

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEVİRİMSSEL YÜKLEMeye MARUZ KALMIŞ SİLTİ
ZEMİNİN STATİK KAYMA DİRENCİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif UYGUN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ertan BOL

Mayıs 2019

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Elif UYGUN

06.05.2019



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ertan BOL'a ve değerli hocam Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca hayat arkadaşım sevgili Çağrı UYGUN'a ve değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Ceyda AKSOY TIRMIKÇI'ya ve İnşaat Yüksek Mühendisi Ömer YÖNEV'e tez çalışması sırasındaki yardımları için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR..... | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | v |
| TABLolar LİSTESİ | vii |
| ÖZET..... | viii |
| SUMMARY | ix |

BÖLÜM 1.

| | |
|-------------|---|
| GİRİŞ | 1 |
|-------------|---|

BÖLÜM 2.

| | |
|--|----|
| LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... | 3 |
| 2.1.Giriş..... | 3 |
| 2.2.Tekrarlı Yüklerin Zeminler Üzerindeki Etkisi | 4 |
| 2.2.1. Tekrarlı yüklerin ince daneli zeminler üzerindeki etkisi..... | 6 |
| 2.2.2.Tekrarlı yüklerin kum zeminler üzerindeki etkisi | 10 |

BÖLÜM 3.

| | |
|---|----|
| MALZEME, DENEY VE YÖNTEM | 15 |
| 3.1. Giriş | 15 |
| 3.2. Malzeme ve Numune Hazırlama..... | 15 |
| 3.3. Zeminlerin Fiziksel Özellikleri | 17 |
| 3.4. Ön Konsolidasyon Aşaması | 25 |
| 3.5. Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi..... | 26 |
| 3.5.1. Dinamik üç eksenli deney sistemi (CTX) genel özellikleri | 27 |
| 3.5.2. Dinamik üç eksenli deney sistemi uygulama | 28 |

| | |
|---|----|
| 3.5.3. Dinamik üç eksenli deney sistemi numune kurulumu | 31 |
|---|----|

BÖLÜM 4.

| | |
|---|----|
| DENEY SONUÇLARI | 35 |
| 4.1. Bir Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları | 35 |
| 4.2. İki Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları | 40 |
| 4.3. Üç Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları | 44 |
| 4.4. Dört Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları | 49 |
| 4.5. Beş Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları | 53 |
| 4.6. Altı Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları | 57 |
| 4.7. Tüm Karışımlara Ait Deney Sonuçları | 60 |

BÖLÜM 5.

| | |
|-------------------------|----|
| SONUÇ VE ÖNERİLER | 66 |
|-------------------------|----|

| | |
|----------------|----|
| KAYNAKÇA | 68 |
|----------------|----|

| | |
|----------------|----|
| ÖZGEÇMİŞ | 70 |
|----------------|----|

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|-----------------|-------------------------------|
| B | : Doygunluk derecesi |
| c | : Kohezyon |
| CI | : Orta plastisiteli kil |
| CL | : Düşük plastisiteli kil |
| CSR | : Çevrimsel gerilme oranı |
| CTX | : Dinamik üç eksenli deney |
| D | : Kayma modülü |
| E ₅₀ | : Kiriş elastisite modülü |
| E _i | : Başlangıç elastisite modülü |
| f | : Frekans |
| FC | : İnce yüzdesi |
| G | : Sönüm oranı |
| ML | : Düşük plastisiteli silt |
| N | : Çevrim sayısı |
| PI | : Plastisite indisi |
| T | : Periyot |
| W _L | : Likit limit |
| W _P | : Plastik limit |
| ρ _L | : Sıvı birim hacim ağırlığı |
| ρ _w | : Suyun birim hacim ağırlığı |
| σ _d | : Deviatör gerilme |
| φ | : Kayma direnci açısı |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Dinamik yükleme deney tipleri..... | 4 |
| Şekil 2.2. Deformasyon hızının statik mukavemete etkisi. | 8 |
| Şekil 2.3. Konsolidasyon süresinin laboratuvar numunelerinde dinamik mukavemete etkisi..... | 8 |
| Şekil 2.4. Tekrarlı yükleme sonrası statik mukavemetlere plastisitenin etkisi..... | 9 |
| Şekil 2.5. Kil bantlarının yenilme üzerindeki etkisinin şematik gösterimi | 12 |
| Şekil 2.6. T-2, T-13, T16 ve T18 örneklerinin yenilme düzlemleri..... | 12 |
| Şekil 2.7. $0.00 \leq B \leq 1.00$ ve $DKGO=0.35$ olduğu durumda $\Delta u/\sigma_c$ oranının yükleme çevrimi ile değişim ilişkisi. | 13 |
| Şekil 2.8. Doygun, kısmi doymuş ve kuru numunelerin elastisite modülü azalım ilişkilerinin karşılaştırılması | 14 |
| Şekil 3.1. Karışımı hazırlama aşamaları | 17 |
| Şekil 3.2. Casagrende yöntemiyle likit limit deneyi. | 18 |
| Şekil 3.3. Etüvden çıkmış plastik limit deney örneği. | 19 |
| Şekil 3.4. Tüm numunelere ait likit limit ve plastik limit deney örnekleri. | 19 |
| Şekil 3.5. Likit-plastik limit ve plastisite indisi. | 20 |
| Şekil 3.6. Plastisite kartı TS1500/2000. | 21 |
| Şekil 3.7. Özgül ağırlık deney örnekleri. | 22 |
| Şekil 3.8. Hidrometre deneyi yapım aşamaları. | 24 |
| Şekil 3.9. Granülometre eğrisi. | 24 |
| Şekil 3.10. Yüzde kum, silt ve kil oranları histogramı..... | 25 |
| Şekil 3.11. Numuneyi hazırlama aşamaları..... | 26 |
| Şekil 3.12. Numunenin maruz kaldığı basınçlar. | 28 |
| Şekil 3.13. Üç eksenli basınç deney sistemi (CTX)..... | 29 |
| Şekil 3.14. Deney öncesi numune yerleştirme. | 32 |
| Şekil 3.15. Hücre kapsülü yerleştirilen numune. | 33 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.16. Deney sonu numune hali..... | 34 |
| Şekil 4.1. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (1 no'lu numune)..... | 38 |
| Şekil 4.2. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (1 no'lu numune). | 39 |
| Şekil 4.3. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (1 no'lu numune). | 40 |
| Şekil 4.4. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (2 no'lu numune)..... | 43 |
| Şekil 4.5. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (2 no'lu numune). | 43 |
| Şekil 4.6. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (2 no'lu numune). | 44 |
| Şekil 4.7. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (3 no'lu numune)..... | 47 |
| Şekil 4.8. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (3 no'lu numune). | 48 |
| Şekil 4.9. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (3 no'lu numune). | 48 |
| Şekil 4.10. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (4 no'lu numune)..... | 51 |
| Şekil 4.11. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (4 no'lu numune). | 52 |
| Şekil 4.12. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (4 no'lu numune). | 52 |
| Şekil 4.13. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (5 no'lu numune)..... | 55 |
| Şekil 4.14. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (5 no'lu numune). | 56 |
| Şekil 4.15. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (5 no'lu numune). | 56 |
| Şekil 4.16. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (6 no'lu numune)..... | 59 |
| Şekil 4.17. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (6 no'lu numune). | 60 |
| Şekil 4.18. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (6 no'lu numune). | 60 |
| Şekil 4.19. Numune numarasına göre başlangıç elastisite modülü değerleri..... | 61 |
| Şekil 4.20. Numune numarasına göre giriş elastisite modülü değerleri..... | 62 |
| Şekil 4.21. N:20 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri. | 62 |
| Şekil 4.22. N:4 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri. | 63 |
| Şekil 4.23. N:10 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri. | 63 |
| Şekil 4.24. N:40 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri. | 64 |
| Şekil 4.25. Numune numarasına göre deviatör gerilme oranı..... | 65 |

TABLolar LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Tablo 3.1. Karışımlara ait içerik yüzdeleri..... | 16 |
| Tablo 3.2. TS1500/2000 Sınıflama deney sonuçları. | 20 |
| Tablo 3.3. Özgül ağırlık deney sonuçları. | 23 |
| Tablo 4.1. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (1 no'lu numune)..... | 38 |
| Tablo 4.2. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (2 no'lu numune)..... | 42 |
| Tablo 4.3. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (3 no'lu numune)..... | 46 |
| Tablo 4.4. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (4 no'lu numune)..... | 51 |
| Tablo 4.5. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (5 no'lu numune)..... | 55 |
| Tablo 4.6. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (6 no'lu numune)..... | 59 |

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Dinamik Yükleme, Kayma Direnci, Pekleşme, Sıvılaşma, Kil.

Adapazarı'ndan temin edilmiş siltli kumlu ve killi zeminlerde dinamik üç eksenli basınç deney sistemi üzerinde dinamik ve statik deneyler yapılmıştır. Çalışmanın en belirleyici özelliği düşük çevrimsel gerilme oranında yapılmış olmasıdır. Bu çalışmanın amacı deprem yüküne maruz kalmış siltli zeminlerin deprem anında ve sonrasındaki statik kayma dirençlerini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda laboratuvar ortamında bulamaçla elde edilmiş numuneler üzerinde çalışılmıştır. Frekans, kesme hızı ve dinamik yükleme oranı tüm deneylerde sabit olarak alınırken çevrim sayısı değiştirilmiştir. Numunelerin başlangıçtaki mukavemetleri dinamik yük sonrası belirlenen nihai mukavemetleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece dinamik yüklerin zemin üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada altı farklı karışım belirlenmiştir. Bu karışımlar içermiş oldukları silt ve kil yüzdesine göre hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre zeminlerin dinamik yükleme sonrası statik kesmeyle belirlenen mukavemetleri başlangıç durumuna göre artmış ve böylece zeminlerde dayanım kazanımları oluşmuştur.

Dinamik kayma gerilmesi oranının düşük olması nedeniyle zeminde düşük şiddetli tekrarlı yüklerin zeminin dane dizilimlerini değiştirdiği ve zeminin pekleşme durumuna sebep olduğu düşünülmektedir. Diğer bir sebep ise deney numunelerindeki en düşük kil oranı seviyesi %20'den başladığı için kilin kohezyon özelliğinden dolayı sıvılaşmaya yatkın olmamasının da etkisi büyüktür. Aynı zamanda zeminin pekleşmesiyle daha katı bir form alması ve bunun neticesinde oluşabilecek oturmaların üst yapıda negatif etkilere yol açacağını ihmal etmemek gerekmektedir.

STATIC SHEAR STRENGTH OF SILTY SOIL EXPOSED TO CYCLIC LOADING

SUMMARY

Keywords: Dynamic Loading, Shear Strength, Hardening, Liquefaction, Clay.

Dynamic and static experiments were performed on the dynamic three-axis pressure test system in silty sandy and clayey soils from Adapazarı. The indicative side of this study is to be performed at low cyclic stress ratio. The aim of this study is to determine the static shear strength of silty soils exposed to earthquake load during and after earthquake. In this respect, the study was carried out on the samples that been prepared from the slurry in the laboratory. The frequency, shearing speed and dynamic loading ratio were fixed in all experiments while the number of cycles was changed. The initial strengths of the samples were compared with the final strengths after the dynamic load. Thus, the effect of dynamic loads on the ground has been investigated. Six different mixtures were determined in the study. These mixtures were prepared according to the percentage of silt and clay they contain. According to the results of the experiments, after the dynamic loading of the grounds, the strengths determined by the static shear increased according to the initial state and thus the resistance gains on the soils have formed.

Due to the low dynamic shear stress ratio, it is thought that low intensity repetitive loads on the ground change the grain sequences of the ground and cause the soil to harden. Another reason is that the clay does not have a tendency to liquefy because of the cohesion property of clay, since the lowest clay ratio in the test samples starts at 20%. At the same time, to be a more rigid form due to compression of the ground and some cases like settlement as a result of this situation may happen. It should not be neglected that the settlements will cause negative effects on the superstructure.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sakaryanın konumu itibarıyla deprem kuşağının altında olması, kentin yapılanmasında rol oynayan teknik şartnameler, planlar, ilgili idare plan notları ve geçerli imar kanunlarının tamamı 1.dereceden deprem riski öngörülerek oluşturulmaktadır. Bu plan ve yönetmeliklerdeki amaç can ve mal kaybını en aza indirgeyecek şekilde yapılar tasarlayıp uygulamaktır.

2019 yılı itibarıyla plan, proje ve yapı denetim uygulamaları revize edilmiş, Türkiye bina deprem yönetmeliği (2018) yenilenmiş ve yapılaşma sahasının önemi ön plana çıkarılmıştır. Parsel bazında hazırlanan zemin etütlerine eklenen yeni deneylerle zeminde açığa çıkabilecek deformasyon durumları ve zeminin dayanımının belirlenebilmesi için daha fazla deneysel çalışmanın yapılması zorunluluk haline getirilmiştir. Yapılmış olan bu doğru uygulama sayesinde zeminin deprem gibi dinamik bir yükleme sonrası nasıl bir davranış sergileyeceği konusunda zemin etütleri daha güvenilir olacaktır.

Bölge (Adapazarı ve çevresi) jeolojik olarak alüvyon birikintisinden meydana gelmiştir. Bu durum zeminin yerleşim için çok elverişli olmadığını ve depremin öngörülerek yapılaşmanın esas alınması gerektiğini doğrulamaktadır. Bol (2003) ve Önalp ve ark. (2000) yapmış oldukları çalışmada, Adapazarı ve çevresinin Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin getirmiş olduğu silt, kum, çakıl ve kil içeriğinden oluştuğunu ve bu zeminlerin bazen tek başlarına bazense farklı kombinasyonlar şeklinde tabakalanmış olarak görülebildiklerini belirtmiştir.

Bu çalışmada da deprem koşulları altında Adapazarı gibi yumuşak zeminlere sahip ortamlarda zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışı araştırılmıştır. Zemin standart bir malzeme olarak değerlendirilemeyeceği için dinamik özellikleriyle ilgili

sınırlandırmalar yapmak da oldukça güçtür. Zeminlerin gerilme geçmişleri, minerolojik yapıları, yaşları, fiziksel ve mekanik özellikleri ve yer altı su seviyeleri gibi bir arada değerlendirilmesi gereken çok fazla parametre vardır. Bu durumdan dolayı aynı tür zeminlerde bile bölgesel olarak farklı davranışlar açığa çıkabilmektedir. Tüm bu sebeplerden ötürü zemin araştırma ve geliştirmelerinin deneysel çalışmalarla sürekli desteklenmesi gerekmektedir.

Bu tezde Adapazarı bölgesinden temin edilen silt ve siltli kil zeminler üzerinde çalışılmıştır. Zeminler dinamik üç eksenli deney sisteminde dinamik yüklere maruz bırakılmıştır. Numuneler laboratuvar ortamında bulamaç (Slurry) şeklinde hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada frekans ve çevrimsel gerilme oranı (CSR) sabit olarak alınıp, çevrim sayısı (N) değiştirilmiştir. Bu doğrultuda siltli ve killi zeminlerin öncelikle statik durumdayken mukavemeti belirlenmiş daha sonra zeminlere tekrarlı yük uygulanmış ve bu yüklemenin hemen ardından zeminler statik olarak yüklenip yeni dayanımları belirlenmiştir. Böylece başlangıç durumdaki statik yükleme ile dinamik yük sonrası statik yükleme karşılaştırılarak dinamik yüklerin zemin dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

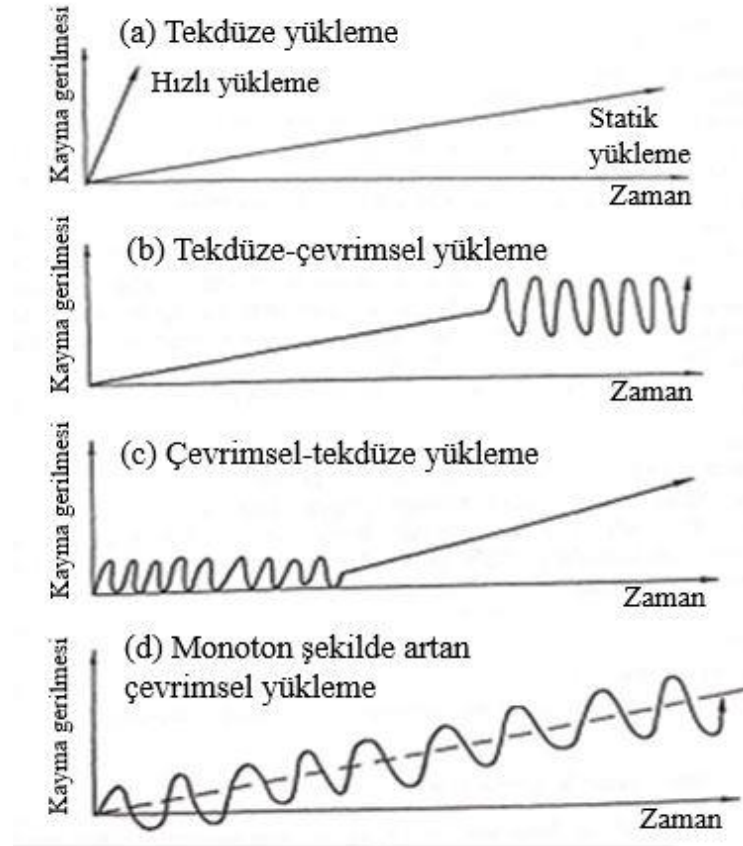
2.1. Giriş

Bu çalışma kapsamında, çevrimsel yüklemeye maruz kalmış zeminlerin bu yüklemelerden nasıl etkilendiği ve sonrasında zeminde ne tür değişimlerin olduğu üzerinde durulmuştur. Zemindeki bu etkiler çevrimsel yüklemenin genliği, şiddeti, süresi gibi belirleyici yükleme özelliklerine bağlı olurken aynı zamanda zeminin kendi yapısıyla da birlikte değerlendirildiği bilinmektedir. Yani zeminin oluştuğu ortam, tabaka kalınlıkları, gerilme tarihçeleri ve ne tür malzemelerden oluştukları etken olacağı gibi aynı zamanda zeminin dane boyutu, dizilimleri ve yer altı su seviyesi gibi parametrelerin de zeminin davranışında etkili olduğu bilinmektedir.

Bu bölümde, farklı zemin sınıflarında statik ve dinamik yüklemeler üzerinde frekans, ince dane oranı, dinamik kayma gerilmesi oranı ya da pastisite gibi çeşitli parametrelerin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkileri çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar eşliğinde anlatılmıştır.

Zeminlerin dinamik dayanımlarının belirlenebilmesi için farklı dinamik yükleme testleri kullanılmaktadır. Şekil 2.1.'de gösterilen çalışmaya göre bu testler 4 sınıfa indirgenebilir. Bu sınıflandırma yüklemenin hızlı ya da yavaş olmasına göre ayrılırken aynı zamanda yüklemenin tekdüze ya da çevrimsel olmasına göre de değerlendirilir. Şekil 2.1.c. üzerinde çevrimsel-tekdüze yükleme (*Cyclic-monotonic loading*) olarak gösterilen yükleme tipinde genelde zeminlerin maruz kaldıkları belli bir çevrim sayısından sonra yumuşayıp zayıflaması üzerine dayanım ve deformasyon özellikleri başlangıç durumuna göre değişime uğrar. Bu deney tipi, sismik dalgalara maruz kalmış zeminlerde, zeminlerin mukavemetinde ve rijitliğinde açığa çıkan bozulmaların etkilerini araştırmak için kullanılır (Ishirara, 1996).

