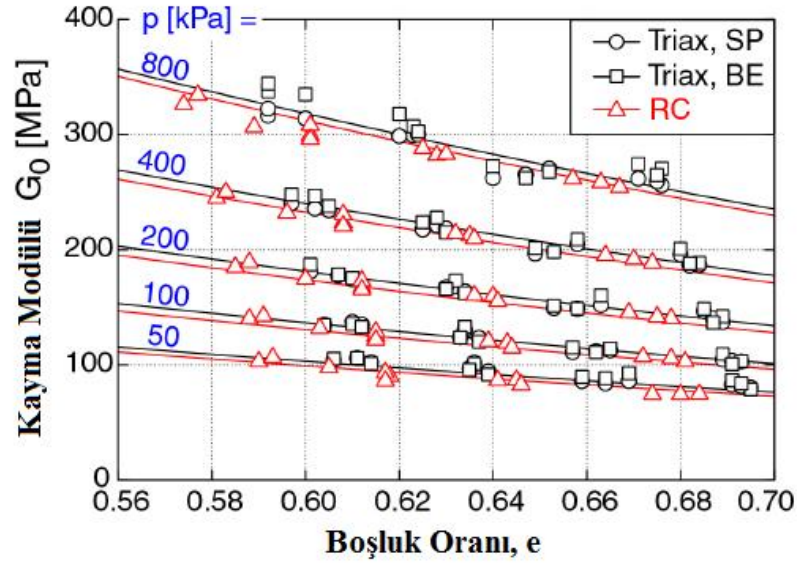
4. ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞINI ETKİLEYEN FİZİKSEL ÖZELLİKLER

İnce daneli zeminlerde, dinamik yüklemekten dolayı oluşan etkiler zeminin çeşitli fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

4.1. Boşluk Oranı

Boşluk oranının dinamik davranış üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Iwasaki vd. (1978) ile Kokusho (1980) farklı boşluk oranlarına sahip (0.640 ile 0.793 arasında değişen) Toyoura Kumu numuneleri üzerinde yaptıkları dinamik üç eksenli deneyler sonucunda kayma modülü azalım eğrilerinin üst üste geldiğini ve boşluk oranı değişiminden etkilenmediğini göstermişlerdir. Ayrıca sıvılaşma açısından düşünüldüğünde, zeminin doğal boşluk oranının kritik boşluk oranına göre durumuna bakılabilir. Kritik boşluk oranı; numunenin değişmez deviator gerilmede hacim değişimi göstermeden kesildiği dane dizilimi olarak tariflenir. Bu tarifle, doğal boşluk oranının kritik boşluk oranından küçük olduğu zeminlerde sıvılaşmanın oluşmadığı söylenebilmektedir.

Öte yandan, Wichtmann vd. (2004) rezonant kolon (*resonant column*), köprü elemanı (*bender element*), kesme plakası (*shear plate*) deneyleri yaparak boşluk oranının etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre bütün metodlar birbirleriyle uyum sağlamış, bununla birlikte boşluk oranının artmasıyla başlangıç kayma modülünde düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 4.1).



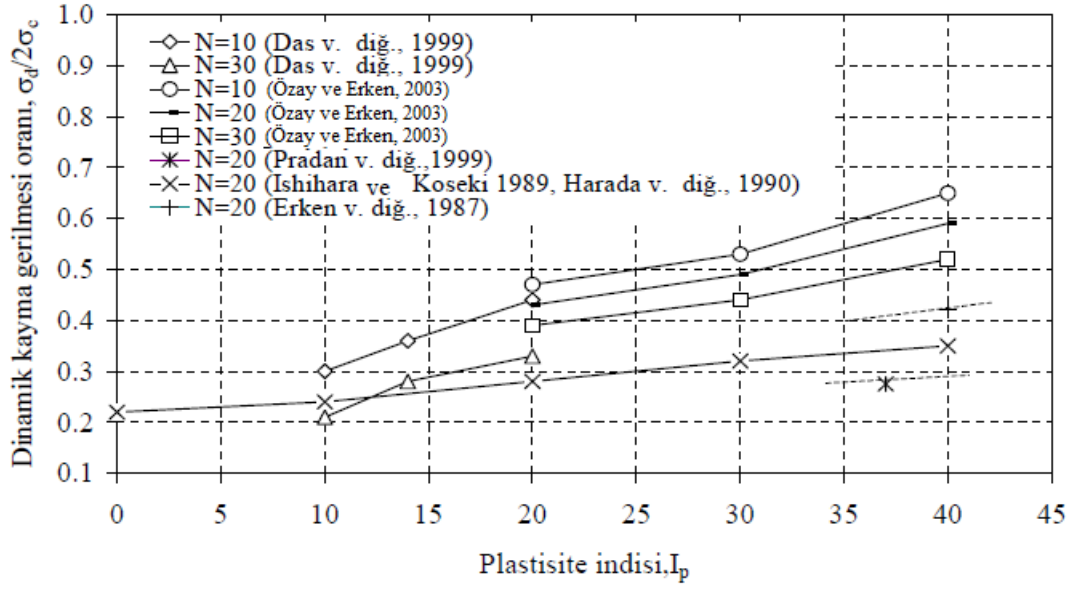
Şekil 4.1 Boşluk oranının kayma modülüne etkisi (Wichtmann vd., 2004)

Rezonant kolon (RC) deneyinde; silindirik numunelere çevrimsel burulma kuvvetleri uygulanır ve numunenin bu kuvvete verdiği tepki, hız veya ivme açısından ölçülür. Deneyde zemin numunesinin rijitlik ve sönümlleme özellikleri ölçülerek, efektif çevre basıncı, birim deformasyon genliği ve zaman etkileri incelenir.

Kayma dalgası hızlarını ölçmede kullanılan piyezoseramik köprü elemanı (BE) deneyinde numunenin her iki ucuna zıt uçlar batırılıp S dalgaları üretilir. Bu dalgaların katettiği yol ve bu yolu katederken harcanan süre ölçülerek V_s bulunur.

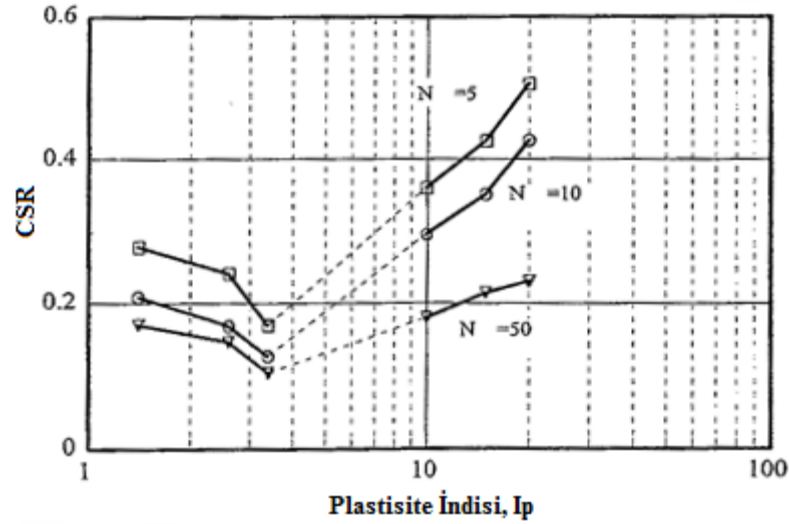
4.2. Plastisite İndisi

Plastisite indisinin artmasıyla numunelerin çevrimsel gerilme dirençlerinin arttığı bilinmektedir. Yapılan son çalışmalardan, Özay ve Erken (2003) plastisite indisinin artmasıyla zeminin yenilmesi için gerekli kayma gerilmesinin veya CSR (çevrimsel gerilme oranını) değerinin arttığını dinamik üç eksenli deneylerle göstermiştir (Şekil 4.2). Deney sonuçlarında yenilme kriteri olarak %5 çift genlikteki deformasyona ulaşılan çevrim sayısı değerleri ölçüt alınmış ve düşük plastisite indislerinde çevrimsel dayanımın çok fazla değişmediği ancak, $I_p=10$ gibi bir eşik değerden sonra artışlar gözlemlendiğini belirtmişlerdir.



Şekil 4.2 Çevrimsel Gerilme Oranına Plastisitenin Etkisi (Özay ve Erken, 2003)

Prakash ve Guo (1998), çalışmalarında farklı yüzdelerde kil içeriğine sahip silt karışımlarının dinamik davranışını incelemiştir. Sonuç olarak kil içeriğinin artmasıyla yükselen plastisite indisinin dinamik kayma direnci açısından bir eşik değerine sahip olduğunu, düşük değerleri için zeminin dinamik direncini azalttığını büyük değer aralıklarında ise dinamik direnci artırıcı yönde etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 4.3).



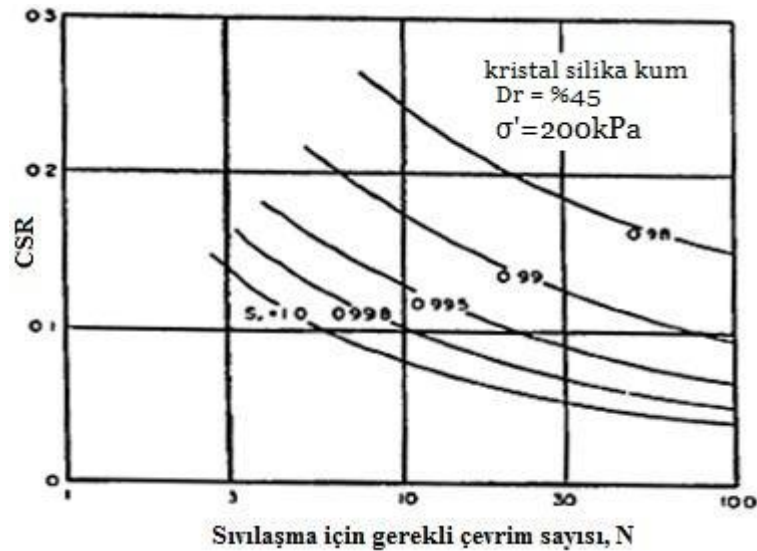
Şekil 4.3 Plastisite indisinin dinamik dirence etkisi (Prakash ve Guo, 1998)

4.3. Sıvılık İndisi

Sıvılık indisinin (I_L) 1.0 olması, zeminin arazide likit limite eşit su muhtevasını; sıfır olması plastik özelliklerin alt limitini; sıfırdan küçük olması ise kuruluk yani aşırı konsolide özelliği yansıtır. Bu değerin 1'den büyük olması o zeminde dinamik yükler altında ciddi problemlerin oluşabileceğini göstermektedir. Örneğin, Adapazarı killi siltlerinde I_L değeri 1.5'e kadar yükselebilmektedir. Ayrıca, geliştirilen birçok sıvılaşma kriteri yaklaşımında sıvılık indisinin etkili rolü gösterilmiştir. Örneğin Adapazarı Sıvılaşma Kriteri'nde $I_L \geq 0.9$ durumunda sıvılaşma olabileceği, $0.75 \leq I_L < 0.9$ durumunda test (DDSS, CTX) yapılmasının gerekli bulunduğu, $I_L < 0.75$ durumunda ise sıvılaşmanın belirmeyeceği belirtilmiştir (Ural vd., 2007).

4.4. Doygunluk Derecesi

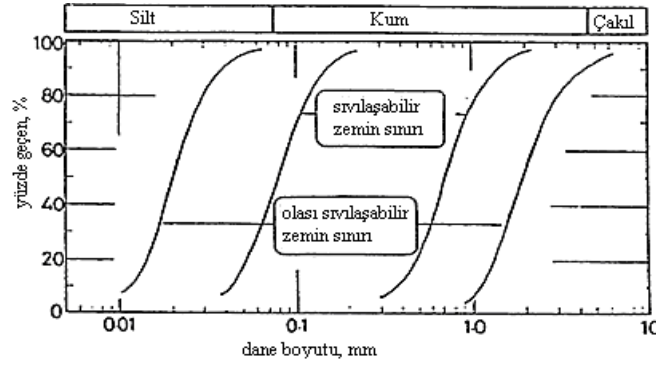
Yapılan araştırmalarda numunelerin doygunluk derecesinin artmasıyla tekrarlı yükleme sonuçlarında özellikle sıvılaşmaya veya yumuşamaya karşı hassasiyetin arttığı belirlenmiştir (Martin vd., 1978). Şekil 4.4'de uygulanan CSR ile çevrim sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Doygunluk derecesinin düşmesi fiziksel anlamda boşluk hacminde havanın artan varlığını göstermekte, bu da aşırı hacim değişimlerine yol açabilmektedir.



Şekil 4.4 Sıvılaşmanın oluştuğu çevrim sayısına doygunluk derecesinin etkisi (Martin vd., 1978)

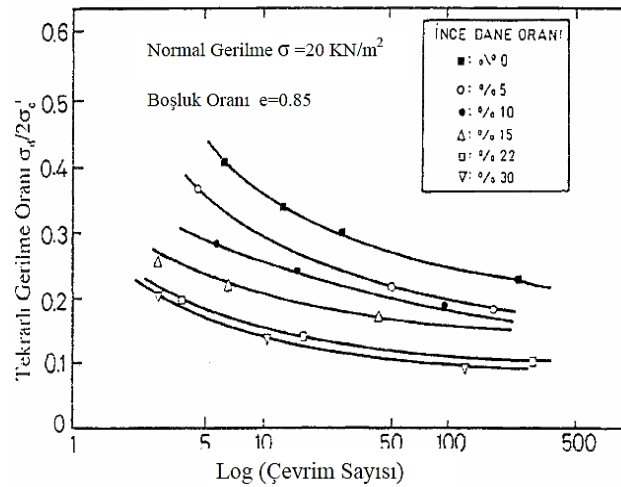
4.5. Dane Boyutu

Tsuchida (1970) geçmiş depremlerde sıvılaşılan ve sıvılaşmayan zeminlerde dane boyutunun etkisini çalışmış ve Şekil 4.5’de sıvılaşma sınır eğrilerini vermiştir. Bu bağlamda yapılmış olan birçok çalışmada özellikle ortalama dane çapı D_{50} değeri üzerinde durulmuştur. Literatürde kabul görmüş olan birçok sıvılaşma kriterinde de D_{50} değeri, üzerinde değerlendirme yapılan parametreler arasında yer almaktadır. Seed ve Idriss (1971) ve Wang (1979) dane boyutu arttıkça, numunenin sıvılaşması için uygulanması gereken kayma gerilmesinin de artmakta olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 4.5 Sıvılaşılabir zeminlerin dane dağılımı

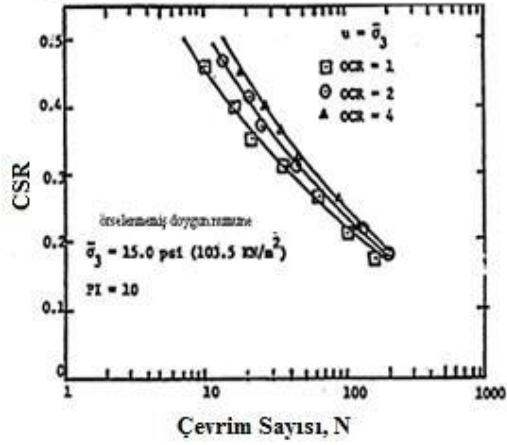
Ayrıca, dane boyutu büyüdüğünde zeminin geçirimsizliği artmakta, buna bağlı olarak aşırı boşluk suyu basıncı oluşumları azalmaktadır. Troncoso ve Verdugo (1985) tarafından düşük plastisiteli siltler üzerinde dinamik üç eksenli deney sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir. Zeminde, plastik olmayan ince dane oranı arttıkça, dinamik yüklemelere karşı direncin azaldığı görülmektedir.



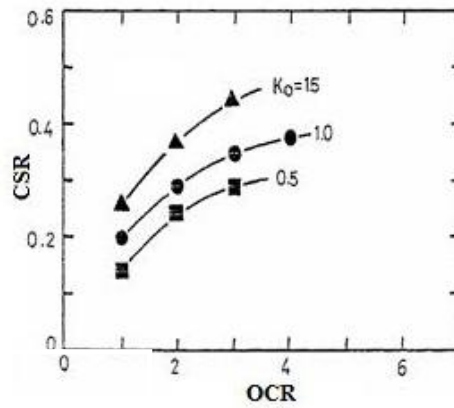
Şekil 4.6 Düşük plastisiteli ince dane içeriğinin, kumların sıvılaşması üzerindeki etkisi (Troncoso ve Verdugo, 1985)

4.6. Aşırı Konsolidasyon Oranı

Aşırı konsolidasyonun derecesi ve zeminin jeolojik yaşı, ince daneli zeminlerin dinamik davranışında doğrudan etkilidir. İlk defa Seed ve Peacock (1971) aşırı konsolidasyon oranının etkisini araştırmış ve OCR arttıkça sıvılaşmaya karşı direncin arttığını gözlemlemişlerdir. Ishihara (1978) aşırı konsolidasyon oranının etkisini alüviyal siltli kum ve kumlu siltlerde incelemiştir. Ayrıca kumdaki ince içeriğinin artmasıyla bu etkinin belirginleştiğini bildirmiştir. Finn (1981) ve Puri (1984) (Şekil 4.7) aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla kayma direncinin yükseldiğini belirtmişlerdir. Ishihara (1977) aşırı konsolidasyon oranının ve K_0 değerinin artmasıyla birlikte sıvılaşmaya karşı direncin arttığını belirtmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.7 CSR- N_{cyc} arasındaki ilişki (Puri, 1984)



Şekil 4.8 OCR'nin sıvılaşmaya etkisi (Ishihara, 1977)

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Literatür özetinde de görüleceği üzere, kumlarda yaşlanma ile özelliklerin önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Öte yandan bu etkinin killerde de geçerli olduğuna ilişkin bilgilerin literatürde yaygın olarak bulunmadığı görülmüştür.

Laboratuvarında bekletilen numunelerin yaşlanma ve/veya bayatlaması arazideki koşulların değişmesi yanında araştırma projelerinde örselenmemiş numuneler üzerinde yapılacak deneyleri etkileyip etkilemediğini görebilme açısından da önem taşımaktadır. Bu etkileri gözlemlemek için yapılan çalışmada, yaşlanmanın ve/veya bayatlamının, kil içerikli ve sıvılaşmaya yatkın Adapazarı siltlerinin dinamik davranışı, konsolidasyon parametreleri ve pH gibi değerlerinin değişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

5.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

5.1.1. Deney Numuneleri İçin Silt Temini

Silt kelimesi sözlükte, akarsuyla gelen ince zemin veya çamur birikintisi, ince toprak çökeli olarak tanımlanmaktadır. Farklı kaynaklarda, su vasıtasıyla taşınan ince daneli zeminler ve sediment olarak adlandırılan birikintiler olarak veya genellikle suda süspansiyon halinde taşınan, kaya veya zeminden ayrılan ince malzemeden oluşan gevşek çökel olarak tanımlanmıştır.

Siltin dane boyutu ISO 14688'e göre 2 mikron ile 63 mikron arasındadır. USDA (United States Department of Agriculture)'ya göre üst sınır 50 mikron iken AASHTO (T88) ve ASTM (D422)'de üst sınır 75 mikron'a çıkartılmıştır.

Ana kaya; çevre koşulları ve kendi özelliklerine bağlı olarak ayrışma ve yıpranma mekanizmaları sayesinde, toprağa yönelen bir sürece girmektedir. Anakayanın yıpranma/ayrışması ile oluşan malzemelerin büyük çoğunluğu su, rüzgar, yerçekimi ve buzullar tarafından taşınarak farklı uzaklıklarda birikmektedir. Farklı şekilde

taşınarak biriken malzemeler; akarsu çökelleri, rüzgarla taşınarak oluşan birikintiler, göl çökelleri ve buzul çökelleri olarak ayrılmıştır.

Siltler birçok fiziksel sürecin etkisiyle, genellikle kayaların kum tanesi büyüklüğündeki kuvars kristallerinin kafeslerindeki (*lattice*) noksanlıkların (zayıf bağlantıların) parçalanmasıyla oluşur. Bu süreçler, kayaların-regolitlerin kimyasal ayrışması, donma-çözülme ve ortamdaki tuz kristallerinin artması gibi birçok ayrışma sürecini kapsar. Silt daneleri yeterince küçük olduklarından çok uzaklara su veya hava yoluyla kolayca taşınabilirler. Rüzgarla taşınmış kalın silt malzemelerinin çökelleri lös (*loess*) olarak adlandırılır.

Bu çalışmada kullanılan silt daha önce ayrıntılı olarak araştırılmış akarsu kökenli bir malzemedir (Önalp, Arel, Bol, Özocak, Sert, 2007). Bu siltler Holosen ve son zamandan (1967'ye kadar) Sakarya Nehri tarafından Adapazarı Ovası'nın (Akova) değişik noktalarına sellenme ve menderes etkisi ile kısıtlı hacimlerde biriktirilmişlerdir. Yüzey alanı yaklaşık 27 km² olan Adapazarı kentinde zemin profili, Sakarya veya bir başka büyük akarsuyun geçmiş 7000 yılda yaklaşık 5 km boyunca batı'dan doğu'ya yatak değiştirmesinden etkilenmiştir. Bu görüş, günümüzde Çark Suyu gibi sadece Sapanca Gölü'nün fazla suyunu taşıyan önemsiz bir akarsu üzerinde mevcut Roma zamanında yapılmış 6 gözlü köprünün varlığından kaynaklanmaktadır.

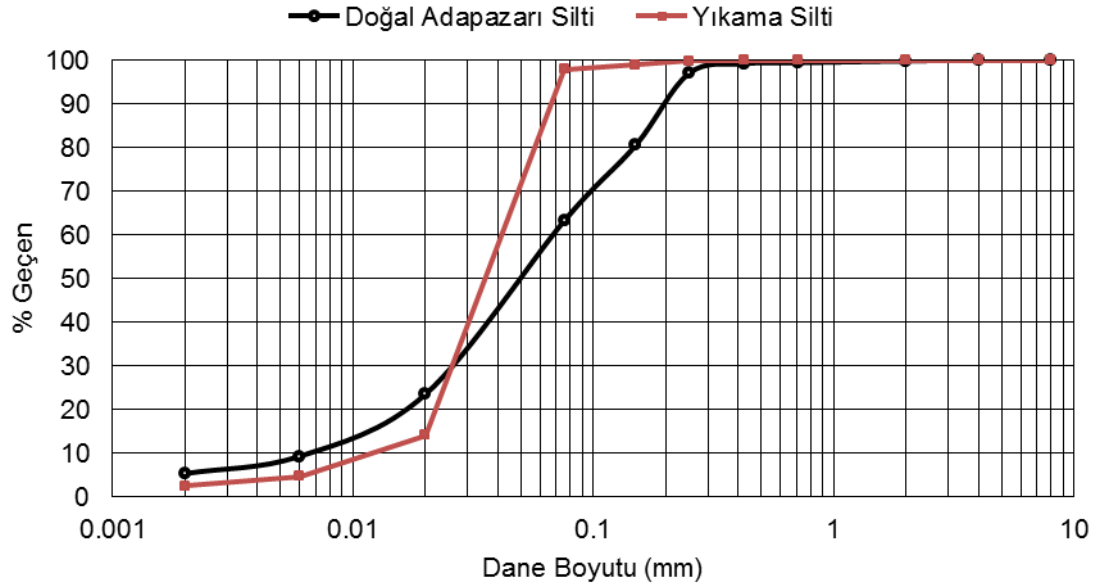
Bray vd. (2004) ABD Willamette Geological Service laboratuvarında yapılan analizde, Adapazarı zeminlerinin kil içeriğinin smektit veya rastgele tabakalı illit/smektit, klorit, illit ve kaolinit olarak belirlendiğini bildirmiştir. Montmorillonitin kaynağı olan smektit ince kilin egemen minerali olup; illit, daha büyük kil boyutlarında boldur. <0.2 µm boyutların tüm durumlarda %85 smektit, %10 illit ve %5 klorit ve kaolin içerdiği söylenebilmektedir.

Adapazarı siltlerinin fiziksel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Adapazarı doğal siltinin özellikleri (Tübitak 106M042)

Likit Limit	w_L	34 → NP	İnceler	FC	%80-90
Plastik limit	w_P	23 → NP	% Kum	S	<30
Plastisite indisi	I_P	7 → NP	%Silt	M	~60
pH		7.98	%Kil	C	5-10
SINIFI TS1500		ML			

Deneylerde kullanılda silt, Adapazarı Yenigün Mahallesinden alınmıştır. Doğal arazi numunesinin önce yıkamalı eleme yöntemi ile kumu elenmiş, ardından çöktürme yöntemiyle kil yüzdesinin mümkün olduğunca azaltılması hedeflenmiştir. Bu işlemler sonucunda elde edilen ve doğal durumdaki siltin dane dağılım eğrileri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Numunenin likit limit ve plastik limit değerleri NP (non-plastik) olarak belirlenmiştir.



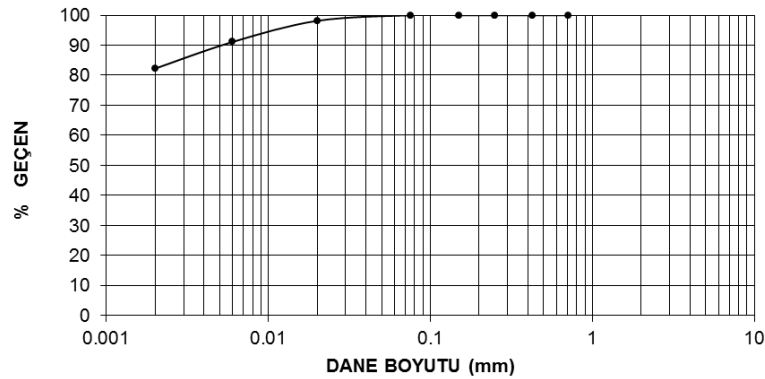
Şekil 5.1 Adapazarı Siltinin doğal durumdaki ve işlem sonrasındaki dane dağılım eğrileri

Deneyler sırasında kullanılan numuneler: Doğal Adapazarı Silti, yıkama sonucu elde edilen silt (bundan sonra yıkama silti olarak anılacak) ve ağırlıkça %10 bentonit eklenmiş Doğal Adapazarı Silti olarak 3 türdür.

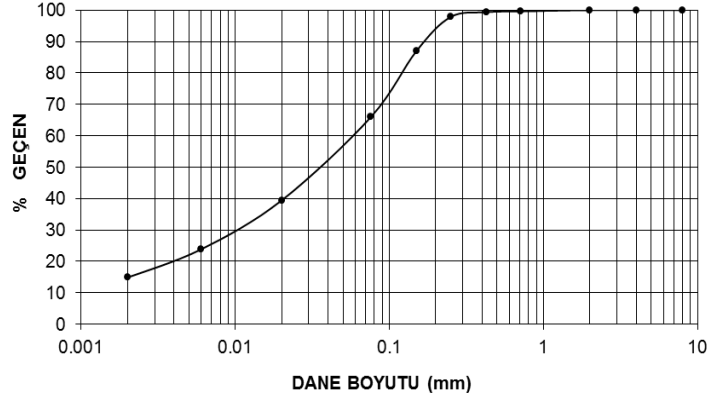
Deneylerde kullanılan bentonitin pipet deneyinde (BS 1377:2) bulunan dane dağılımı eğrisi Şekil 5.2’de verilmiştir. Buna, ağırlıkça %10 bentonit eklenmiş Doğal

Adapazarı Siltinin dane dağılım eğrisi Şekil 5.3’de, bentonit’in likit limit değerleri Şekil 5.4’de verilmiştir. Bentonit’in özellikleri ise $w_L=133$, $w_p=34$, $I_p=99$ olarak belirlenmiştir (Duran, 2010). Bentonitin kristal yapısı, şerit şeklinde ve üç katlıdır. Bu katlar, dizilmiş sekizyüzlü ve dörtyüzlüden oluşmuştur. Dörtyüzlünün merkezinde Silisyum, sekizyüzlünün merkezinde ise Al, Mg, Na, Ca, Fe, Li vb. gibi katyonlar bulunur. Hidrojen molekülü boyutu $1\text{\AA}$ ’dır. Bir smektit (bentonit) kristalinin boyutu 2 mikrondan daha küçüktür. İnce daneli ve gözenekli bir yapıya sahiptir. En önemli özelliklerinden biri suyu emince şişmesi, peltemsi bir kitle meydana getirmesidir. % 1-2 ölçüsünde bentonit, su içinde kuvvetli şekilde çalkalanırsa, dibe çökmeden askıda kalır. Çok değişik renklerde gözlenebilen bentonitin katyon değiştirme kapasitesi (CEC) yüksektir ve süspansiyon halindeki kolloid’de bentonit danelerinin yüzeyleri negatif yüklüdür.

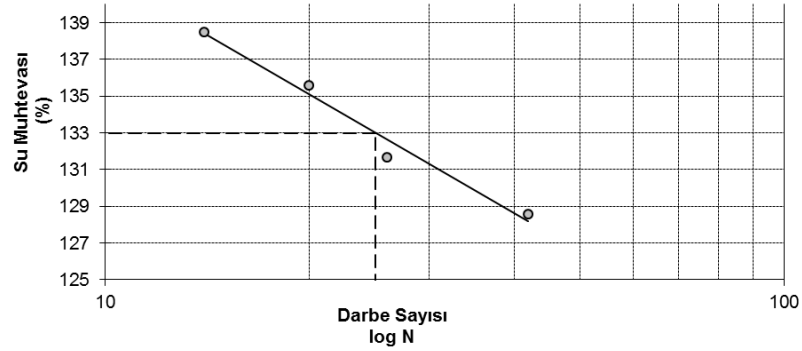
Bu çalışmada bentonit’in, Doğal Adapazarı Siltine ağırlıkça %10 olarak eklenmesinin sebebi ise; kil içeriği=%15 gibi bir eşik değerden sonra numunelerin çevrimsel yükleme direncinin arttığının gözlemlenmiş olmasıdır (Sawada vd., 2007; Duran, 2010).



Şekil 5.2 Bentonitin dane dağılım eğrisi



Şekil 5.3 Ağırılıkça %10 Bentonit eklenmiş Doğal Adapazarı Siltinin dane dağılım eğrisi



Şekil 5.4 Bentonitin akma doğrusu

5.1.2. Numune Hazırlama Yöntemleri

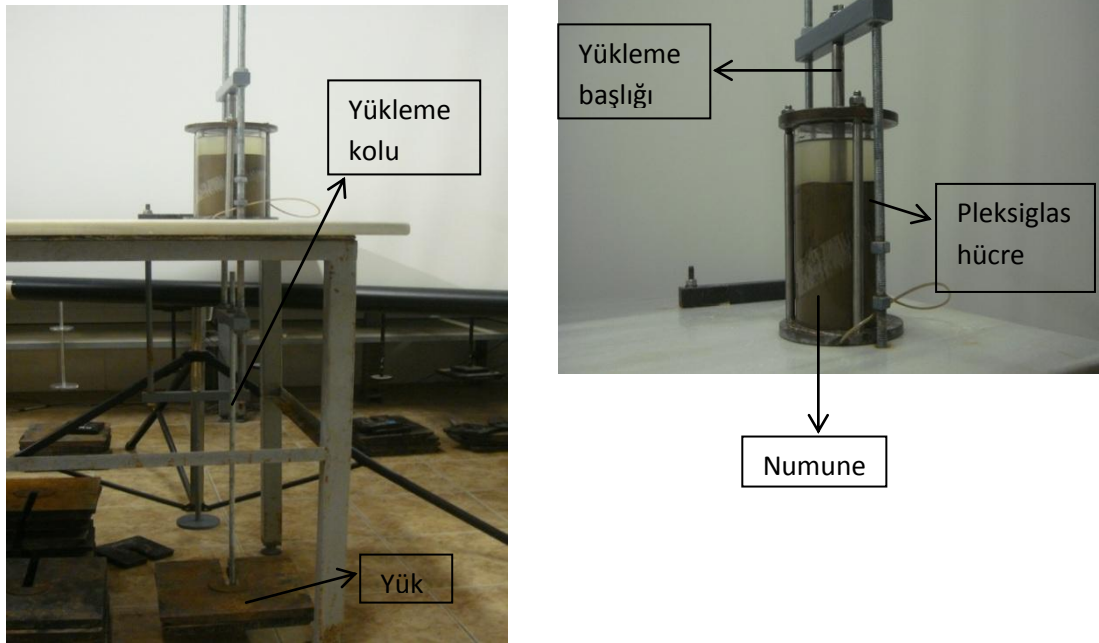
Zeminlerin doğadaki davranışını laboratuvarında gözlemleyebilmek için, araziden dikkatli bir şekilde örselenmemiş numuneler almanın önemi bilinmektedir. Kum ve siltlerde örselenmemiş numune almak oldukça zor ve pahalı olduğundan, üzerinde deney yapılacak zemin numuneleri, laboratuvarında numune hazırlama yöntemlerinden en uygun olanı seçilerek elde edilebilir. Laboratuvarında hazırlanan numunelerde, arazide ölçülen doğal birim hacim ağırlık, bağıl sıkılık (D_r) ve hazırlanan numunenin yapısının doğal zemin çökeline benzemesi esas alınmaktadır. Bu çalışmada, kuru yağmurlama, ıslak tokmaktama, suda çöktürme ve bulamaç çökeli ile hazırlama yöntemlerinden, Adapazarı zeminlerinin akarsu karakterli alüvyon malzemelerinden oluştuğu göz önüne alınıp, bunu en iyi yansıtabilecek ve çalışmalarda kullanılabilecek yöntemin bulamaç çökeli ile hazırlama yöntemi olduğu bildirilmiştir (Ural, 2008). Birçok araştırmada kolaylığı nedeniyle ıslak tokmaktama yöntemi de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak Vaid (1994) ıslak tokmaktama

yönteminin plastik olmayan fluviyal sedimentlerin yapısını yansıtmadığını söylemiştir. Chang (1982), Cao ve Law (1991), Law ve Ling (1992), Hussein (1995) gibi araştırmacılar ise çalışmalarında ıslak tokmaklama yöntemini kullanmışlardır. Kuerbis ve Vaid (1988) çalışmalarında doymuş homojen numunelerin hızlı bir şekilde hazırlanabilmesinden dolayı bulamaç çökeli yöntemini kullanmışlardır. Bunlara karşın Amini ve Sama (1999) ve Amini ve Qi (2000) çalışmalarında suda yağmurlama ve ıslak tokmaklama yöntemleri arasında dikkate değer bir fark olmadığını söylemişlerdir. Polito (2001) ıslak tokmaklama ve bulamaç çökeli yöntemiyle hazırladığı numunelerin deney sonuçlarını karşılaştırarak, Dr'si daha yüksek olan, bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlanan zemin numunesinin daha düşük dinamik direnç verdiğini gözlemlemiştir. Bir diğer deyişle bulamaç çamuru yönteminin muhafazakar sonuçlar vermesi bir alt sınır oluşturması bakımından anlamlı olabilir.

6. YÖNTEM

6.1. Bulamaç Yöntemiyle Numune Hazırlanması

Araziden getirilen numune, su muhtevası, likit limit değerinin 1.5 katı olacak şekilde su eklenerek karıştırılmıştır. Desikatörde vakumlanarak havası alınan numuneler 24 saat süreyle bekletildikten sonra iç çapı 10 cm dış çapı 11 cm pleksiglastan yapılmış konsolidasyon hücrelerine boşaltılıp, kademeli yükleme ile 100 kPa'a konsolide edilmiş ve su çıkışı sonlanana kadar bekletilmiştir (Şekil 6.1). Bu süreç yaklaşık bir haftada tamamlanmıştır.



Şekil 6.1 Bulamaç yöntemiyle hazırlanan numunelerin saydam plastik hücrede konsolide edilmesi

6.2. Numunelerin Saklanması ve Deneye Hazırlanması

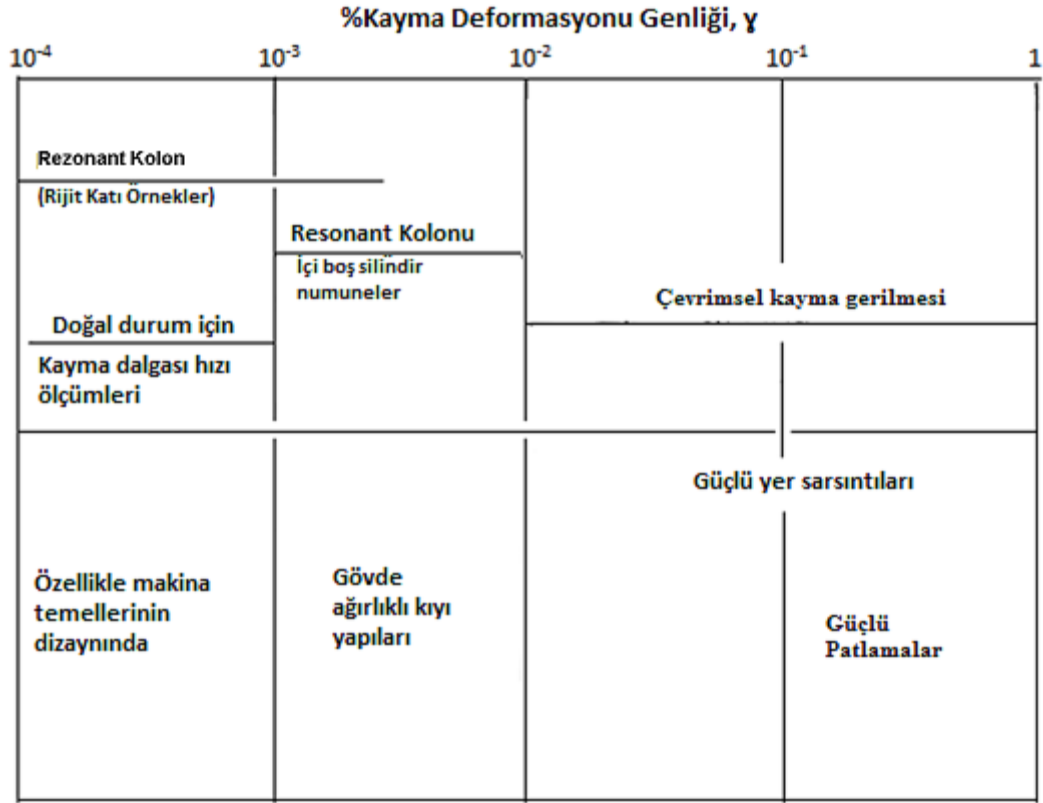
Bulamaç yöntemiyle hazırlanan numunelerin su içeriğini kaybetmemesi için pleksiglas hücrenin içerisindeki numuneler, üst ve alt kısımlarına parafin dökülerek silikonla sıvanmış, streç filmle sarılmış ve dairesel olarak bantlanmıştır.

Doğal Adapazarı Silti ve Yıkama Silti numuneleri 7, 60, 100, 200, 300, 400 gün, ağırlıkça %10 Bentonit eklenmiş numuneler 7 ve 100 gün bekletilerek “yaşlandırılmış”tır. Bir bekletme çevrimi; ilk 7 gün havuzda (24°C), havuzdan çıkarıldıktan sonra 1 saat derin dondurucuda (-15°C) ve daha sonraki 7 gün boyunca buzdolabında (6°C) tutulma ile uygulanmıştır. Bu yolla zeminin doğada geçirdiği mevsimsel çevrimlerin, laboratuvarında hızlandırılarak modellenmesi gözetilmiştir.

Havada kurutulmuş numunelerde deney yapabilmek için, yıkama silti ve yıkama silti + ağırlıkça %10 bentonit numunesi 1 hafta konsolide edildikten sonra, DSS halkası yardımıyla pleksiglas hücrenin içinden numune alınmış, 1 hafta açık-hava koşullarında laboratuvarında bekletilmiş ve kurutulmuştur. Daha sonra buzdolabında 6°C sıcaklıkta 1 hafta daha bekletilen numuneler, deneye hazır hale getirilmiştir.

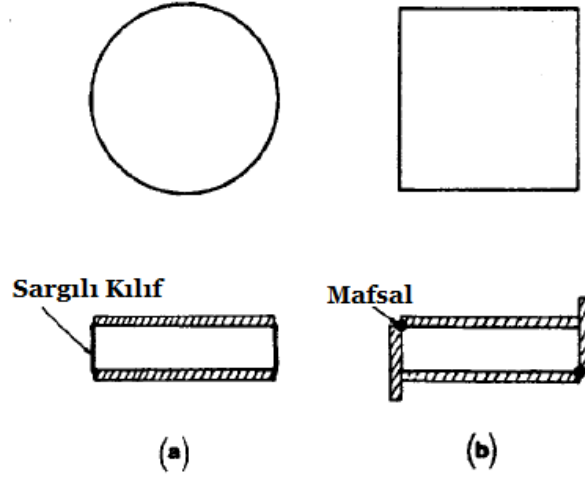
6.3. Deney Aletinin Özellikleri

Bu çalışmada yaşlanmanın, dinamik rijitlik parametreleri olan kayma modülü ve sönüm oranlarına etkisinin hesaplanması için dynamic direct simple shear (DDSS) cihazı kullanılmıştır. Şekil 6.2’de ilgili problemin çözümü için kayma deformasyonu (γ) genliğine bağlı olarak kullanılması uygun olan dinamik testler gösterilmiştir.

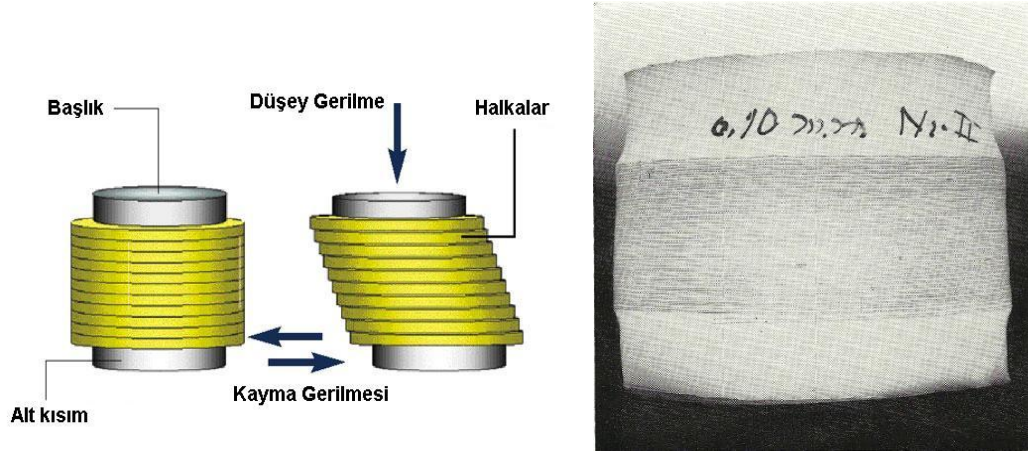


Şekil 6.2 Kayma deformasyonuna dayalı problem çözümü için kullanılacak deney sistemi

Basit kesme deneyinin tarihsel gelişimi incelendiğinde; ilk olarak Kjelmann (1951) tarafından, İsveç tipi olarak bilinen, numunenin kesme kutusunda olduğu gibi tek düzlemden kesilmesini engelleyerek en zayıf düzlemden kesilmesini sağlamak amacıyla üst üste dizilmiş ince halkaların kullanımının önerildiği görülmektedir (Şekil 6.4). Bu tez kapsamında da kullanılan bu tip halkalar K_0 koşullarına benzer bir durumu sağlamaktadır. Daha sonra, Bjerrum ve Landva (1966) tarafından Norveç tipi tel sargılı kılıf (*reinforced rubber membrane*) geliştirilmiştir. Bu sistemde amaç, kum katmanları arasına sıkışmış kalın kil tabakalarının kayma deformasyonları sonucu yatay olarak hareket etmesinden dolayı oluşan birim şekil değiştirme koşullarının arazi benzetiminin yapılmasıdır. Roscoe'nun (1953) geliştirdiği ve Cambridge tipi olarak da anılan sistemde ise, numunenin etrafındaki rijit plakalar mafsallar yardımıyla numunenin ideal koşullarda kayma şekil değiştirmelerini zorlamaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Basit kesme aparatları (a) NGI tipi (b) Cambridge tipi



Şekil 6.4 Solda SGI (Kjellmann, 1951) ve Sağda NGI (Bjerrum, 1966) tipi kesme sistemleri

Bu araştırmada kullanılan Geocomp firması tarafından üretilmiş DDSS cihazı (Şekil 6.5) kesme sırasında ASTM D6528-00'a benzer olarak sabit hacim prensibine dayalı çalışmaktadır. Sistem boşluk suyu basıncını dolaylı olarak dinamik yükleme altında oluşan kabarma veya sıkışma eğilimine bağlı belirlemektedir.

Deney programında, $CSR=0.35$ $f=0.50$ Hz ve normal gerilme de $\sigma_n=100$ kPa seçilmiştir.



Şekil 6.5 DSS aleti ve deney numunesi

6.4. Sonuçların Analizi

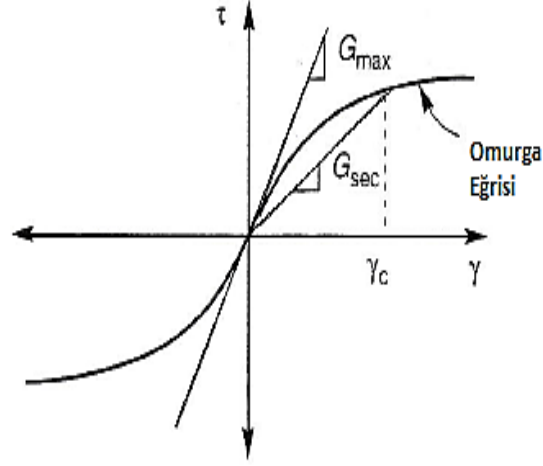
Deney sonuçları hesaplanırken “Eşdeğer Doğrusal Yöntem” seçilmiştir. Eşdeğer doğrusal modeller, simetrik tekrarlı yüklemeye maruz kalan zeminlerin histeresis döngüsü sergilediğini ve bu döngünün iki önemli özelliğinin eğim ve genişlik olduğunu belirtmektedir. Döngünün eğimi zeminin rijitlik derecesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca, farklı tekrarlı birim deformasyon genliklerinin histeretik döngülerinin uç noktaları birleştirilerek omurga eğrisi oluşturulur. Elde edilen omurga eğrisinin orijindeki eğimi maksimum kayma modülünü (G_{max}) gösterir (Şekil 6.6).

Zeminin yükleme sırasında herhangi bir noktada rijitlik derecesi teğet kayma modülü G_{tan} ile tanımlanmaktadır. Döngünün genel eğimi G_{sec} olarak kabul edilir ve τ_c kayma gerilmesi, γ_c kayma birim deformasyon genliği olmak üzere;

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (5.1)$$

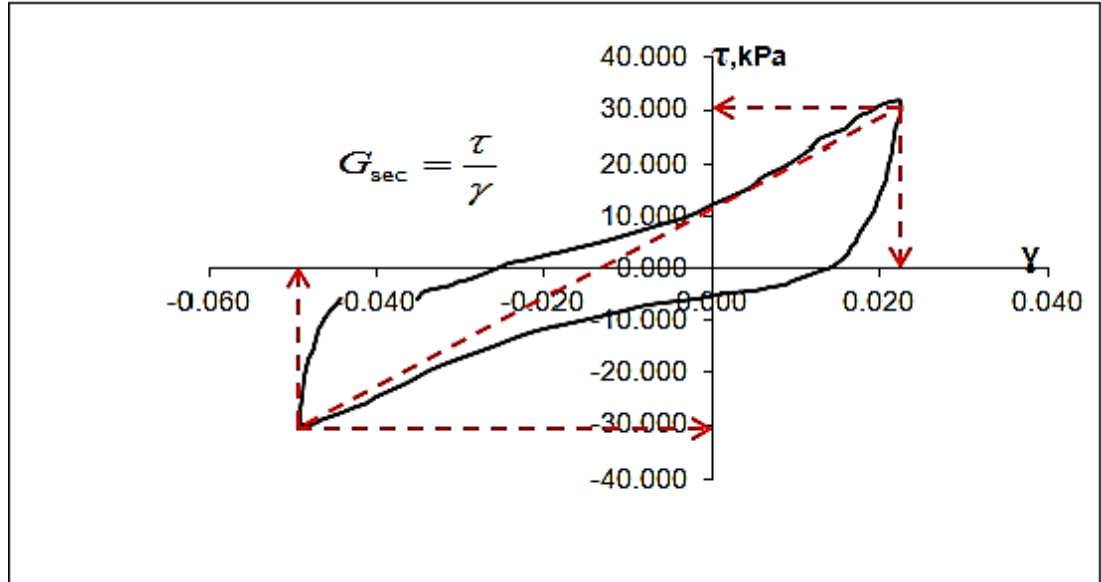
şeklinde ifade edilir. Bir elemanın kiriş kayma modülü (G_{sec}) tekrarlı kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak değişmektedir. Ancak, bu değişim birim

deformasyon genliği ile ters orantılı olup birim deformasyon genliği artarken kiriş kayma modülü düşmektedir.



Şekil 6.6 Omurga eğrisi, G_{max} ve G_{sec} (Kramer, 1995)

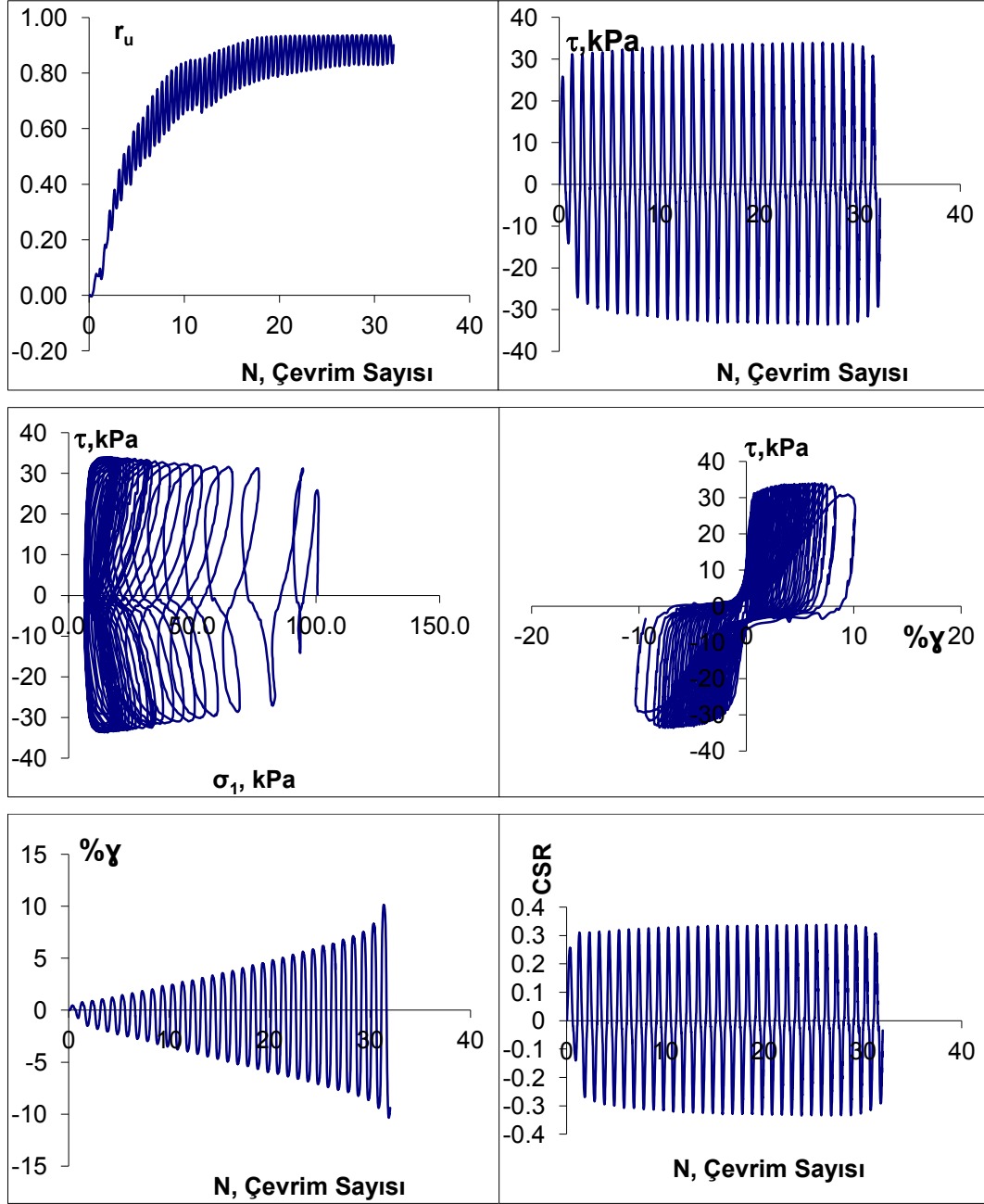
Kiriş kayma modülü değışimi incelenirken, gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi için ilk 15 çevrimin kiriş kayma modülü hesaplanmıştır.



Şekil 6.7 Kayma modülünün (G_{sec}) hesaplanması

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi kiriş kayma modülü, hesaplanması istenen çevrimdeki en düşük ve en yüksek kesme gerilmeleri ve birim şekil deformasyonlar bulunarak, bu değerlerin grafik üzerinde noktalanması ve sonrasında birleştirilmesi sonucunda oluşturulan doğrunun eğiminin elde edilmesiyle bulunur.

Tipik DDSS sonuçları Şekil 6.8’de görülebilir. Ayrıca EK – A kısmında yapılmış bütün deney sonuçları verilmiştir.

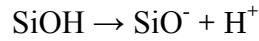


Şekil 6.8 Tipik DSS Grafikleri - 7 günlük Doğal Adapazarı Silti (Sıvılaşma oluşmuş)

6.5. Deney Sonuçları

Zemin-su karışımlarının elektro-kimyasal dengesinin en basit göstergesi, pH değerinde zamanla beliren değişimdir. H^+ atomlarının konsantrasyonunun artışı pH

değerini düşürmekte ve ortamın yumaklanmasına (*flocculation*) yol açmaktadır. Süspansiyonların pH dengesi, killerin yüzey ve kenar değerliklerinde değişimler yapmakta, bundan da en çok kaolinit etkilenmektedir (Mitchell ve Soga, 2005). Tablo 6.1 ve Tablo 6.2 incelendiğinde öncelikle yıkama silti numunelerinin pH değerinde zamanla bir azalma olduğu görülmektedir. Doğal Adapazarı Silti numunelerinde de aynı azalma ölçülmüş ancak 300. günde ani bir artış, 400. günde yine düşüş gözlemlenmiştir. Buna göre yıkama siltinin pH değerinde, bayatlamasıyla birlikte düşüş gözlemlenebilir. Bunun sebebi olarak da;



hidroksillerin su içerisinde ayrışması sonucu H^+ atomlarının ortama salınması ve ortamdaki H^+ konsantrasyonunu arttırması gösterilebilir.

Numuneler saklanırken, su içeriğinde önemli değişimlerin gözlemlenmemesi, deneylerde sağlıklı sonuçlar alınabilmesi açısından önemlidir. Bu durumun kontrolü için numunelerin deney öncesi ve sonrası su içerikleri karşılaştırıldığında; önemli bir değişiklik olmadığı, bütün deney numuneleri için yaklaşık aynı değerlerde olduğu ve dolayısıyla numunelerin saklanması başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Yıkama siltinde ve Doğal Adapazarı Siltinde sıkışma indisi (C_c) değerinde bir değişim olmazken, önkonsolidasyon basınçlarında (σ_c) süreç içerisindeki değişimler, OCR'nin değişiminden gözlemlenebilmektedir. 7 günlük deney numunesinin OCR'si 2.2 iken ilerleyen zamanda bu değer 3.5-4 hatta Doğal Adapazarı siltinde 5 gibi değerlere çıkmaktadır. C_c değerindeki, kayda değer bir değişkenliğin belirmeme durumu, numunelerin σ_c 'ni aştıktan sonra birbirlerine paralel bir şekilde sıkışmalar gösterdiğini, yani numunelerin σ_c aşıldıktan sonra aynı şekilde davranış gösterdiklerini; σ_c 'deki artış ise, yaşlanmanın, numunenin mekanik özelliklerinde bir artış meydana getirdiği biçiminde yorumlanmıştır. EK – C'de yapılan bütün konsolidasyon deneylerinin eğrileri verilmiştir.

Tablo 6.1 Yıkama Silti Deney Sonuçları

%Kum	%Kil	%Silt								
2	3	95								
BEKLEME (gün)	pH	C _c	σ_c (kPa)	N±%5	N±%10	u _{N10} (kPa)	u _{N15} (kPa)	G _{secmax} (kPa)	Kons öncesi w _n (%)	Kons sonrası w _n (%)
7	8.00	0.133	220	13	21	75.7	85.4	3584	27.5	26.9
7	8.00	0.133	220	18	40	69.5	80.2	3237	29.6	24.7
60	7.86	0.136	500	7	10	83.8	100.0	4173	31.1	29.2
60	7.86	0.136	500	15	20	67.2	80.9	4242	26.1	27.5
100	7.82	0.166	430	18	26	60.7	80.5	4680	28.0	25.8
100	7.82	0.388	500	4	6	100.0	100.0	3295	27.5	27.2
200	7.68	0.159	500	16	23	72.4	80.5	3130	29.0	26.1
200	7.68	0.159	500	13	22	73.3	84.4	3350	26.9	24.9
300	7.79	0.139	350	16	27	90.4	95.5	3654	29.4	25.6
300	7.79	0.139	350	18	27	89.8	100.0	3513	29.2	27.0
400	7.82	0.179	400	10	15	92.3	95.8	3593	31.1	25.7
400	7.82	0.179	400	10	15	90.6	95.2	3745	30.5	25.8

%5 ve %10 çift genlikteki kayma deformasyonlarına (*double amplitude*) ulaşılan çevrim sayıları incelendiğinde, her iki numune seti için de bu değerlerde zaman içinde değişkenlik gözlenmemekte ve yaşlanmayla ilgili olarak herhangi bir eğilim belirmemektedir.

Tablo 6.2 Doğal Adapazarı Silti Deney Sonuçları

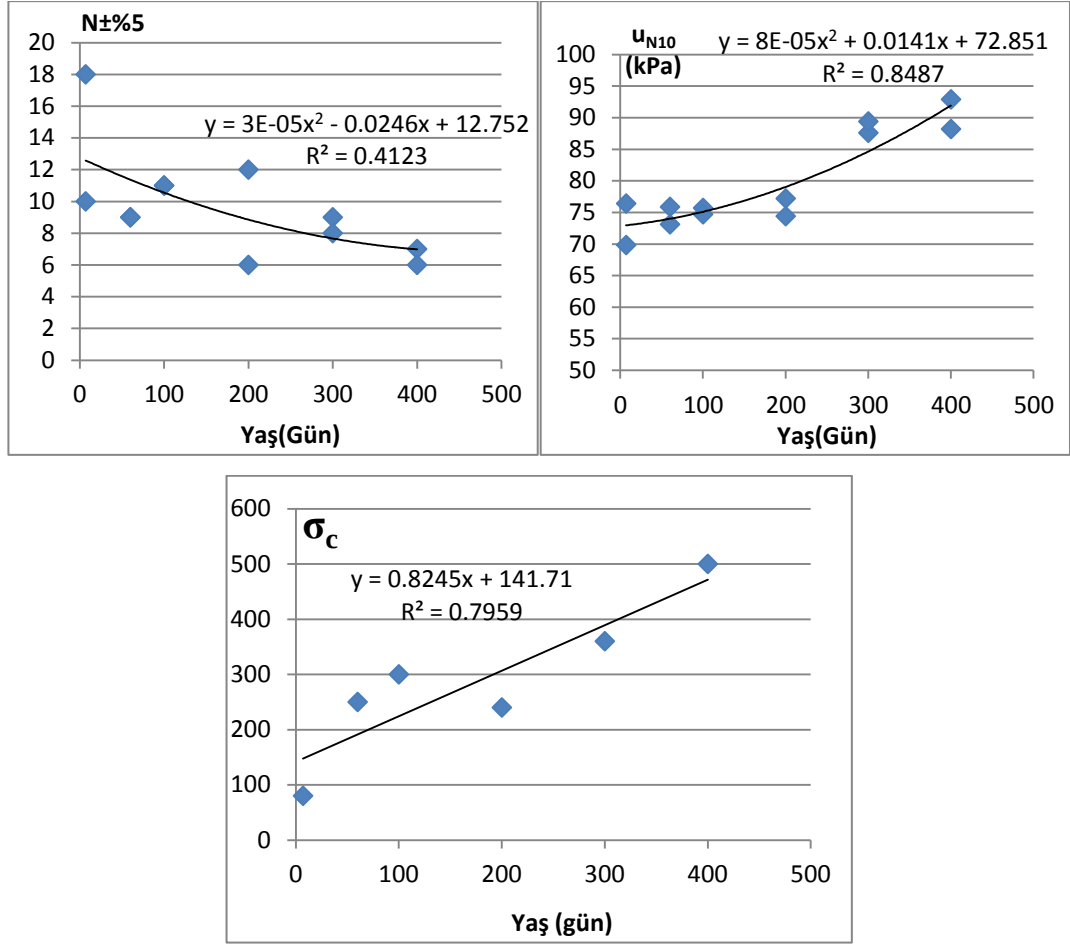
%Kum	%Kil	%Silt								
37	5	58								
BEKLEME (gün)	pH	C _c	σ_c (kPa)	N±%5	N±%10	u _{N10} (kPa)	u _{N15} (kPa)	G _{secmax} (kPa)	Kons öncesi w _n (%)	Kons sonrası w _n (%)
7	7,89	0,066	80	18	32	69,8	81,5	3364	21,1	20,4
7	7,89	0,066	80	10	15	76,4	87,0	3682	23,0	22,0
60	7,87	0,156	250	9	13	75,9	100,0	3507	24,0	21,0
60	7,87	0,156	250	9	15	73,1	79,6	3443	24,0	21,0
100	7,66	0,301	300	11	16	75,7	82,3	3334	25,4	21,6
100	7,66	0,301	300	11	22	74,7	84,6	3299	24,1	21,0
200	7,64	0,156	240	12	22	74,4	85,9	3607	24,0	20,7
200	7,64	0,156	240	6	9	77,2	100,0	3268	24,9	21,7
300	7,89	0,146	360	9	14	87,6	100,0	3454	23,9	21,0
300	7,89	0,146	360	8	16	89,4	92,4	3331	25,0	21,0
400	7,65	0,133	500	7	17	88,2	91,2	2988	24,5	20,6
400	7,65	0,133	500	6	15	92,9	96,4	2797	23,8	21,2

10. ve 15. çevrimlerde ulaşılan boşluk suyu basınçları incelendiğinde, yaşlanmaya bağlı olarak Yıkama Siltinde ve Doğal Adapazarı Siltinde beklenenin tersine, 10. ve 15. çevrimlerde ulaşılan boşluk suyu basınçlarında artış gözlenmektedir. Bunun anlamı yaşlanma süresi arttıkça numunelerin daha erken sıvılaşabileceği izlenimini vermektedir. Bu davranış, Doğal Adapazarı Silti ve Yıkama Silti numunelerine şahit olarak hazırlanan bentonitli numunelerde de gözlenmektedir (Tablo 6.3).

Tablo 6.3 Doğal Adapazarı Silti + Ağırlıkça %10 Bentonit Numuneleri

%Kum	%Kil	%Silt								
34	15	51								
BEKLEME (gün)	pH	C _c	σ_c (kPa)	N±%5	N±%10	u _{N10} (kPa)	u _{N15} (kPa)	G _{secmax} (kPa)	Kons öncesi wn(%)	Kons sonrası wn(%)
7	7.87	0.189	200	15	26	69.8	81.5	3599	24.7	23.1
7	7.87	0.189	200	13	24	76.4	87.0	3476	26.0	22.9
100	7.82	0.196	190	12	17	75.7	82.3	3854	26.3	24.2
100	7.82	0.196	190	15	23	74.7	84.6	3627	23.1	21.9
200	7.95	0.176	195	DENEY BAŞARISIZ						
200	7.95	0.176	195							

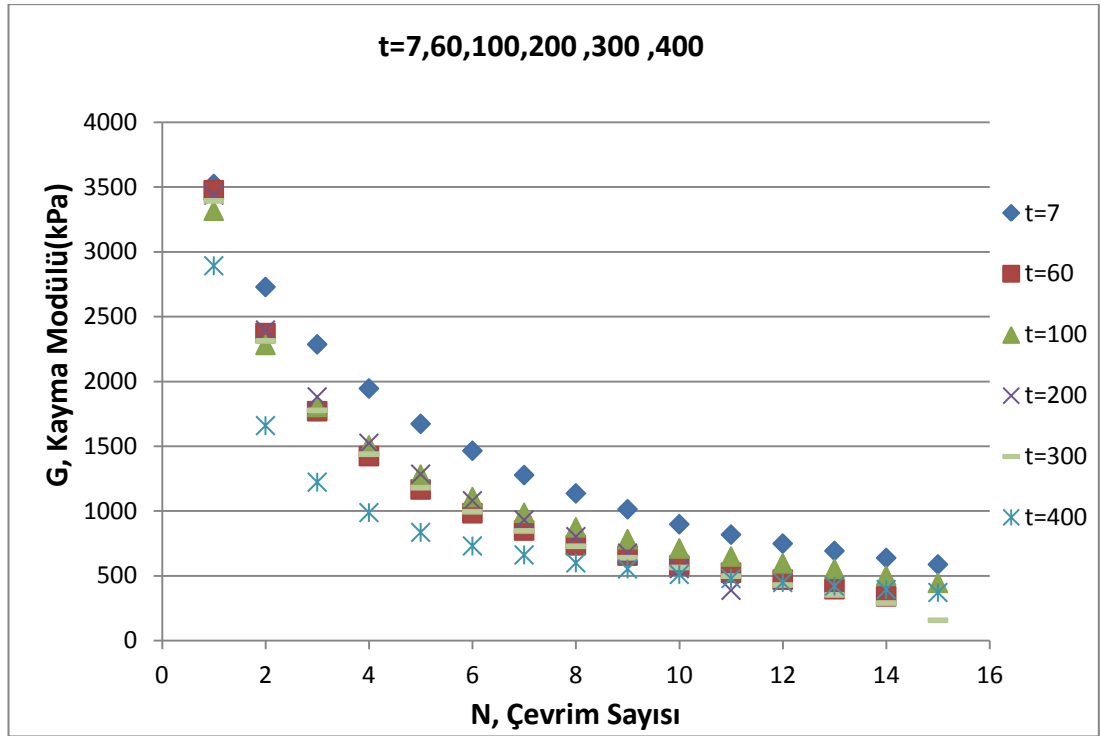
Şekil 6.9’da, Doğal Adapazarı Silti numunelerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçlardan elde edilen bazı veriler noktalanmıştır. Ayrıca bu veriler üzerinde regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan diğer regresyon analizleri EK – B’de verilmiştir.