Bu deneysel çalışma kapsamında dinamik dayanımı belirlemek için yapılan tüm deneylerde çevrimsel-tekdüze yükleme tipi kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Dinamik yükleme deney tipleri (Ishirara, 1996).

2.2. Tekrarlı Yüklerin Zeminler Üzerindeki Etkisi

Uzun bir zaman diliminde meydana gelen zeminler bu oluşum sırasında ve sonrasında devamlı bir yüklemeye maruz kalmaktadır. Çoğunlukla kendi durağan halinde statik yükleme altında bir sorun teşkil etmeyen zemin bazı zaman dilimlerinde de dinamik yüklemelere (Deprem, trafik yükleri, dalga ve titreşim yükleri ve diğ. gibi) maruz kalabilmektedir. Dinamik yük zemine aynı nicelik ve nitelikte gelmeyen ve zamana karşı değişen bir kuvvetin varlığını belirtmektedir. Zemin dinamik yükleme aldığı anda Hooke Kanunu gereği bu yüklemeye karşı cevap vererek zeminin özelliklerinin değişimine maruz kalabilmektedir. Bu değişim zeminin davranışına yansyarak

zeminde taşıma gücü kayıpları, oturmalar açığa çıkabilmektedir. Bu nedenle zeminin bu tip yüklemeler sonrası temsil edilmesinin önemi ve gereği açığa çıkmaktadır. Bu ihtiyaca çözüm getirmek amacıyla geoteknik alanında yapılan çalışmalar arazide de laboratuvar da kendi durum ve koşullarına göre değerlendirilip zeminin davranışı ile ilgili bizi yönlendirmektedir.

Bilindiği üzere tekrarlı yükler altında zeminler, gerilme-birim şekil değiştirme özellikleri ve mukavemet özellikleri olarak iki durumda incelenmektedir. İlk kısımda zemin elastik kısımda kalırken belirli bir gerilmeden sonra elasto-plastik yere geçip artan yüke karşı koyamayıp plastik davranışa geçiş yapmaktadır. Yani elastik ve elasto-plastik davranış koşullarındaki zeminlerin, gerilme-şekil değiştirme durumu açığa çıkarken plastik durumda ise geri dönüşü olmayan kalıcı deformasyonlar açığa çıkmaktadır.

Gerilme-şekil değiştirme özelliği olarak genellikle elastik ve plastik şekil değiştirme durumlarına göre kayma modülü (D) ve sönüm oranı (G) değerleri öne çıkmaktadır. Mukavemet özelliklerinde ise zeminin maruz kaldığı dinamik yükün genliği ve çevrim sayısı (N) göz önüne alınmaktadır (Altun ve Ansal, 2003).

Dinamik yükün genliği zeminin davranışını etkilemektedir. Düşük genlikli yüklerin neden olduğu yükleme durumlarında elastik şekil değiştirme izlenirken büyük genlikli yükleme durumlarında danelerin kopmasına bağlı olarak plastik şekil değiştirme durumu açığa çıkmaktadır. Depreme bağlı yapılarda oluşan deformasyonların zeminin davranışına önemli derecede bağlı olduğunu görülmektedir (Okur ve Ansal, 2009).

Depremler sırasında oluşan tekrarlı gerilmeler farklı genlik ve frekanslarla zemin tabakalarında deformasyonlara sebep olmaktadır. Dolayısıyla deformasyona uğrayan zemin tabakasının üzerinde bulunan yapılar da bu durumdan etkilenmekte belki de zarar görmektedir. Ayrıca zemin tabakalarındaki tekrarlı yüklemeler sırasında zeminin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri de değişecektir. Bu duruma bağlı olarak da toprak dolguları ve istinat duvarları gibi yapıların dayanımında negatif etkiler açığa çıkacaktır (Ansal ve Erken, 1989).

Tekrarlı yükler zeminlerde hacim azalırma neden olabilmektedir. Eğer artan boşluk suyu basınçları hacim azalmasıyla aynı oranda hızlı bir şekilde sönmelenemez ise boşluk suyu basınçları açığa çıkacaktır. Killer üzerinde bulunan yapılar için tekrarlı gerilmeler etkisinde boşluk suyu basınçlarının sönmelenebilmesi için zamana ihtiyaç olacaktır. Bu koşullarda kısa dönemde drenajsız durum etkin olup boşluk suyu basınçlarının artmasıyla efektif gerilmenin düşmesine sebep olacaktır. Efektif gerilmenin düşmesiyle statik yük dağılımı yeniden olacak bu da drenajsız durumda yapıya etkiyen kayma deformasyonları ve oturmaların artmasına neden olabilecektir (Yasuhara ve Andersen, 1991).

Tekrarlı yüklemeler arasındaki durağan zamanlarda artmış olan boşluk suyu basınçları sönmelenebilmek için yeterli zamana sahip olur bu durumun sonucunda da efektif gerilmelerde yeniden artışlar olur. Hacim azalması yeniden meydana gelir bu da oturmalara yol açar (Yasuhara ve Andersen, 1991).

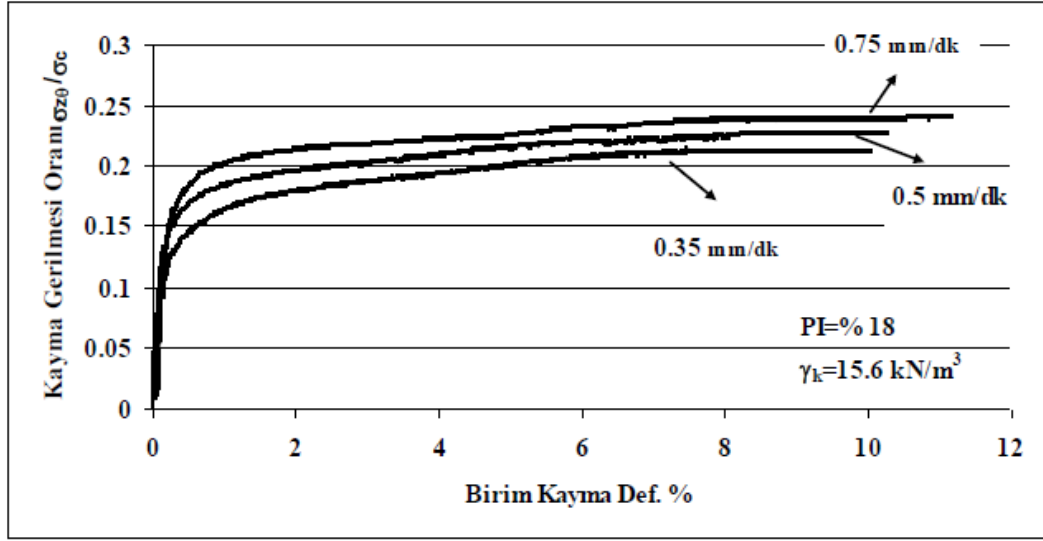
2.2.1. Tekrarlı yüklerin ince daneli zeminler üzerindeki etkisi

Guo ve Prakash (1999) yapmış oldukları çalışmada silt ve siltli kil zeminler üzerinde yapılan çalışmaların yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Kil yüzdesinin, plastisitenin ve boşluk oranının etkilerinin net olarak bilinmediğini ve bu tip zeminlerin dinamik davranışının anlaşılabilmesi için bu faktörlerin etkilerine ilaveten zeminlerin yapısının ve yaşının da bilinmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalara göre zeminin yapısı ve yaşı boşluk suyu basıncını azaltıcı yönde etki ettiğini ifade etmişlerdir.

Özay ve Erken (2003) araziden alınmış örselenmemiş killi numune üzerinde dinamik deneylerden oluşan çalışma yapmıştır. Bu zeminler, düşük plastisiteli normal konsolide kil ya da yüksek plastisiteli killi zeminlerden oluşmuştur. Dinamik deneylerde frekansı 0,5 Hz olarak sabit alıp plastisiteyle dinamik kayma gerilmesi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Değerlendirmeyi %5 deformasyon durumuna göre yapmış olup bu deformasyon seviyesinde, plastisite arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranının da artmakta olduğunu belirlemiştir.

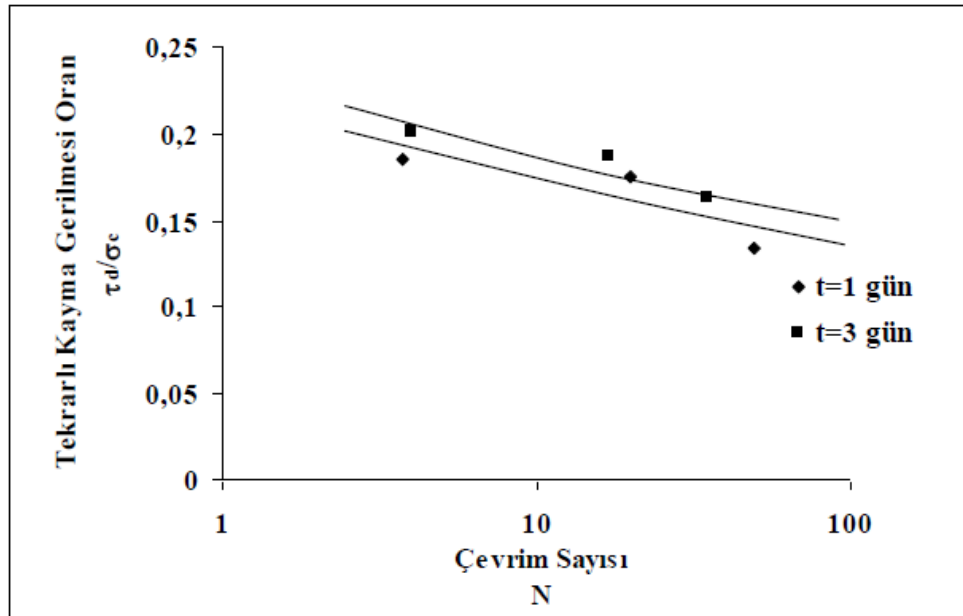
Ural ve arkadaşları (2007) farklı kil yüzdelerinde bulunan siltli zeminler üzerinde dinamik üç eksenli deneyler yapmış olup farklı dinamik kayma gerilmesi oranları ve çevrim sayıları arasındaki ilişkinin sıvılaşmayı nasıl etkileyeceği doğrultusunda çalışmışlardır. %9 ve %12 kil içeren numuneler üzerinde dinamik kayma gerilmesi oranı (CSR) olarak 0,35, 0,25 ve 0,20 değerlerinde incelemelerde bulunmuşlardır. %9 kil içeren numunelerde 0,35, 0,25 ve 0,20 CSR değerlerinde boşluk suyu basıncı oranlarının %100'e ulaşip sıvılaşma oluştuğunu gözlemlemişlerdir. %12 kil içeren numunelerde 0,35, 0,25 CSR değerlerinde boşluk suyu basıncı oranlarının %100'e ulaşip sıvılaşma oluştuğunu gözlemlemişlerdir. CSR 0,20 değerinde ise sıvılaşma görülmemekle birlikte çevrimsel hareketliliğe ulaşıldığını görmüşlerdir. Çevrimsel hareketliliği de, Castro'ya (1975) göre dinamik yüklemeye bağlı hacim azalması nedeniyle boşluk suyu basıncının aniden artarak efektif gerilmenin sıfırlanması ve Kramer'e (1999) göre sıvılaşan zeminin kayma dayanımının, statik kayma gerilmesine göre daha büyük olması şeklinde belirtmişlerdir. Aynı zamanda kil yüzdesinin artmasıyla dinamik direncin arttığını da ifade etmişlerdir.

Ülker (2004) yapmış olduğu tez çalışmasında siltli killi zeminler üzerinde çalışmıştır. Numunelerini 100 *kPa* altında konsolide etmiştir. Numunelerinin bir grubu laboratuvarında hazırlanmış iken diğer bir grubu ise araziden alınan örselenmemiş numunelerden oluşmuştur. Deneysel çalışmasının ilk gurubunu oluşturan %18 plastisiteli numunelerde yükleme hızını değerlendirmek üzere 0,35, 0,50 ve 0,75 *mm/dk* deformasyon hızlarında göçme oluşuncaya kadar statik yüklemeler yapmıştır. Deneysel sonuçlara göre deformasyon hızlarının artmasıyla yumuşak siltli kil zeminin drenajsız kayma mukavemetinin arttığını, boşluk suyu basınçlarının ise azaldığını gözlemlemiştir. Bu durum Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



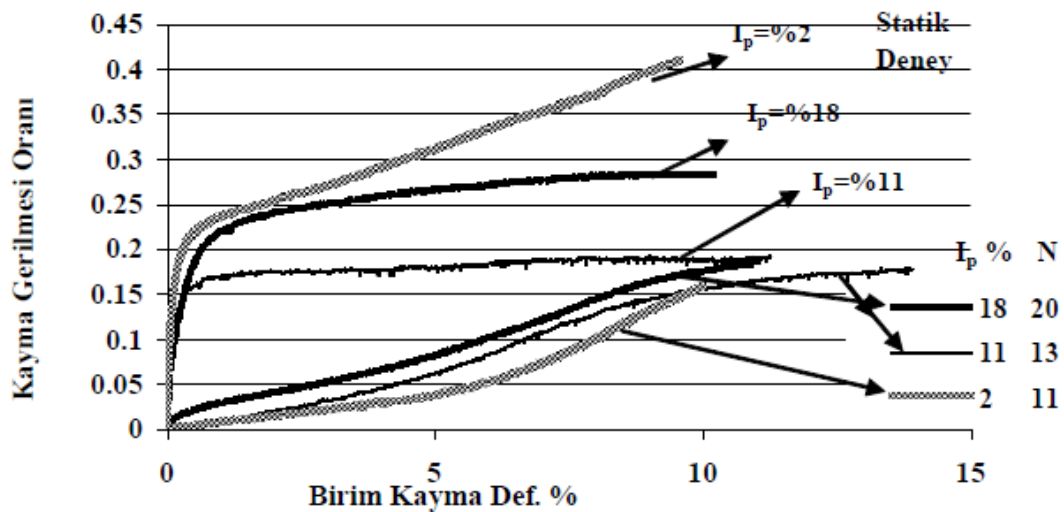
Şekil 2.2. Deformasyon hızının statik mukavemete etkisi (Ülker, 2004).

Diğer deney serisinde ise çimentolanmanın etkisini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Numunelerini 1 gün ve 3 günden oluşan iki farklı konsolidasyon süresine tabi tutmuştur. Deneysel çalışmasının sonuçlarına göre konsolidasyon süresinin uzamasıyla sıkışması artmış olan siltli kil zeminlerde çimentolanma etkisi görülmüştür. Konsolidasyon süresi artan numunenin dinamik mukavemeti de artmıştır. Araştırmacının yapmış olduğu bu çalışma Şekil 2.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Konsolidasyon süresinin labaratuvar numunelerinde dinamik mukavemete etkisi (Ülker,2004).

Aynı araştırmacının, Ülker (2004) laboratuvar numuneleri üzerinde yapmış olduğu diğer grup serisinde ise üç farklı plastisite yüzdesine sahip numuneler üzerinde farklı gerilme oranlarında dinamik burulmalı kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalarını siltli zeminler üzerinde uygulamıştır. Çalışmaya plastisite arttıkkça dinamik mukavemet de artmaktadır. Fakat bu artış değerini %10 plastisite indisine değerinden sonrası olarak belirtmiştir. Plastisite indisine %2, %11 ve %18 olan numunelerin dinamik mukavemeti incelendiğinde %2 plastisite indisine sahip olan numunenin dayanımı %11 olan numuneden küçük bir farkla fazlayken %18 olanla ise oldukça yakındır. Bu durumun plastisitesi düşük olan siltli numenin kum miktarı da yüksek olduğundan daneler arası sürtünme mukavemetinden kaynaklandığını gözlemlenmiştir. Yani, kum miktarının ve kuru birim hacim ağırlığının statik mukavemeti arttırdığını belirtmiştir. şekil 2.4.'te plastisite etkisine bağlı dayanım sonuçları gösterilmiştir.



şekil 2.4. Tekrarlı yükleme sonrası statik mukavemetlere plastisitenin etkisi (Ülker,2004).

Hyodo ve arkadaşları (1999) Japonya'nın 7 farklı bölgesinden farklı derinliklerden yüzün üzerinde örnekler almıştır. Bu örnekler deniz kilinden oluşmuştur. Bu numunelerde yaş faktörünü, plastisiteyi ve aşırı konsolidasyon oranı etkilerini ayrı ayrı incelemişlerdir. Çalışmalarını izotropik ve anizotropik gerilmeler altında, drenajsız koşullarda gerçekleştirmişlerdir. Bu numunelerde yaşlanmaya (Gerilme tarihçesi) bağlı olarak önceden var olan düşey bir akma dayanımı olduğunu görmüşlerdir. Bu

sebeple de numunelerini 3 farklı gerilme altında konsolide etmişlerdir. Bu gerilmeleri üç farklı durumda ele almışlardır. Bu basınçlar, geçmişte almış olduğu en yüksek basınçtan daha düşük bir basınçla, geçmişte almış olduğu en yüksek basınçla düşey akma dayanımı arasındaki bir basınçla ve de içsel akma dayanımından daha büyük bir normal basınç altında olarak belirtilmiştir. Bu deneylerden edinilen sonuçlara göre, plastik olmayan killer, özellikle tekrarlı yüklemelere bağlı efektif gerilmenin sıfır olması durumundan ötürü kumlara benzeyen bir davranış göstermişlerdir. Plastisite oranının artmasıyla birlikte davranış çevrimsel hareketliliğe dönüşüyor. Eğer plastisite daha da artarsa tekrarlı gerilme eğrisi dikeyleşiyor ve efektif gerilme değeri sıfır olmasa da sabitleşiyor. Plastik olmayan killerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerine göre basmaya (*Compression*) karşı çekmede (*Extension*) daha zayıflar. Aynı zamanda plastisitenin artmasıyla zeminin katılığı (*Stiffness*) da artar (Hyodo ve ark., 1999).

Kaya ve Erken (2009) yapmış oldukları çalışmalarında deney numunelerini Adapazarı'ndan temin ettikleri siltli ve killi zeminlerden elde etmişlerdir. Numunelerini Adapazarı'ndaki sekiz farklı bölgeden ve özellikle hasar görmüş binaların çevrelerinden alıp araştırmalarını dinamik üç eksenli deney sistemi kullanarak yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre yüksek silt içeriği bulunan kumlu zeminlerin dayanımı en düşük olan zemin grubu olarak belirlenmiştir. Siltler düşük ya da yüksek plastisite durumuna göre değerlendirilip dayanımının en düşük olduğu grup plastik olmayan silt grubu iken plastisitenin artmasıyla dayanımın da arttığını gözlemlemişlerdir. Killer ise silt, kum ve plastik olmayan siltlere göre daha yüksek dayanım sunmuştur.

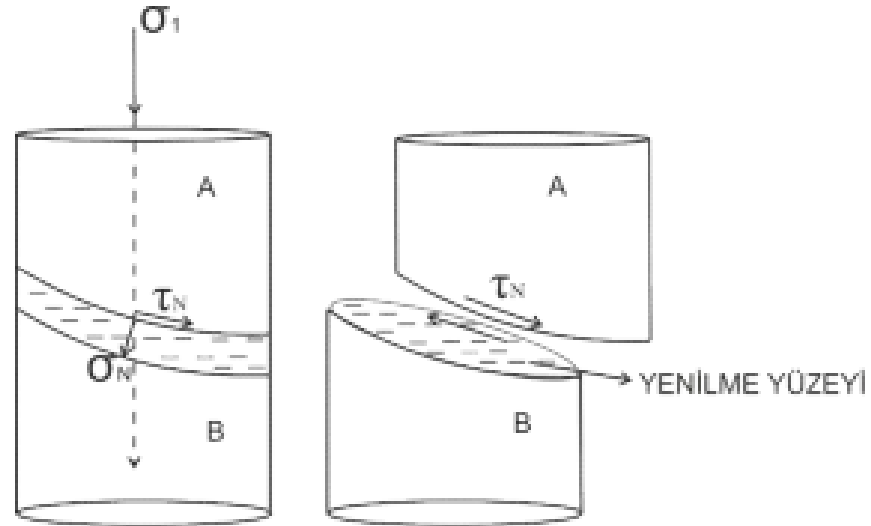
2.2.2. Tekrarlı yüklerin kum zeminler üzerindeki etkisi

Altun ve Ansal (2003) suya doymuş kumlu zeminler üzerinde, zeminlerin tekrarlı yüklemeye bağlı göstermiş olduğu davranışları incelemiştir. Bu davranışları belirleyen parametreler olarak da kayma modülünü ve sönüm oranını değerlendirmişlerdir. Deneylerini gerilme kontrollü olarak drenajsız şartlarda, farklı başlangıç ve sınır koşullarında artan genlikli gerilmelerle, frekansı 0,1 Hz de sabit tutup sinüzoidal dinamik yükleme uygulayarak yapmışlardır. Deneysel çalışmalarının sonuçlarına

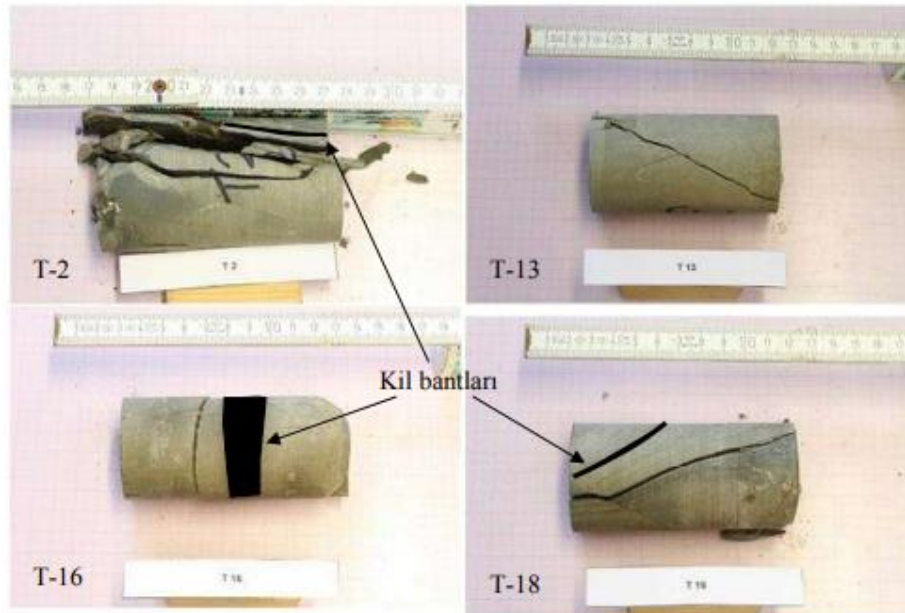
göre, çevrim sayısındaki artışla kayma modülü değerleri doğru orantılı bir şekilde artış gösterirken sönüm oranı değerlerinde bir azalmaya yol açmaktadır. Çevre gerilmesindeki ve boşluk oranındaki farklılıkların kum zeminlerin dinamik özelliklerini belirleme parametrelerinin (D ve G) deformasyona bağlı eğrilerinde değişiklikler oluşturduklarını belirlemişlerdir. Bu çalışmadan anlaşıldığı üzere frekans sabit tutulduğunda çevre basıncı dinamik özellikler üzerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır.

Kadakçı Koca ve Koca (2017) yapmış olduğu çalışmasında, kumlu marn ve marnlı kumtaşı zemin örnekleri üzerinde kuru ve suya doymuş durumlarda olmak üzere bu zeminlerin üzerindeki tek eksenli dayanımlarını ve elastik özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmasında frekansı $0,3 \text{ Hz}$ ve genliği $\pm 10 \text{ MPa}$ olarak almışlardır. Numunelerine önce dinamik yükleme uygulamış ardından statik yüklemeye kesmişlerdir. Deneysel sonuçlarına göre statik durumda düşük-orta mukavemette olan numunelerin dinamik tek eksenli yükleme altında (kuru koşullarda) mukavemetinin arttığını yani deformasyon sertleşmesinin oluştuğunu belirlemiştir. Elastisite modülünü incelediğinde ise buradaki artışın tek eksenli sıkışma dayanımındaki artışa oranla iki buçuk kat daha fazla olduğunu belirtmiştir. Bu artışları kimyasal ve fiziksel özelliklerle birlikte değerlendirdiğinde, boşluk oranı, birim hacim ağırlığı ve numunelerin yapısında ihtiva ettiği mikro çatlaklar, kil bantlarının dağılımı ve kimyasal olarak bileşenlerinin tümünün birlikte mukavemeti ve elastisite modülünü arttırdığını belirtmiştir. Aynı zamanda numunelerdeki kil bantlarının da mukavemeti doğrudan etkilediğini ifade etmiştir. Numunelerinden biri olan T-3'ün diğerlerine nazaran daha yüksek mukavemete sahip olduğu görülmüştür. Bunun gerekçesinin de kimyasal bileşeni olan CaO 'ya, porozitesinin düşüklüğüne ve içerdiği kil bantlarının daha ince olmasından kaynaklandığını söylemiştir. Dinamik yük altında, numunelerin içerdiği CaO miktarının artması ve Na_2O , Fe_2O_3 miktarlarının azalmasıyla dayanımın arttığını belirtmiştir. Bir diğer örneği olan T-2'de ise poison oranının $0,5$ olduğunu belirtmiştir (Suya doymuş). Bu örnekte de yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olduğunu bunun sebebinin de yapısında ihtiva ettiği kil içeriğinin enerjiyi soğurmasından kaynaklı olarak düşündüğünü belirtmiştir.

Araştırmacının kil bantlarının numuneler üzerindeki etkisini gösterdiği grafik Şekil 2.5.'te verilmiştir. Şekil 2.6'da ise araştırmacının deney numunelerindeki yenilme yüzeylerinin kil bantları doğrultusunda oluştuğunu gösterdiği fotoğraf verilmiştir.



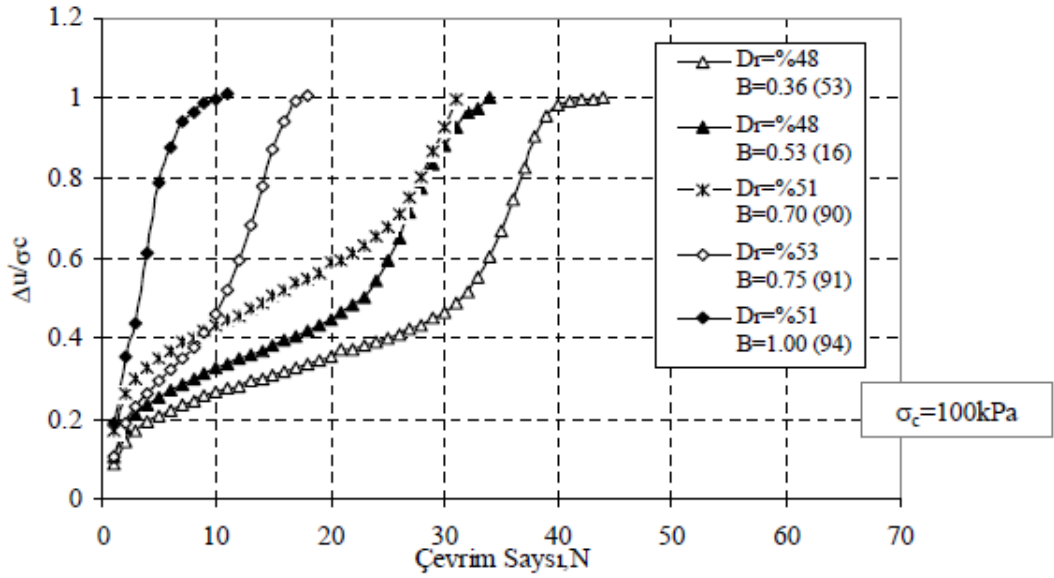
Şekil 2.5. Kil bantlarının yenilme üzerindeki etkisinin şematik gösterimi (Kadakçı Koca ve Koca, 2017).



Şekil 2.6. T-2, T-13, T16 ve T18 örneklerinin yenilme düzlemleri (Kadakçı Koca ve Koca, 2017).

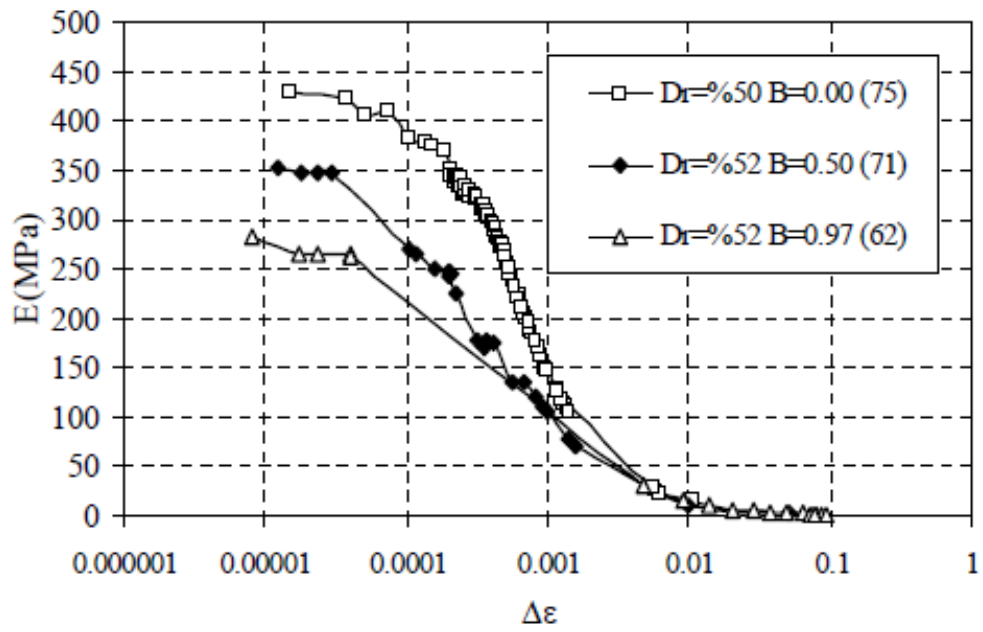
Elibol ve Erken (2005) temiz kum zeminler üzerinde dinamik üçeksenli basınç deneyleri yapmıştır. Çalışmasını farklı doygunluk derecelerine (B değerine) sahip

numuneler üzerinde yaparak doygunluk derecesiyle mukavemet arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla çalışmıştır. Numunelerini doygun, kısmi doygun ve doygun olmayan olarak sınıflandırmıştır. Deneysel sonuçlarına göre, dinamik üç eksenli deney sisteminde, sabit tekrarlı gerilme değerinde, kuru olarak hazırlanmış yani $B=0$ olan numunelerde deformasyon değerinin %0,1 seviyesinde kalmasıyla en dayanıklı numune olarak belirlemiştir. Kısmi doygun olan numunede B değerinin 0,36 olduğu durumda yaklaşık 40 çevrimde sıvılaşma olurken, B değerinin 1 olması durumunda ise 10 çevrimde sıvılaşma olmuştur. Yani kısmi doygun olan numune dört kat daha dirençlidir. Bu durum Şekil 2.7.'de gösterilmiştir



Şekil 2.7. $0.00 \leq B \leq 1.00$ ve $DKG0=0.35$ olduğu durumda $\Delta u/\sigma_c$ oranının yükleme çevrimi ile değişim ilişkisi (Elibol,2005).

Elastisite modülü değerleri incelediğinde ise kuru numunenin kısmi doygun ve doygun olan numunelere göre daha büyük direnç gösterdiği görülmüştür. Genel bir kanı olarak, kumlu zeminlerde, kısmi doygunluğun sağlanması halinde zeminin direncinin artabileceği doğrudur. Şekil 2.8.'de eksenel birim şekil değişiminin elastisite modülü değerine göre değişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Doymun, kısmi doymun ve kuru numunelerin elastisite modülü azalım ilişkilerinin karşılaştırılması (Elibol,2005).

BÖLÜM 3. MALZEME, DENEY VE YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu bölümde, yapılmış olan deneysel çalışma adımları anlatılmıştır. Laboratuvarında hazırlanmış toplamda altı adet silt ve kil karışımından oluşan numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan likit, plastik limit, piknometre ve hidrometre deneyleri sunulmuştur. Sonrasında tez çalışmasının temelini oluşturan CTX deney sistemi hakkında bilgi verilmiştir. Bu deney sisteminde numuneler öncelikle dinamik yükleme olmadan sadece statik yüklemeye maruz tutulmuş ve kayma dayanımları bulunmuştur. Sonrasında aynı özellikteki bir başka grup numuneye dinamik yükleme uygulanmış ve hemen sonrasında numuneler statik olarak kesilmiştir. Tüm dinamik deneylerde çevrimsel gerilme oranı (CSR) değeri 0,175 olarak sabit alınmıştır. N çevrim sayıları da 4, 10, 20 ve 40 olarak belirlenmiş ve kesme hızı olarak 0,8 mm/dk seçilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmada kullanılan frekans değeri 0,5 Hz olarak sabit alınmıştır.

3.2. Malzeme ve Numune Hazırlama

Bu çalışmada, temel malzeme olarak Adapazarı silti ve kili seçilmiştir. Bu malzemelerden belirli oranlarda bir araya getirilerek toplamda altı adet homojen karışım elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan malzemeler yapısal olarak ayrıştırılmış saf silt ya da kil olmadan doğada bulunan haliyle kullanılmıştır.

Silt ve kil etüve atılıp en az 24 saat süreyle kurutma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra belirlenen oranlarla karıştırılmıştır. Suya doymun hale getirilen bu altı farklı karışımdan numuneler hazırlanmıştır.

Numuneler 50 mm çapında ve boyu çapının yaklaşık iki katı olacak şekilde maksimum %10'luk bir artış ya da azalışla 90-110 mm arasında olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneysel numunelerinin elde edildiği karışımların oranları Tablo 3.1.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Karışımlara ait içerik yüzdeleri

| Tüm karışımlar | | |
|-----------------|------------|-----------|
| 1 no'lu karışım | % 100 silt | % 0 kil |
| 2 no'lu karışım | % 80 silt | % 20 kil |
| 3 no'lu karışım | % 60 silt | % 40kil |
| 4 no'lu karışım | % 40 silt | % 60 kil |
| 5 no'lu karışım | % 20 silt | % 80kil |
| 6 no'lu karışım | % 0 silt | % 100 kil |

Karışımlar silt ve kil yüzdelerine göre ağırlıkça oranlanarak 6 farklı türde olacak şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra karışımlara su ilave edilmiş ve karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Karışım desikatöre alınarak içindeki hava da suyla yer değiştirmiş ve böylece suya doymuş bir karışım elde edilmiştir. Karışımı hazırlama aşamaları kısaca Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Şekil 3.1. ile üzerindeki sıralamayla, etüvde kurutulmuş olan siltin ve kilin yüzdesine göre ağırlıkça oranlanması (1), karışıma su ilave edilmesi (2), zemin danelerinin su ile homojen hale getirilmesi (3), desikatöre yerleştirilen karışımdaki hava kabarcıklarının alınması (4) gösterilmiştir.

Bu çalışmada oluşturulmuş olan karışımlardan hazırlanan numuneler karışım numarası ile isimlendirilmiştir. Örneğin 1 numaralı karışımdan hazırlanan numune metin içinde '1 no'lu numune' olarak nitelendirilmiştir.



Şekil 3.1.Karışımı hazırlama aşamaları

3.3. Zeminlerin Fiziksel Özellikleri

Laboratuvarda hazırlanmış olan örselenmiş numunelerin, fiziksel özelliklerinin tayini için literatürde ön görülen deneyler yapılmıştır. İlk olarak TS 1900 (2006)'ya göre Atterberg kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Kıvam limitleri zeminlerin yapılarında ihtiva ettikleri su içeriklerine göre belirlenmektedir. Kıvam limitleri olarak likit ve plastik limit deneyleri yapıldıktan sonra zeminlerin özgül ağırlıklarının tayin edilebilmesi için piknometre deneyi yapılmıştır. Son olarak da kil ve silt oranlarının belirlenebilmesi için hidrometre deneyleri yapılmıştır.

Likit limit, zeminin sıvı halden plastik hale geçtiği sınır değerdeki su içeriği olup literatürdeki gösterimi w_L ile yapılmaktadır. Likit limit tayini; Casagrende Yöntemi, Düşen Koni Penetrasyon ve Tek Nokta Yöntemi olmak üzere üç farklı metotla yapılabilmektedir. Bu çalışmada Casagrende yöntemi seçilmiştir. Alınan bir miktar zemin suyla karıştırılıp belirli bir kıvama getirilmiş, içerisindeki suyun homojen dağılımının sağlanması için plastik bir poşet içine koyulmuş ve 48 saat bu şekilde

bekletilmiştir. 48 saat sonra zemine az miktarda su ilave edilerek tekrar karıştırılmış ve bu karışımdan alınan bir miktar zemin Casagrande aleti üzerine zeminin yüzeyi düzgün olacak şekilde serilmiştir. En fazla 1 cm kalınlığında serilmiş olan bu zemin, oluk açma bıçağıyla ortadan ikiye ayrılmıştır. Casagrande aletinde, saniyede 2 düşüş olacak şekilde 10 ile 50 arasında düşüş yapılmıştır. Ortadan ikiye bölünmüş olan parçaların (Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.) akarak 13 mm'lik kısmın kapanmaya başlamasıyla deney sonlandırılmıştır. Bu parçaların birleştiği yerden alınan zemin örneği, su muhtevası tayini için etüve atılmıştır. Her seferinde numunenin su içeriği artırılarak toplamda dört adet deney yapılmıştır. Daha doğru deney sonuçlarının alınabilmesi için yapılan dört deneyden ikisindeki düşüş sayısı 25'in üzerinde, kalan ikisinin de 25'in altında olmasına dikkat edilmiştir.