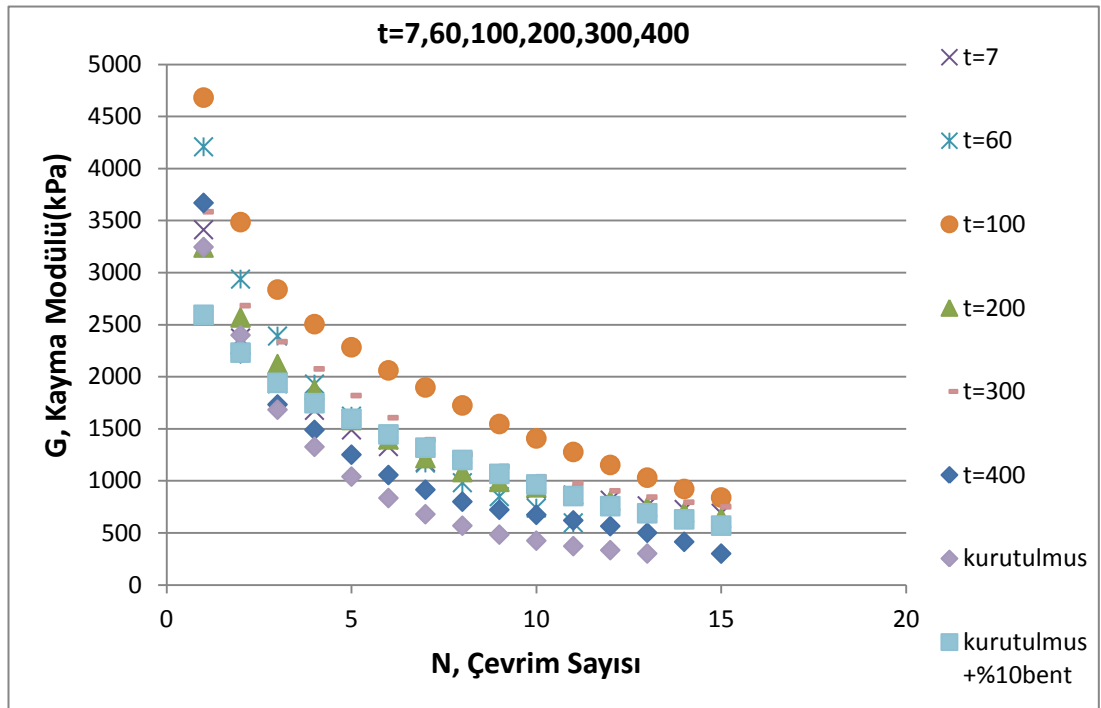
Şekil 6.9 Yaşlanmanın mekanik ve dinamik özelliklere etkisi (Doğal Adapazarı Silti)

Kiriş kayma modülleri incelendiğine, Doğal Adapazarı Silti numunelerinde beklenenin tersine numuneler yaşlandıkça, genel eğilim olarak, değerlerde bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 6.10) fakat bunu düşüş olarak değerlendirmek ileri çalışmalar gerektirmektedir. Yıkama siltinde ise yaşlanmaya bağlı olarak herhangi bir eğilim belirlenememiştir (Şekil 6.11). Karışımlarda kil katkısı olarak aşırı pelteci özelliği olan bentonitin dinamik kesme sırasında direncinin kaybolması bu tutarsızlığın nedeni olarak değerlendirilebilir.

Kiriş kayma modülleri 15. çevrime geldiğinde eğrilerin birbirlerine yaklaştığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebinin zemin danelerinin, *kalıntı* dirence ulaşması sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.10 Doğal Siltin Kayma modülünde değişim



Şekil 6.11 Yıkama Silti Kayma Modülünde değişim

Yaşlanmanın iyi korunmuş numunelerde önemli bir değişiklik oluşturmadığı görüşü ağırlık kazandığında, iyi korunmamış numunenin ne tür bir davranış göstereceğini anlama amacı ile kil içeriği %13 dolayında olan yıkama siltli numune oda ortamında kurutulduktan sonra DDSS deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 6.11'den görüldüğü gibi

kurutmanın, numunelerin kayma modülü azalımını fazla etkilemese de kayma modüllerini etkilediği gözlemlenmiştir. Örneğin, numunenin kil içeriği %20 veya daha fazla olursa, numunelerin kuru direncinin aşırı değerlere ulaşabileceği düşünüldüğünde, bu çalışmada kullanılan kil miktarını ($\leq\%15$) barındıran numunelerin deneysel çalışmalarda kullanılması, dinamik deneyler açısından sakınca yaratmayacaktır.

Genel değerlendirmede bentonitin, karışımlarda rijitliği değiştirerek numuneler hazırlanmasını sağladığı görülmüştür. Ancak bentonit yüzdeleri arttıkça titreşimli deneylerde pelteci özelliğin daha etkin biçimde devreye girmesiyle olası kıvam kaybının, numunenin rijitliğini hızla azaltabilme olasılığının öngörülmemesi çalışmanın bir eksiği olarak gösterilebilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneylerin sonuçlarına göre şu bulgulara ulaşılmıştır;

- Literatür incelendiğinde, zaman ya da yaşlanmanın mekanik özellikler açısından kumlarda killere oranla daha belirgin etkisi bulunduğu görülmüştür.
- Yaşlanmanın pH üzerindeki etkisi incelendiğinde, süreç içerisinde pH değerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Ancak bu sonuçların açıklanabilmesi için ileri çalışmalar gerekmektedir. pH değerindeki düşüşün flokülasyon ve dispersiyon durumları açısından bakıldığında önemli etkileri olduğu düşünülmektedir.
- Numuneler yaşlandıkça ve/veya bayatladıkça Doğal Adapazarı Silti, Yıkama Silti ve Doğal Adapazarı Silti + Ağırlıkça %10 Bentonit numunelerinin kayma modüllerinde herhangi bir düzenli değişim gözlemlenmemiştir. Doğal Adapazarı Silti + Ağırlıkça %10 Bentonit numunelerinden, sadece 7 ve 100 günlük numuneler karşılaştırıldığında kayma modüllerinde bir artış gözlenmektedir. Ancak yaşlanma mekanizmasının bu numuneler üzerinde etkisi olduğunu söyleyebilmek için ilave deney programının yürütülmesi gerekmektedir.
- Bu deney programında numuneler sıfıra yakın konsolidasyon gerilmesi altında bekletilmiştir. Bundan sonra yapılacak deneylerin konsolide edildikleri yük altında beklemiş örnekler üzerinde yapılması ve yeni bir yaşlanma değerlendirmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.
- Havada kurutulmuş yıkama siltinde kirli kayma modülünde düşüş gözlemlenirken, ağırlıkça %10 bentonit eklenmiş yıkama silti numunelerinde de 7 günlük yıkama silti numuneleriyle, birim şekil değiştirme açısından, aynı davranış görülmektedir. G_{secmax} düşük olarak başlamasına rağmen, bentonitin sönümlenme oranını azaltmasından ötürü, düşüş göreceli olarak daha azdır.

- Buradan, araziden alınarak laboratuvarda uzunca bir süre bekletilen ince daneli zemin numunelerinde, özellikle siltlerde, bayatlamanın deney sonuçları üzerinde olumsuz etkisi olmayacağı gibi bir sonuca varılmaktadır. Bunun nedeninin kil içeriklerinin %15'in altında kalmış olması nedeniyle yaşanma ya da kuruma ile silt danelerini tutan kil pulcuklarının sisteme ön gerilme sağlamaması, daha basit bir deyişle kuru direncin düşük kalması olduğu söylenebilmektedir.
- Doğal olarak bekletmenin doğal su muhtevasında değişikliklere neden olmayacak koşullarda yapılması önem taşımaktadır. Su içeriğindeki düşüşler sistemin doku ve yapısında önemli değişiklik oluşturacağından bu çalışmanın kapsamı dışında kalmaktadır.

8. KAYNAKÇA

- AASHTO T88-00.** 2004. "Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils"
- Afifi, S. S., Woods, R. D.** 1971. Long-term pressure effects on shear modulus of soils. *J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 97(10) , 1445-1460
- Amini, F ve Sama, K.M.** 1999. Behavior of stratified sand–silt–gravel composites under seismic liquefaction conditions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18 (1999) 445–455
- Arango, I., Miguez, R. E.** 1996. Investigation of the seismic liquefaction of old sand deposits. Rep. on Research, Bechtel Corporation, National Science Foundation Grant No. CMS-94-16169, San Francisco.
- ASTM D422 – 63.** 2007. "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils"
- ASTM D6528.** 2000. "Standart Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils"
- ASTM D653.** 2004. "Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids"
- Barton, M. E.** 1993. Cohesive sands: The natural transition from sands to sandstones. In: A. Anagnostopoulos, F. Schlosser, N. Kalteziotis, and R. Frank (Eds.), *Geotechnical Engineering of Hard Soils and Weak Rocks*, Balkema, Rotterdam, pp. 367–374.
- Baxter, C.D. P.** 1999. An experimental study on the aging of sands. Ph.D. dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, Va.
- Baxter, C. D. P. & Mitchell, J. K.** 2004. Experimental study on the aging of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130(10):1051-1062
- Bjerrum, L. And Landva, A.** 1966. Direct simple shear tests on Norwegian quick clay. *Geotechnique*, 26(1), pp. 1-20.
- Bjerrum, L.** 1967. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, 17, 81-118.
- Bjerrum, L.** 1973. Problems of soil mechanics and construction on soft clays. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3:111-159
- Bowman, E. T.** 2002. The Ageing and Creep of Dense Granular Materials, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Cambridge.
- Bray J. D., Sancio R. B., Durgunoglu H. T., Cetin K. O.** 2004. Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, p.673-685.
- BS1377:2.** 1990. "Particle size distribution pipette method"
- Cao, Y.L. ve Law, A.K.** 1991. Energy Approach for Liquefaction of Sandy and Clayey Silts. *Proceeding:2. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, 11-15 Mart, St.Louis, Missouri, 491-497
- Chang, N.Y., Yeh, S.T., Kaufman, L.P.** 1982. Liquefaction Potential of Clean and Silty Sands, 3. *International Earthquake Microzonations Conference Proceedings Vol. 2*, 28 june- 1 july, Seattle

- Charlie, W. A, Rwebyogo, M. F. J., and Doebling, D. O.** 1992. Time dependent cone penetration resistance due to blasting, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 8, pp. 1200–1215
- Daramola, O.** 1980. Effect of consolidation age on stiffness of sand, *Geotechnique*, Vol. 30, No. 2, pp. 213–216.
- Denisov, N.Y, Reltov, B.F.** 1961. The influence of certain processes on the strength of soils. 5th ICSMFE, Vol 1. Pp 75-78
- Dexter, A. R., Horn, R. and Kemper, W. D.** 1988. Two mechanisms for age-hardening of soil. *Journal of Soil Science*, 39: 163–175. doi: 10.1111/j.1365-2389.1988.tb01203.x
- Dowding, C. H., and Hryciw, R. D.** 1986. A laboratory study of blast densification of saturated sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 2, pp. 187–199
- Duran, İ.B., 2010.** Sismik etkiler alan, ince daneli zeminlerin rijitlik parametreleri açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi.
- Finn, W.D.L., Pickering, D.J. and Bransby, P.L.** 1971. Sand Liquefaction in Triaxial Test, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Eng. Division*, Vol. 97, No:
- Finn, W. D. L.** 1981. Liquefaction Potential: Developments Since 1976, *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, University of Missouri, Rolla, Missouri, 655-681
- Howie, J. A., Shozen, T., and Vaid, Y. P.** 2002. Effect of ageing on stiffness of very loose sand, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, pp. 149–157
- Human, C.** 1992. Time dependent property changes of freshly deposited or densified sands, Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley
- Hussein, A.K.** 1995. Undrained Cyclic Behavior of Nonplastic Silt, Cornell Üniversitesi,
- Ishihara, K. and Li, S.** 1972. Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsional Shear Test, *Soils and Foundations*, ICSMFE, Vol. 1.
- Ishihara, K., Sokekawa, M, Tanaka, Y.** 1978. Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sands containing silts, *Dynamics Geotechnical Testing*, ASTM Special Technical Publication 654, ASTM, 246-264
- Ishihara K., Troncoso J., Kawase Y. ve Takahashi Y.,** 1980. Cyclic strength characteristics of tailings materials. *Soils Foundations* 20 4, pp. 127–142.
- Ishihara, K.,** 1984. “Post-Earthquake Failure of a Tailings Dam due to Liquefaction of the Pond Deposit”. *Proc. Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engrg.* St. Louis, Missouri, Vol. 3, 1129-1143
- Ishihara, K.** 1985. Stability of natural deposits during earthquakes. *Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 321–376.
- Ishihara, K.** 1996. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Clarendon Press, Oxford.
- ISO 14688-1.** 2002. “Geotechnical investigation and testing -- Identification and classification of soil”
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y.** 1978. Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading, *Soils and Foundations*, 18, 1: 39-50.
- Jamiolkowski, M.** (1996). Baxter’ın Jamiolkowski ile yaptığı kişisel görüşme.
- Joshi, R. C., Achari, G., Kaniraj, S. R., and Wijewera, H.** 1995. Effect of aging on the penetration resistance of sands, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 767–782.
- Kjellmann, W.** 1951. Testing the shear strength of clay in Sweden. *Geotechnique*, 2(3), p. 225.

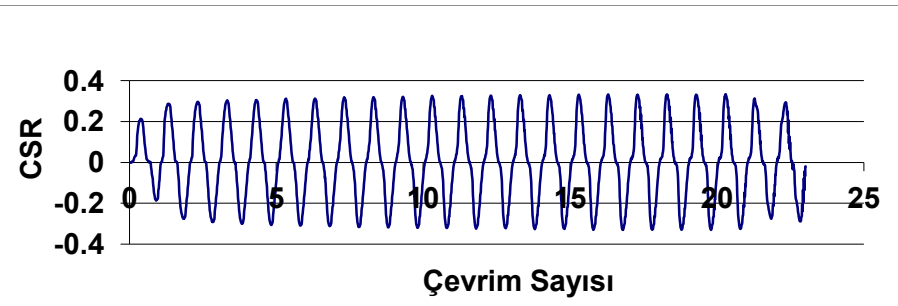
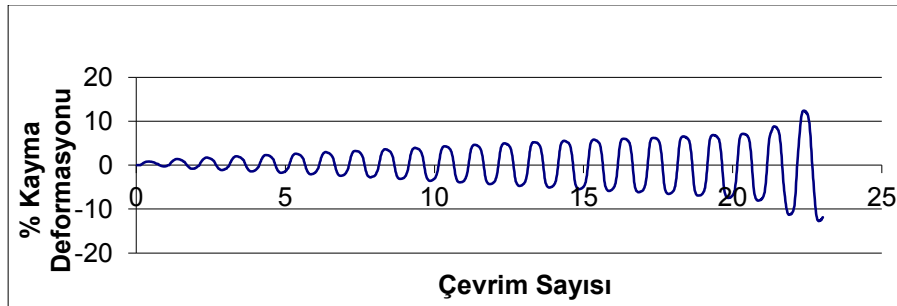
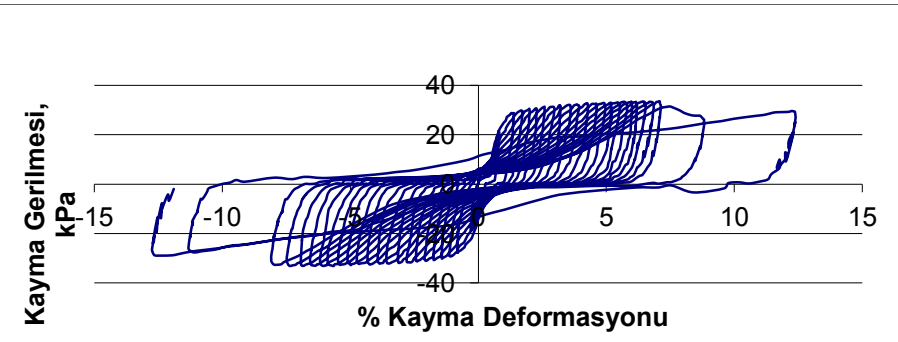
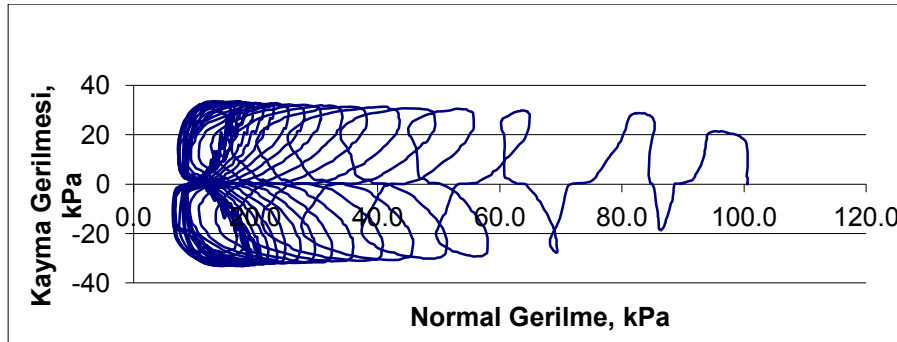
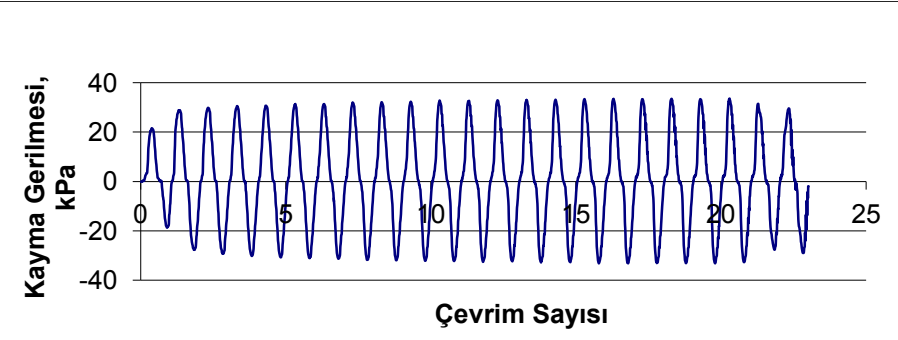
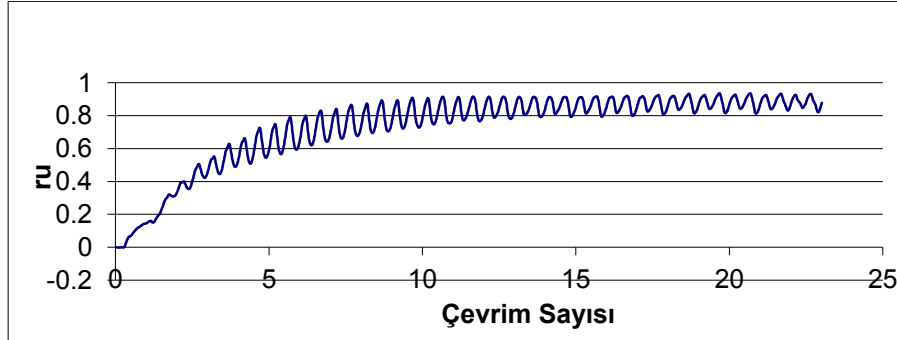
- Kokusho, T.** 1980. Cyclic triaxial test on dynamic soil properties for wide strain range. *Soils & Fndns* 20, No. 2, 4560.
- Kokusho, T.** 1987. In-situ dynamic soil properties and their evaluations, *Proc. of the 8th Asian Regional Conference on SMFE, Kyoto*, Vol. 2, pp. 215–235.
- Kramer, S. L.** 1995. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Kuerbis, R. and Vaid, Y. P.** 1988. Sand Sample Preparation-The Slurry Deposition Method, *Soils and Foundation*, Vol. 28, No. 4, pp. 107-118.
- Lade, P. V., and Liu, C.-T.** 1998. Experimental study of drained creep behavior of sand, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 124, No. 8, pp. 912–920
- Law, K.T. ve Ling, Y.H.** 1992. Liquefaction of Granular Soils with Non Cohesive and Cohesive Fines, *Earthquake Engineering*, 10. World Conference, 1491-1496 sayfa
- Leonards, G. A., and Ramiah, B. K.** 1960. Time effects in the consolidation of clays. *STP 254, ASTM, Philadelphia, Pa.*, 116-130.
- Leroueil, S., Perret, D., Locat, J.** 1996. Strain rate and structuring effects on the compressibility of a young clay. *Measuring and Modeling Time Dependent Soil Behavior. Geotechnical Special Publication*, vol. 61. ASCE, pp. 137–150.
- Leung, C. F., Lee, F. H., and Yet, N. S.** 1996. The role of particle breakage in pile creep in sand, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 888–898.
- Losert, W., Geminard, J. C., Nasuno, S., and Gollub, J. P.** 2000. Mechanisms for slow strengthening in granular materials, *Physical Review E*, Vol. 61, No. 4, pp. 4060–4068.
- Martin, G.R., Finn, W.D.L. ve Seed, H.B.** 1978, Effects of System Compliance on Liquefaction Tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 104(4), 463-479
- Mejia, C. A., Vaid, Y. P., and Negussey, D.** 1988. Time dependent behaviour of sand. In: M. J. Keedwell (Ed.) *International Conference on Rheology and Soil Mechanics*, Elsevier Applied Science, London, pp. 312–326.
- Mitchell, J. K.** 1960. Fundamental aspects of thixotropy in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 86, No. SM 3, pp. 19–52.
- Mitchell, J. K., and Solymar, Z. V.** 1984. Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 110, No. GT 11, pp. 1559–1576.
- Mitchell, J. K.,** 1986. Practical problems from surprising soil behavior, *The Twentieth Karl Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 3, pp. 259–289.
- Mitchell, J. K.; Soga, K.** 2005. *Fundamentals of Soil Behavior (3rd Edition)*, John Wiley & Sons, 978-1-60119-299-8, Pg. 516.
- Miura S., Kawamura S., ve Yagi, K.,** 1995. “Liquefaction Damage of Sandy and Volcanic Grounds in the 1993 Hokkaido Nansel-Oki Earthquake.” *Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engg. An Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol. 1, 193-196
- Mori, K.** 1976. Factors affecting the liquefaction behavior of saturated sands. Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
- Mullilis, J. P., Chan, C. K. and Seed, H. B.** 1975. The Effects of Method of Sample Preperation on the Cyclic Stress-Strain Behaviour Sands, Report No. EERC 75-18, Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Murayama, S., Michihiro, K., and Sakagami, T.** 1984. Creep characteristics of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 2, pp. 1–15.

- Oda, M.** 1972. Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, *Soils and Foundations*, Vol. 12, No. 1, pp. 17–37.
- Önalp, A., Arel, E., Bol, E., Özocak, A., Sert, S.** 2007. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesinde Koni Penetrasyon Deneyi Sönümlenme Yönteminin Uygulanması TÜBİTAK, Proje No.104M387, 350s., Adapazarı.
- Özay, R., ve Erken, A.** 2003. Killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi, *İTÜ Dergisi*, no. 212: 55-63.
- Peacock, W. H., and Seed, H. B.** 1968. Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Condition, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Eng. Division*, Vol. 94, No:SM3, p.689-708.
- Pender, M.J., Peploes, R.J. and Duske, G.C.** 1992. Simple shear compaction of basecourse aggregates. 6th Australian and New Zealand Conference.
- Polito, C.P. ve Martin, J.P.** 2001, Effects of Nonplastic Fines on the Liquefaction Resistance of Sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Mayıs 2001, 408-414
- Port Harbour Research Institute of Japan,** 1997. Handbook on liquefaction remediation of reclaimed land. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Prakash, S. and Guo, T.** 1998. Liquefaction of silts with clay content. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ACSE, Seattle, WA, Vol. I, pp 337-348.
- Puri, V.K.** 1984. Liquefaction Behavior and Dynamic Properties of Loessial (silty) Soils. Ph.D. Thesis, University of Missouri – Rolla, Missouri
- Richards, N. P., and Barton, M. E.** 1999. The Folkestone Bed sands: microfabric and strength. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 32, pp. 21–44.
- Roscoe, K. H.** 1953. An Apparatus for the application of simple shear to soil samples. *Proc. 3rd. Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, , Sess. 2, pp. 186-191.
- Sawada, R., Takaki M., and Motohiro O.** 2007. The Influence of Ageing on the Strength Ratio Causing Liquefaction in Diluvial Ground. *Quarterly Report of RTRI* 48, no. 1: 58-63. doi:10.2219/rtriqr.48.58.
- Schmertmann, J. H.** 1991. The mechanical aging of soils. *Journal of geotechnical engineering*, vol. 117, no. 9, pp. 1288-1330.
- Seed, H.B., Idriss, I.M.,** 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *J. Soil. Mech. Foundat. Div., ASCE* vol. 97, no. SM9, 1249-1273.
- SM4, p.639-659.
- Thomann, T. G., and Hryciw, R. D.** 1992. Stiffness and strength changes in cohesionless soils due to disturbance, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, pp. 853–861.
- Tohno, I. ve Yasuda, S.,** 1981. “Liquefaction of the Ground During the 1978 Miyagiken-Oki earthquake” *Soils and Foundations*, 21(3), 18-34
- Troncoso, J.H. and Verdugo, R.** 1985. Silt content and dynamic behavior of tailing sands. 10th Intl. Soil Mechanics and Found. Eng’g., 3:pp. 1311-1314. San Francisco, California.
- Troncoso, J.H. and Garcés, E.** 2000. Ageing Effects in the Shear Modulus of Soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19, p. 595-601
- Tsuchida H.** 1970. Prediction and Countermeasure Against the Liquefaction in Sand Deposits, (in Japanese) in abstract of the *Seminar in the Port and Harbor Research Institute*, pp 3.1-3.33.
- Tübitak Projesi 106M042,** 2010. “İnce Daneli Zeminlerin Sismik Koşullarda Yenilmesinin Adapazarı Kriterleri ile Tanısında Dinamik Deneylerin Etkisi”

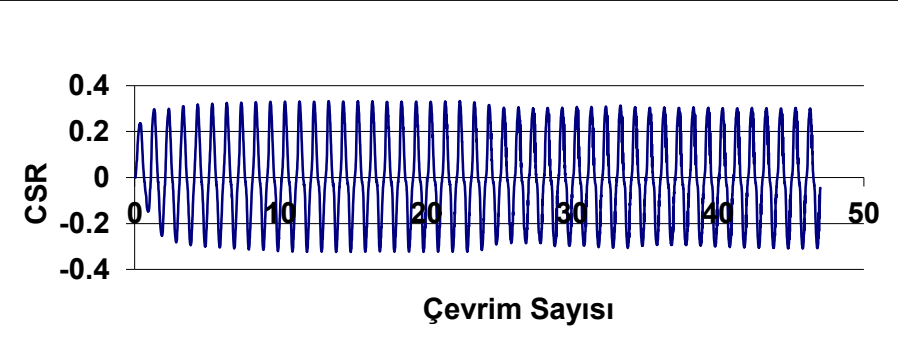
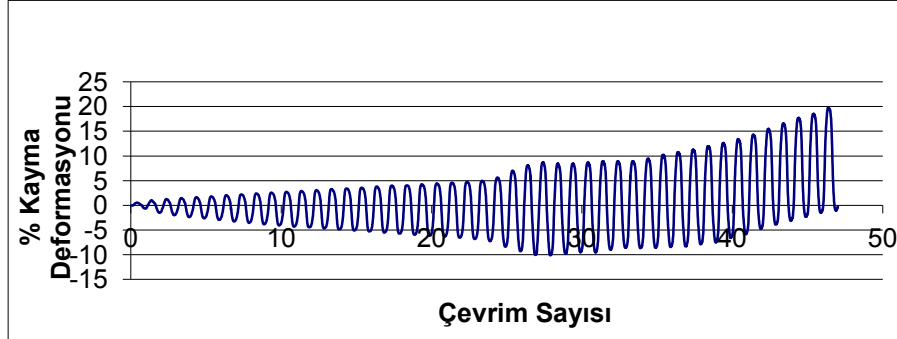
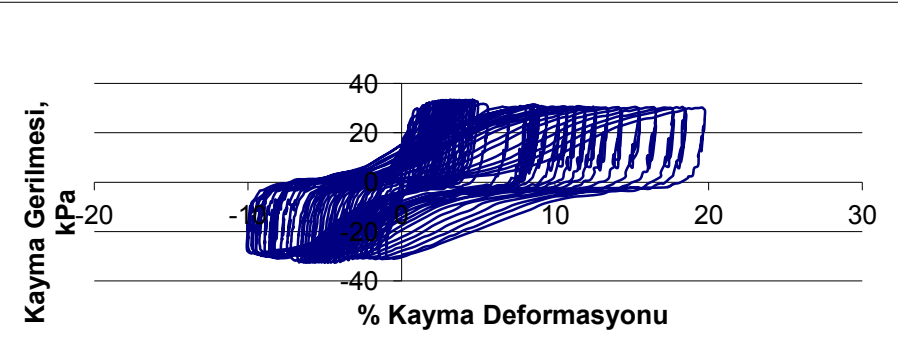
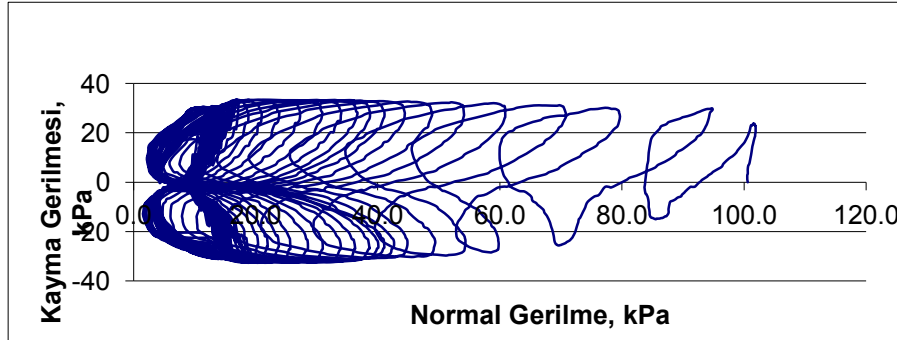
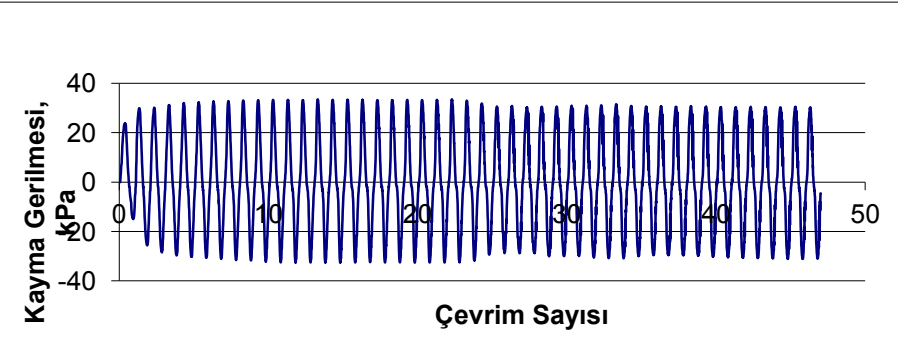
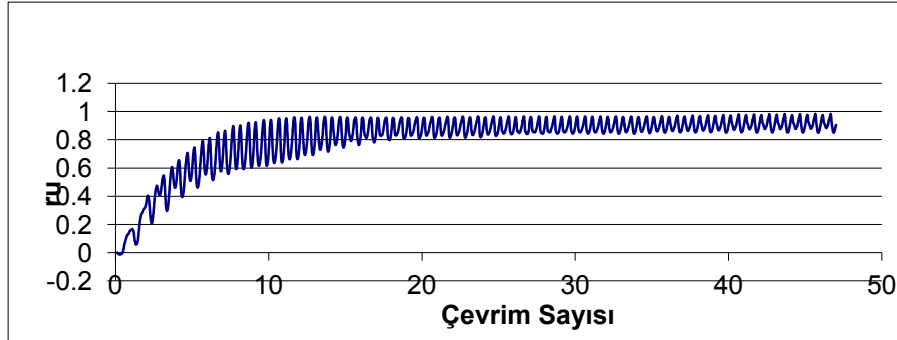
- Ural, N., Önalp, A. ve Bol, E.,** 2007. Siltlerin Sıvılaşma Tanısı 2. İMO Geoteknik Sempozyumu 22-23 Kasım 2007 Adana
- Ural, N.** 2008. İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi. Sakarya Üniversitesi, FBE. Doktora tezi.
- USDA,** “Part 618 – Soil Properties and Qualities – 43. Particle Size”
- Vaid, Y.P.** 1994. Liquefaction of Silty Soils, Ground Failures Under Seismic Conditions, ASCE Geotechnical Special Publication 44, 1-16 sayfa
- Wang, W.,** 1979. “Some Findings in Soil Liquefaction” Report Water Conservancy and Hydro-electric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1-17
- Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, Th.** 2004. Dynamic properties of sand. Faculty of Civil Engineering. University of Patras. http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~gn97/torsten/vortraege/patras_dynamic_2004.pdf
- York, D. L., Brusey, W. G., Clemente, F. M., and Law, S. K.** 1994. Setup and relaxation in glacial sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 9, pp. 1498–1513.
- Youd, T. L., and Hoose, S. N.** 1977. Liquefaction susceptibility and geologic setting. Proc., 6th World Conf. on Earthquake Engineering, New Delhi, India, Vol. 6, 37–42.
- Youd, T. L., and Perkins, D. M.** 1978. Mapping liquefaction-induced ground failure potential. J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 104, 433–446.
- Zeevaert, L.** 1983. Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, 510 sayfa, Van Nostrand Reinhold, New York.