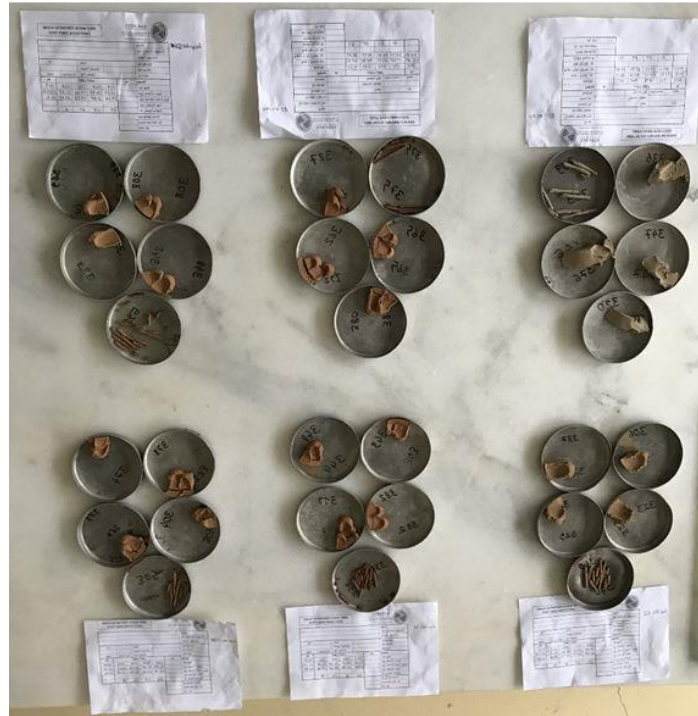
Şekil 3.2. Casagrande yöntemiyle likit limit deneyi.

Plastik limit, zeminin plastik halden yarı katı hale geçtiği sınır değerdeki su içeriği olup w_p ile gösterilmektedir. Bunun için likit limite başlamadan önce hazırlanan örnekten alınan bir miktar zemin, buzlu cam üzerine serilip içeriğindeki suyunu bir miktar kaybetmesi beklenilmiştir. Buzlu cam üzerindeki zemin, 3 mm çaplı çubuk halinde olacak şekilde avuç içiyle yuvarlanmıştır. 3 mm çapa ulaştığında numunede

çatlamalar başlaması ile deney sonlandırılmıştır. Bu aşamaya gelebilmek için zeminin durumuna göre içerisine su ilave edilmiş ya da buzlu cam üzerine serilip avuç ayası ile yuvarlanarak kuruması sağlanmıştır. Deneyin sonunda su muhtevası tayini için alınan çatlayan örnekler etüve atılmıştır. Etüv sonrası numune örneği Şekil 3.3.'te gösterilmiştir. Şekil 3.4.'te ise tüm karışımlara ait likit ve plastik limit örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Etüvden çıkmış plastik limit deney örneği.



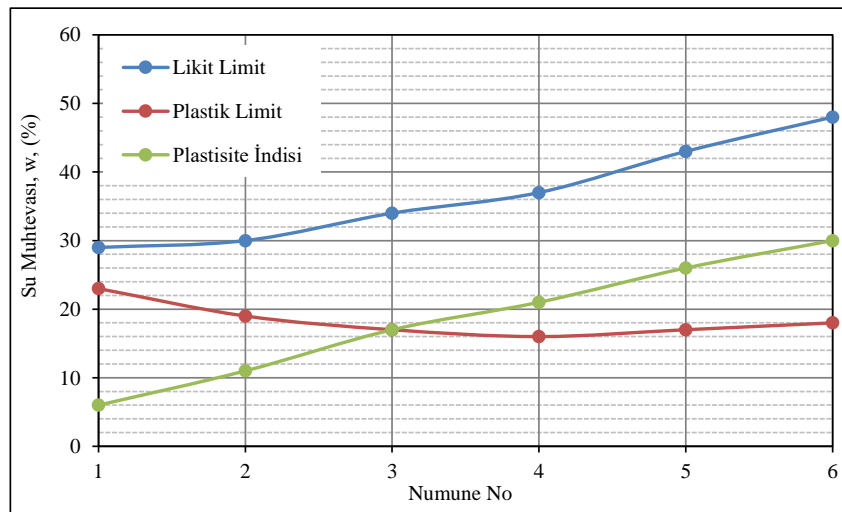
Şekil 3.4. Tüm numunelere ait likit limit ve plastik limit deney örnekleri.

Tüm karışımlar üzerinde yapılmış olan likit limit ve plastik limit deney sonuçları ve bu sonuçlara göre belirlenen plastisite indisi değerleri Tablo 3.2.'de gösterilmiştir. Ayrıca hidrometre deneyi sonunda yıkamalı elek sonucuna göre numunelerin ince dane oranları ve TS 1500(2000)'e göre belirlenen zemin sınıfları da toplu halde gösterilmiştir.

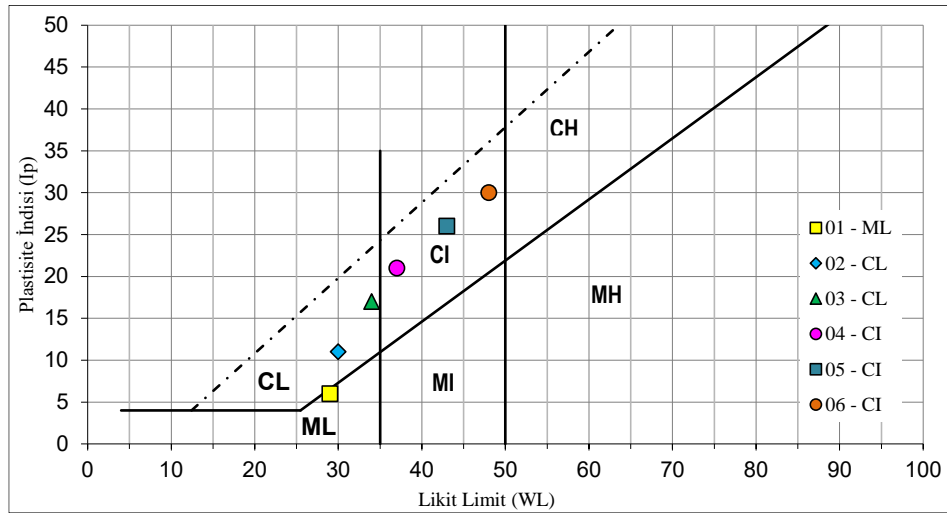
Tablo 3.2. TS1500/2000 Sınıflama deney sonuçları.

| Numune No | Likit Limit, w_L , (%) | Plastik Limit, w_P , (%) | Plastisite İndisi, IP, (%) | Yüzde İnce, FC, (%) | Sınıf (TS1500/2000) | Açıklama (TS1500/2000) |
|-----------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1 | 29 | 23 | 6 | 91,60 | ML | Düşük Plastisiteli Silt |
| 2 | 30 | 19 | 11 | 91,60 | CL | Düşük Plastisiteli Kil |
| 3 | 34 | 17 | 17 | 89,97 | CL | Düşük Plastisiteli Kil |
| 4 | 37 | 16 | 21 | 82,42 | CI | Orta Plastisiteli Kil ve Az Kum |
| 5 | 43 | 17 | 26 | 85,60 | CI | Orta Plastisiteli Kil |
| 6 | 48 | 18 | 30 | 85,90 | CI | Orta Plastisiteli Kil |

Şekil 3.5.'te numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri grafiksel olarak sunulmuştur. Grafiklerde numunelerin su içerikleri anlaşılır bir biçimde gösterilmiştir. Likit limit ve plastisite indisi değerleri, plastisite kartına yerleştirildiğinde, bu altı numunenin bulunduğu yerler işaretlenmiştir. Bu şekilde numunelerin TS 1500(2000)'e göre ait oldukları zemin sınıfları Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Likit-plastik limit ve plastisite indisi.



Şekil 3.6. Plastisite kartı TS1500/2000.

Piknometre deneyi, ince daneli zeminlerde dane birim hacim ağırlıklarının suyun birim hacim ağırlığına oranlanmasıyla belirlenmektedir. Piknometre değeri literatürde G_s ile gösterilmekte olup boyutsuzdur. Bu deney yardımıyla zeminlerin özgül ağırlıkları tayin edilmektedir.

Özgül ağırlık (Piknometre) deneyine başlarken ilk adım olarak etüvde kurutulmuş olan piknometreler kapakları ile birlikte tartılarak ağırlıkları not alınmış ve bu değer M_1 olarak kaydedilmiştir. Deney için hazırlanan zeminden yaklaşık 10 gr alınıp piknometre şişelerinin içine koyulmuş ve kapağıyla birlikte tartılan piknometrelerin ağırlığı M_2 olarak not edilmiştir. Sonrasında zemin numunesinin üzerini hafif geçecek şekilde saf su ilavesi ile piknometre hafifçe karıştırılmıştır. Böylece zeminle suyun homojen karışımı sağlanmıştır (Şekil 3.7.). Daha sonra desikatöre alınan piknometrelerin içindeki hava alınmış ve yerine saf su ilave edilmiştir. Piknometreler yeni haliyle tekrar tartılmış ve bu değer M_3 olarak kaydedilmiştir. Son olarak tamamen boşaltılan piknometreler saf su ile doldurulup tartılmış ve bu değer M_4 olarak not edilmiştir.



Şekil 3.7. Özgül ağırlık deney örnekleri.

G_s özgül ağırlık hesabı, aşağıda gösterilen eşitlik (Denklem 3.1) kullanılarak hesaplanmıştır (TS 1900-1).

$$G_s = \frac{\rho_L(M_2 - M_1)}{\rho_w(M_2 + M_4 - M_3 - M_1)} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte ρ_L , deneyde kullanılan sıvının birim hacim ağırlığını, ρ_w , suyun birim hacim ağırlığını, M_1 , piknometrenin ağırlığını, M_2 , piknometre ve kuru zemin ağırlığını, M_3 , piknometre, zemin ve suyun toplam ağırlığı, M_4 , damıtılmış su ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığını ifade etmektedir (TS 1900-1).

Bu deneysel çalışmada kullanılan altı farklı siltli kil zeminlere yapılan piknometre deney sonuçları Denklem 3.1.'de gösterilen hesaplama yöntemine göre değerlendirilmiş olup tüm sonuçlar Tablo 3.3.'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Özgül ağırlık deney sonuçları.

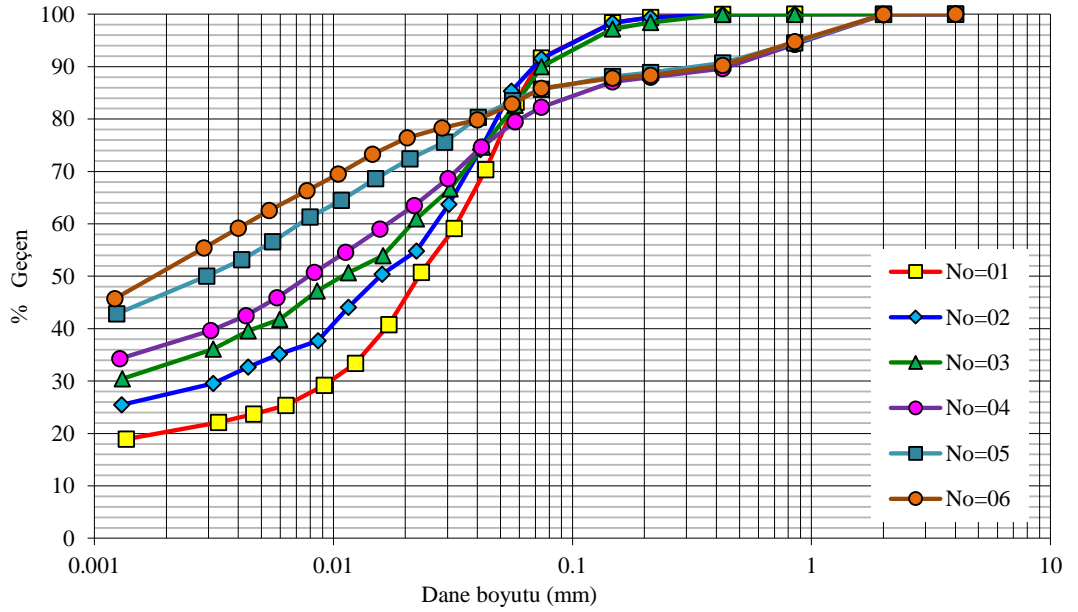
| Numune No | Piknometre, M_1 (gr) | Pik.+Kuru Num., M_2 (gr) | Pik.+Num.+Su, M_3 (gr) | Pik.+Su, M_4 (gr) | G_s |
|-----------|------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|-------|
| 1 | 26,377 | 38,032 | 86,935 | 79,675 | 2,65 |
| 2 | 28,535 | 38,604 | 86,163 | 79,757 | 2,75 |
| 3 | 26,561 | 35,908 | 85,083 | 79,222 | 2,68 |
| 4 | 26,347 | 33,779 | 83,786 | 79,085 | 2,72 |
| 5 | 26,070 | 33,847 | 84,472 | 79,544 | 2,73 |
| 6 | 26,304 | 34,349 | 84,056 | 78,932 | 2,75 |

Hidrometre deneyi, ince daneli zeminlerde dane çapı dağılımının hesaplanması için yapılmaktadır. Böylece ince daneli zeminlerin kil ve silt yüzdeleri belirlenebilmektedir. Hidrometre deneyinin yapım aşamaları özet olarak Şekil 3.8. üzerinde sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 3.8. ile üzerindeki sıralamayla, hidrometre deneyine, 10 No'lu elekten geçen 50 gr zemin örneği alınarak başlanılmıştır. Bu zeminin üzerine 50 ml hidrojen peroksit (Perhidrol) dökülerek içindeki organik maddeler yakılmış olup (1) ardından zemin, etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuştur (2). Etüvden alınan zemine 125 mililitrelik Sodyum Hegza Meta Fosfat (Kalgon) dağıtıcı çözeltisi eklenerek zeminin homojen dağılımı sağlanmıştır (3). Pipet yardımıyla damıtık su ilave edilen zemin mekanik karıştırıcıya alınarak karıştırılmış (4) ve mezüre aktarılıp saf su ilave edilerek 1000 ml'ye tamamlanmıştır (5). Mezürdeki karışım çalkalanarak homojenleştirilip sabit sıcaklık havuzuna koyulmuş ve kronometre çalıştırılıp belirli zaman aralıklarında (başlangıç olarak: 0,5'inci dakika, 1'inci dakika, 2'nci dakika ve 4'üncü dakika) hidrometre karışımların içine koyulup okumalar alınmış ve diğer saat okumalarının da alınmasıyla deney sonlandırılmıştır (6). Deney sonunda mezürdeki karışım 200 no'lu elekten yıkanarak elenmiş ve elek üzerinde kalan zemin, içindeki suyun kuruması için etüve atılmıştır. Etüvden alınan kurumuş zemin üzerinde elek analizi yapılp değerler kaydedilmiştir.

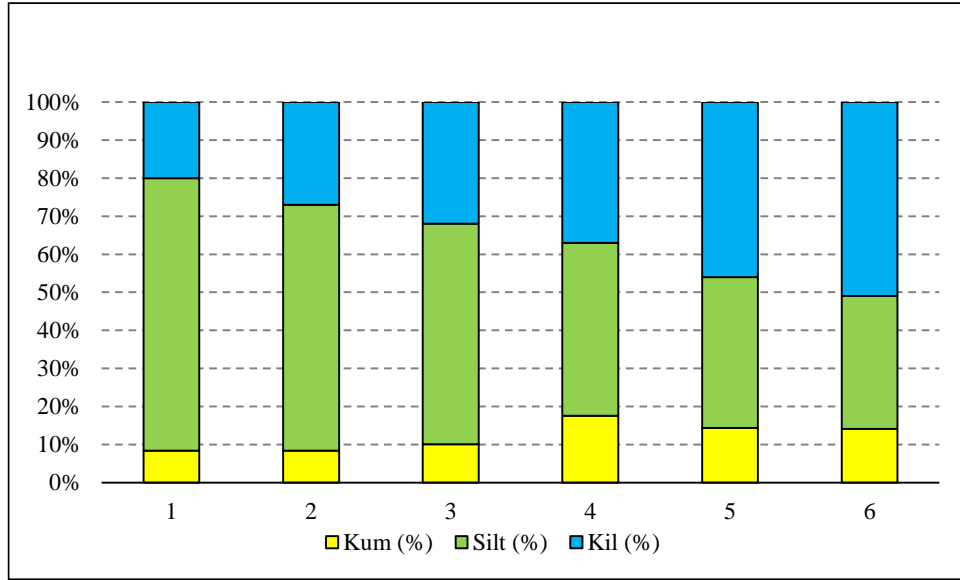


Şekil 3.8. Hidrometre deneyi yapım aşamaları.

200 No'lu elekten geçen zeminlerin dane dağılımını hesaplamak için yapılmış olan hidrometre deneyi sonuçlarına göre granülometre eğrileri Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. Numunelerin silt, kil ve kum yüzdelерinin gösterimi Şekil 3.10.'da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Granülometre eğrisi.



Şekil 3.10. Yüzde kum, silt ve kil oranları histogramı.

3.4. Ön Konsolidasyon Aşaması

Karışımlar oluşturulduktan sonra numune hazırlama safhasına geçilmiştir. Numune hazırlama aşamaları sırasıyla Şekil 3.11. üzerinde gösterilmiştir. İlk olarak alt başlığın üzerine poroz taş ve onun da üzerine filtre kağıdı serilmiştir (1). İkinci adımda bunun da üzerine plastik tüp yerleştirilip karışımdan alınan örnek zemin tüpe yerleştirilmiştir (2). Daha sonra tüpe yerleştirilen zeminin üzerine önce filtre kağıdı sonrasında da poroz taş yerleştirilmiş (3) ve poroz taşın üzerine de yük dağılımını homojenleştirme amacıyla yük dağıtıcı aparatı koyulmuştur (4). Son olarak hücrenin üzerine su ilave edildikten sonra üst başlık takılmış (5) ve numune kendi ağırlığında çökmeye bırakılmıştır. Bir süre sonra yük aşama aşama artırılarak toplamda 100 kPa gerilme altında konsolidasyona bırakılmıştır. Ön konsolidasyon işlemi için tüplere yerleştirilmiş numuneler 100 kPa altında 4-7 gün süreyle doğal silt ya da kil içeriğine göre askıda kalmıştır.



Şekil 3.11. Numuneyi hazırlama aşamaları.

Ön konsolidasyona bırakılan numunelerde oturmalar tamamlandığında CTX hücresine yerleştirmeye hazır hale gelmişlerdir. Karışımların kil yüzdesi fazla olanlarında ön konsolidasyondan sonra şekil ve formunu koruyabilen numuneler açığa çıkmıştır. Ama silt yüzdesi fazla olan karışımdan oluşturulan numunelerin deney sırasında formunu koruyabilmesi için ön konsolidasyon yüklemesinin ardından buzluğa aktarılmış ve en az 24 saat süreyle donması beklenmiştir. Böylece siltli numuneler de şeklini ve formunu koruyarak deneye hazır duruma gelmiştir. Deney için hazır hale gelen numunenin ölçüm ve ağırlık verilerinin alınmasının ardından üç eksenli dinamik deney aşamasına geçilmiştir.