EK – A

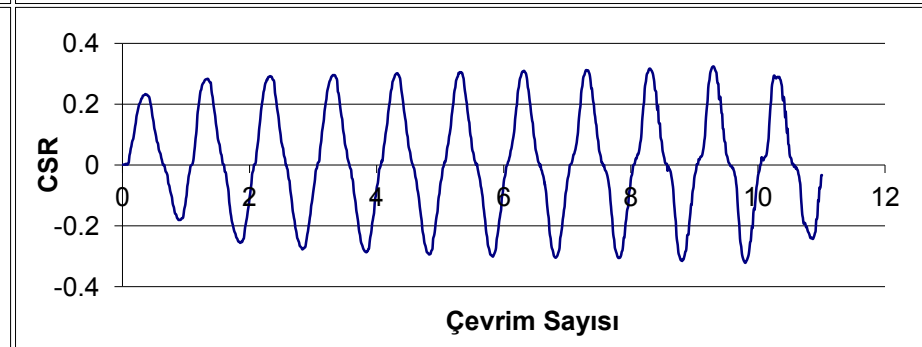
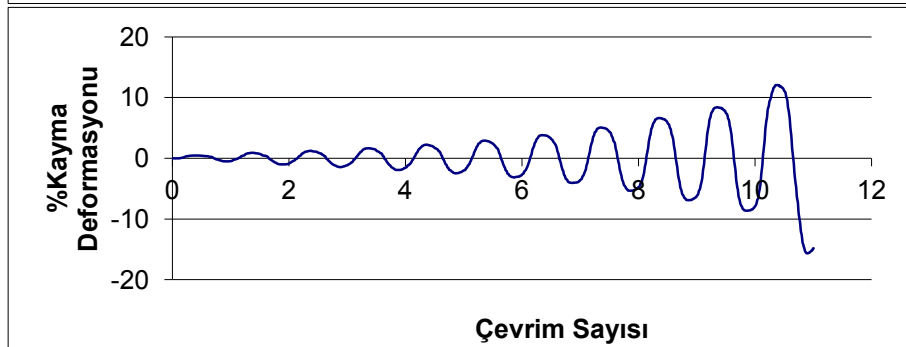
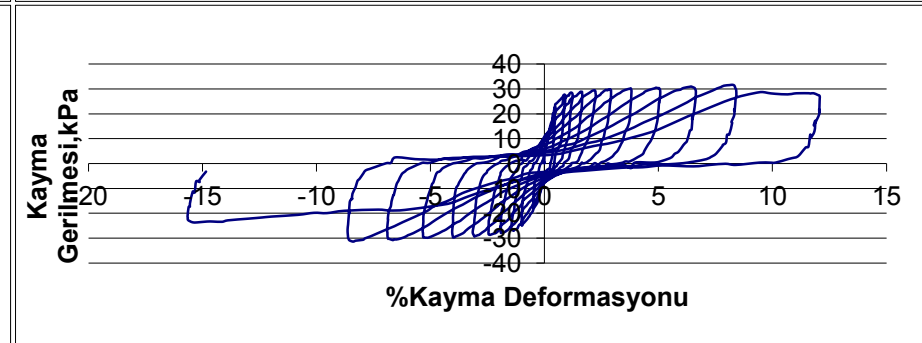
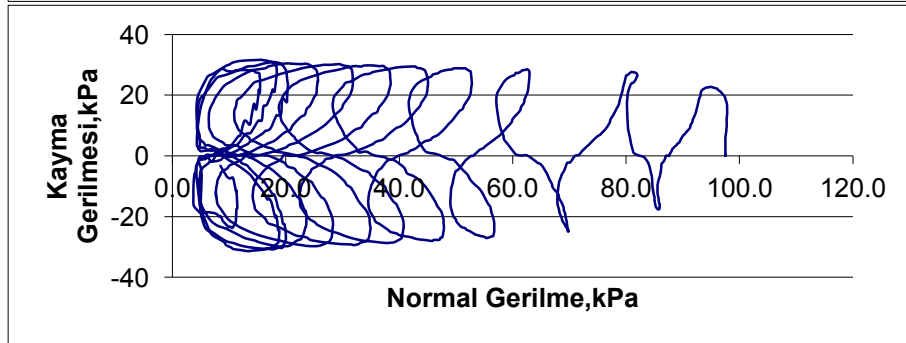
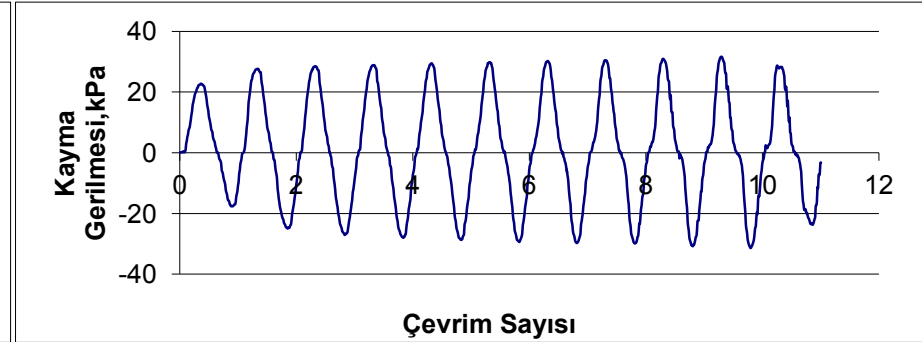
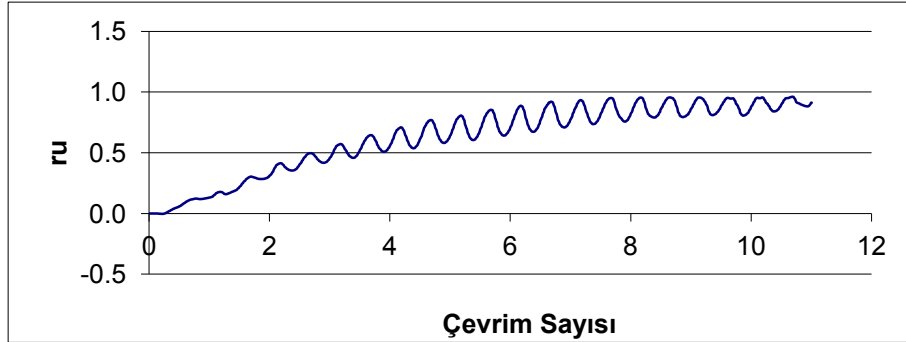
7 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ



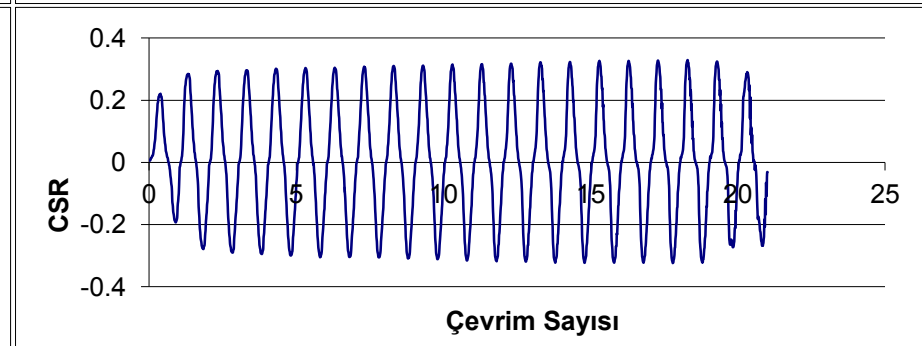
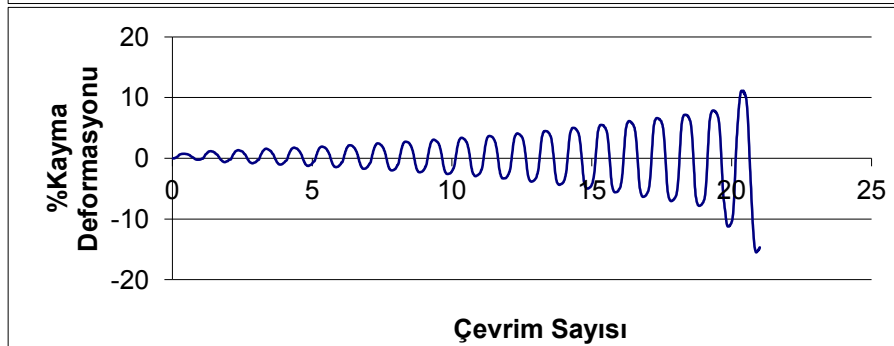
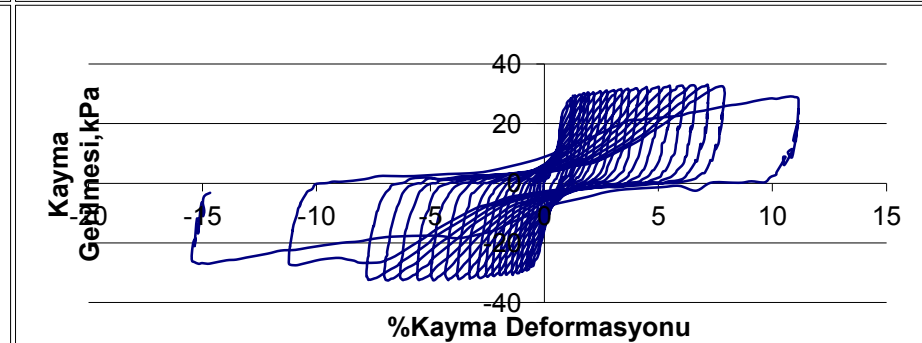
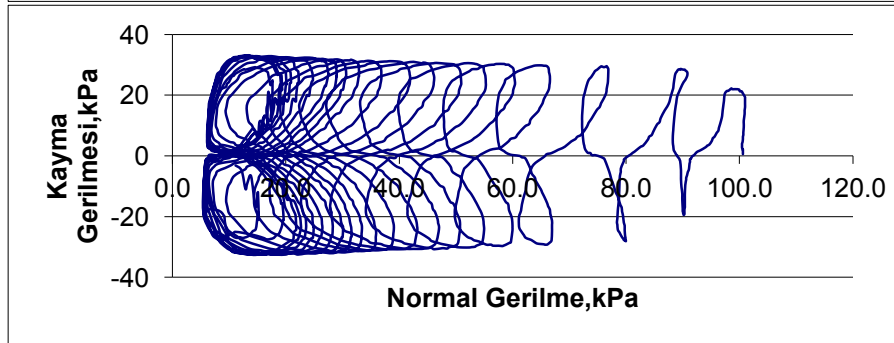
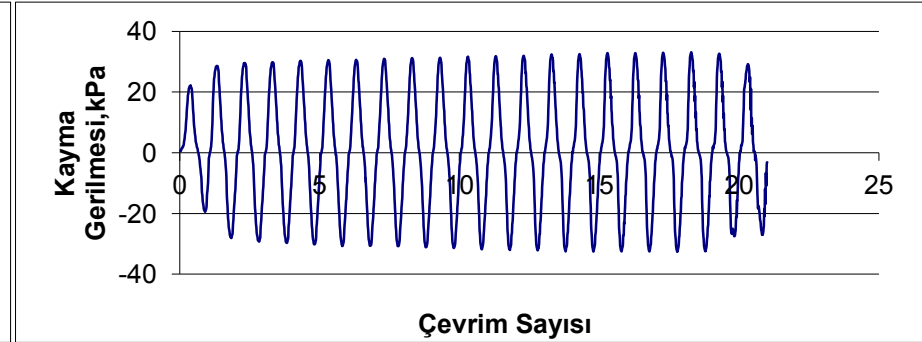
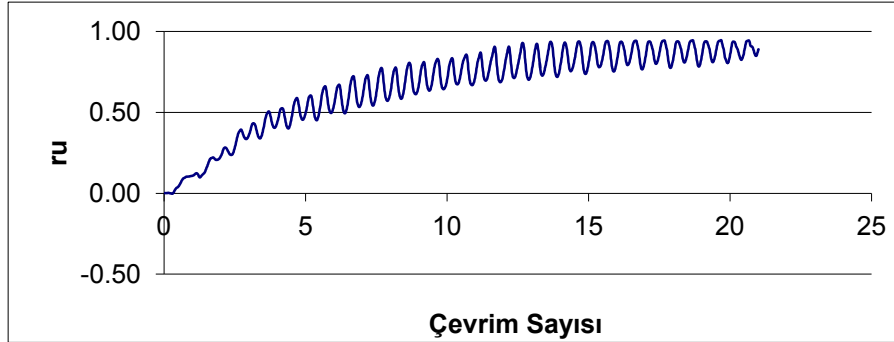
7 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ - 2



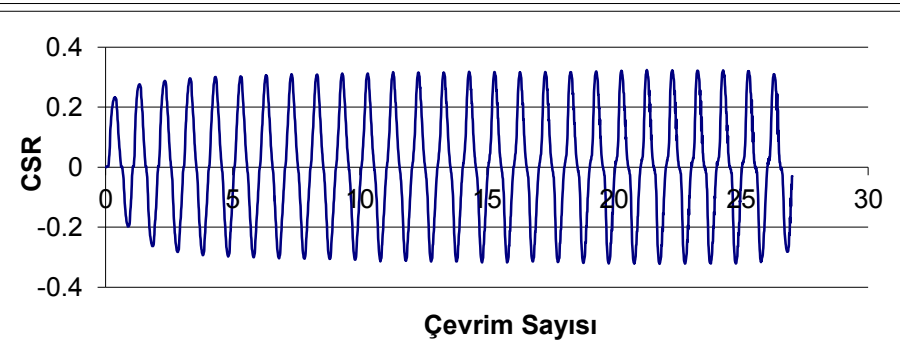
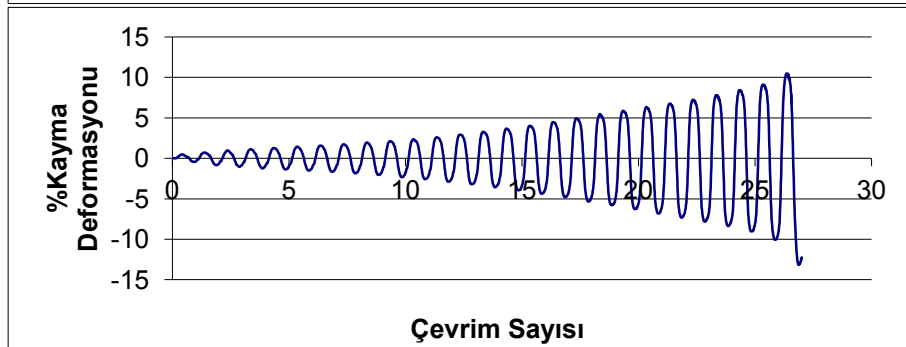
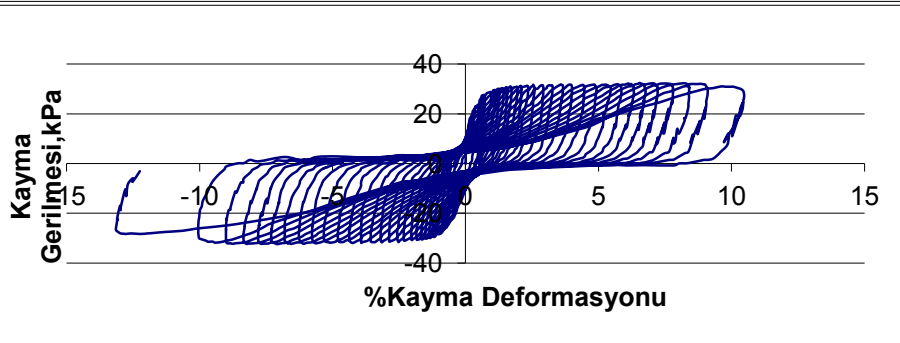
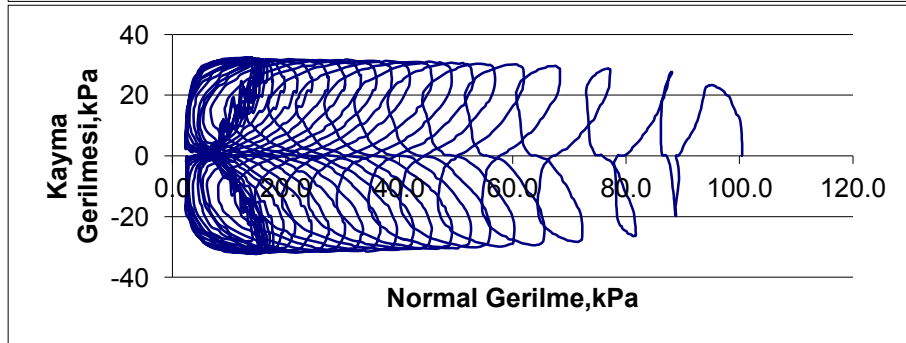
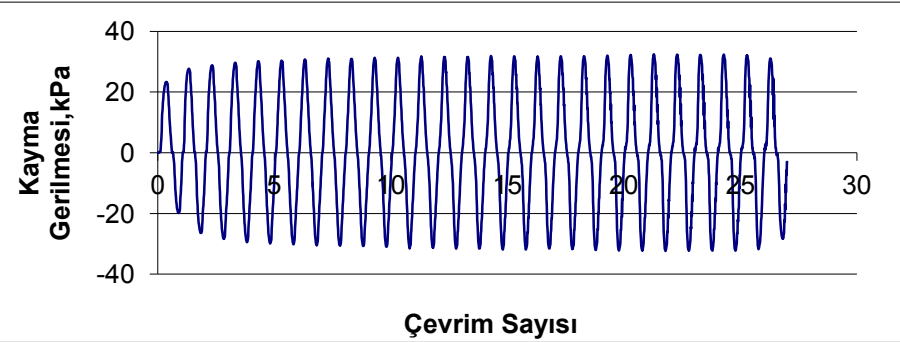
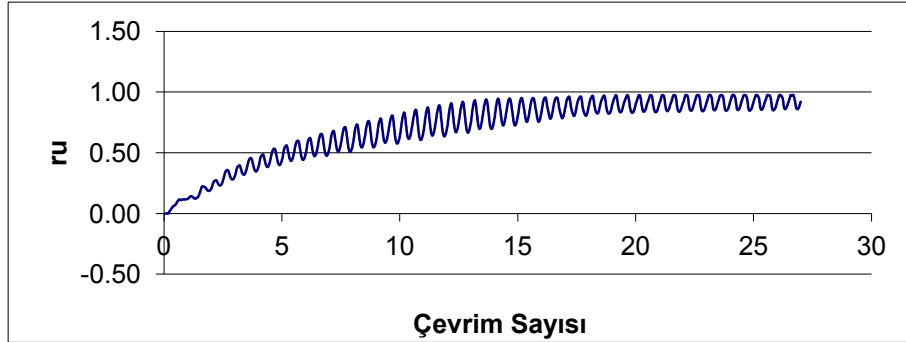
60 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ



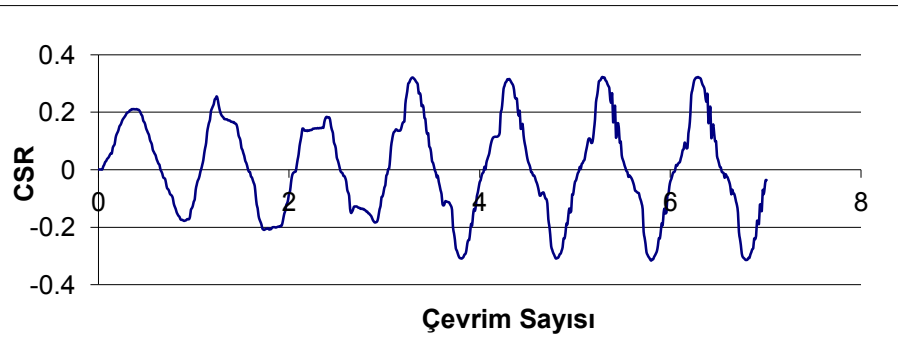
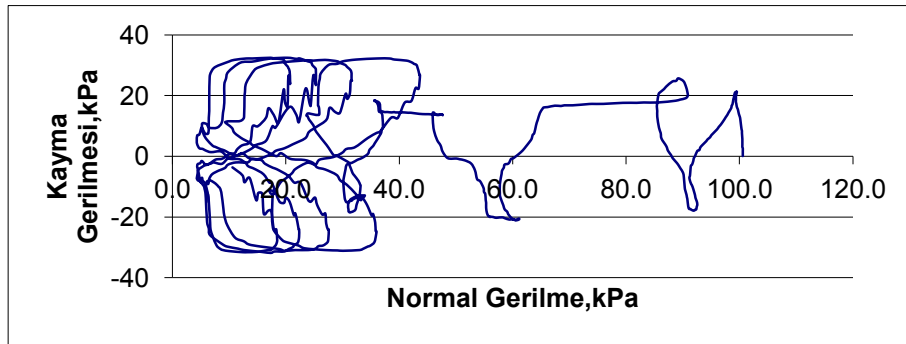
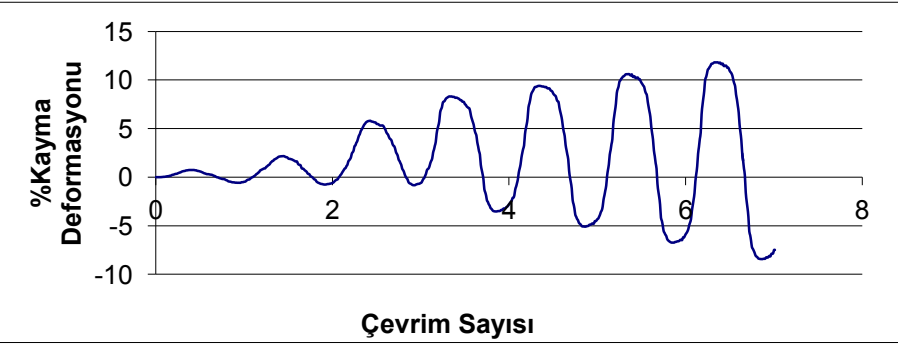
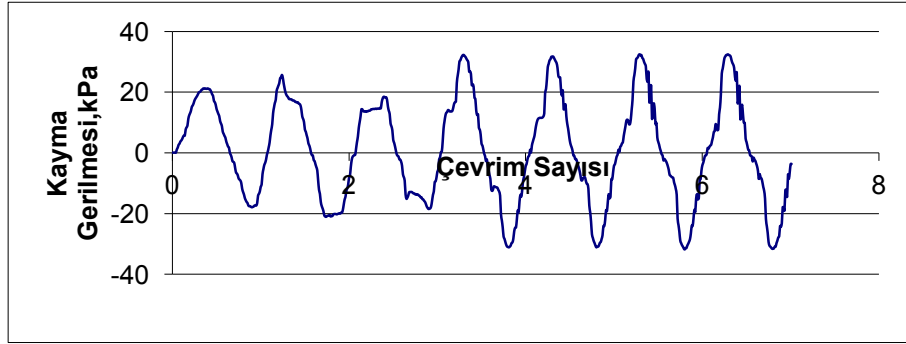
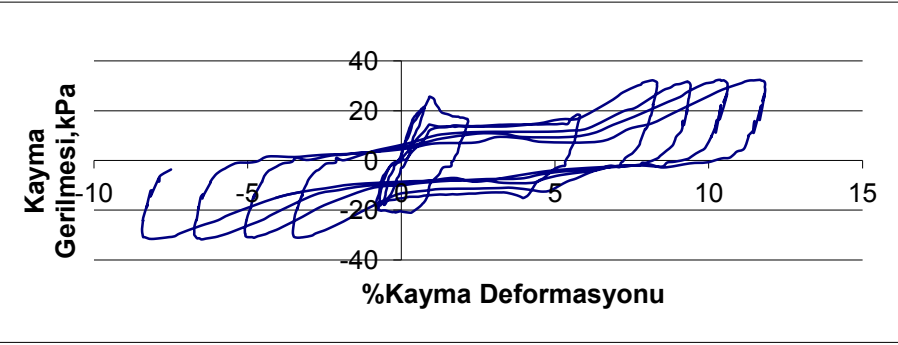
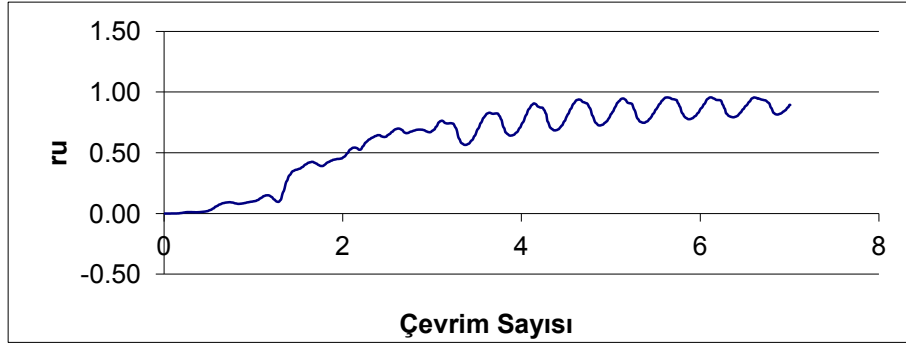
60 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ – 2



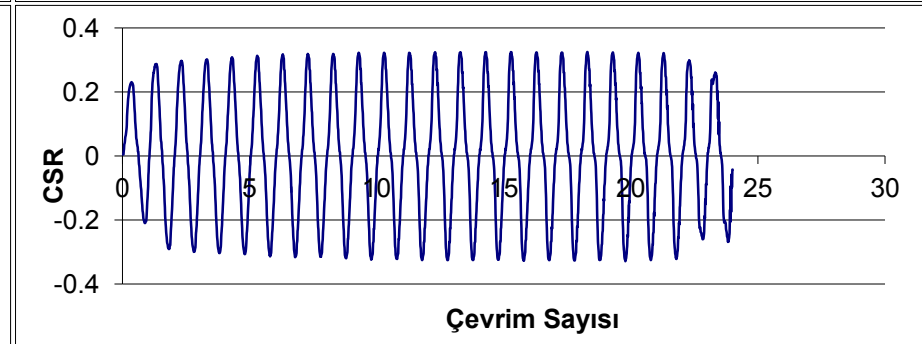
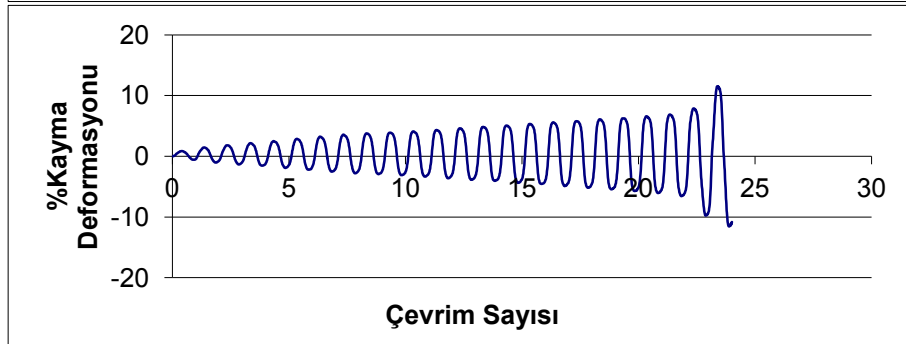
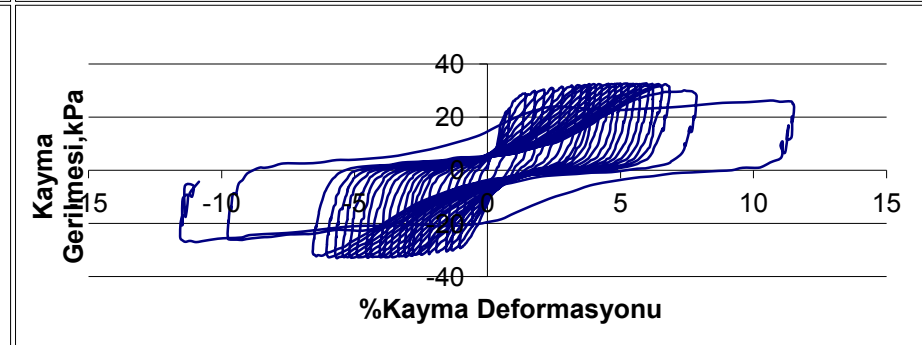
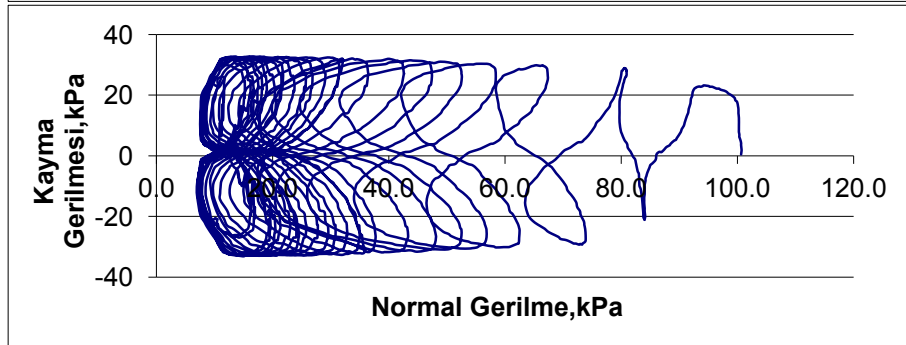
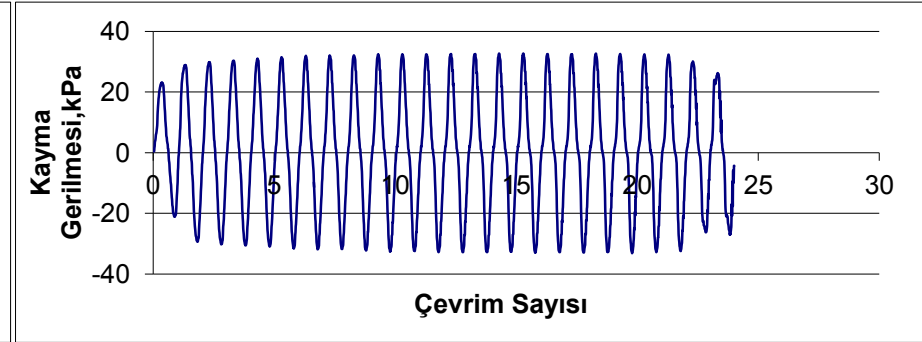
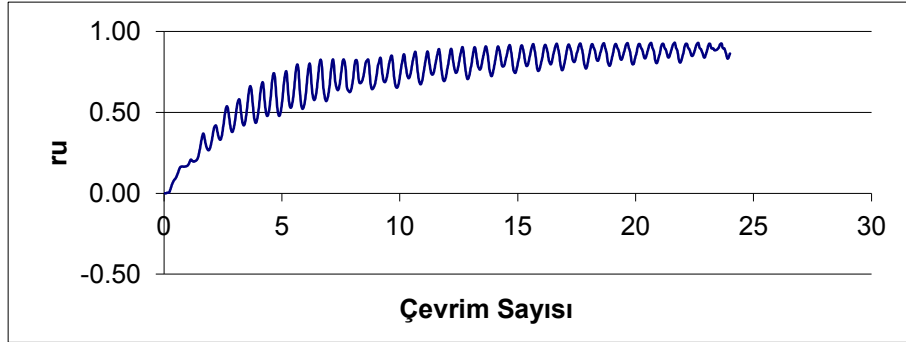
100 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ



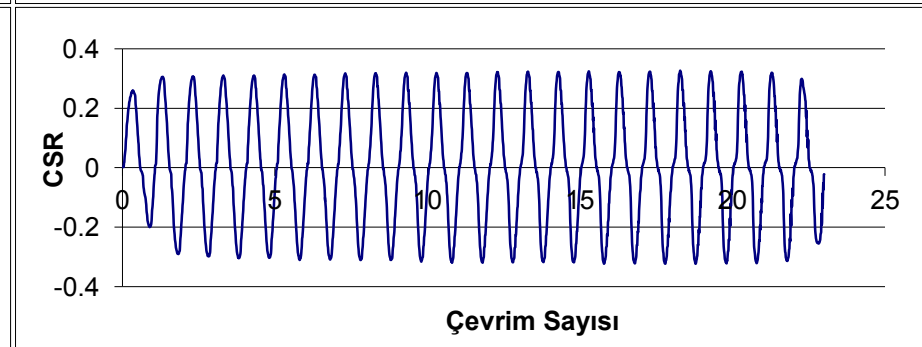
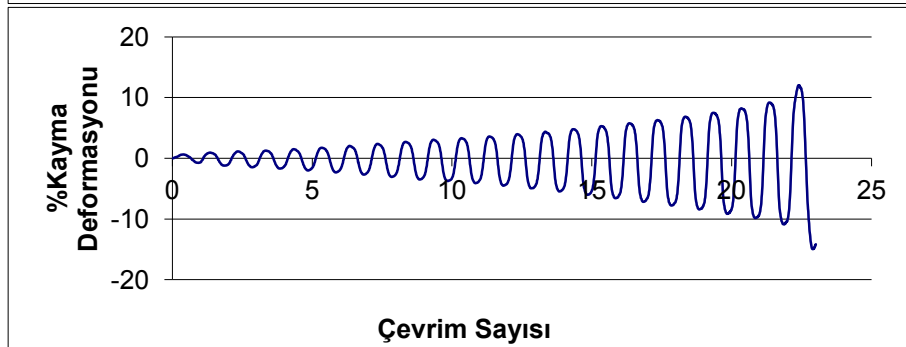
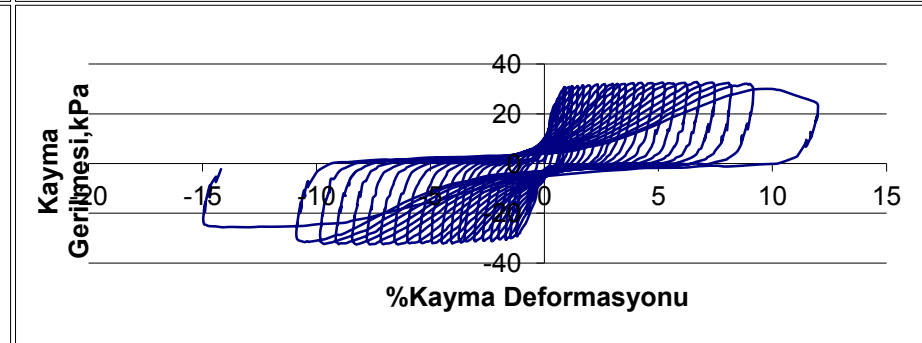
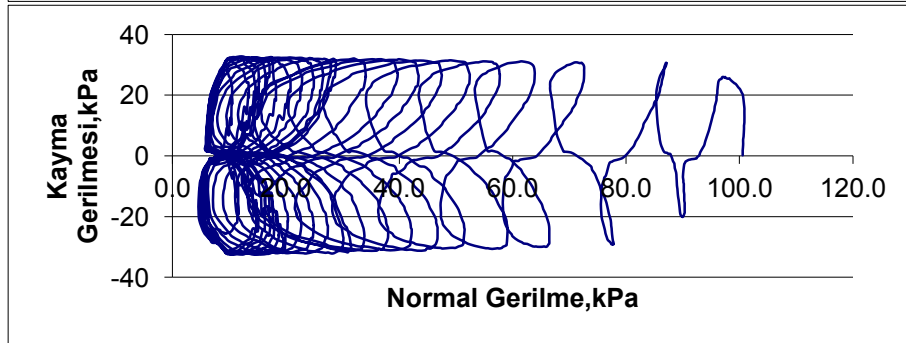
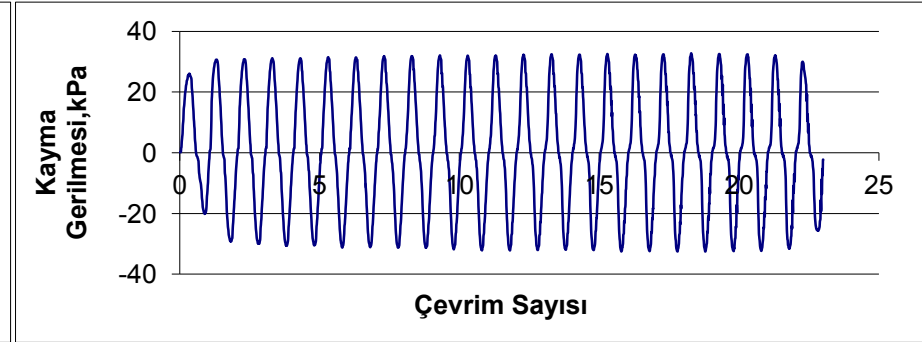
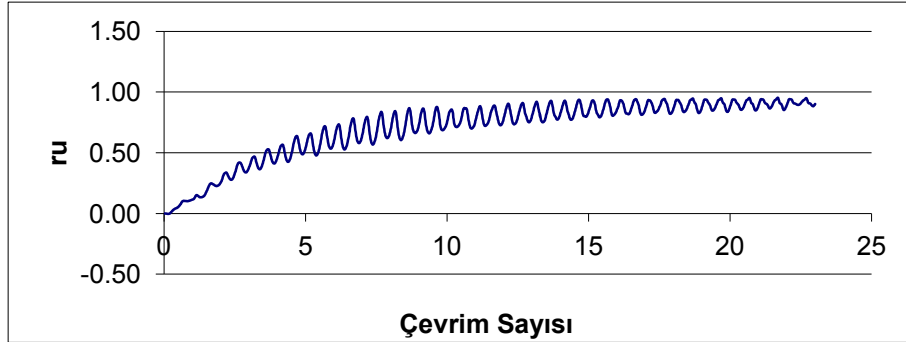
100 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ – 2



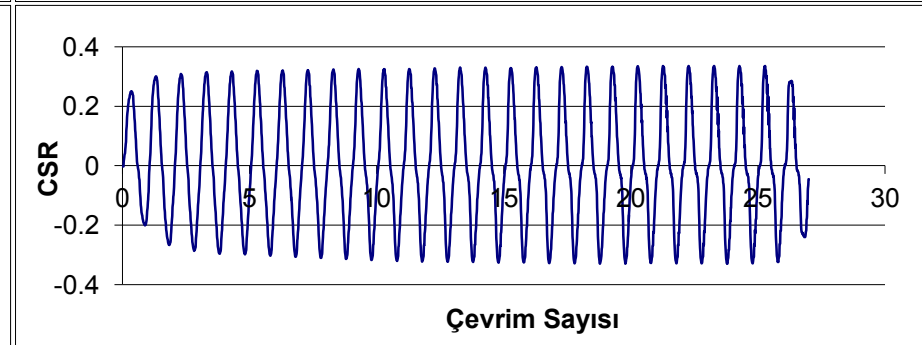
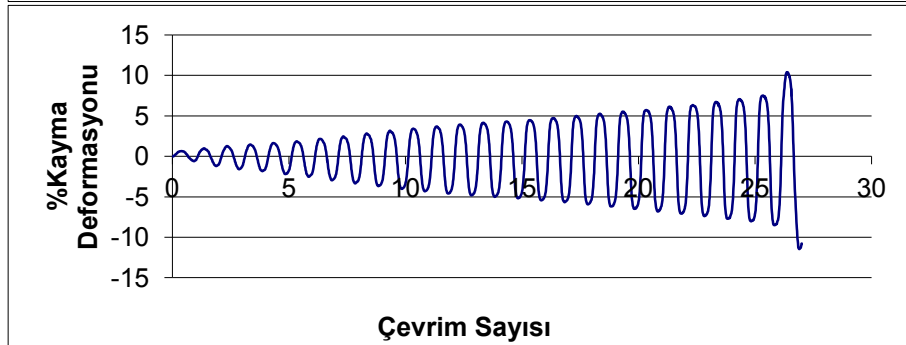
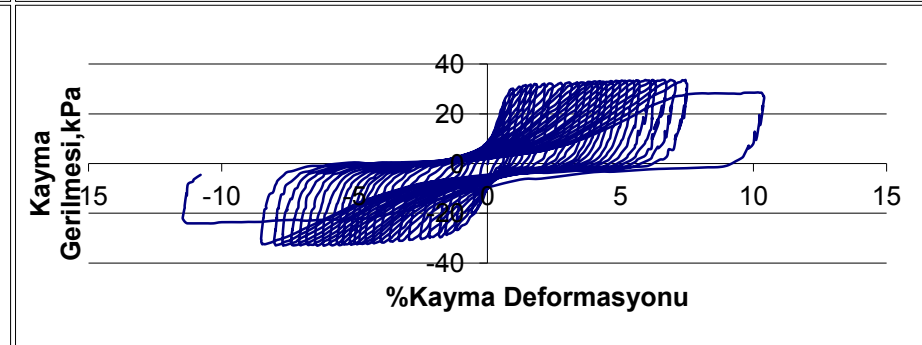
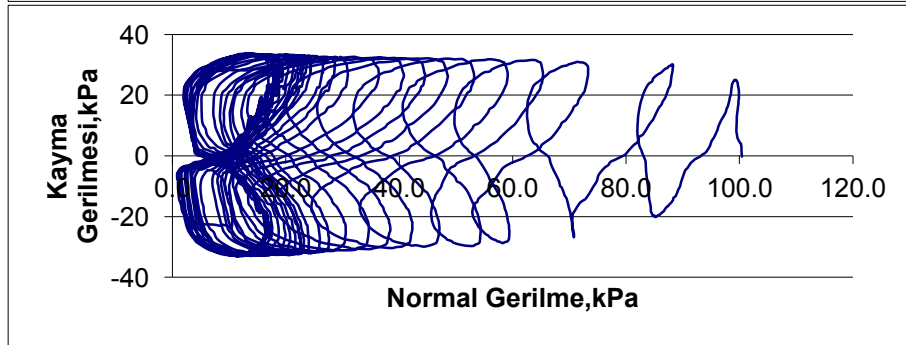
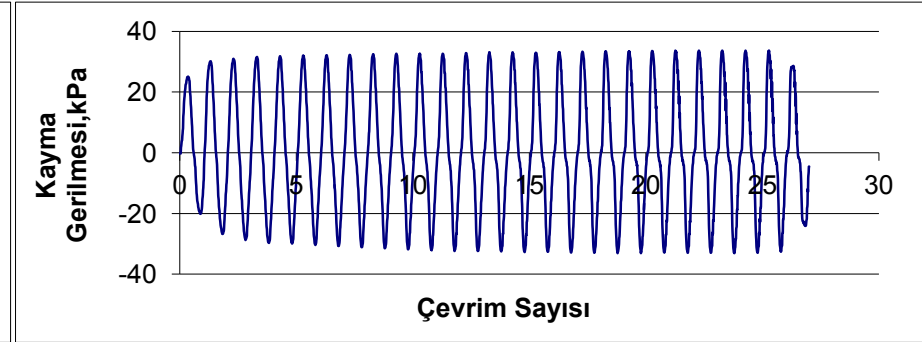
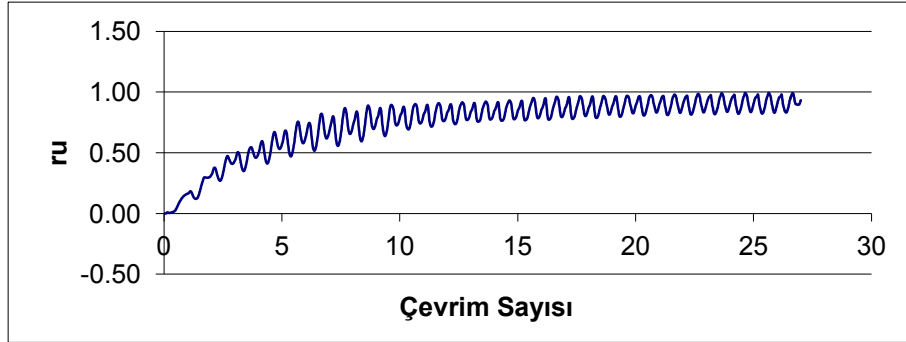
200 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ



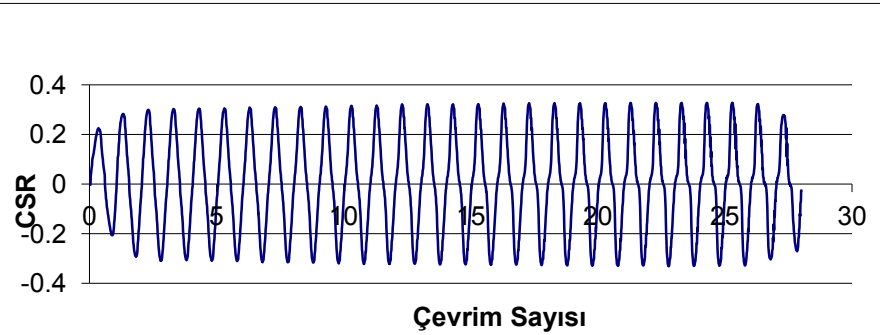
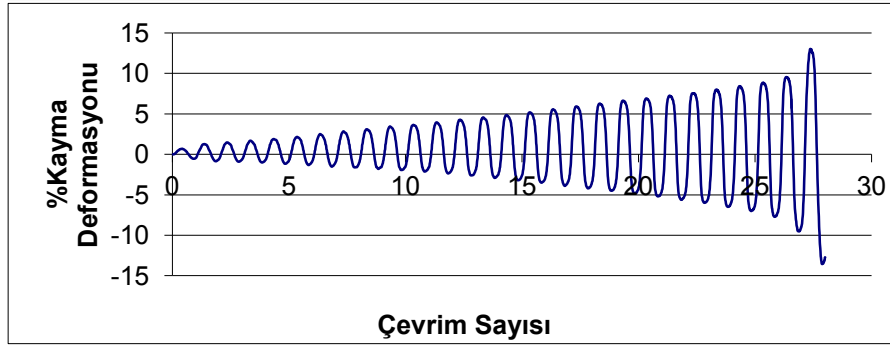
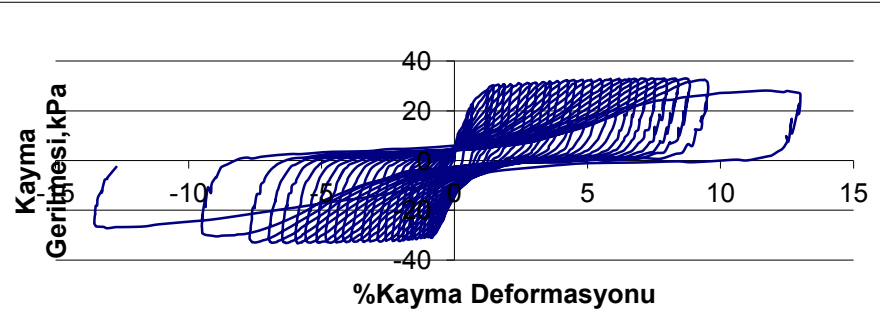
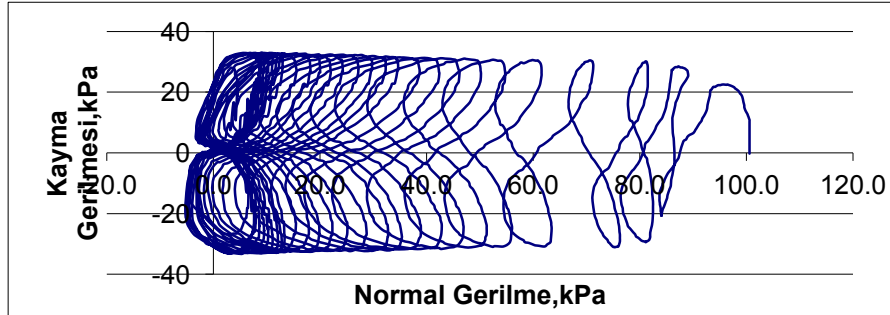
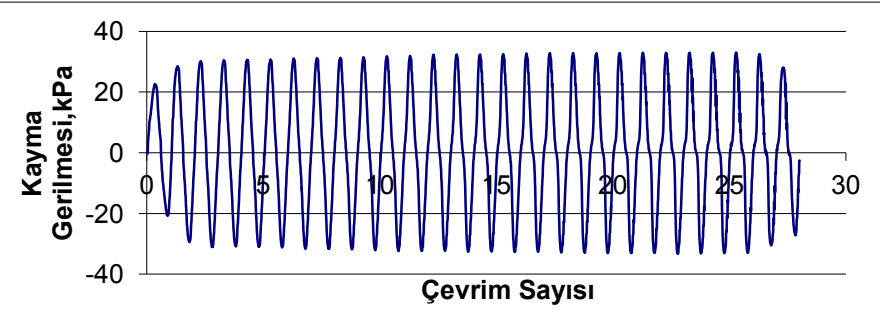
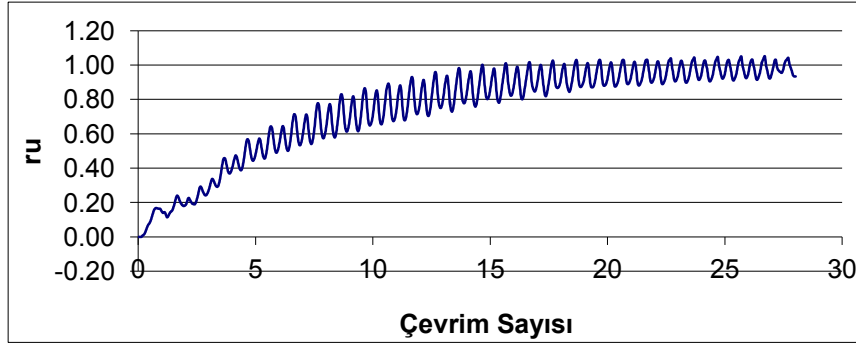
200 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ – 2



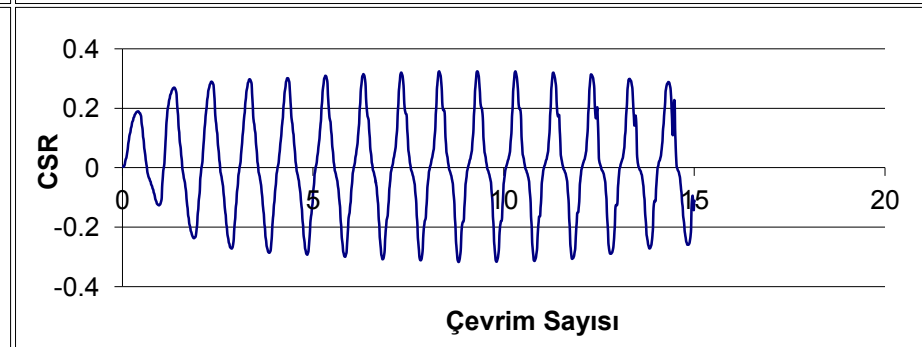
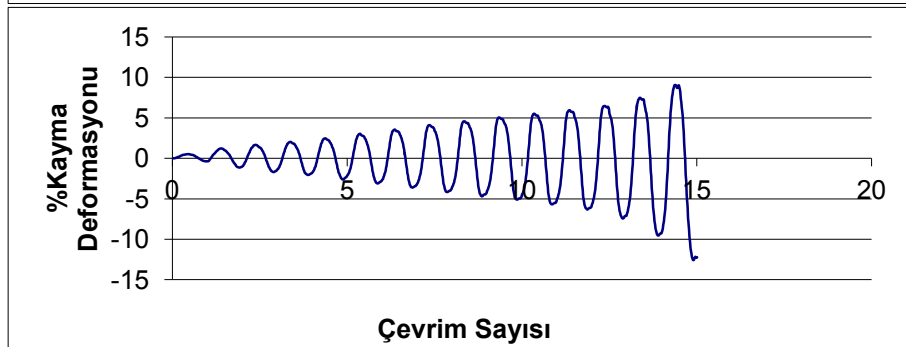
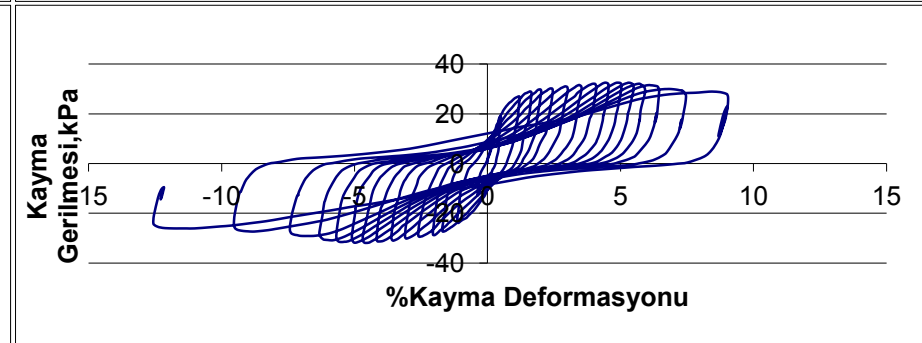
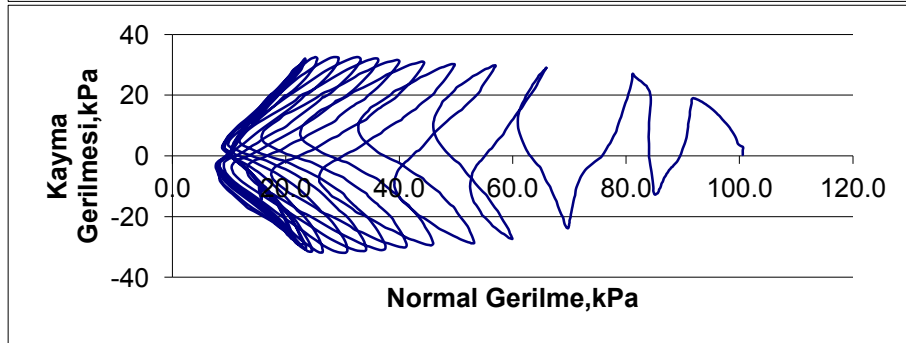
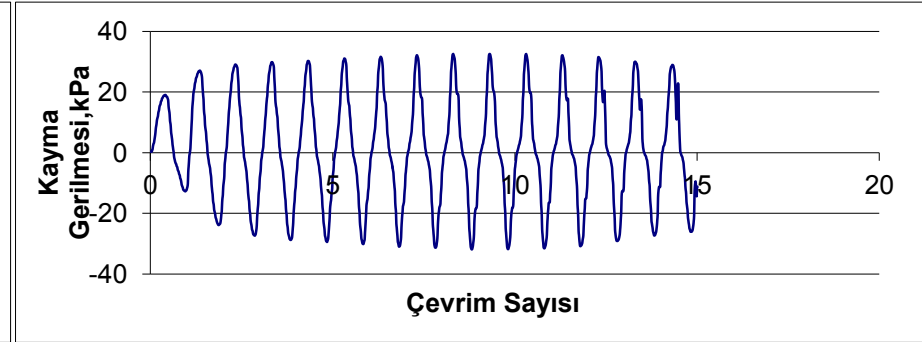
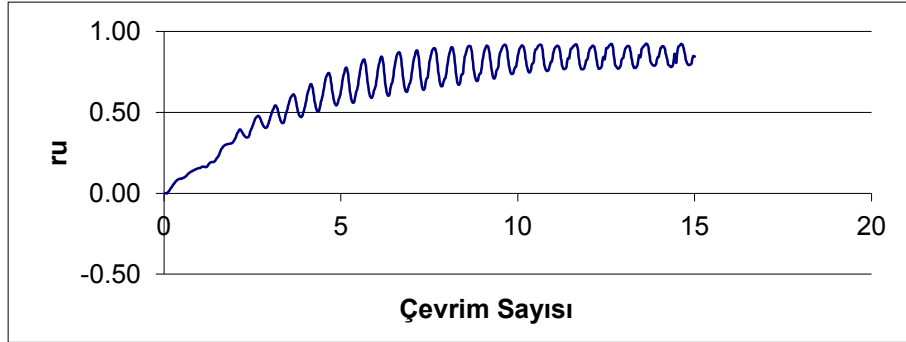
300 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ



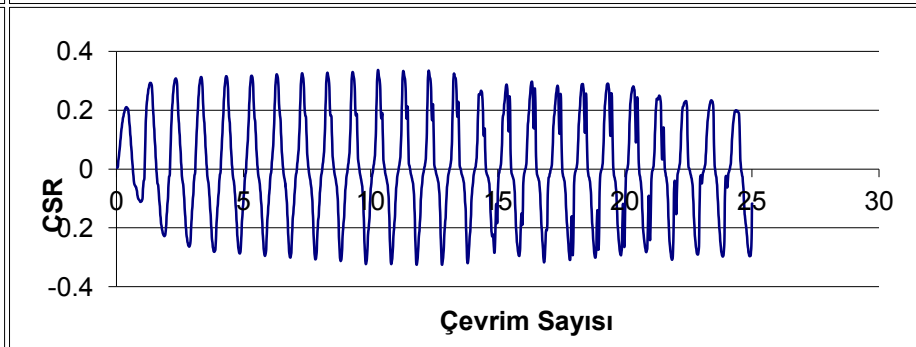
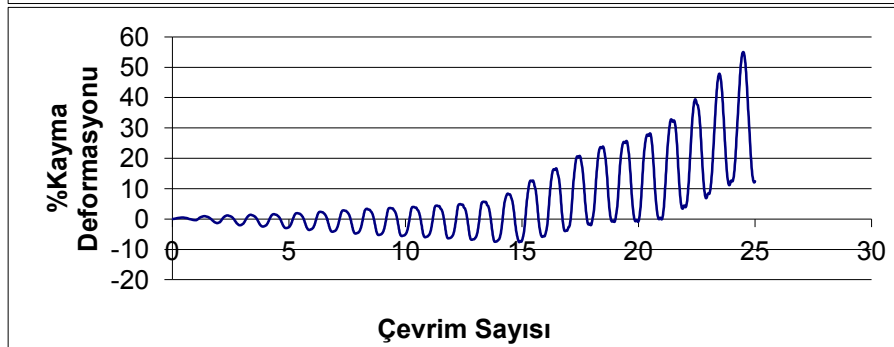
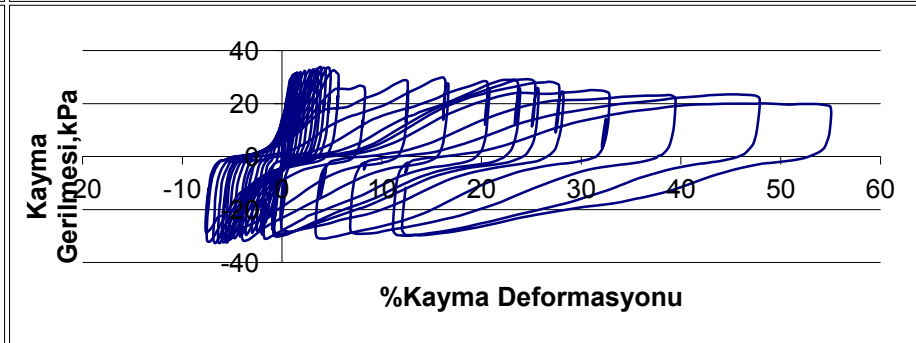
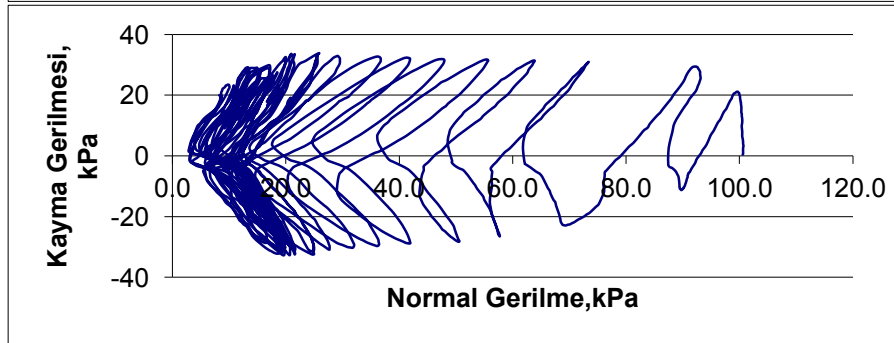
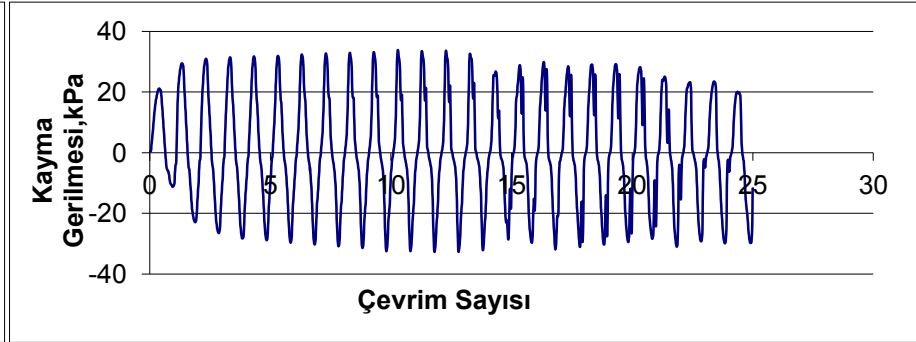
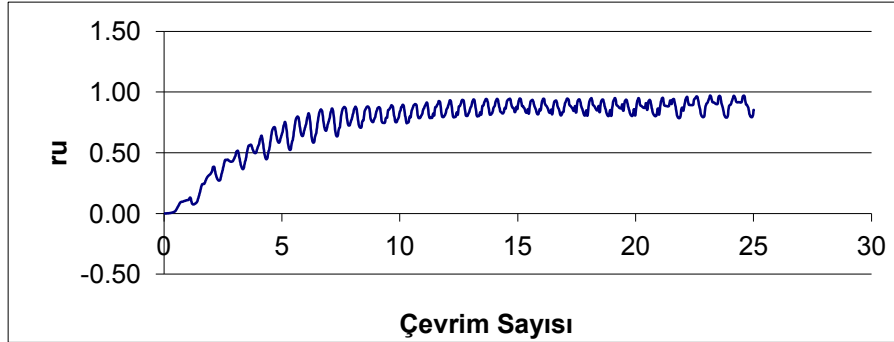
300 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ – 2



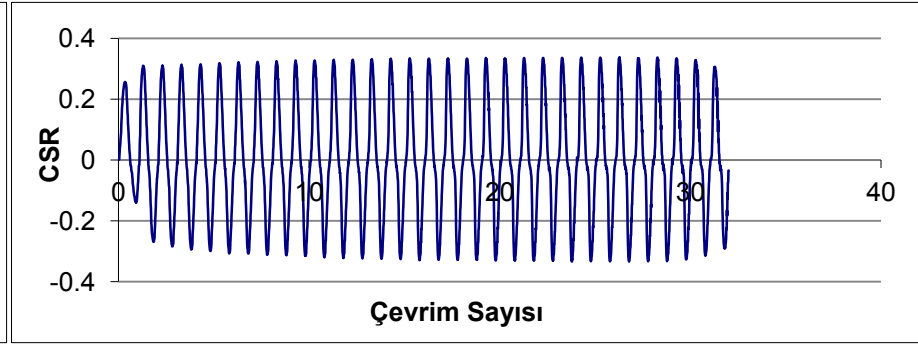
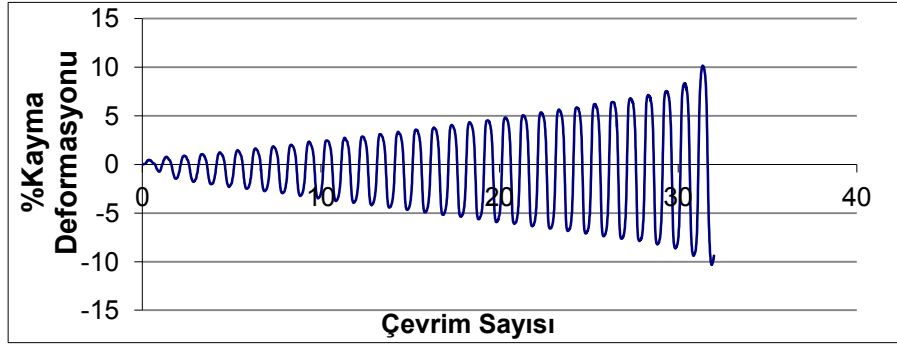
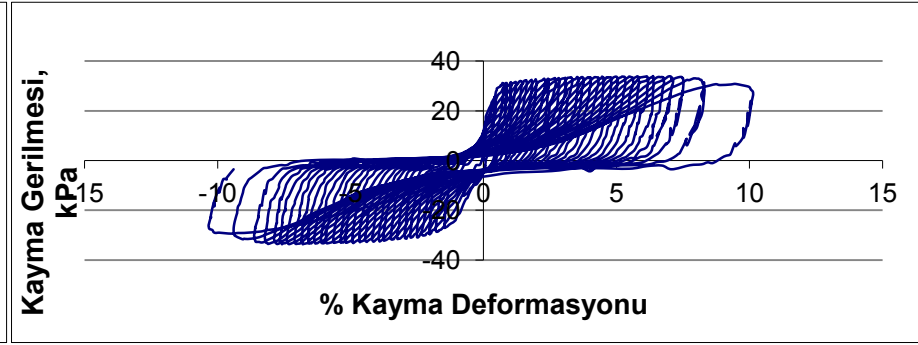
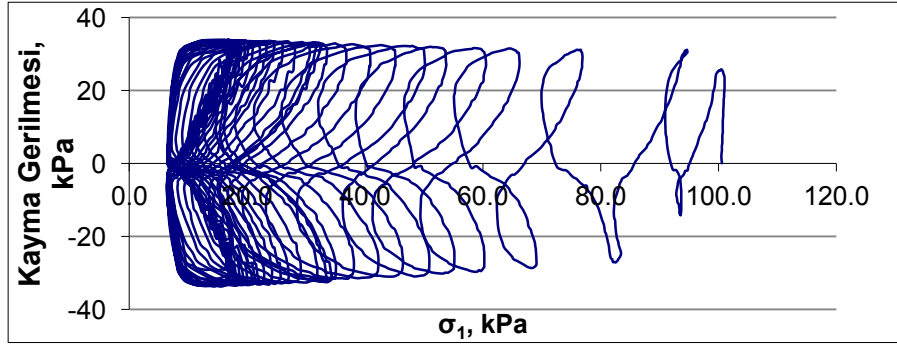
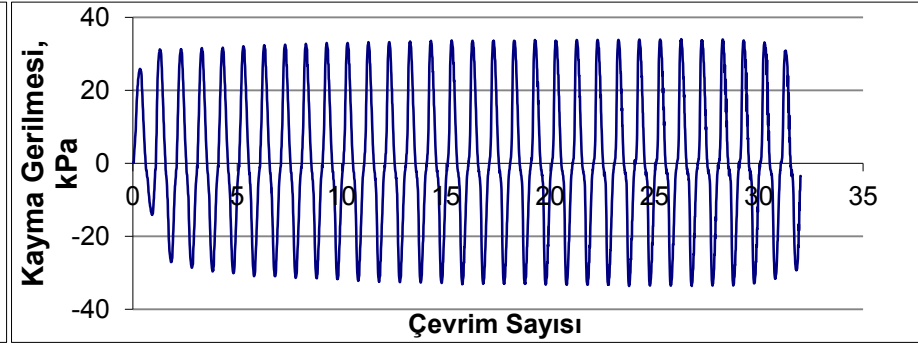
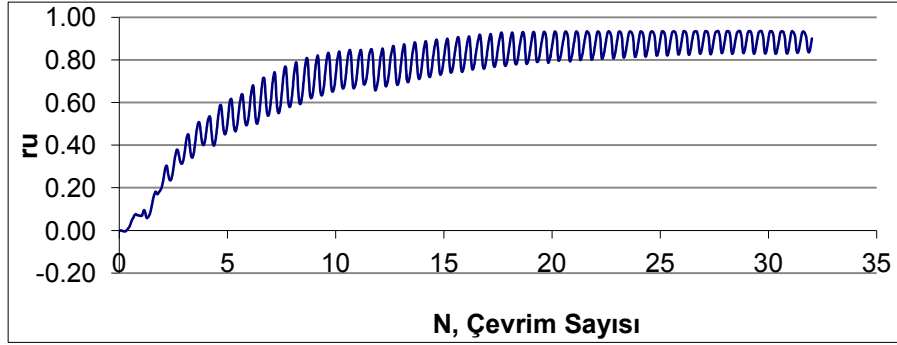
400 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ



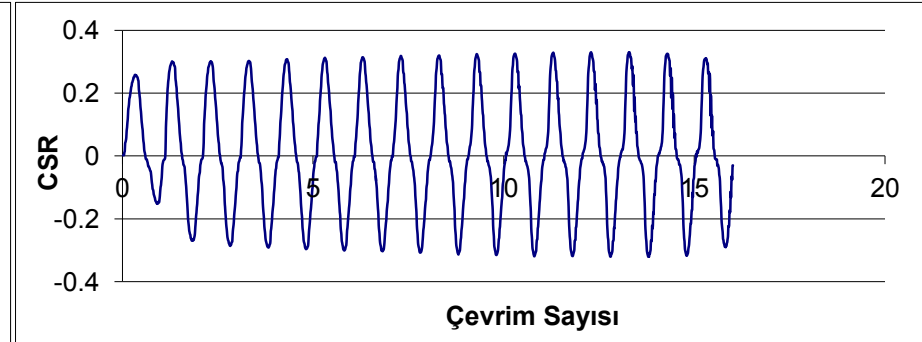
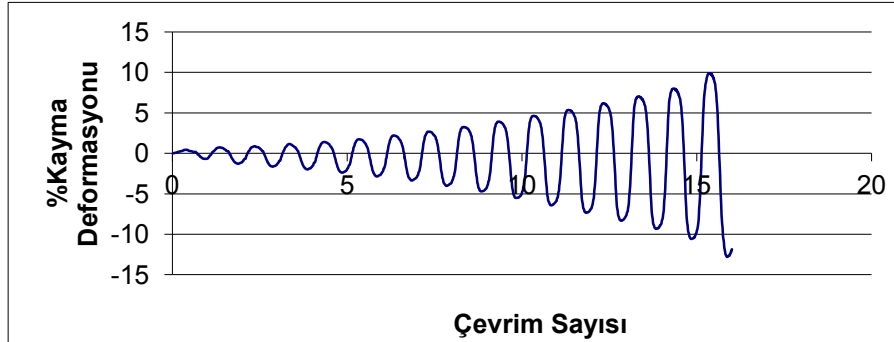
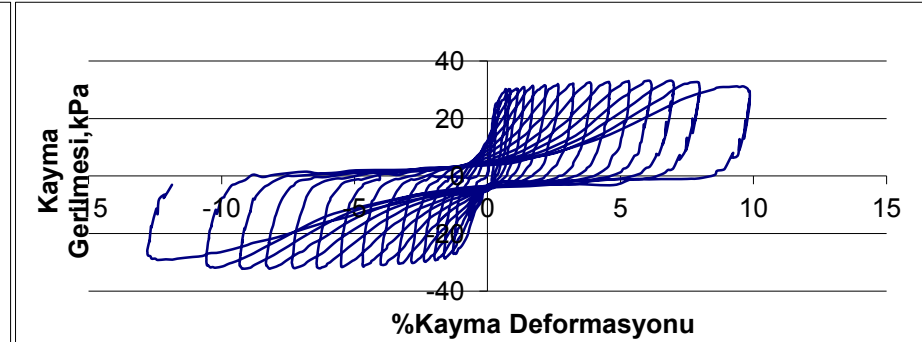
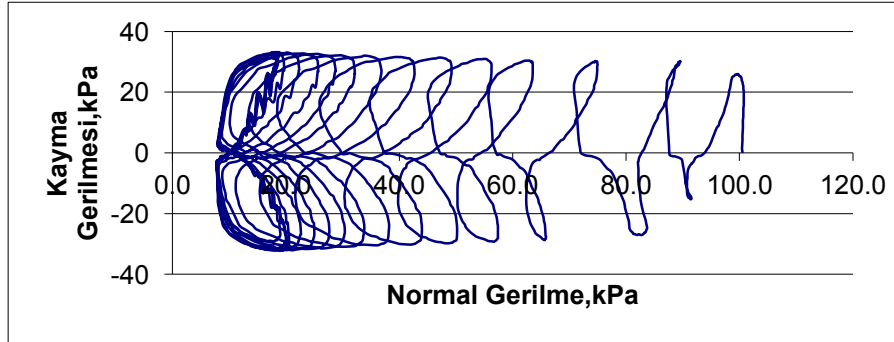
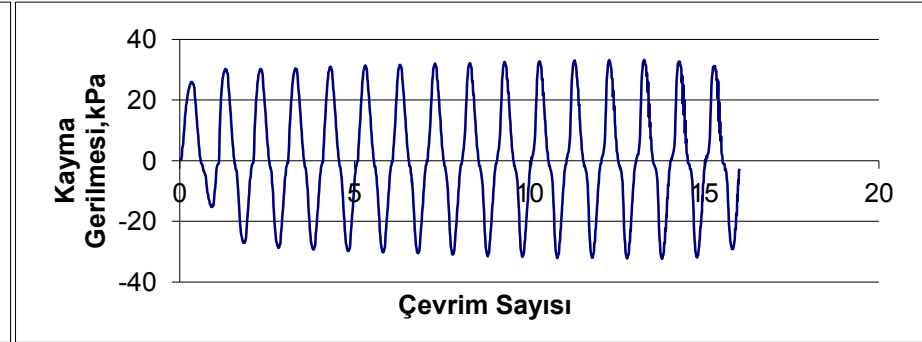
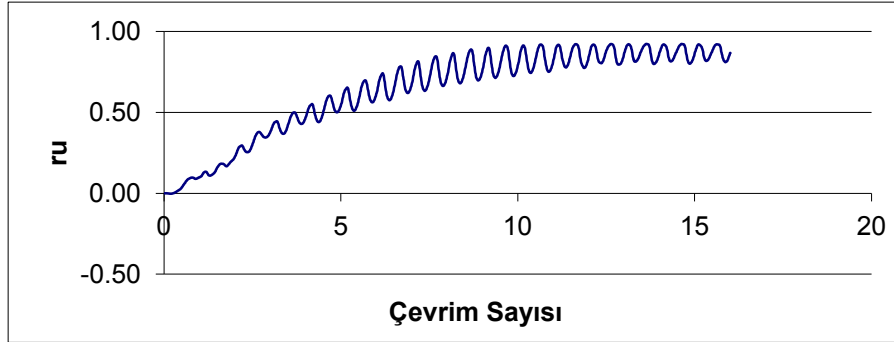
400 GÜNLÜK YIKAMA SİLTİ – 2



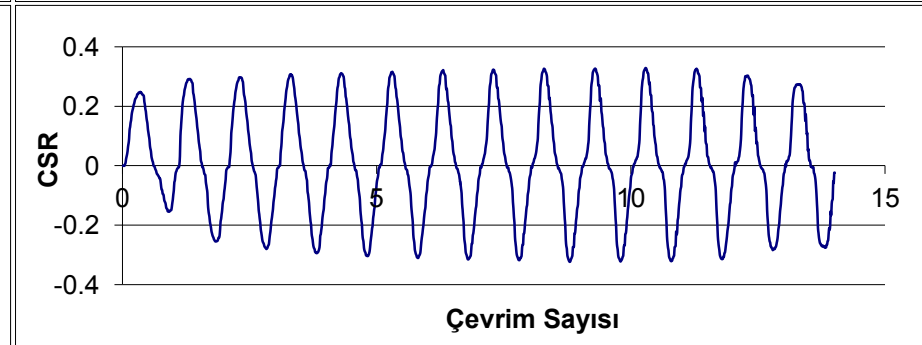
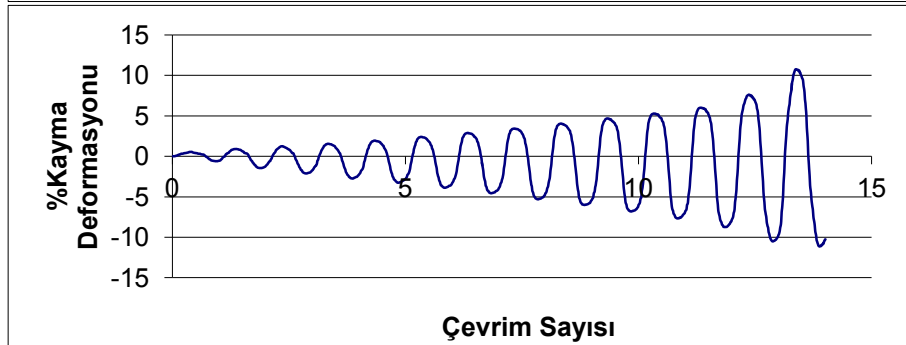
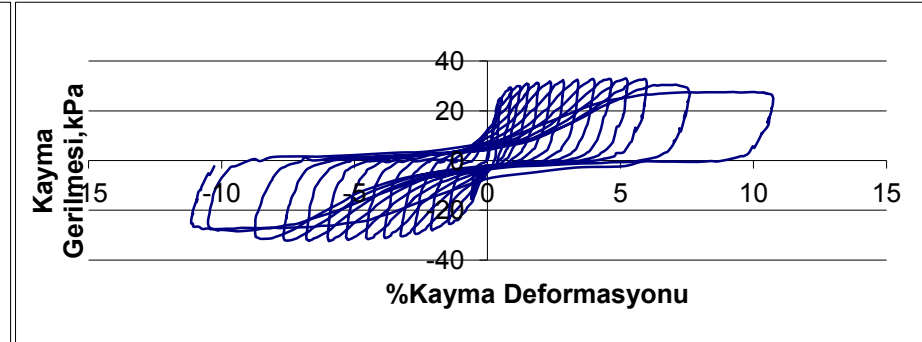
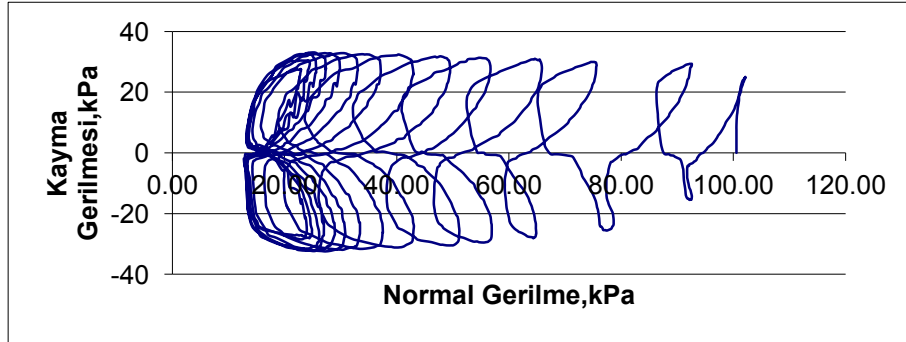
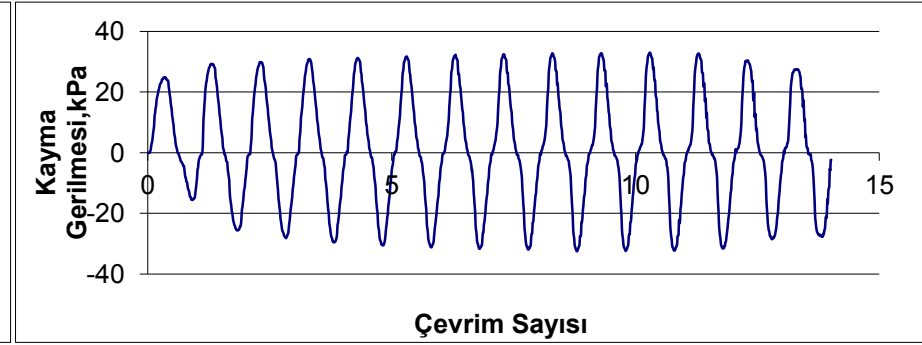
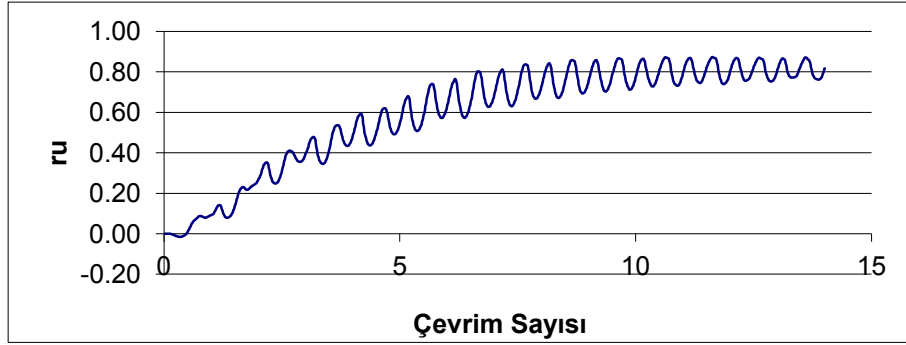
7 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ



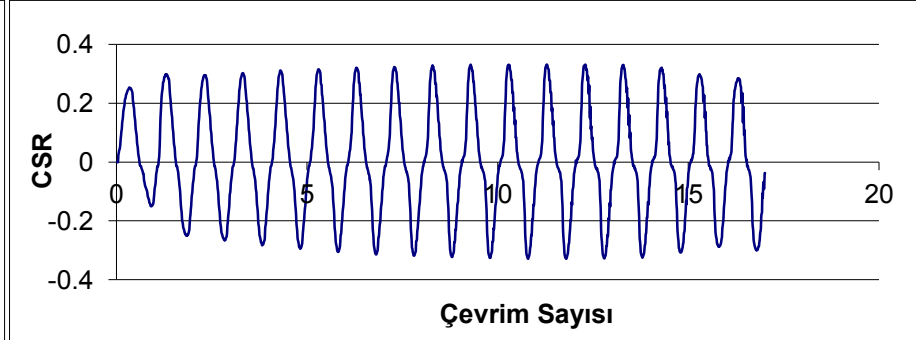
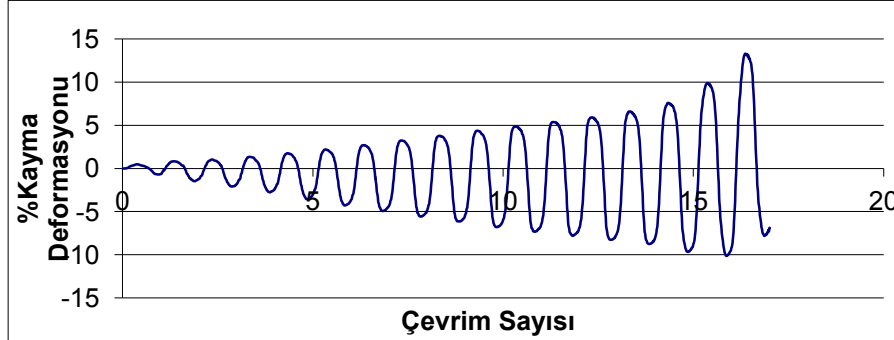
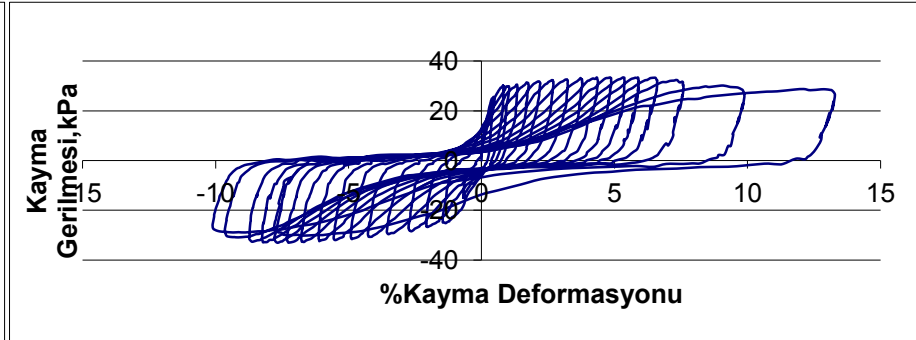
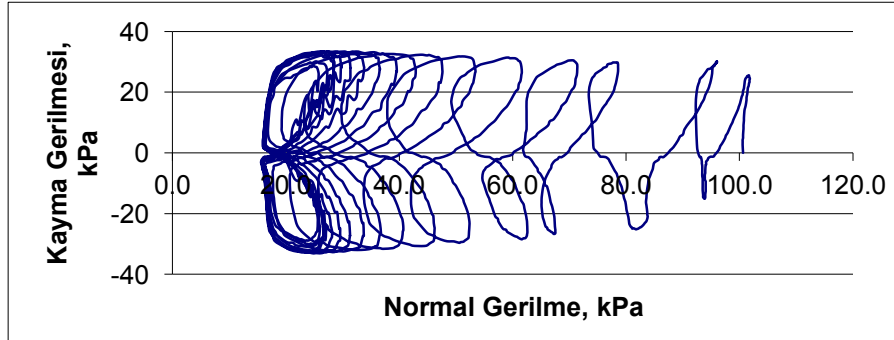
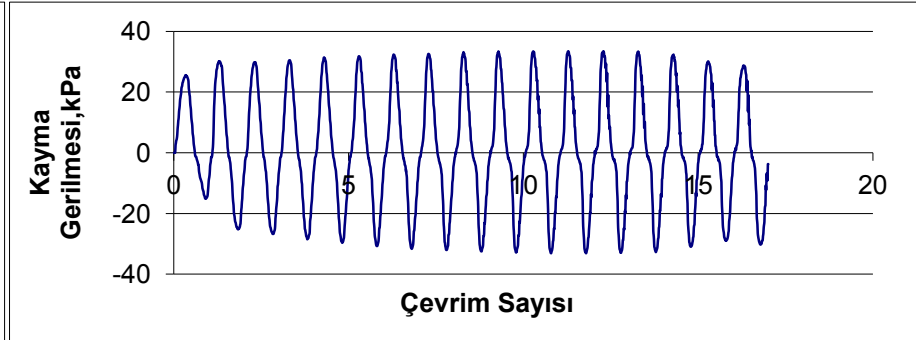
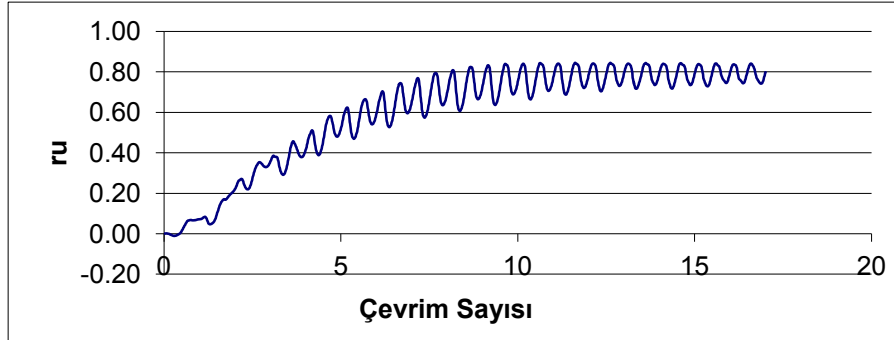
7 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ – 2



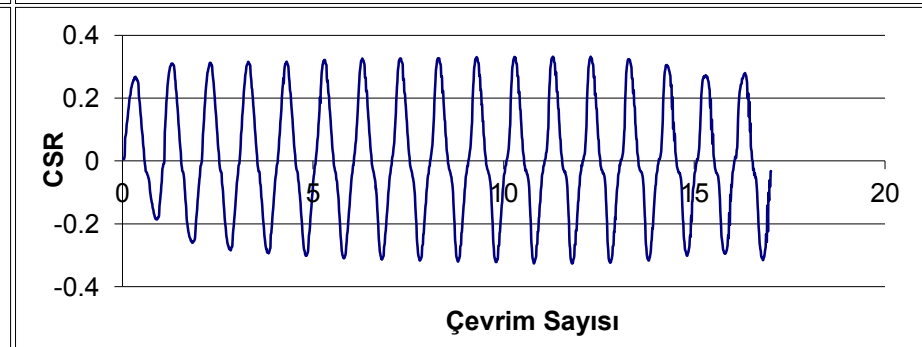
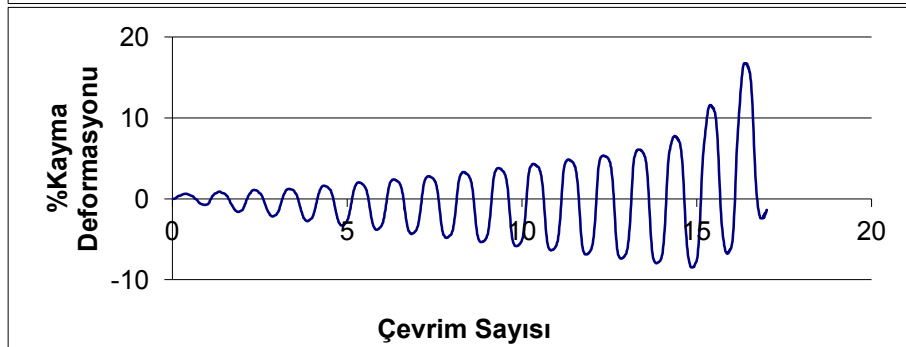
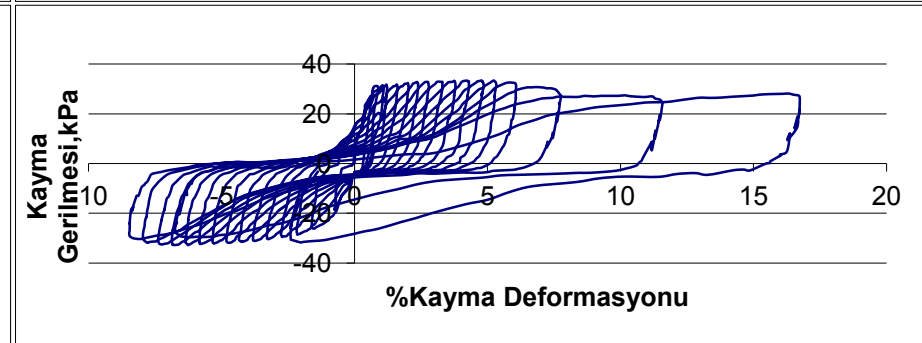
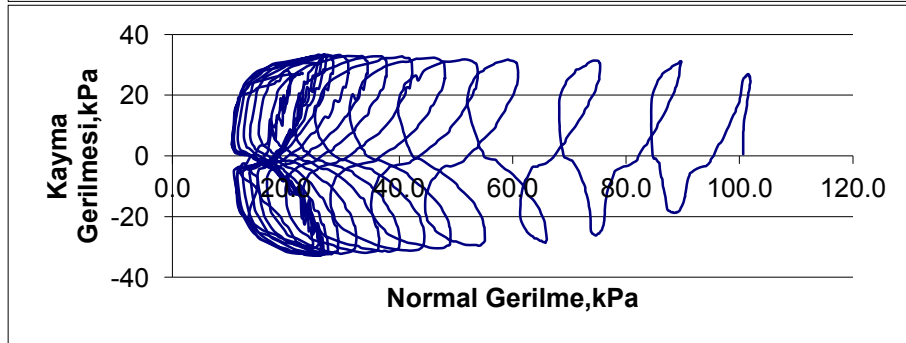
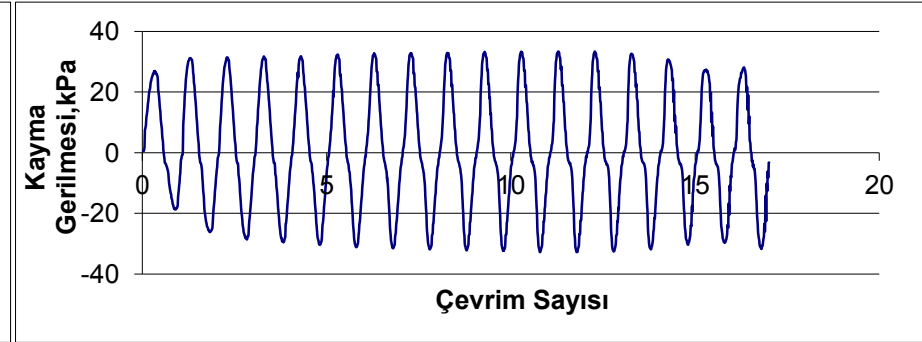
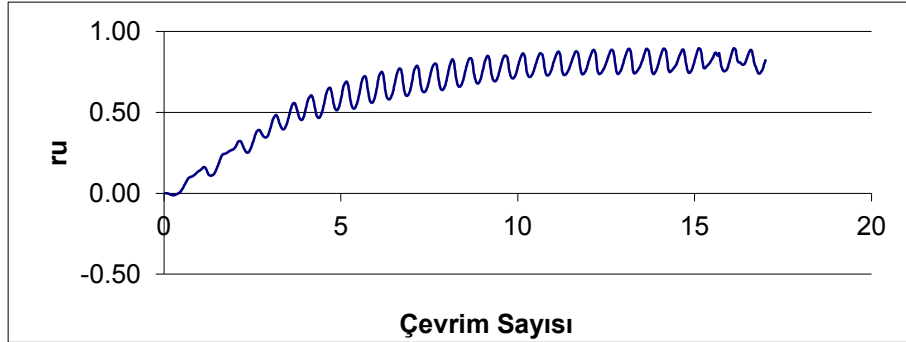
60 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ



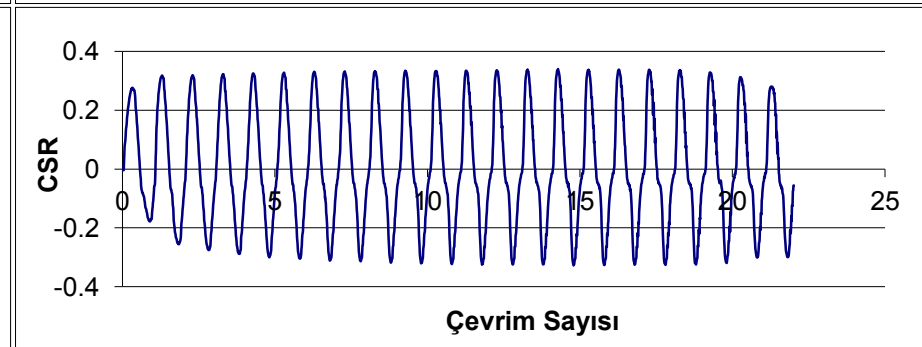
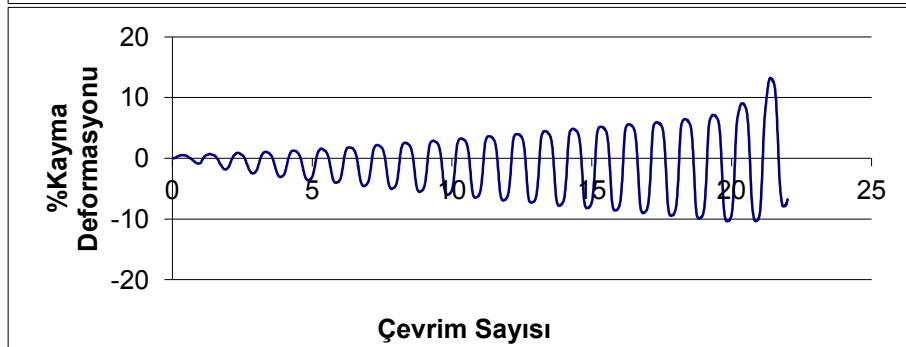
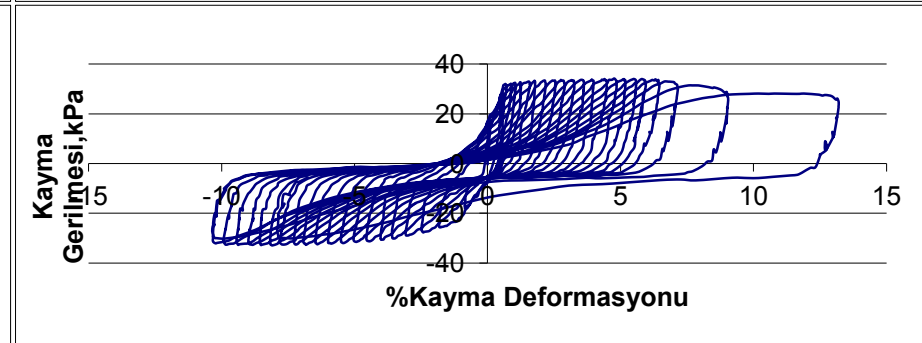
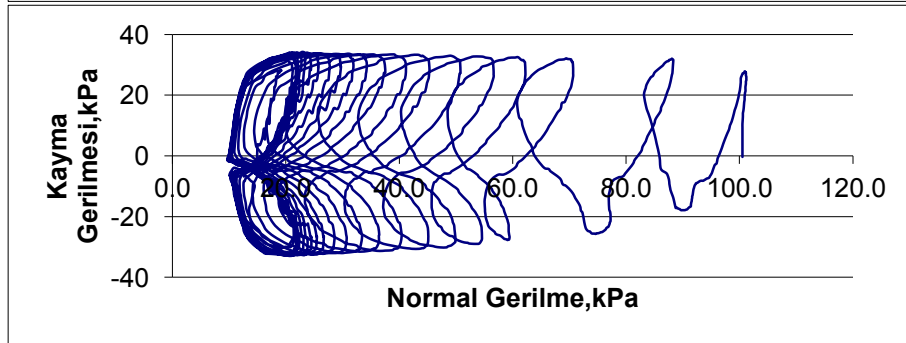
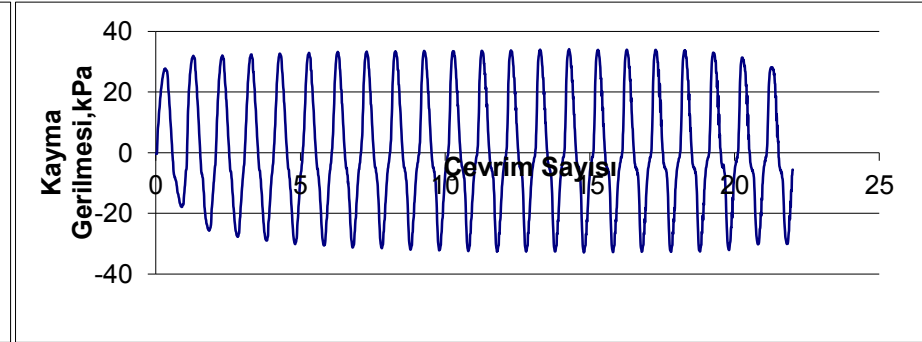
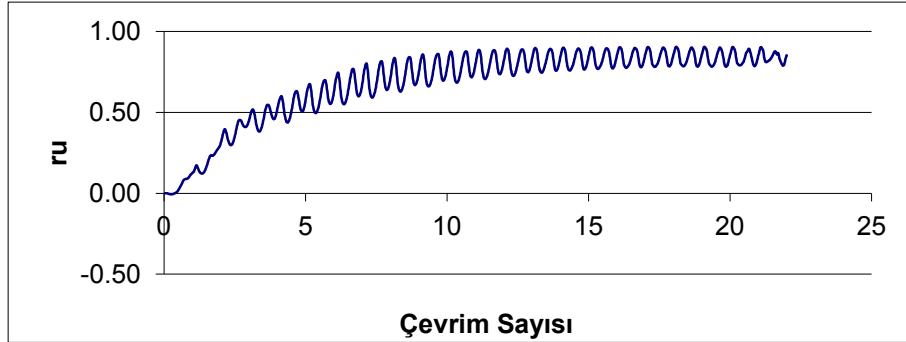
60 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ – 2