3.5. Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi

Bu tez kapsamında Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvar'ında bulunan Wykeham Farrance firmasına ait 1999 yılı yapımı dinamik üç eksenli deney sistemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın temelini oluşturan statik ve dinamik deneylerin

yapıldığı bu deney sistemi hakkında genel bilgiler bu kısımda ele alınmıştır. Deney sisteminin kullanım amacı ve sistemdeki gerilme durumları hakkında genel kabul gören bilgiler hatırlatılmış ve deneysel çalışmada izlenen yol gösterilmiştir.

3.5.1. Dinamik üç eksenli deney sistemi (CTX) genel özellikleri

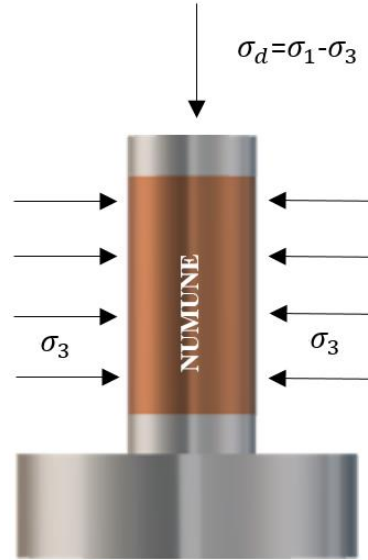
Üç eksenli hücre kesme deneyi, zeminin kayma mukavemeti parametreleri olan kayma direnci açısını (ϕ) ve kohezyonu (c) bulmak için kullanılan bir deney sisteminden oluşmaktadır. Kayma direnci göçmeye mahal vermeden hemen önce zeminin taşıyabileceği en büyük gerilme olarak bilinmektedir. Deney sisteminde, izotropik ve izotropik olmayan yükleme biçimleri seçimi yapılabilmektedir. Deneysel aşamalar doyurma (*Saturation*) ile başlayıp doyurması tamamlanan numunenin konsolidasyon (*Consolidation*) aşamasına bırakılmasıyla devam etmektedir. Bir sonraki adımda ise konsolidasyonunu tamamlamış olan numune için dinamik yükleme (*Cyclic*) kısmına geçilmektedir. Son olarak dinamik yüklemekten hemen sonra kesme (*Shear*) işlemiyle deney sonlandırılmaktadır.

Deney sisteminde konsolidasyonsuz drenajsız (UU), konsolidasyonlu drenajlı (CD) ve konsolidasyonlu drenajsız (CU) şeklinde amaca bağlı olarak deneyi yapan araştırmacının seçimi doğrultusunda çalışmalar yürütülebilmektedir. Bu çalışmada depremden hemen sonraki durum ele alınmıştır. Suyun drene olması için yeterli zaman olmadığı için konsolidasyonlu drenajsız (CU) deneysel çalışma seçilmiştir.

Laboratuvar deneylerinde doğru sonuçlara gidebilmek için arazideki zeminlere en yakın modeli oluşturabilme çok önemli olmaktadır. Bu sebeple de sistemde zemine üç eksenli gerilmeler uygulanarak zemin arazideki gerilme koşullarına tabi tutulmaktadır. Böylece arazideki şartları gerçeğe daha yakın temsil eden bir deney gerçekleştirilmektedir.

Birbirine dik üç doğrultudaki bu asal gerilmeler σ_1 , σ_2 ve σ_3 olarak gösterilmektedir. σ_1 'in en büyük gerilmeyi, σ_3 'ün en küçük gerilmeyi, σ_2 'nin ise orta eksenel gerilmeyi ifade ettiği bilinmektedir. Deneyin başında tüm gerilmeler birbirine eşit başlarken

deney sırasında σ_2 ve σ_3 birbirine eşit olmaktadır. σ_1 ise sistemdeki en büyük gerilmeyi temsil ederek uygulanan aksel yük ile hücre basıncının toplamına eşit olup kırılma gerçekleşinceye kadar artmaktadır. Numuneye uygulanan aksel gerilme yani σ_d 'nin (Deviatör gerilme) $\sigma_1 - \sigma_3$ olarak gösterildiği bilinmektedir. Bu gerilmeler Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Numunenin maruz kaldığı basınçlar.

3.5.2. Dinamik üç eksenli deney sistemi uygulama

Bu çalışmada Wykeham Farrance firmasının 0002-2260 model numaralı ve kendi içinde özel yazılımı olan sistemi kullanılmıştır. Sistem 50 mm çapı olan numuneler için uygundur ve 50-60 Hz frekansta çalışmaktadır.

Üç eksenli deney sisteminin hava hattı için harici bir kompresör ve kompresör hattına bağlı bir hava kurutucu ile basınç regülatörü, bağlantı parçaları için gerekli hava hortumları ve redüksiyonları, dengeli ve sabit bir basınç sağlamak için ufak bir dengeleme tankı gerekmektedir. Üretilen bu basınçlı hava yükleme çerçevesine iletilerek numuneye yükleme yapılması sağlanmaktadır. Sisteme eklenen iki adet sabit basınç ünitesi, numuneye çevre basıncı ve geri basınç (Ters basınç) verilmesini sağlamaktadır. Yükleme çerçevesi ve iki adet sabit basınç sağlar ünitesinden kaynaklanan basınçlı ortam basınca dayanıklı şeffaf üç eksenli deney hücresi ile

güvenli kılınmıştır. Ayrıca numunenin üst ve alt kısımlarında oring kullanılarak sızdırmazlık garanti altına alınmaktadır. Oluşturulan basınç sabit basınç sağlama ünitesindeki basınç ölçer (manometre) ya da sistemdeki yazılım programından kontrol edilmektedir. Sistemdeki yazılım programı basınç kontrolünün yanı sıra istenilen deney aşamasına geçilmesini de sağlamaktadır.

Deney sistemini oluşturan bölümler Şekil 3.13.'te numaralandırılarak gösterilmiştir. Bu numaralandırmaya göre sistem parçaları Şekil 3.13. ile üzerindeki sıralamayla, su ve hava dolaşım sistemi (1), kurutucudan gelen hava hortumu (2), basınç dengeleme tankı (3), yükleme çerçevesi (4), sabit basınç sağlar (5, 6), kontrol ve veri alıcı sistem (7), yazılım programı (8), üç eksenli deney hücresi (9), geri basınç vanası (10), hücre basıncı vanası (11), boşluk suyu basıncı vanası (12) olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.13. Üç eksenli basınç deney sistemi (CTX).

Deneye bu şekilde başlanmış olsa da çalışmaların devamında bazı değişimler yapılmıştır. Bu çalışmada karşılaşılan bir takım aksaklıklar nedeniyle deneye bu sistemle devam edilememiştir. Hücre basıncı ve geri basınç sisteme dışarıdan basınç cihazları (*Pressure test*) takviye edilerek sağlanmıştır. Bu basınç cihazları Şekil 3.13.

üzerindeki sıralamayla (5) ve (6) olarak gösterilmiştir. Yazılımdan giriş yapma imkanı olduğu için programda tekrarlı yükleme (*Cyclic*) ve kesme (*Shear*) aşamaları aktif hale getirilip doyurma (*Saturation*) ve konsolidasyon (*Consolidation*) aşamaları kapatılmıştır. Bu aşamalar dışarıdan manuel olarak takip edilmiştir.

Yazılımda kullanılan test yöntemi ASTM D 5311'e göre olup kontrol modu olarak da gerilmeye bağlıdır. Tekrarlı yükleme verileri olarak dalga boyu (*Pulse width*) değeri 2000 *msec*, tepeden tepeye genlik (*Peak to peak amplitude*) 70 *kPa* değerleri sabit olarak alınmış ve tekrarlı çevrim sayısı (*Cycle count*) 4, 10, 20 ve 40 olarak numunelere göre farklılık göstererek girişleri yapılmıştır.

Dalga boyu olarak 2000 *msec* değeri, 1 çevrimsel yüklemenin gerçekleşmesi için gereken toplam sürenin 2 *sn* olduğunu ifade etmektedir ve bu durum periyot olarak tanımlanırken literatürdeki gösterimi T ile yapılmaktadır. Frekans ise birim zamanda gerçekleşen dalga boyu olarak ifade edilmektedir ve literatürdeki gösterimi f ile yapılmaktadır. Frekans ile periyot arasındaki bağıntının Denklem 3.2.'de gösterildiği gibi olduğu bilinmektedir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte, f frekansı ve T periyodu ifade etmektedir. Denklem 3.2. bağıntısı kullanılarak yapılan hesaplamaya göre frekans 0,5 *Hz* olarak sabit alınmıştır.

Deneysel çalışmada dinamik yükleme oranı olarak ifade edilen *CSR* değeri 0,175 olarak sabit alınmıştır. Tekrarlı yükleme verileri olarak tepeden tepeye genlik (*Peak to peak amplitude*) 70 *kPa* değerinden, tepeden başlangıç noktasına kadar olan genlik değerinin de 35 *kPa* olduğu anlaşılmaktadır. Bu değere göre çevrimsel gerilme oranı hesaplanmıştır. Çevrimsel gerilme oranının hesaplanması Denklem 3.3.'te gösterildiği gibidir.

$$CSR = \frac{\sigma_{dev}}{2\sigma_3} = \frac{35}{2*100} = \pm 0,175 \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte, σ_{dev} dalga boyundaki tepeden başlangıç noktasına kadar olan genlik değerini, σ_3 konsolidasyon değerini ve *CSR* ise çevrimsel gerilme oranını ifade etmektedir.

3.5.3. Dinamik üç eksenli deney sistemi numune kurulumu

Numune hücreye yerleştirilmeden önce, cihazın ön hazırlığı yapılmıştır. Bunun için öncelikle hava basıncı açılmış ve devamında hava kurutucu aktif hale getirilmiştir. Sonrasında bilgisayar ortamında UTM 4 programı açılmıştır. Son olarak *CTX* deney sistemi açılmış ve tüm başlıklardan su geçirildikten sonra herhangi bir yerde tıkanıklık olup olmadığı suyun geçişi yapılarak kontrol edilmiştir. Hazırlanmış olan numune, durumuna göre (İçerdiği kil yüzdesi) buzluktan ya da askıdan alınmıştır.

Numune deformasyona uğramadan hücresinden çıkarılmış ağırlık ve boy özellikleri not alınmıştır. Bu ölçüm değerleri programa numune bilgileri ve tarih de belirtilerek giriş yapılmıştır; Tekrarlı yük sayısı, *CSR* oranı, kesme hızı da sisteme giriş yapılarak belirtilmiştir. Alt başlığa önce poroz taşı onun üzerine filtre kağıdı serilip ve üzerine de numune koyulmuştur (Şekil 3.14.). Aynı şekilde numunenin üzerine de filtre kağıdı ve poroz taş yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Deney öncesi numune yerleştirme.

Eğer numunenin kil içeriği yüksek ise konsolidasyonu yani suyun drenajını kolaylaştırmak adına numunenin çevresine de filtre kağıdı sarılmıştır. Daha sonra numunenin çapına uygun olarak tasarlanmış metal kalıp kullanılarak numuneye membran giydirilmiş, üst ve alt başlıklardan o-ringlerle sabitlenmiştir. Üst başlık da yerine yerleştirildikten sonra hücre kapsülü takılmıştır. Şekil 3.15.'te kapsülü yerleştirilen numune gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Hücre kapsülü yerleştirilen numune.

Hücrenin içine su doldurulmuş ve havası alınmıştır. Çevre basıncı (σ_3), hücre içindeki numuneye hücre içine doldurulan su ile sağlanmıştır. Çevre basıncı, literatürde hücre basıncı ya da yanal basınç olarak da ifade edilebilmektedir. Basınç sağlayan cihaz üzerinden çevre basıncı değeri ayarlanmış, bu basıncı ileten vana açılmıştır. Bu basınç numuneye verildikten sonra da geri basınç değeri diğer basınç sağlayan cihaz üzerinden ayarlanmış ve basıncı ileten vana da açılarak bu yük numuneye verilmiştir. Numuneler bulamaç yöntemiyle hazırlandığından doymun olduğu kabul edilmiş olan numunelerin konsolidasyonunu tamamlaması beklenilmiştir. Konsolidasyon takibi için numunedeki su çıkışı gözlemlenmiş eğer çıkan su seviyesi sabitlenmişse ya da su çıkışını ölçen saatte bir ilerleme olmuyorsa numune konsolidasyonunu tamamlamış olarak değerlendirilmektedir. İkinci bir seçenek olarak, numuneye uygulanan çevre basıncıyla geri basıncın arasındaki basınç farkının, boşluk suyu basıncı olarak okunması gerekmektedir. Boşluk suyu basıncı artışının çevre basıncı artışına oranının %95 ve üzerine çıkması durumunda konsolidasyon tamamlanmış demektir. Bu çalışmada her iki durum da kontrol edilmiş, boşluk suyu basıncı temel alınarak

konsolidasyon takip edilmiştir. Sabit çevre basıncı altında, geri basınç vanası kapatılmış, aksenal yük ise arttırılarak deney gerçekleştirilmiştir. Geri basınç vanası kapatıldığında suyun çıkışına izin verilmemiş, bu durumda da boşluk suyu basıncındaki değişimler gözlemlenmiştir. Düşey deformasyon %20'ye ulaştığında deney durdurulmuştur. Şekil 3.16.'da deneyi tamamlanmış olan numunenin son hali gösterilmiştir. Son olarak numunenin deney sonu ağırlığı tartılmış ve yapısındaki su içeriğinin hesaplanabilmesi için numune etüve atılmıştır.



Şekil 3.16. Deney sonu numune hali.

BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI

Deneysel çalışmada kullanılan numuneler, Adapazarı'ndan temin edilen silt ve kil zeminlerin farklı yüzdelerle bir araya getirilmesiyle elde edilen toplamda 6 farklı karışımdan oluşmaktadır. Numuneler laboratuvar ortamında bulamaç (Slurry) yöntemiyle hazırlanmış ve ön konsolidasyon basıncı olarak 100 kPa yük altında konsolide edilmiştir. Tüm deneyler konsolidasyonlu ve drenajsız olarak yapılmıştır. Öncelikle altı farklı numune üzerinde dinamik yükleme olmadan sadece statik yükleme yapılarak deviatör gerilme değerleri hesaplanmış ve bu numunelerin başlangıç dayanımları belirlenmiştir. Daha sonra aynı özellikteki diğer numuneler dinamik yüklemeye maruz bırakılmış ve hemen ardından numuneler statik olarak kesilmiştir. Bunun neticesinde numunelerin nihai dayanımları belirlenmiştir. Dinamik yükleme oranı, CSR değeri 0,175 ve frekans da 0,5 Hz olarak alınmıştır. Kesme hızı 0,8 mm/dak seçilmiştir. Kesme hızı, frekans ve dinamik yükleme oranı sabit alınarak deneyde çevrim sayıları değiştirilmiştir. *N* yani tekrarlı yük sayısı, 1, 4 ve 6 numaralı karışımda 4, 10, 20 ve 40 çevrim olarak 2, 3 ve 5 numaralı karışımda ise 4 ve 20 çevrim sayısı olarak belirlenmiştir. Numunelerin çevrimsel yük sonrası başlangıç durumuna göre değişen mukavemeti, deformasyon durumları ve elastisite modülleri incelenmiştir.

4.1. Bir Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları

Deneysel çalışmanın ilk grubunu oluşturan 1 numaralı karışım içerik olarak %20 kil, %72 silt ve %8 kum içeriğinden oluşmaktadır. Karışımın %92'si ince danelidir. 1 numaralı grubun likit limiti %29, plastik limiti %23 ve plastisite indisi %6'dır. Numunenin özgül ağırlığı ise 2,65 olup zemin sınıfı düşük plastisiteli silt olarak belirlenmiştir.

Bu karışıma ait deneyler öncelikle hiçbir dinamik yüklemeye maruz tutulmadan sadece statik olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise sırasıyla 10 çevrim, 20 çevrim ve 40 çevrimden oluşan tekrarlı dinamik yüklemeler ve dinamik yüklemelerden hemen sonra statik yüklemeler yapılmıştır. Tüm deneylerde %5, %10, %15 ve %20 deformasyon durumlarındaki deviatör gerilme değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda 1 numaralı numuneye ait %1 başlangıç elastisite modülü ($E_{i(01)}$) ile %50'lik kırıç elastisite modülü (E_{50}) sonuçları da bulunmuştur.

Bu karışıma ait ilk numune statik olarak yüklenmiş olup %5 deformasyona 98 *kPa*'da ulaşmıştır. Sonra dinamik yüklemelere geçilmiş olup ilk olarak 4 çevrim sayılı tekrarlı yükleme sonundaki deviatör gerilme 127 *kPa*, 10 çevrim sayılı tekrarlı yükleme sonrasında yapılan statik yüklemeye bu deformasyon seviyesine denk gelen deviatör gerilme 117 *kPa* çıkmıştır. 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 121 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme ise 139 *kPa*'dır. %5 deformasyon seviyesinde, statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artmış olduğu görülmüştür.

Aynı karışıma ait %10 deformasyon durumu incelenmiş olup statik yükleme sonrası bu deformasyon seviyesine karşılık gelen deviatör gerilme 136 *kPa*'dır. Sonrasında sırasıyla yapılan tekrarlı yüklemelere göre, %10'luk deformasyon seviyesinde, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 154 *kPa*, 10 çevrim sonundaki deviatör gerilme 158 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 144 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme 164 *kPa* olarak belirlenmiştir. %10 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmeler de artan eğilim göstermiştir. 20 çevrim sonunda ulaşılan deviatör gerilme değeri statik duruma göre artan bir deviatör gerilme olsa da 10 çevrimli dinamik yüklemeye göre azalan bir deviatör gerilme değerini göstermiştir. Bu durumda numunenin pekleşme sonrası yumuşama eğilimi gösterdiği anlaşılmış olup, 40 çevrimde numunenin yumuşama sonrası yeniden pekleşme eğilimine geçtiği görülmüştür.

Aynı karışıma ait %15 deformasyon durumunda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 166 *kPa*'dır. Sonrasında %15'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla

yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonunda 172 *kPa*, 10 çevrim sonunda 187 *kPa*, 20 çevrim sonunda 159 *kPa*, 40 çevrim sonunda 182 *kPa* olarak belirlenmiştir. %15 deformasyon seviyesinde statik kesmeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmeler de artan eğilim gösterirken 20 çevrim sonunda ise statik duruma ve 10 çevrime göre azalan bir deviatör gerilme değeri görülmüştür. Yani numunenin yumuşama eğilimi gösterdiği anlaşılmış olup, 40 çevrimde zeminin yumuşama sonrası yeniden pekleşme eğilimine geçmeye çalıştığı görülmüştür.

Aynı karışıma ait %20 deformasyon durumunda yani maksimum durumda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 192 *kPa*'dır. Sonrasında %20'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 180 *kPa*, 10 çevrim sonundaki deviatör gerilme 208 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 169 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme 195 *kPa* olarak belirlenmiştir. Bu durumda, 4 çevrim sonunda numunenin dayanımının düştüğü, 10 çevrim sonunda biraz dayanım kazandığı, 20 çevrim sonunda yeniden yumuşama gösterip statik duruma göre ve 10 çevrimlik dinamik yükleme durumuna göre dayanımının düştüğü, 40 çevrimde ise statik duruma göre deviatör gerilmenin az bir şekilde artmış (+3 *kPa*) olduğu görülmüştür. Buna göre numunenin yumuşamadan pekleşmeye geçmeye çalışan bir zemin davranışı sergilediği görülmüştür.

Elastisite modülü değerleri incelendiğinde, statik deneye göre, başlangıç elastisite modülü ($E_{i(01)}$) 11333 *kPa*'dır. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 34243 *kPa*, 10 çevrim sonunda 20157 *kPa*, 20 çevrim sonunda 18914 *kPa*, 40 çevrim sonunda 31462 *kPa* olarak hesaplanmıştır.

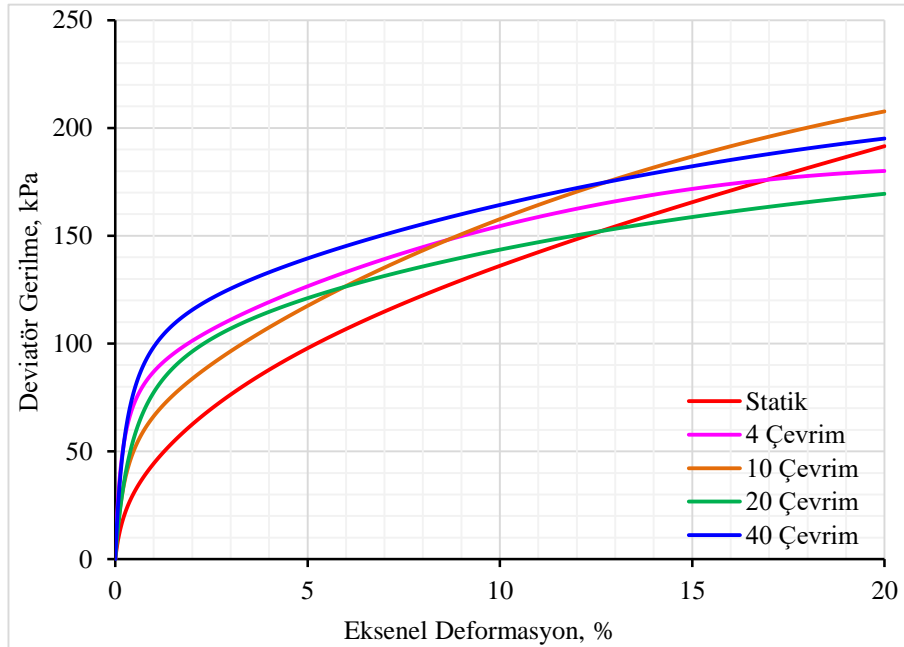
Kiriş elastisite değerleri (E_{50}) incelendiğinde ise statik deneye göre 2016 *kPa* olarak ölçülmüştür. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 7503 *kPa*, 10 çevrim sonunda 2885 *kPa*, 20 çevrim sonunda 6518 *kPa*, 40 çevrim sonunda 10268 *kPa* olarak hesaplanmıştır.

Açıklamaları sunulan bu deviatör gerilme değerleri ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.1. üzerinde deformasyon yüzdelere göre farklı çevrim sayılarında verilmiştir. Tüm deviatör gerilme değerlerinin birimi *kPa*'dır.

Tablo 4.1. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (1 no'lu numune).

| | Statik | 4 Çevrim | 10 Çevrim | 20 Çevrim | 40 Çevrim |
|------------------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|
| σ_d (%5) (kPa) | 98 | 127 | 117 | 121 | 139 |
| σ_d (%10) (kPa) | 136 | 154 | 158 | 144 | 164 |
| σ_d (%15) (kPa) | 166 | 172 | 187 | 159 | 182 |
| σ_d (%20) (kPa) | 192 | 180 | 208 | 169 | 195 |
| E_{101} (kPa) | 11333 | 34243 | 20157 | 18914 | 31462 |
| E_{50} (kPa) | 2016 | 7503 | 2885 | 6518 | 10268 |

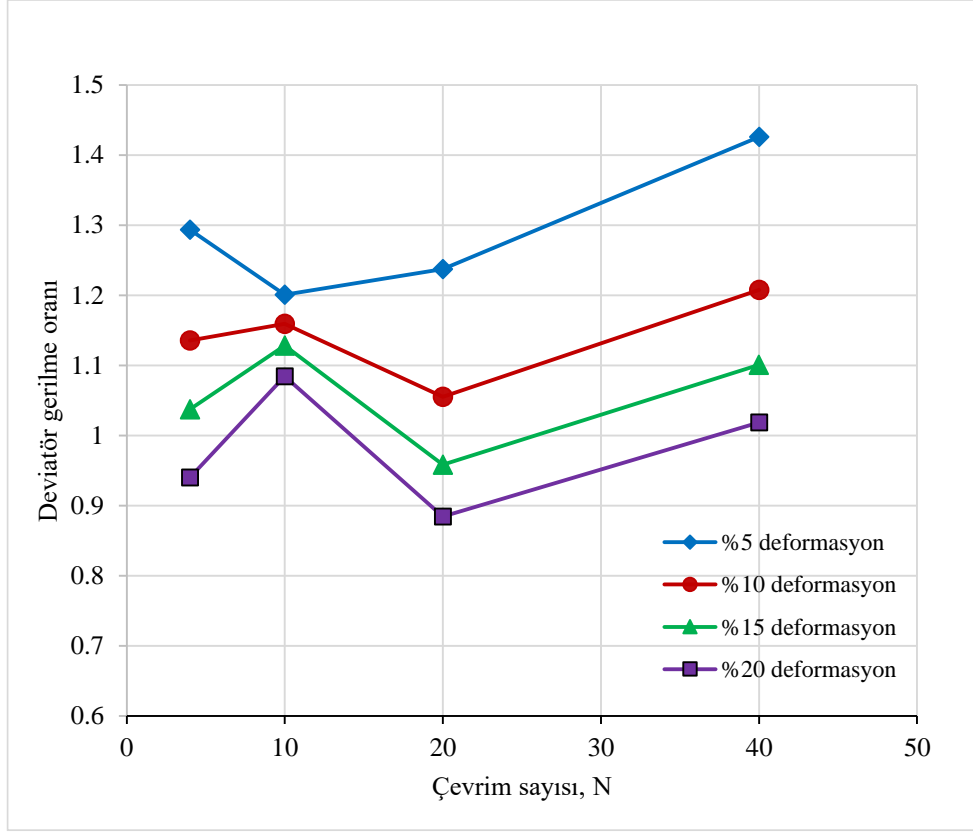
1 no'lu numuneye ait 4 farklı çevrim sayısında incelenen dinamik sonu statik deviatör gerilme ve sadece statik deviatör gerilme, eksenel deformasyon durumuna göre Şekil 4.1. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (1 no'lu numune).

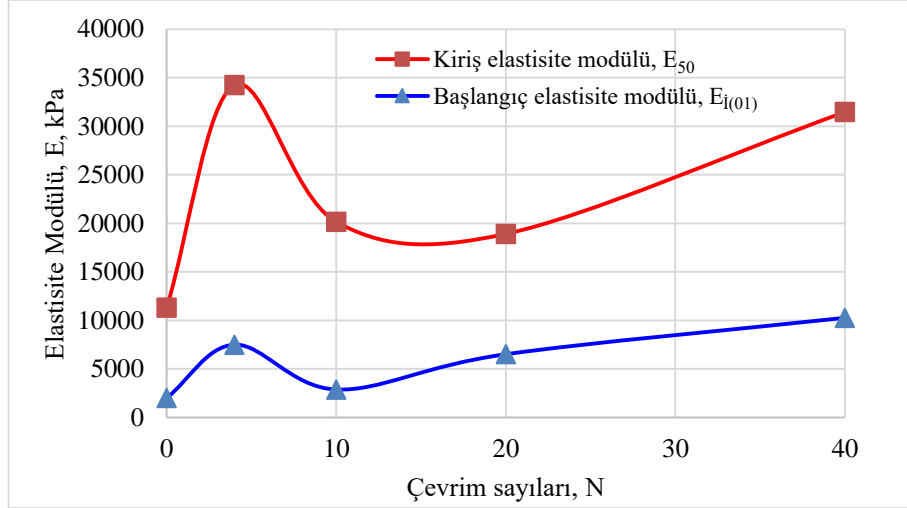
Deviatör gerilme oranı, dinamik yükleme sonunda statik yükleme değerlerinin, dinamik yükleme olmadan sadece statik yükleme değerlerine oranlanmasıyla elde

edilmiştir. Bu oranlamaya göre 1'den büyük olan değerler numunenin dayanımının arttığını göstermektedir. 1 no'lu numuneye ait farklı deformasyon durumlarında, çevrim sayılarına bağlı deviator gerilme oranları grafiksel olarak Şekil 4.2. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Çevrim sayılarına göre deviator gerilme oranı (1 no'lu numune).

1 no'lu numuneye ait statik ve dinamik deney sonu elde edilen başlangıç elastisite modülü ve kiriş elastisite modülü Şekil 4.3.'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (1 no'lu numune).

4.2. İki Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları

Deneysel çalışmanın ikinci grubunu oluşturan 2₅₀ numaralı karışım içerik olarak %27 kil, %65 silt ve %8 kum içeriğinden oluşmuş olup karışımın %92'si ince danelidir. 2 numaralı grubun likit limiti %30, plastik limiti %19 ve plastisite indisi %11'dir. Numunenin özgül ağırlığı ise 2,75 olup zemin sınıfı düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir.

İki numaralı karışım numunelerine ait deneyler öncelikle hiçbir dinamik yüklemeye maruz tutulmadan sadece statik olarak daha sonra ise sırasıyla 4 ve 20 çevrimden oluşan tekrarlı dinamik yüklemelere ve dinamik yüklemeden hemen sonra statik yüklemeye tabi olmuştur. Tüm deneylerde %5, %10, %15 ve %20 deformasyon durumlarındaki deviatör gerilmelere ait sonuçlar gösterilmiştir. Aynı zamanda 2 numaralı numuneye ait %1 başlangıç elastisite modülü ile %50'lik kiriş elastisite modülü sonuçları da bulunmuştur.

Bu karışıma ait ilk numune statik olarak yüklenmiş olup, %5 deformasyona 100 kPa'da ulaşmıştır. Sonra dinamik yüklemelere geçilmiş ilk olarak 4 çevrimlik dinamik yükleme sonundaki deviatör gerilme 104 kPa, 20 çevrimlik dinamik yükleme sonundaki deviatör gerilme 105 kPa olarak hesaplanmıştır. %5 deformasyon

seviyesinde, statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin düşük değerlerle artmış olduğu görülmüştür.

Aynı karışıma ait %10 deformasyon durumu incelenmiş olup statik yüklemeye bu deformasyon seviyesine karşılık gelen deviatör gerilme 121 *kPa*'dır. Sonrasında sırasıyla yapılan dinamik yüklemelere göre, %10'luk deformasyon seviyesinde, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 126 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 129 *kPa* olarak belirlenmiştir. %10 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin düşük değerlerle artmış olduğu görülmüştür.

Aynı karışıma ait %15 deformasyon durumunda statik kesmeye karşılık gelen deviatör gerilme 139 *kPa*'dır. Sonrasında %15'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonunda 136 *kPa*, 20 çevrim sonunda 147 *kPa* olarak belirlenmiştir. %15 deformasyon seviyesinde statik kesmeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artan eğilim gösterdiği fakat 4 çevrim sonunda ise statik duruma göre azalan bir deviatör gerilme değeri elde edildiği görülmüştür. Bu durumda numunenin yumuşama eğilimi gösterdiği anlaşılmış olup 20 çevrimde numunenin yumuşama sonrası yeniden pekleşme eğilimine geçtiği görülmüştür.

Aynı karışıma ait %20 deformasyon durumunda yani maksimum durumda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 154 *kPa*'dır. Sonrasında %20'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 140 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 161 *kPa* olarak belirlenmiştir. Bu durumda, 4 çevrim sonunda numunenin dayanımının düştüğü, 20 çevrim sonunda ise statik duruma göre ve 4 çevrimlik dinamik yükleme durumuna göre dayanımının arttığı, yani yumuşama durumundan pekleşme durumuna geçmeye çalışan bir zemin davranışı görülmüştür.

Elastisite modülü değerleri incelendiğinde, statik deneye göre, başlangıç elastisite modülü ($E_{i(01)}$) 32366 kPa'dır. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 10397 kPa, 20 çevrim sonunda 15638 kPa olarak hesaplanmıştır.

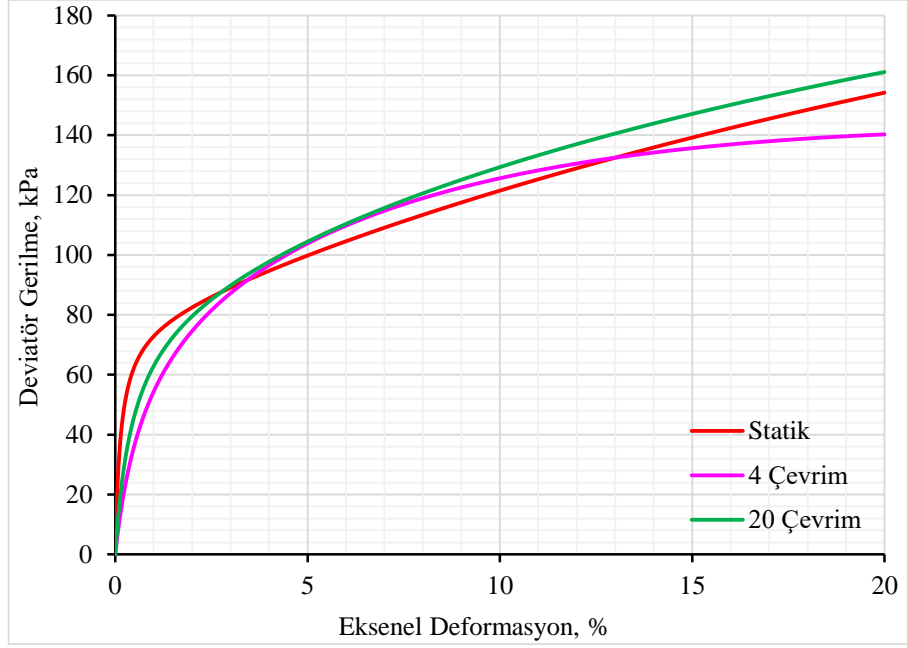
Kiriş elastisite modülü değerleri (E_{50}) incelendiğinde ise E_{50} değeri statik deneyde 2142 kPa olarak hesaplanmıştır. Dinamik deneylerde ise sırasıyla 4 çevrim sonunda 4008 kPa, 20 çevrim sonunda 3929 kPa olarak hesaplanmıştır.

Açıklamaları sunulan bu deviatör gerilme ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.2. üzerinde deformasyon yüzdelerine göre farklı çevrim sayılarında verilmiştir. Tüm deviatör gerilme değerlerinin birimi kPa'dır.

Tablo 4.2. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (2 no'lu numune).

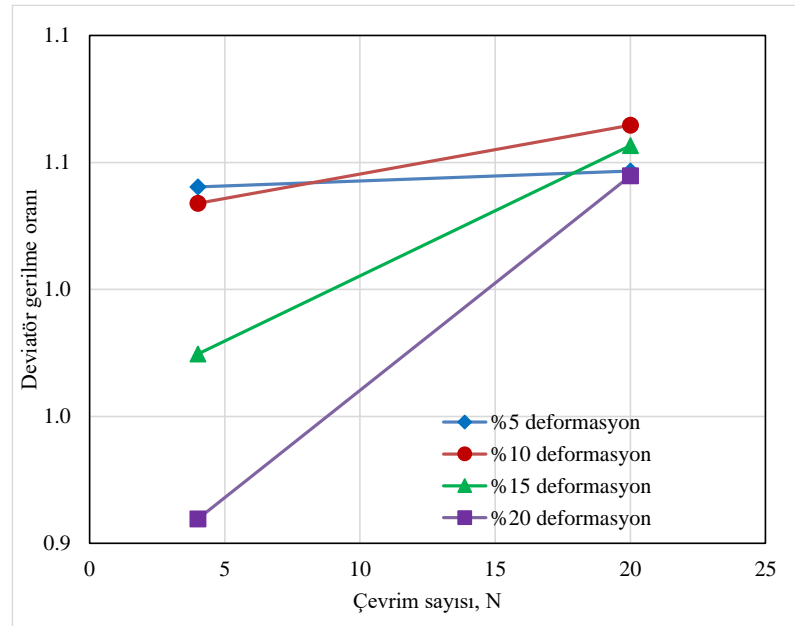
| | Statik | 4 Çevrim | 20 Çevrim |
|------------------------|--------|----------|-----------|
| σ_d (%5) (kPa) | 100 | 104 | 105 |
| σ_d (%10) (kPa) | 121 | 126 | 129 |
| σ_d (%15) (kPa) | 139 | 136 | 147 |
| σ_d (%20) (kPa) | 154 | 140 | 161 |
| E_{i01} (kPa) | 32366 | 10397 | 15638 |
| E_{50} (kPa) | 2142 | 4008 | 3929 |

2 no'lu numuneye ait 2 farklı çevrim sayısında incelenen dinamik yükleme sonu statik deviatör gerilme ve sadece statik deviatör gerilme, eksenel deformasyon durumuna göre Şekil 4.4. üzerinde gösterilmiştir.



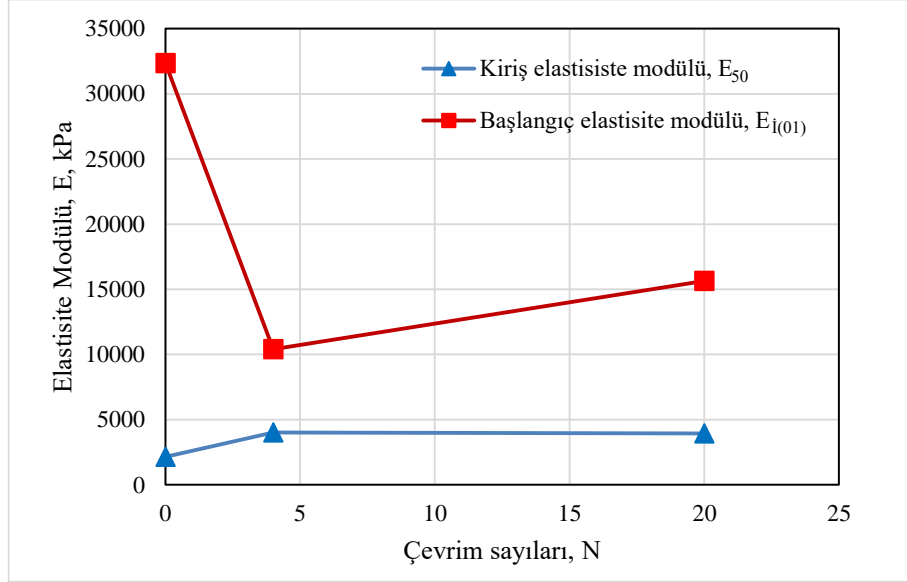
Şekil 4.4. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (2 no'lu numune).

Deviatör gerilme oranı, dinamik yükleme sonunda statik yükleme değerlerinin, dinamik yükleme olmadan sadece statik yükleme değerlerine oranlanmasıyla elde edilmiştir. Bu oranlamaya göre 1'den büyük olan değerler numunenin dayanımının arttığını göstermektedir. Farklı deformasyon durumlarında, çevrim sayılarına bağlı deviatör gerilme oranları grafiksel olarak Şekil 4.5. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (2 no'lu numune).