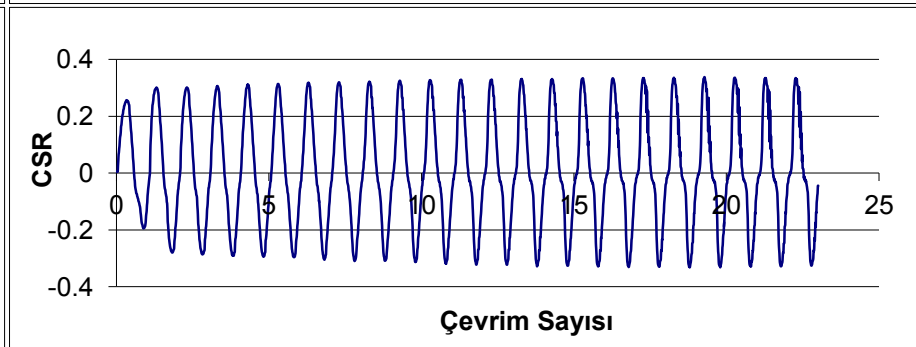
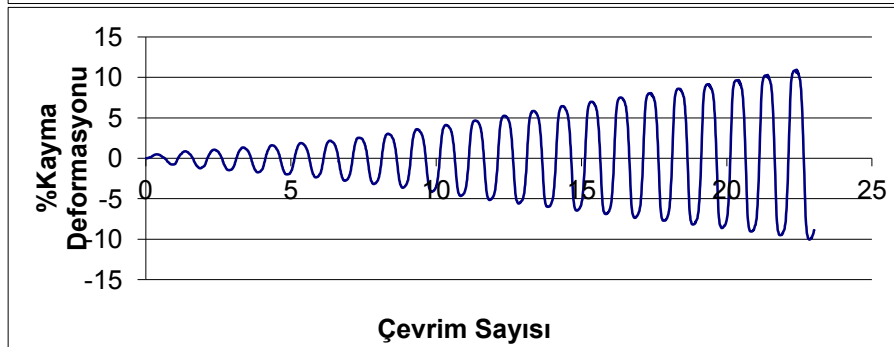
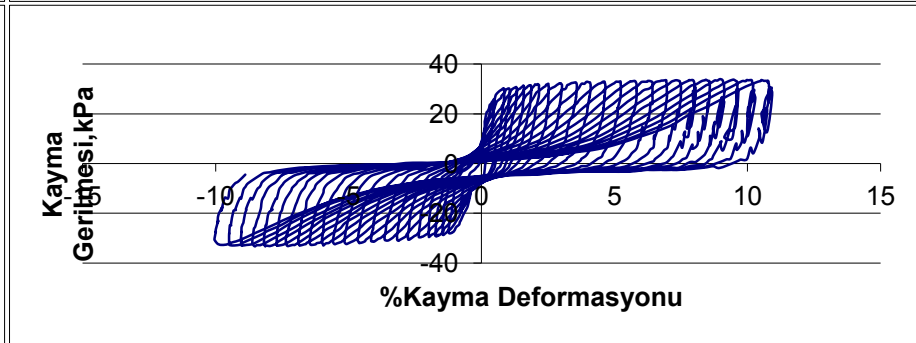
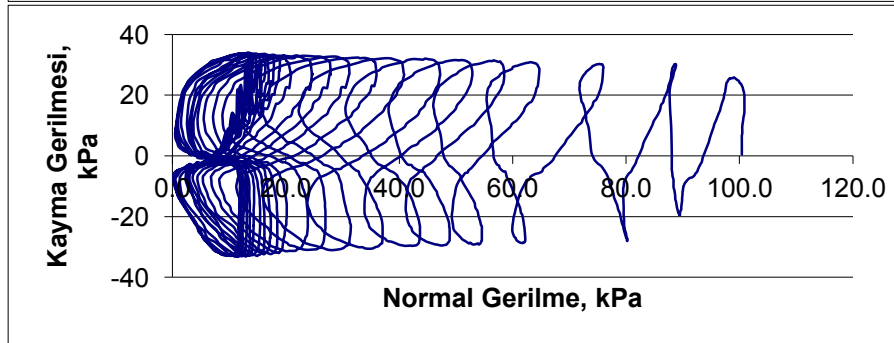
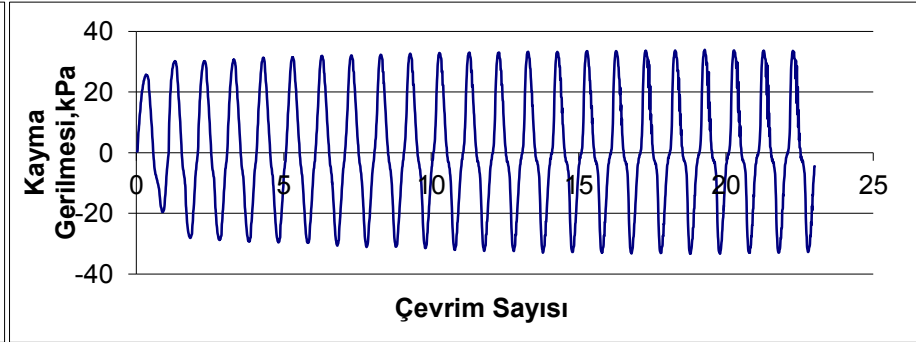
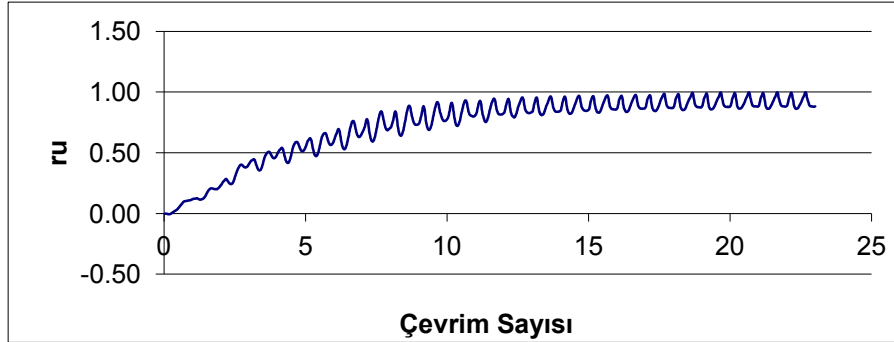
100 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ



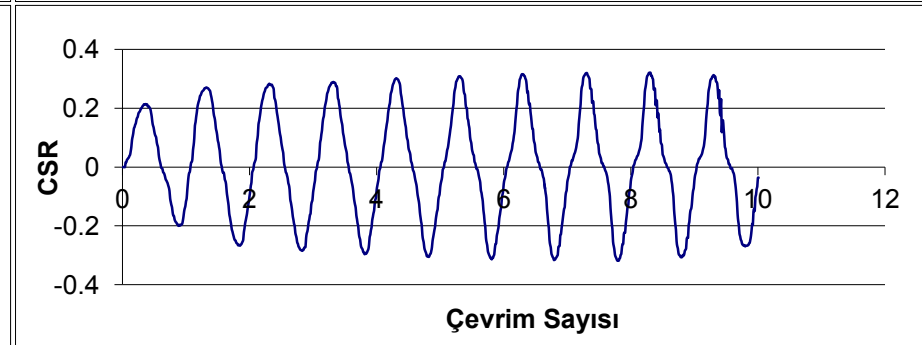
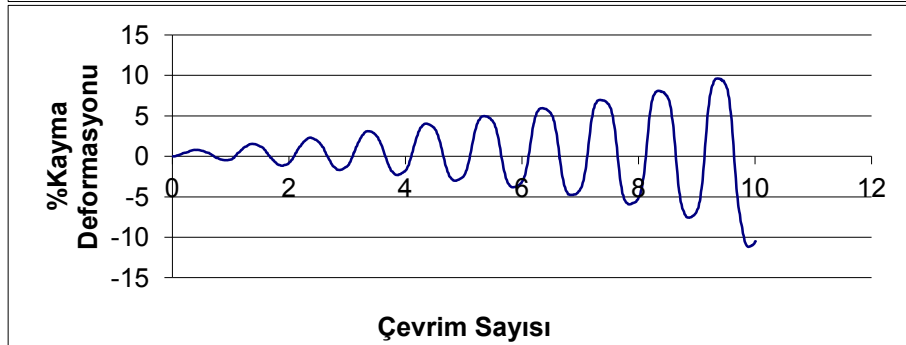
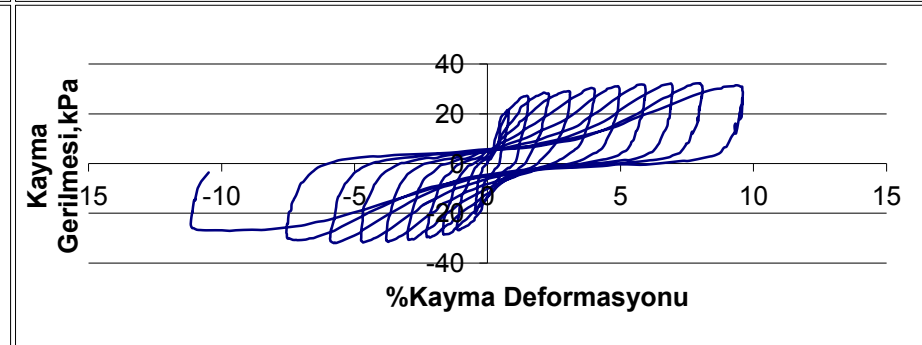
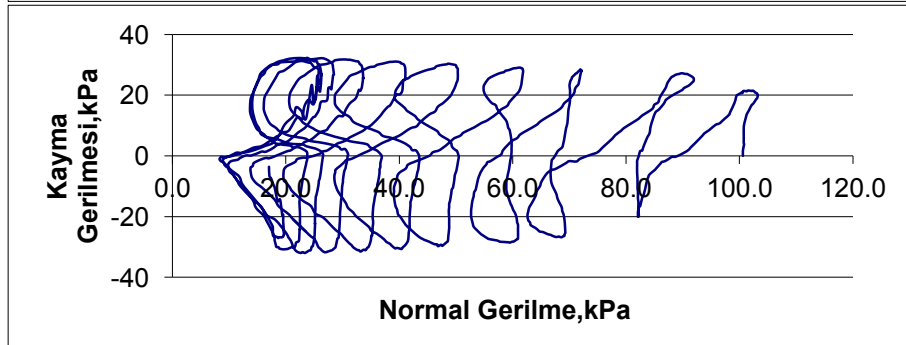
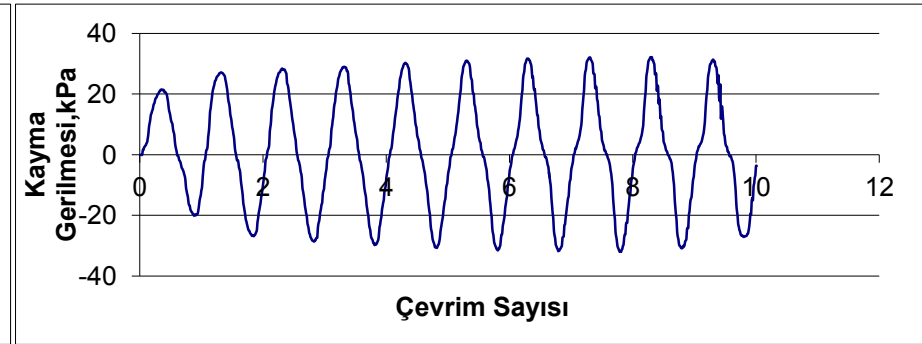
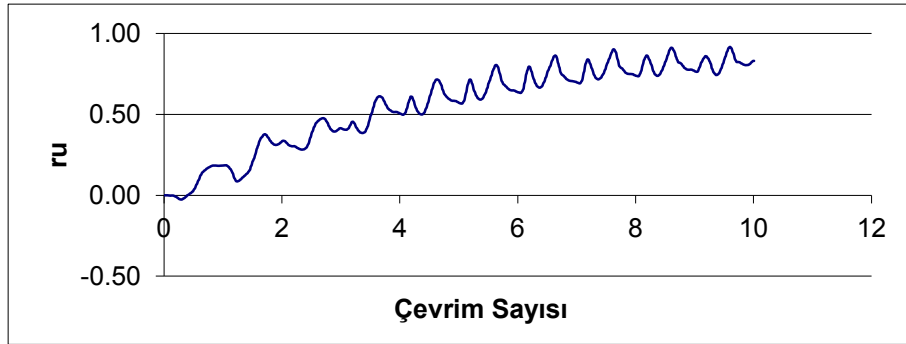
100 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ – 2



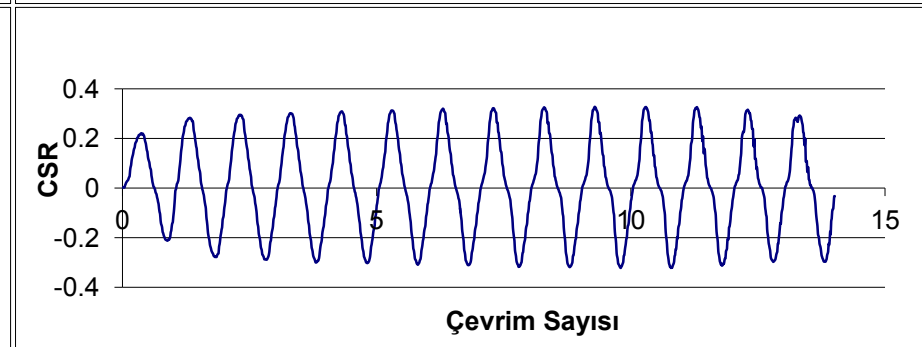
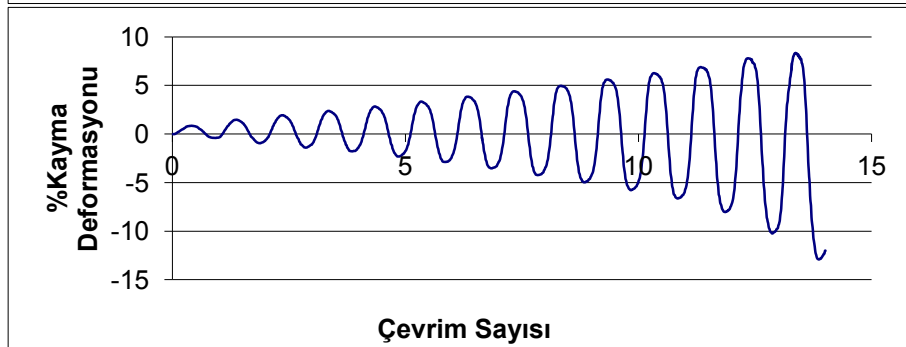
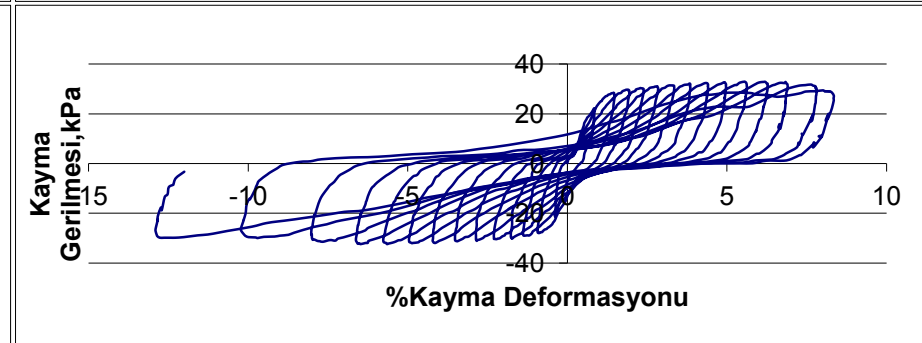
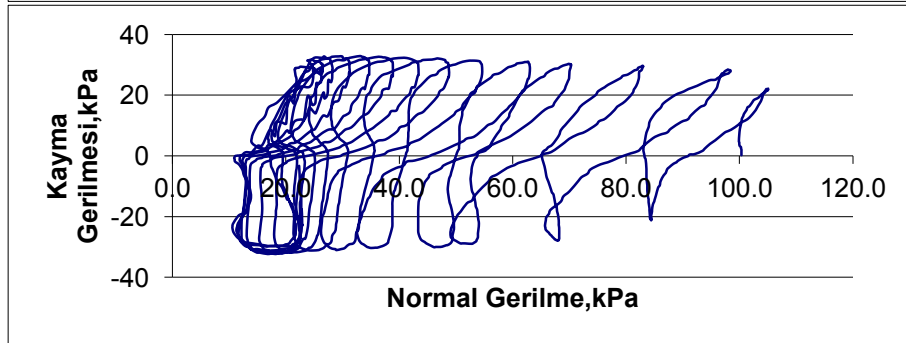
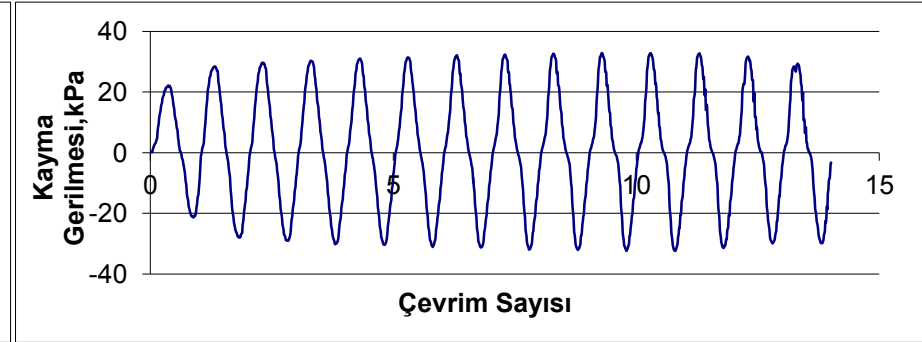
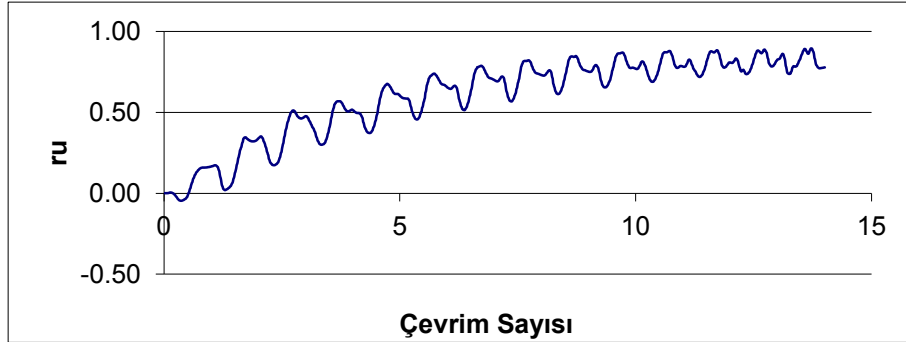
200 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ



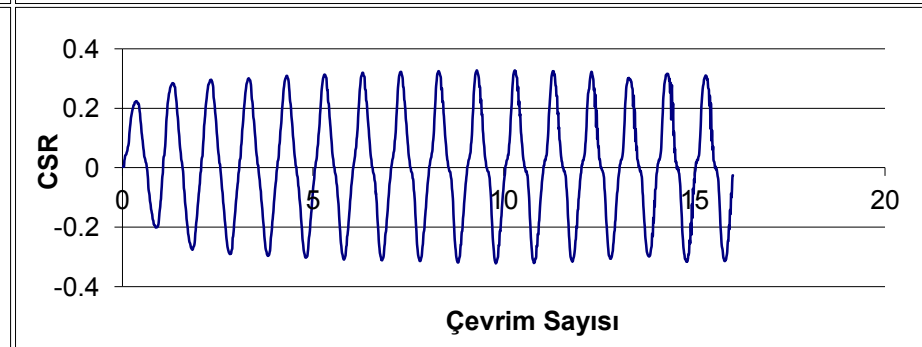
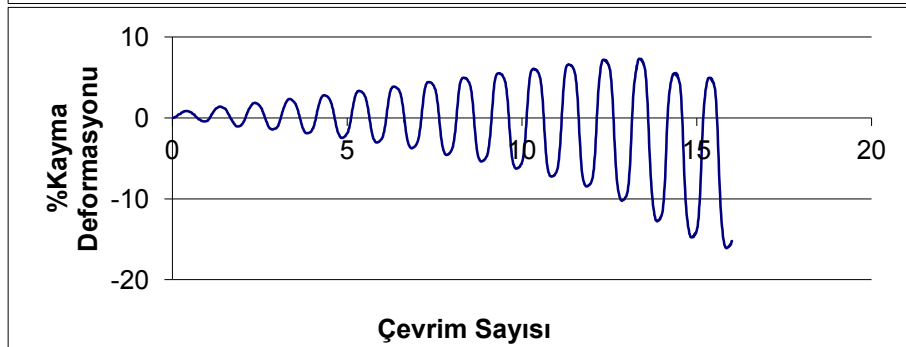
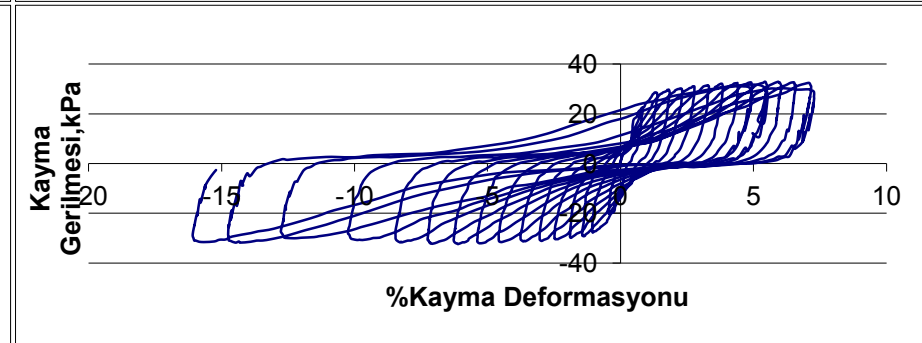
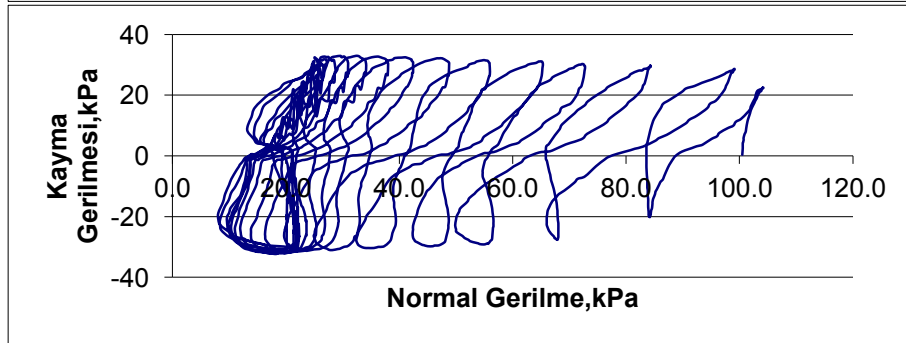
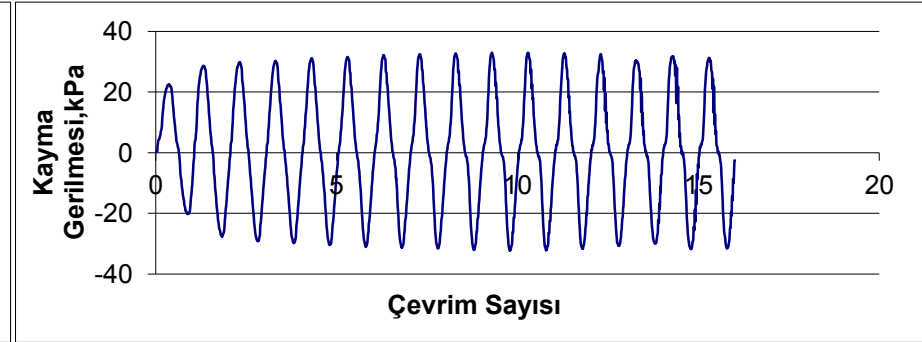
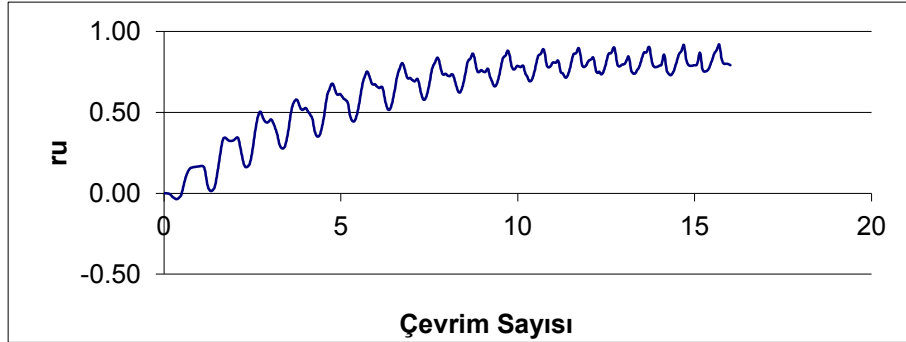
200 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ – 2



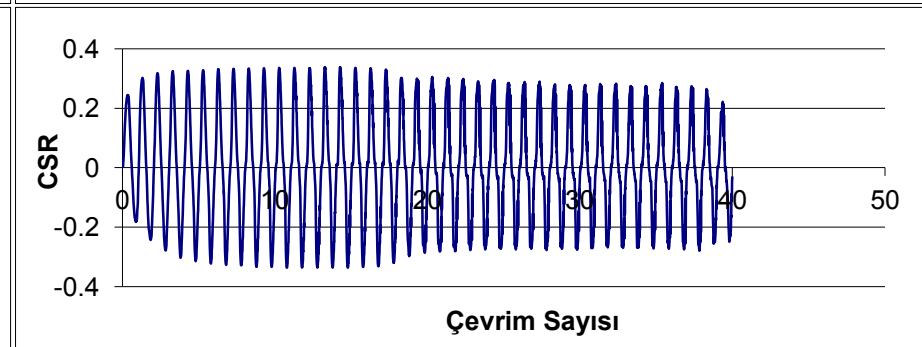
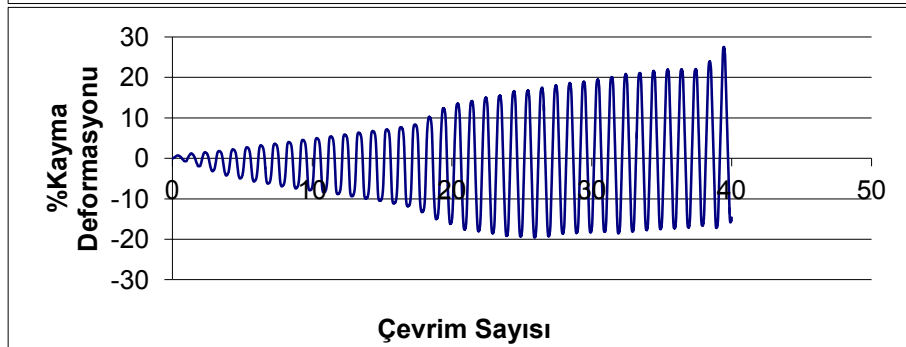
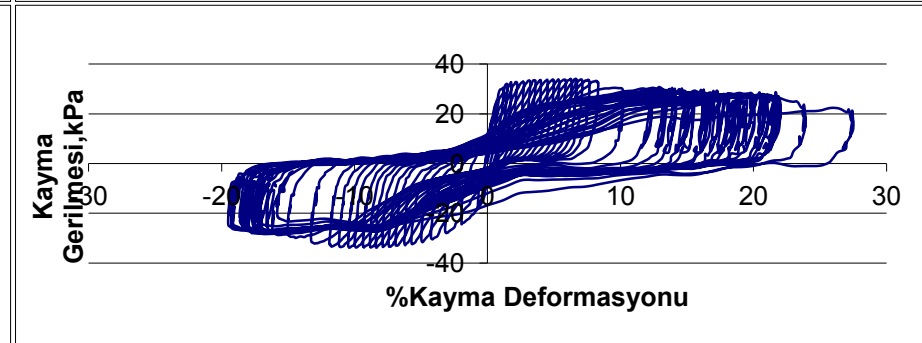
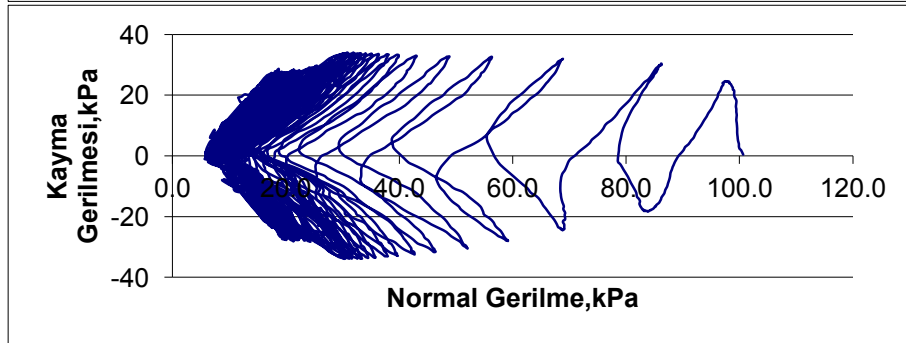
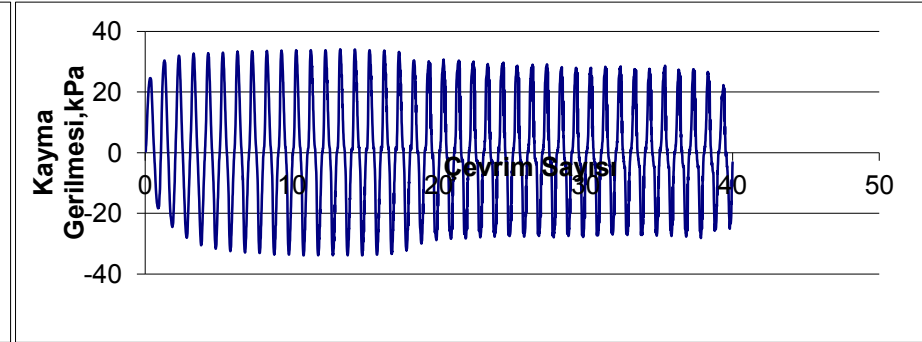
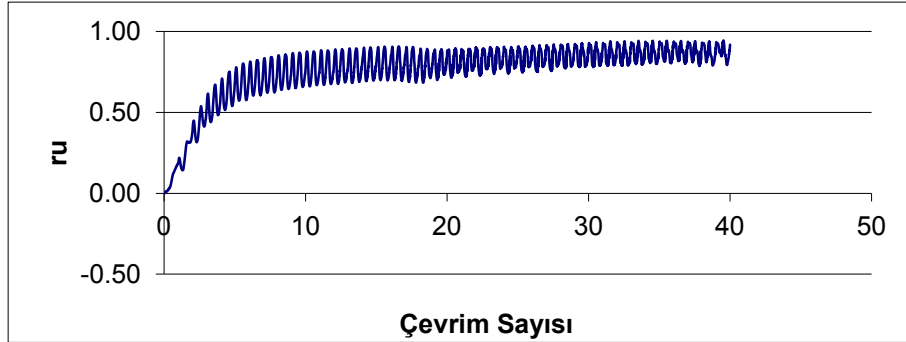
300 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ



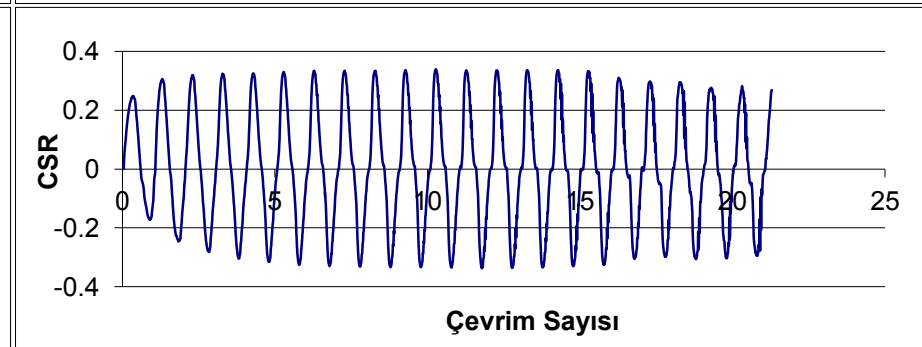
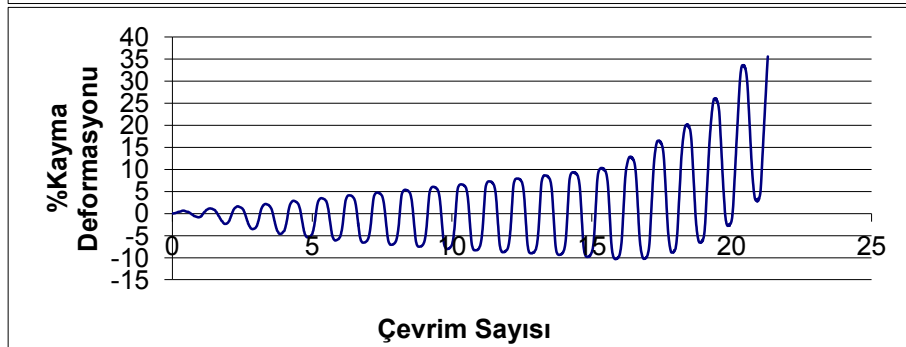
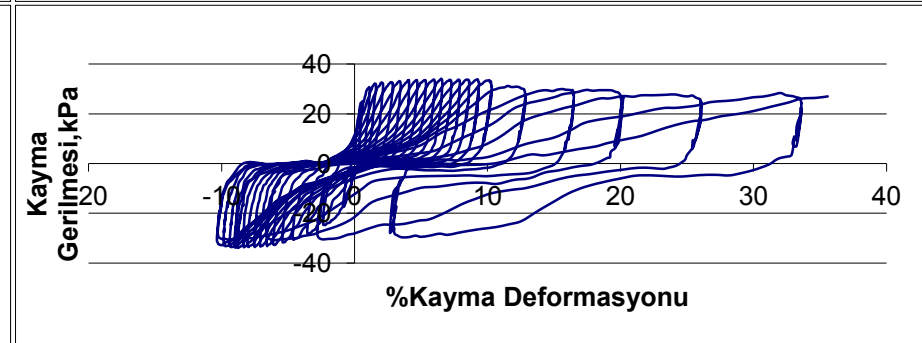
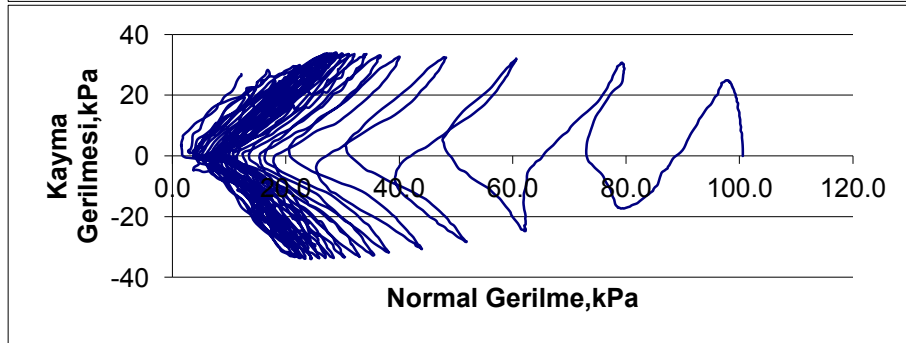
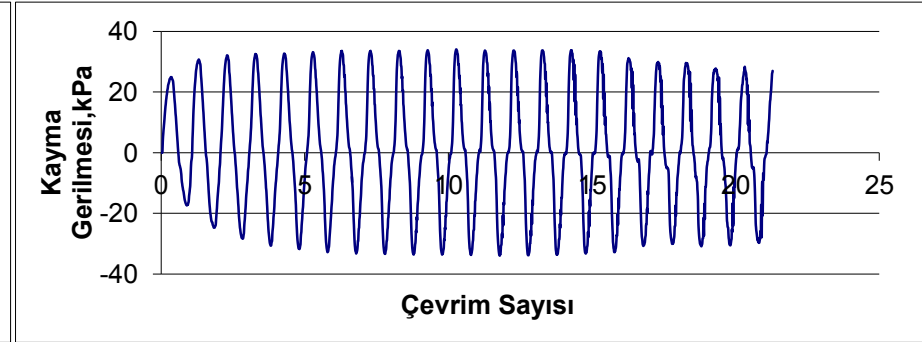
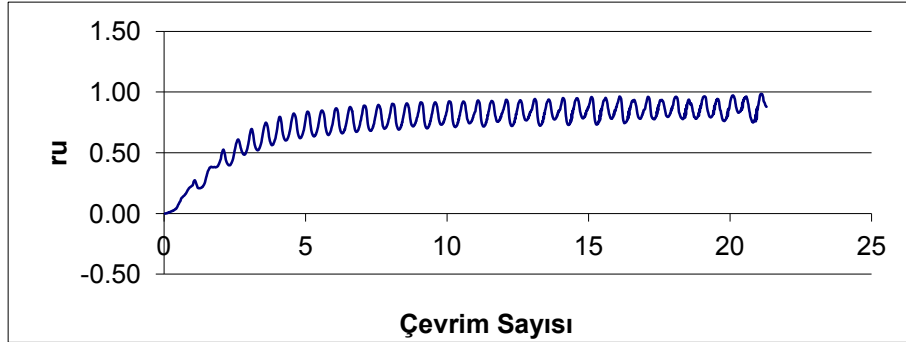
300 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ – 2



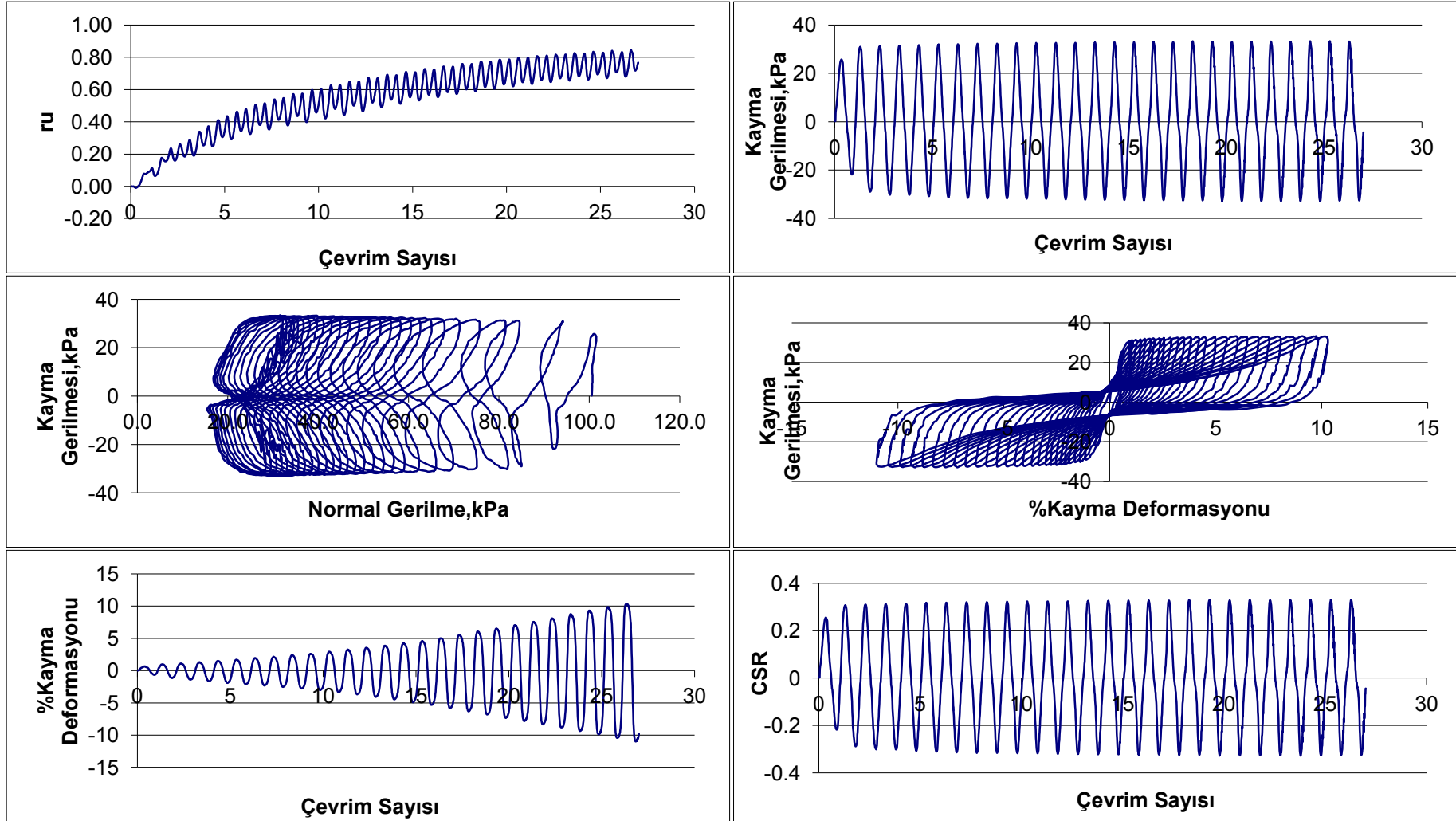
400 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ



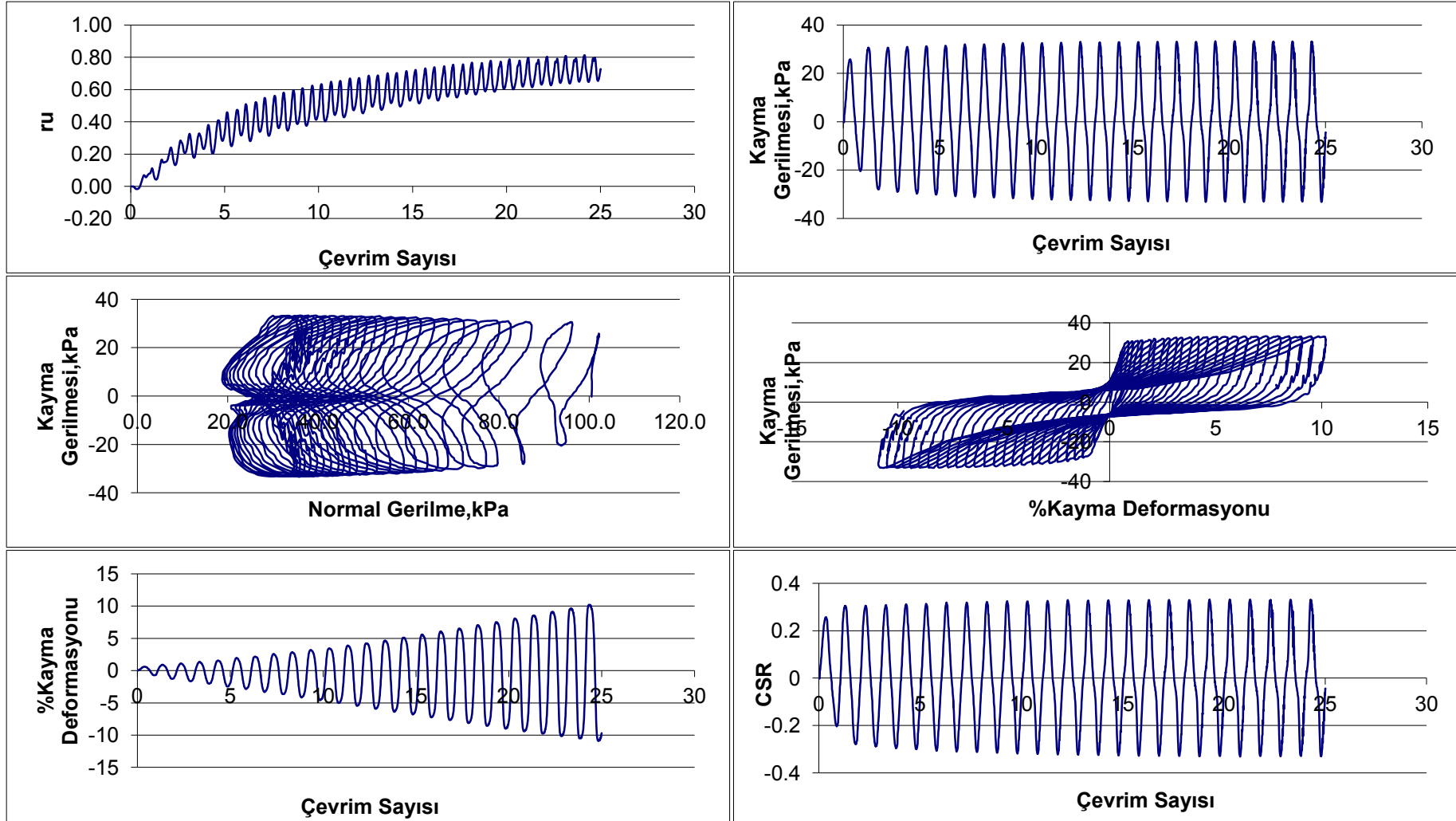
400 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ – 2



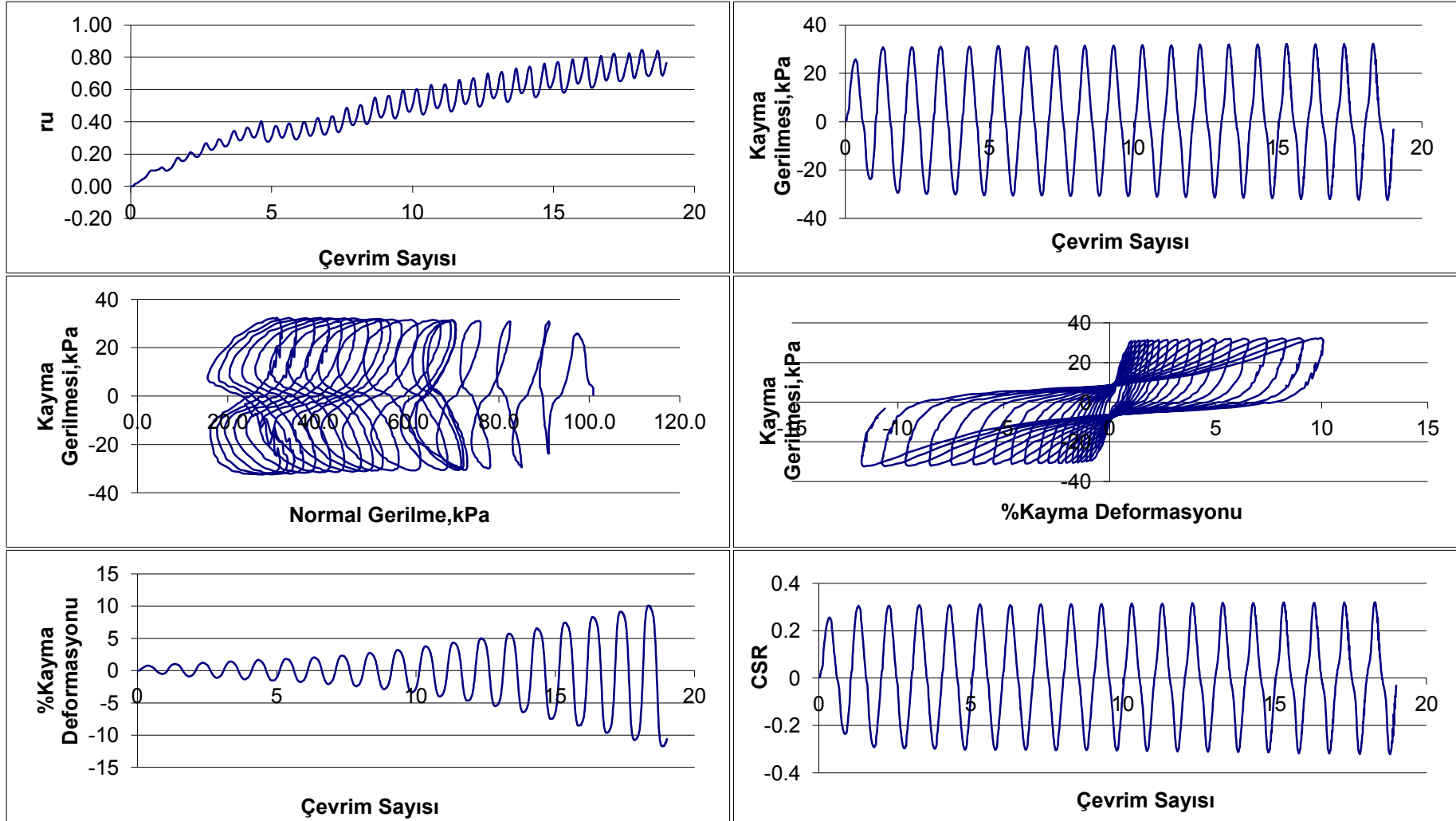
7 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ + AĞIRLIKÇA %10 BENTONİT



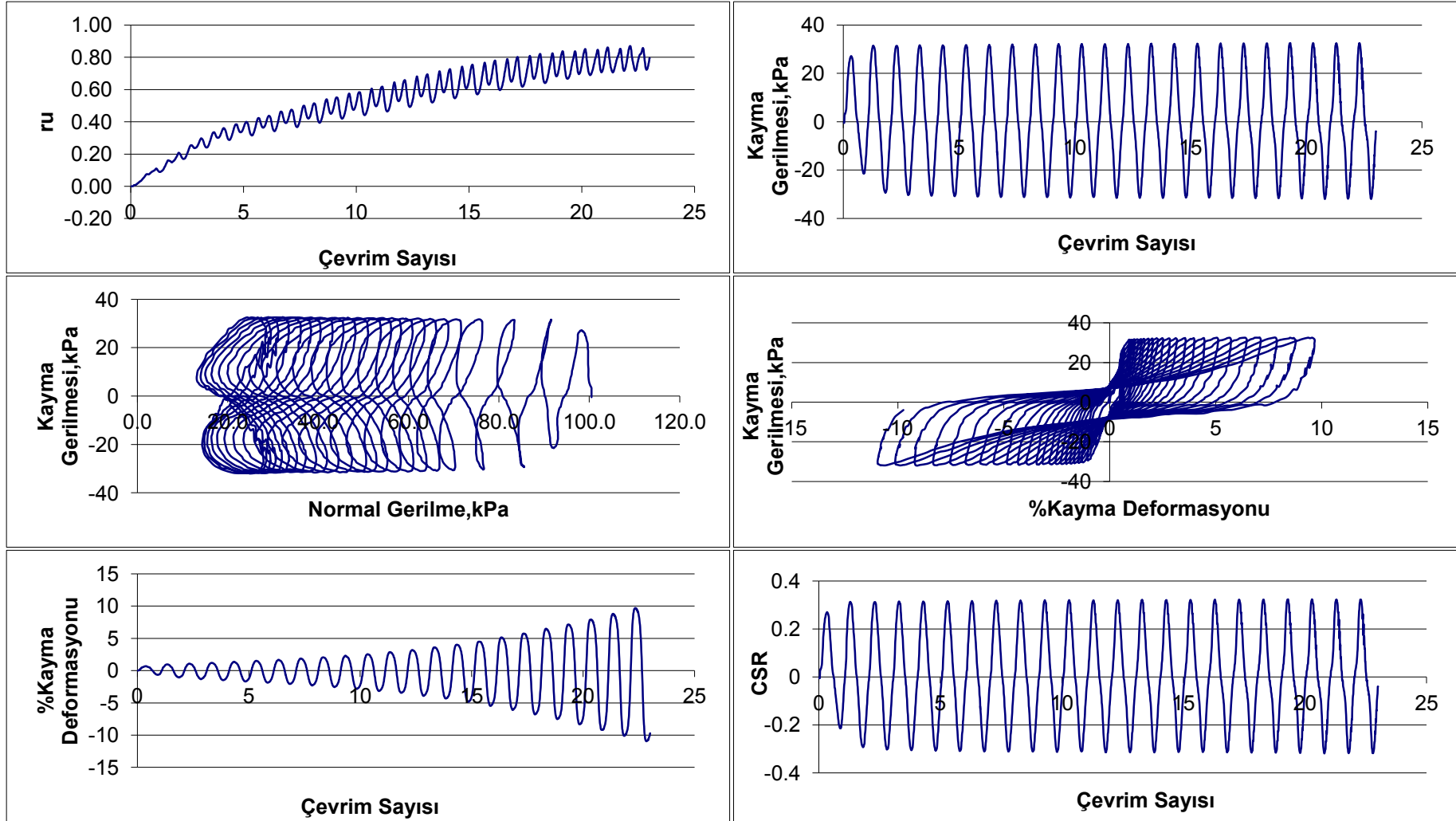
7 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ + AĞIRLIKÇA %10 BENTONİT – 2



100 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ + AĞIRLIKÇA %10 BENTONİT

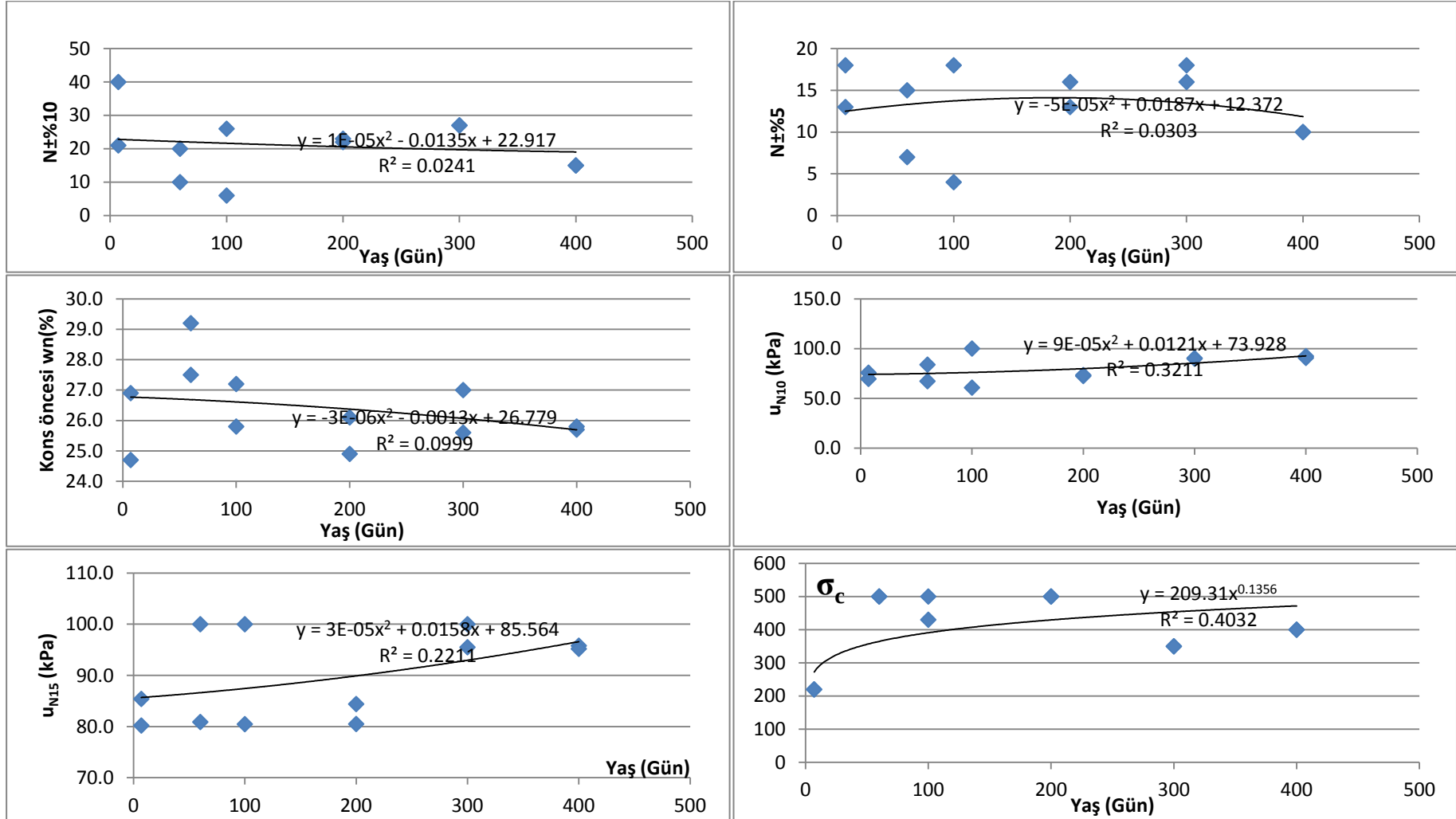


100 GÜNLÜK DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ + AĞIRLIKÇA %10 BENTONİT – 2

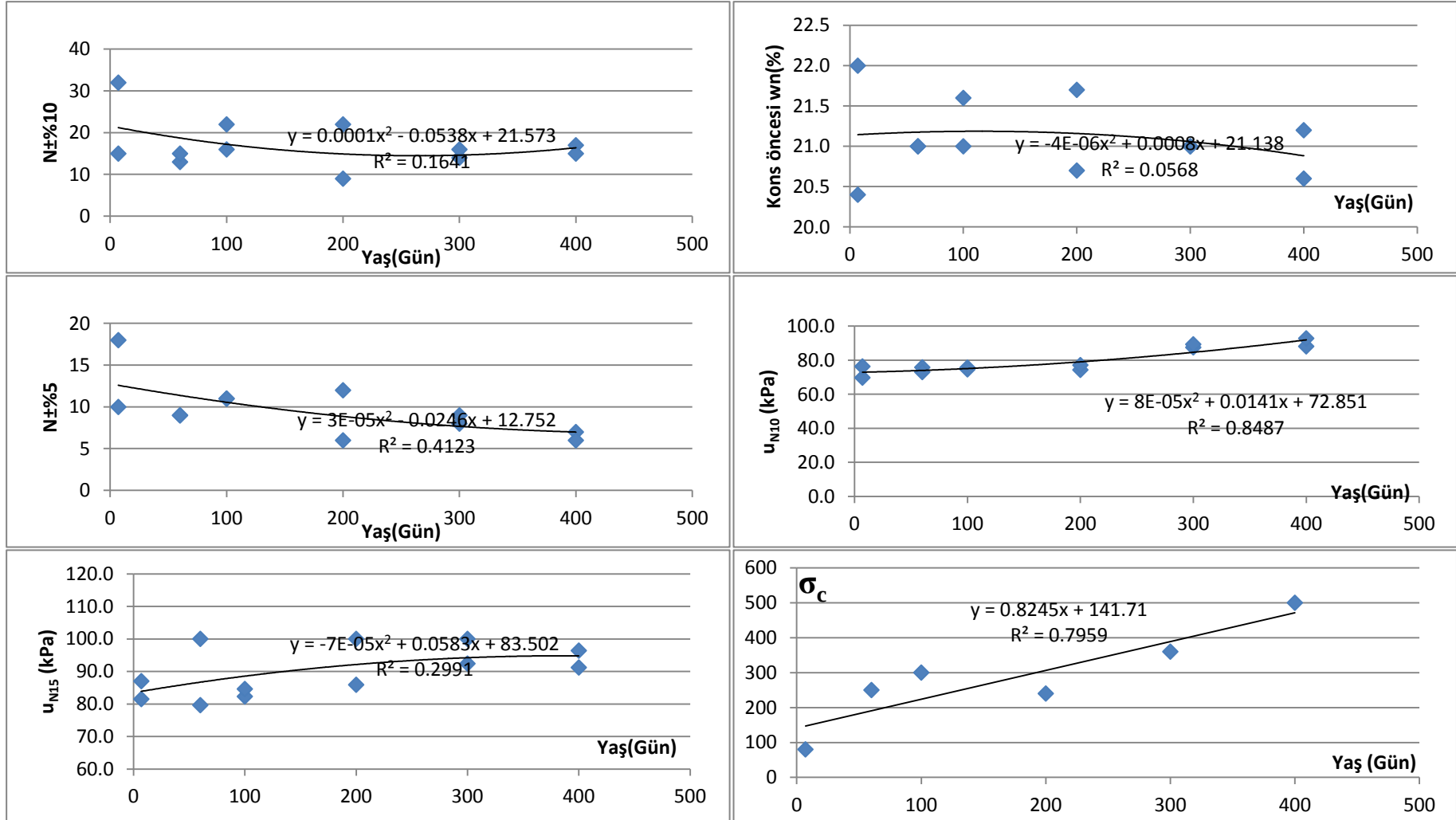


EK – B

YIKAMA SİLTİ – REGRESYON ANALİZLERİ

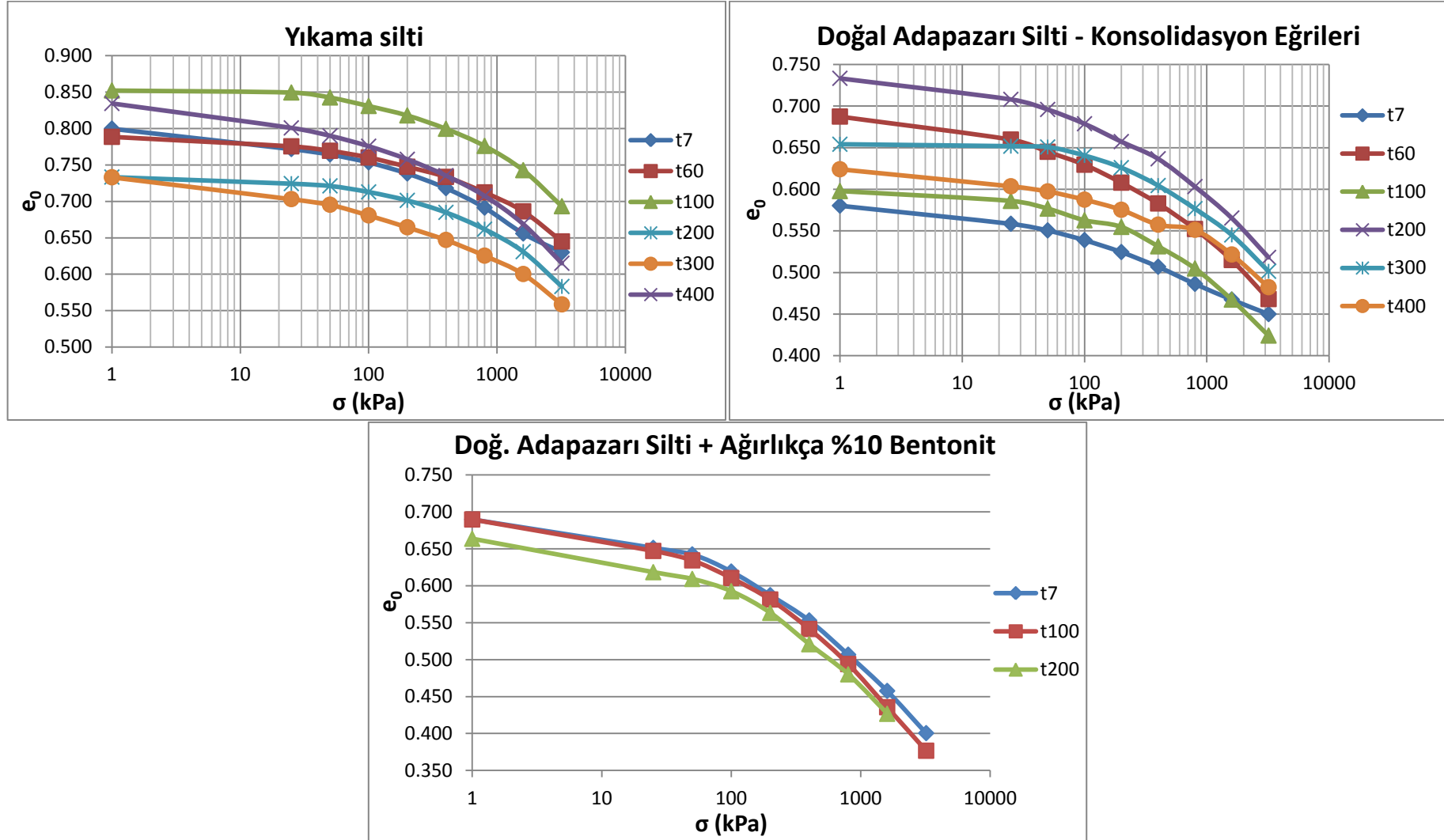


DOĞAL ADAPAZARI SİLTİ – REGRESYON ANALİZLERİ



EK – C

KONSOLİDASYON EĞRİLERİ



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı:

Ozan BİLAL

Doğum Tarihi ve Yeri:

28.07.1986 - Kastamonu

İletişim Adresi:

Tepe Sk. Saray Apt. No:19/7 Sahrayıcedid, Kadıköy-İstanbul

Eğitim:

1. **İlkokul:** Yeşilbahar İlköğretim Okulu
2. **Ortaokul:** Bahariye İlköğretim Okulu
3. **Lise:** Kartal Anadolu Lisesi
4. **Lisans:** Sakarya Üniversitesi – Mühendislik Fakültesi – İnşaat Müh. Bölümü

Çalışılan Bilimsel Projeler:

1-) “İnce Daneli Zeminlerin Sismik Koşullarda Yenilmesinin Adapazarı Kriterleri ile Tanısında Dinamik Deneylerin Etkisi”, **Tübitak Projesi, 106M042**, (İstanbul Kültür Üniversitesi 2007-2010, **Araştırmacı Öğrenci**)
Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Akın ÖNALP