2 no'lu karışıma ait, statik ve dinamik deney sonu elde edilen başlangıç elastisite modülü ve kiriş elastisite modülü değerleri Şekil 4.6.'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (2 no'lu numune).

4.3. Üç Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları

Deneysel çalışmanın üçüncü grubunu oluşturan 3 numaralı karışım içerik olarak %32 kil, %58 silt ve %10 kum içeriğinden oluşmuş olup karışımın % 90'ı ince danelidir. 3 numaralı grubun likit limiti %34, plastik limiti %17 ve plastisite indisi %17'dir. Numunenin özgül ağırlığı ise 2,65 olup zemin sınıfı düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir.

Üç numaralı numunelere ait deneyler öncelikle hiçbir dinamik yüklemeye maruz tutulmadan sadece statik olarak daha sonra ise sırasıyla 4 ve 20 çevrimlik dinamik yüklere ve hemen sonrasında statik yüklemeye tabi olmuştur. Tüm deneylerde %5, %10, %15 ve %20 deformasyon durumlarındaki deviyör gerilme değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda bu karışıma ait %1 deformasyona karşılık gelen başlangıç elastisite modülü ile %50'lik deformasyona karşılık gelen kiriş elastisite modülü sonuçları da gösterilmiştir.

Numune, statik olarak kesildiğinde %5 deformasyona 82 *kPa* deviatör gerilmede ulaşmıştır. Sonra dinamik yüklemelere geçilmiş olup ilk olarak 4 çevrimlik dinamik yük sonrası deviatör gerilme 102 *kPa*, 20 çevrim sayılı tekrarlı yükleme sonrasında yapılan statik kesmede bu deformasyon seviyesine denk gelen deviatör gerilme 78 *kPa* olarak ölçülmüştür. %5 deformasyon seviyesinde, statik kesmeye göre kıyaslama yapıldığında 4 çevrimde deviatör gerilmenin artmış olduğu görülmüştür. 20 çevrimde ise numunenin dayanım kaybettiği gözlemlenmiştir.

Bu karışıma ait %10 deformasyon durumu incelenmiş olup statik yüklemeye sonra bu deformasyon seviyesine karşılık gelen deviatör gerilme 87 *kPa*'dır. Sonrasında sırasıyla yapılan tekrarlı yüklemelere göre, %10'luk deformasyon seviyesinde, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 117 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 92 *kPa* olarak belirlenmiştir. %10 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında 4 çevrimde deviatör gerilmenin artmış olduğu görülmüştür. 20 çevrimde ise statik duruma göre deviatör gerilmenin artmış olmasına rağmen 10 çevrimdeki yüklemeye kıyasla dayanım kaybettiği görülmüştür.

%15 deformasyon durumunda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 90 *kPa*'dır. Sonrasında %15'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonunda 125 *kPa*, 20 çevrim sonunda 101 *kPa* olarak belirlenmiştir. %15 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında 4 çevrimde deviatör gerilmenin artmış olduğu görülmüştür. 20 çevrimde ise numunenin 4 çevrimdeki değere göre dayanımının düştüğü fakat statik duruma göre dayanımının arttığı görülmüştür.

%20 deformasyon durumunda yani maksimum durumda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 94 *kPa*'dır. Sonrasında %20'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 130 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 108 *kPa* olarak belirlenmiştir. %20 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında 4 çevrimde deviatör gerilmenin artmış olduğu görülmüştür. 20 çevrimde ise numunenin 4

çevrimdeki değere göre dayanımının düştüğü fakat statik duruma göre dayanımının arttığı görülmüştür.

Elastisite değerleri incelendiğinde, statik deneye göre, başlangıç elastisite modülü ($E_{i(01)}$) 40977'dir. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 16105 *kPa*, 20 çevrim sonunda 18813 *kPa* olarak hesaplanmıştır.

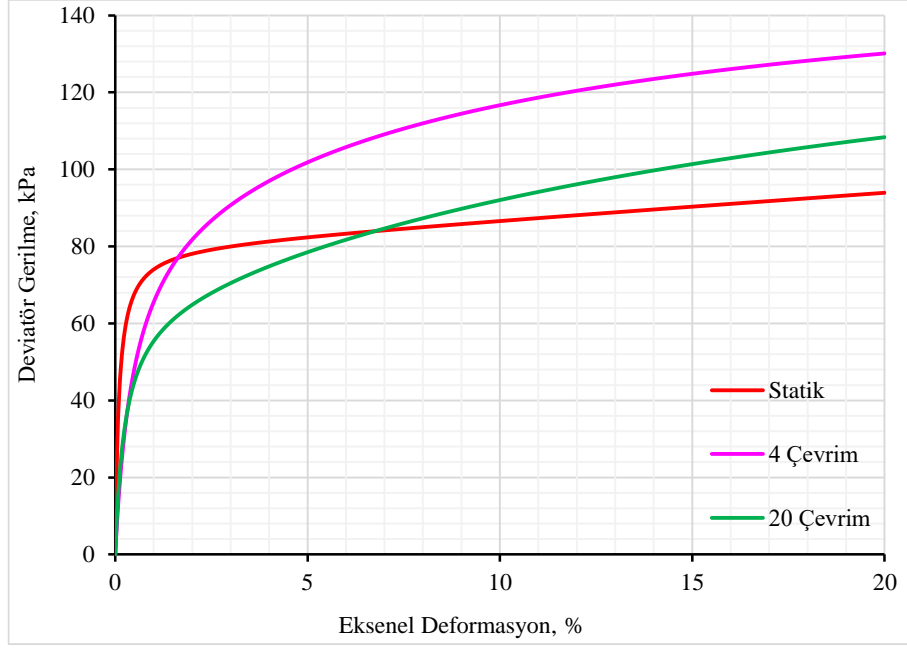
Kirişi elastisite değerleri (E_{50}) incelendiğinde ise statik deneye göre 31310 *kPa* olarak ölçülmüştür. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 6506 *kPa*, 20 çevrim sonunda 6020 *kPa* olarak hesaplanmıştır.

Açıklamaları sunulan bu deviatör gerilme değerleri ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.3. üzerinde deformasyon yüzdelerine göre farklı çevrim sayılarında verilmiştir. Tüm deviatör gerilme değerlerinin birimi *kPa*'dır.

Tablo 4.3. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (3 no'lu numune).

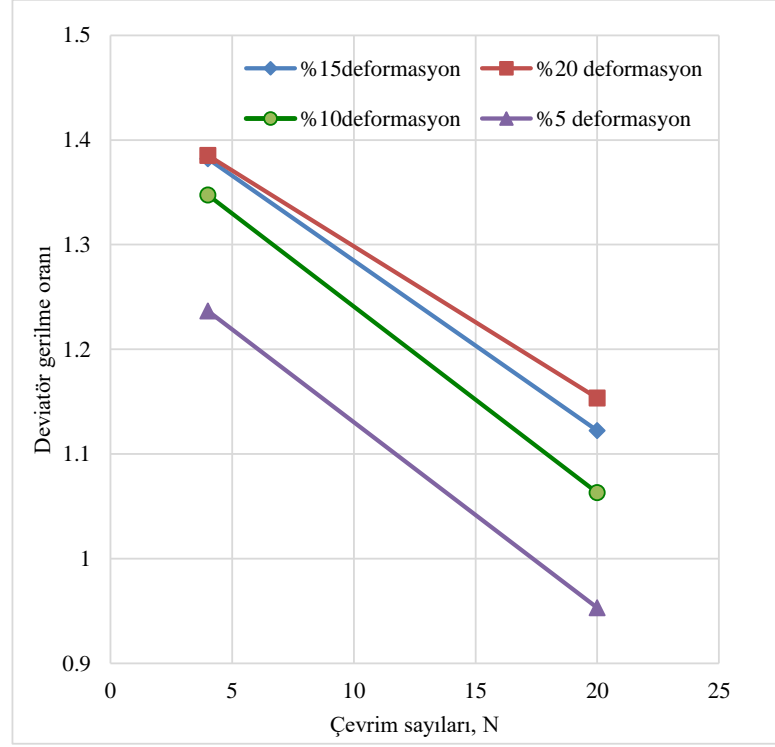
| | Statik | 4 Çevrim | 20 Çevrim |
|------------------------|--------|----------|-----------|
| σ_d (%5) (kPa) | 82 | 102 | 78 |
| σ_d (%10) (kPa) | 87 | 117 | 92 |
| σ_d (%15) (kPa) | 90 | 125 | 101 |
| σ_d (%20) (kPa) | 94 | 130 | 108 |
| $E_{i(01)}$ (kPa) | 40977 | 16105 | 18813 |
| E_{50} (kPa) | 31310 | 6506 | 6020 |

3 no'lu numuneye ait 2 farklı çevrim sayısında incelenen dinamik sonu statik deviatör gerilme ve sadece statik deviatör gerilme, eksenel deformasyon durumlarına göre Şekil 4.7. üzerinde gösterilmiştir.



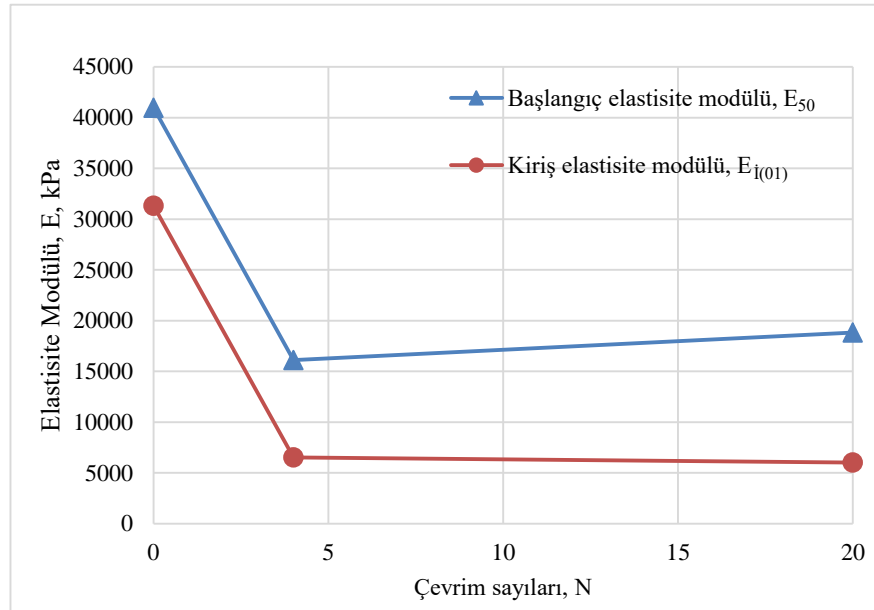
Şekil 4.7. Eksenel deformasyona bağlı deviator gerilmeler (3 no'lu numune).

Deviatör gerilme oranı, dinamik yükleme sonunda statik yükleme değerlerinin, dinamik yükleme olmadan sadece statik yükleme değerlerine oranlanarak elde edilmiştir. Bu oranlamaya göre 1'den büyük olan değerler numunenin dayanımının arttığını göstermektedir. Farklı deformasyon durumlarında, çevrim sayılarına bağlı deviator gerilme oranları grafiksel olarak Şekil 4.8. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (3 no'lu numune).

3 no'lu numuneye ait statik ve dinamik deney sonu elde edilen başlangıç elastisite modülü ve kırış elastisite modülü Şekil 4.9.'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (3 no'lu numune).

4.4. Dört Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları

Deneysel çalışmanın dördüncü grubunu oluşturan 4 numaralı karışım içerik olarak %37 kil, %45 silt ve %18 kum içeriğinden oluşmuş olup karışımın %82'si ince danelidir. 4 numaralı grubun likit limiti %37, plastik limiti %16 ve plastisite indisi %21'dir. Numunenin özgül ağırlığı ise 2,72 olup zemin sınıfı orta plastisiteli kil ve az kum olarak belirlenmiştir. Numunelere ait deneyler öncelikle hiçbir dinamik yüklemeye maruz tutulmadan sadece statik olarak daha sonra ise sırasıyla 10, 20 ve 40 çevrimlik dinamik yüklere ve hemen sonra statik kesmeye tabi olmuştur. Tüm deneylerde %5, %10, %15 ve %20 deformasyon durumlarındaki deviatör gerilme değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda numuneye ait %1 başlangıç elastisite modülü ile %50'lik giriş elastisite modülü sonuçları da gösterilmiştir.

Numune statik olarak kesildiğinde %5 deformasyona 70 *kPa* deviatör gerilmede ulaşmıştır. Sonra dinamik yüklemelere geçilmiş olup ilk olarak 4 çevrim sayılı tekrarlı yükleme sonundaki deviatör gerilme 106 *kPa*, 10 çevrim sayılı tekrarlı yükleme sonrasında yapılan statik yüklemeye bu deformasyon seviyesine denk gelen deviatör gerilme 85 *kPa*'a çıkmıştır. 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 71 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme ise 73 *kPa*'dır. %5 deformasyon seviyesinde, statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artmış olduğu görülmüştür.

%10 deformasyon durumu incelenmiş olup statik yüklemeye sonra bu deformasyon seviyesine karşılık gelen deviatör gerilme 74 *kPa*'dır. Sonrasında sırasıyla yapılan tekrarlı yüklemelere göre, %10'luk deformasyon seviyesinde, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 118 *kPa*, 10 çevrim sonundaki deviatör gerilme 86 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 78 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme 81 *kPa* olarak belirlenmiştir. %10 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artan eğilim göstermiştir. 20 çevrim sonunda ise statik duruma göre artan bir deviatör gerilme olsa da 10 çevrime göre azalan bir deviatör gerilme değeri görülmüştür. Bu durumda numunenin pekleşme sonrası yumuşama eğilimi gösterdiği anlaşılmış olup 40

çevrimde numunenin yumuşama sonrası yeniden pekleşme eğilimine geçen bir zemin davranışı görülmüştür.

%15 deformasyon durumunda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 78 *kPa*'dır. Sonrasında %15'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonunda 126 *kPa*, 10 çevrim sonunda 86 *kPa*, 20 çevrim sonunda 83 *kPa*, 40 çevrim sonunda 86 *kPa* olarak belirlenmiştir. %15 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artan eğilim gösterdiğini fakat 20 çevrim sonunda ise statik yüklemeye ve 10 çevrime göre azalan bir deviatör gerilme değeri görülmüştür. Bu durumda numunenin yumuşama eğilimi gösterdiği anlaşılmış olup 40 çevrimde numunenin yumuşama sonrası yeniden pekleşme eğilimine geçtiği görülmüştür.

%20 deformasyon durumunda yani maksimum durumda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 82 *kPa*'dır. Sonrasında %20'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 132 *kPa*, 10 çevrim sonundaki deviatör gerilme 86 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 87 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme 89 *kPa* olarak belirlenmiştir. Bu durumda 4 çevrim sonunda numunenin dayanımının arttığı, 10 çevrim sonunda ise statik duruma göre dayanım kazanırken 4 çevrime göre dayanımının düştüğü, 20 ve 40 çevrim sonunda yeniden deviatör gerilmenin düşük bir değerle artmış olduğu görülmüştür.

Elastisite değerleri incelendiğinde, statik deneye göre, başlangıç elastisite modülü, ($E_{i(0t)}$) 33706 *kPa*'dır. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 11752 *kPa*, 10 çevrim sonunda 30635 *kPa*, 20 çevrim sonunda 19452 *kPa*, 40 çevrim sonunda 19335 *kPa* olarak hesaplanmıştır.

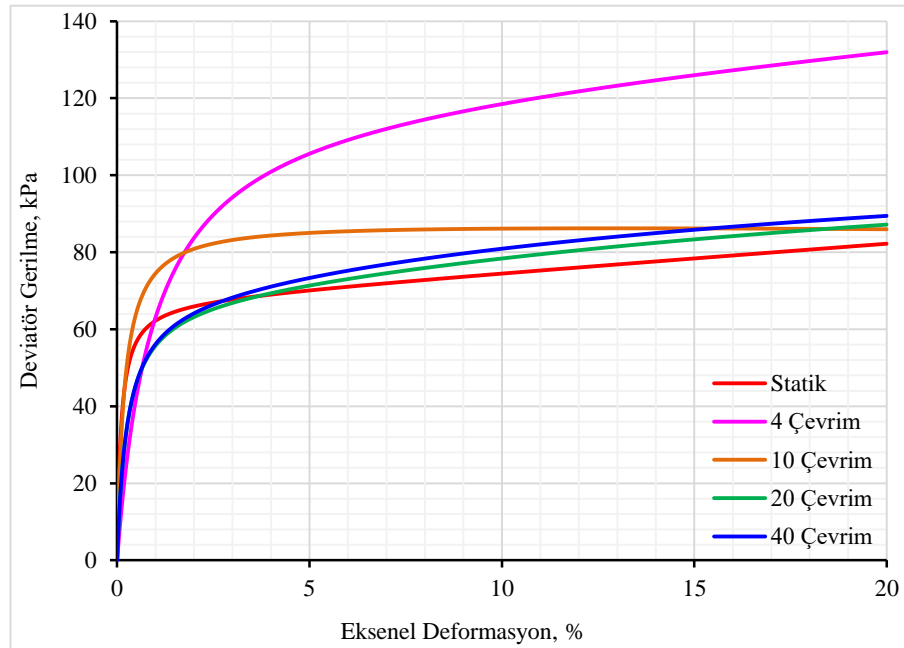
Kirişi elastisite değerleri (E_{50}) incelendiğinde ise statik deneye göre 27404 *kPa* olarak hesaplanmıştır. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 5998 *kPa*, 10 çevrim sonunda 21553 *kPa*, 20 çevrim sonunda 10896 *kPa* ve 40 çevrim sonunda 9938 *kPa* olarak hesaplanmıştır.

Açıklamaları sunulan bu deviatör gerilme değerleri ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.4. üzerinde deformasyon yüzdelere göre farklı çevrim sayılarında verilmiştir. Tüm deviatör gerilme değerlerinin birimi *kPa*'dır.

Tablo 4.4. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (4 no'lu numune).

| | Statik | 4 Çevrim | 10 Çevrim | 20 Çevrim | 40 Çevrim |
|------------------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|
| σ_d (%5) (kPa) | 70 | 106 | 85 | 71 | 73 |
| σ_d (%10) (kPa) | 74 | 118 | 86 | 78 | 81 |
| σ_d (%15) (kPa) | 78 | 126 | 86 | 83 | 86 |
| σ_d (%20) (kPa) | 82 | 132 | 86 | 87 | 89 |
| $E_{i(01)}$ (kPa) | 33706 | 11752 | 30635 | 19452 | 19335 |
| E_{50} (kPa) | 27404 | 5998 | 21553 | 10896 | 9938 |

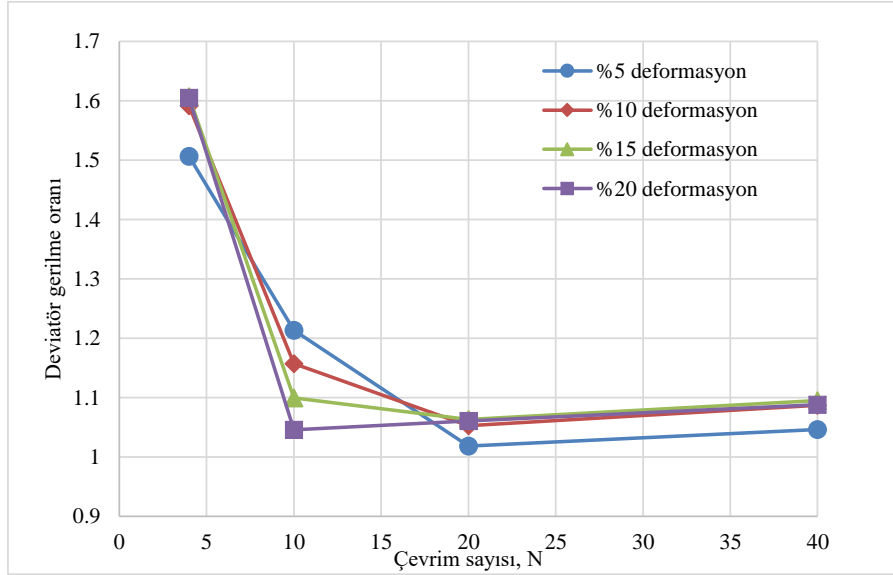
4 no'lu numuneye ait 4 farklı çevrim sayısında incelenen dinamik sonu statik deviatör gerilme ve sadece statik deviatör gerilme eksenel deformasyon durumlarına göre Şekil 4.10. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (4 no'lu numune).

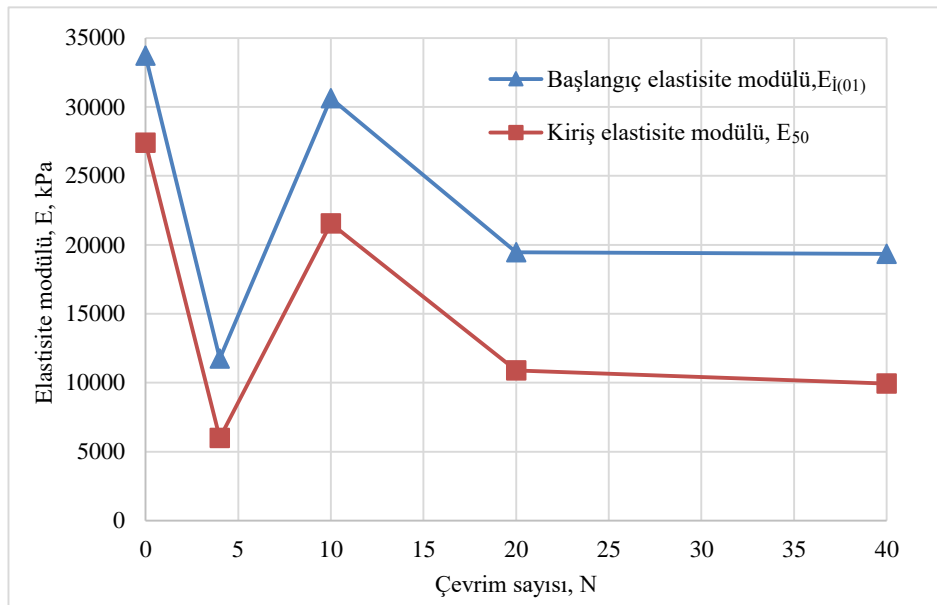
Deviatör gerilme oranı, dinamik yükleme sonunda statik yükleme değerlerinin, dinamik yükleme olmadan sadece statik yükleme değerlerine oranlanarak elde edilmiştir. Bu oranlamaya göre 1'den büyük olan değerler numunenin dayanımının

arttığını göstermektedir. Farklı deformasyon durumlarında, çevrim sayılarına bağlı deviator gerilme oranları grafiksel olarak Şekil 4.11. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Çevrim sayılarına göre deviator gerilme oranı (4 no'lu numune).

4 no'lu numuneye ait statik ve dinamik deney sonu elde edilen başlangıç elastisite modülü ve kırış elastisite modülü Şekil 4.12.'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (4 no'lu numune).

4.5. Beş Numaralı Karışıma Ait Deney Sonuçları

Deneysel çalışmanın beşinci grubunu oluşturan 5 numaralı karışım içerik olarak %46 kil, %40 silt ve %14 kum içeriğinden oluşmuş olup karışımın %86'sı ince danelidir. Bu karışımın likit limiti %43, plastik limiti %17 ve plastisite indisi %26'dır. Numunenin özgül ağırlığı ise 2,73 olup zemin sınıfı orta plastisiteli kil (CI) olarak belirlenmiştir.

Bu karışıma ait deneyler öncelikle hiçbir dinamik yüklemeye maruz tutulmadan sadece statik olarak daha sonra ise sırasıyla 4 ve 20 çevrimlik dinamik yüklere ve hemen sonrasında statik kesmeye tabi olmuştur. Tüm deneylerde %5, %10, %15 ve %20 deformasyon durumlarındaki deviatör gerilme değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda 2 numaralı numuneye ait %1 başlangıç elastisite modülü ile %50'lik kırıç elastisite modülü sonuçları da bulunmuştur.

Bu karışımdan hazırlanan ilk numune statik olarak kesilmiş olup %5 deformasyona 104 *kPa*'da ulaşmıştır. Sonra dinamik yüklemelere geçilmiş olup ilk olarak 4 çevrimlik dinamik yükleme sonrası statik kesmeye göre belirlenen deviatör gerilme 121 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 79 *kPa* olarak hesaplanmıştır. %5 deformasyon seviyesinde, statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında ilk 4 çevrimden sonra deviatör gerilmenin de artmış olduğunu fakat 20 çevrim sonunda ise statik duruma ve 4 çevrime göre azalan bir deviatör gerilmeyi yani numunenin yumuşama eğilimi göstermiş olduğu anlaşılmıştır.

%10 deformasyon durumu incelenmiş olup statik kesmeden sonra bu deformasyon seviyesine karşılık gelen deviatör gerilme 104 *kPa*'dır. Sonrasında sırasıyla yapılan tekrarlı yüklemelere göre %10'luk deformasyon seviyesinde, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 139 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 82 *kPa* olarak belirlenmiştir. %10 deformasyon seviyesinde statik kesmeye göre kıyaslama yapıldığında ilk 4 çevrimden sonra deviatör gerilmenin de artmış olduğunu fakat 20 çevrim sonunda ise statik duruma ve 4 çevrime göre azalan bir deviatör gerilme değeri

görülmüştür. Bu durumda numunenin yumuşama eğilimi göstermiş olduğu anlaşılmıştır.

%15 deformasyon durumunda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 104 kPa'dır. Sonrasında %15'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre 4 çevrim sonunda 153 kPa, 20 çevrim sonunda ise 83 kPa olarak belirlenmiştir. %15 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında ilk 4 çevrim sayısından sonra deviatör gerilmenin de artmış olduğunu fakat 20 çevrim sonunda ise statik duruma ve 4 çevrime göre azalan bir deviatör gerilme değeri görülmüştür.

%20 deformasyon durumunda yani maksimum durumda statik kesmeye karşılık gelen deviatör gerilme 103 kPa'dır. Sonrasında %20'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 167 kPa, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 84 kPa olarak belirlenmiştir. Bu durumda 4 çevrim sonunda numunenin dayanımının artmış olduğunu, 20 çevrim sonunda ise yumuşama gösterip statik duruma göre ve 10 çevrimlik dinamik yükleme durumuna göre dayanımının düştüğü görülmüştür.

5 numaralı numuneye ait elastisite değerleri incelendiğinde statik deneye göre, başlangıç elastisite modülü ($E_{i(01)}$) 40278 kPa'dır. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 36364 kPa, 20 çevrim sonunda 19894 kPa olarak hesaplanmıştır.

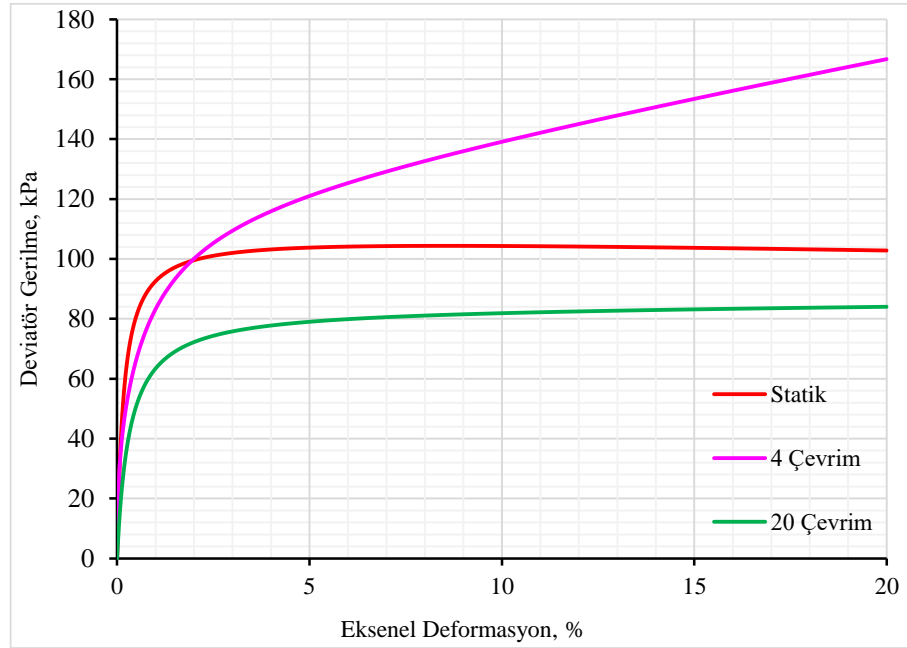
5 numaralı numuneye ait kiriş elastisite değerleri (E_{50}) incelendiğinde ise statik deneye göre 34790 kPa olarak ölçülmüştür. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 8336 kPa, 20 çevrim sonunda 12002 kPa olarak hesaplanmıştır.

Açıklamaları sunulan bu deviatör gerilme değerleri ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.5. üzerinde deformasyon yüzdelerine göre farklı çevrim sayılarında verilmiştir. Tüm deviatör gerilme değerlerinin birimi kPa'dır.

Tablo 4.5. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (5 no'lu numune).

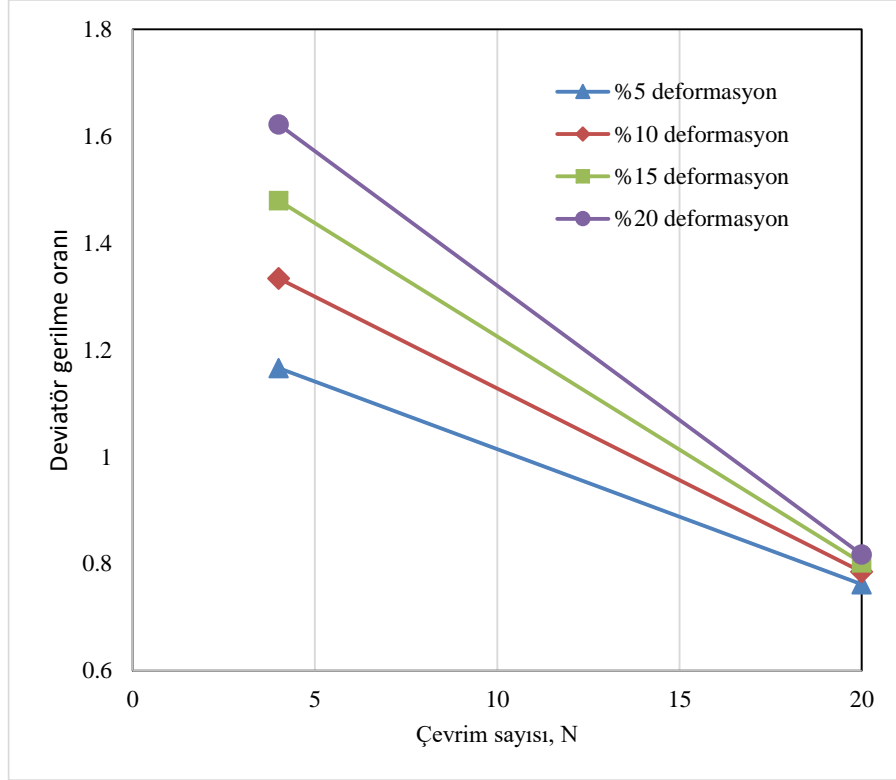
| | Statik | 4 Çevrim | 20 Çevrim |
|------------------------|--------|----------|-----------|
| σ_d (%5) (kPa) | 104 | 121 | 79 |
| σ_d (%10) (kPa) | 104 | 139 | 82 |
| σ_d (%15) (kPa) | 104 | 153 | 83 |
| σ_d (%20) (kPa) | 103 | 167 | 84 |
| $E_{i(01)}$ (kPa) | 40278 | 36364 | 19894 |
| E_{50} (kPa) | 34790 | 8336 | 12002 |

5 numaralı numuneye ait 4 farklı çevrim sayısında incelenen dinamik sonu statik deviatör gerilme ve sadece statik deviatör gerilme, aksel deformasyon durumlarına göre Şekil 4.13. üzerinde gösterilmiştir.



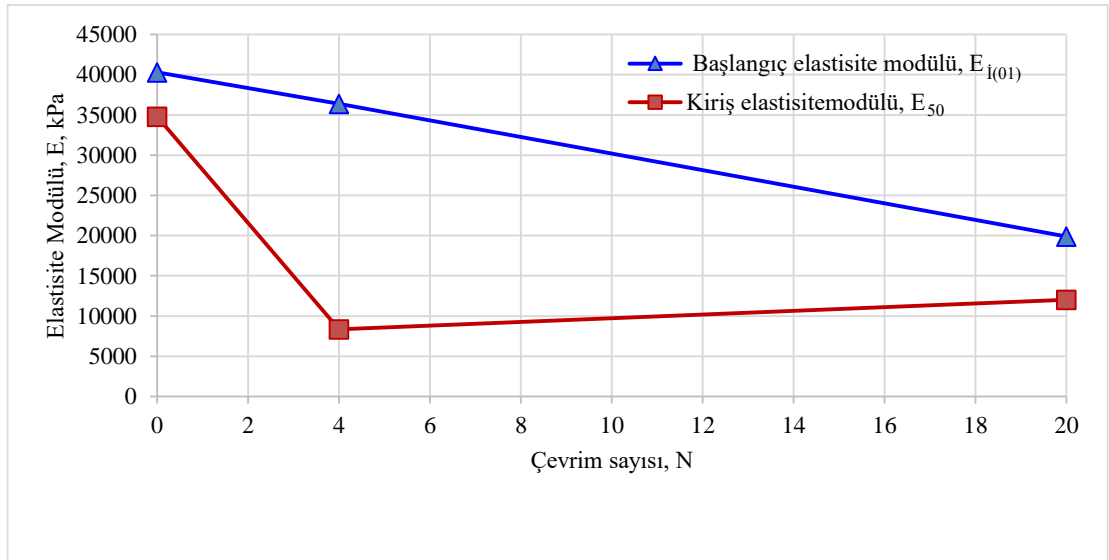
Şekil 4.13. Aksel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (5 no'lu numune).

Deviatör gerilme oranı, dinamik yükleme sonunda statik yükleme değerlerinin, dinamik yükleme olmadan sadece statik yükleme değerlerine oranlanarak elde edilmiştir. Bu oranlamaya göre 1'den büyük olan değerler numunenin dayanımının arttığını göstermektedir. Farklı deformasyon durumlarında, çevrim sayılarına bağlı deviatör gerilme oranları grafiksel olarak Şekil 4.14. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Çevrim sayılarına göre deviator gerilme oranı (5 no'lu numune).

5 numaralı numuneye ait statik ve dinamik deney sonu elde edilen başlangıç elastisite modülü ve kiriş elastisite modülü Şekil 4.15.'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (5 no'lu numune).

4.6. Altı Numaralı Karışıma Ait Deneysel Sonuçları

Deneysel çalışmanın son grubunu oluşturan 6 numaralı karışım içerik olarak %51 kil, %35 silt ve %14 kum içeriğinden oluşmuş olup % 86'sı ince danelidir. 6 numaralı grubun likit limiti %48, plastik limiti %18 ve plastisite indisi %30'dır. Numunenin özgül ağırlığı ise 2,75 olup zemin sınıfı orta plastisiteli kil (CI) olarak belirlenmiştir.

Bu karışımdan oluşan numunelere ait deneyler öncelikle hiçbir dinamik yüklemeye maruz tutulmadan sadece statik olarak daha sonra ise sırasıyla 4, 10, 20 ve 40 çevrimlik dinamik deneylere ve hemen sonrasında statik kesmeye tabi olmuştur. Tüm deneylerde %5, %10, %15 ve %20 deformasyon durumlarındaki deviatör gerilme değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda 6 numaralı numuneye ait %1 başlangıç elastisite modülü ile %50'lik kırılganlık elastisite modülü sonuçları da incelenmiştir.

Karışımdan oluşturulan ilk numune statik olarak kesildiğinde %5 deformasyona 53 *kPa* deviatör gerilme ulaşılmıştır. Sonra dinamik yüklemelere geçilmiş olup ilk olarak 4 çevrimlik dinamik yükleme sonundaki deviatör gerilme 84 *kPa*, 10 çevrim sayılı tekrarlı yükleme sonrasında yapılan statik kesmede bu deformasyon seviyesine denk gelen deviatör gerilme 55 *kPa*'a çıkmıştır. 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 65 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme ise 70 *kPa*'dır. %5 deformasyon seviyesinde, statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artmış olduğu görülmüştür.

%10 deformasyon durumu incelenmiş olup statik yüklemeye sonra bu deformasyon seviyesine karşılık gelen deviatör gerilme 52 *kPa*'dır. Sonrasında sırasıyla yapılan tekrarlı yüklemelere göre, %10'luk deformasyon seviyesinde, 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 86 *kPa*, 10 çevrim sonundaki deviatör gerilme 58 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 65 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme 74 *kPa* olarak belirlenmiştir. %10 deformasyon seviyesinde statik yüklemeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artan eğilim gösterdiğini fakat 4 çevrim sonrası artışın diğer çevrimsel yüklemelere göre daha fazla dayanım kazandığı görülmüştür.

%15 deformasyon durumunda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 52 *kPa*'dır. Sonrasında %15'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre 4 çevrim sonunda 86 *kPa*, 10 çevrim sonunda 59 *kPa*, 20 çevrim sonunda 65 *kPa*, 40 çevrim sonunda 76 *kPa* olarak belirlenmiştir. %15 deformasyon seviyesinde statik kesmeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artan eğilim gösterdiğini fakat 4 çevrim sonundaki deviatör gerilmedeki artışın diğer çevrimlere oranla daha fazla olduğu görülmüştür.

%20 deformasyon durumunda yani maksimum durumda statik yüklemeye karşılık gelen deviatör gerilme 51 *kPa*'dır. Sonrasında %20'lik deformasyon seviyesinde sırasıyla yapılan çevrimsel yüklemelere göre 4 çevrim sonundaki deviatör gerilme 85 *kPa*, 10 çevrim sonundaki deviatör gerilme 61 *kPa*, 20 çevrim sonundaki deviatör gerilme 64 *kPa*, 40 çevrim sonundaki deviatör gerilme 77 *kPa* olarak belirlenmiştir. %20 deformasyon seviyesinde statik kesmeye göre kıyaslama yapıldığında artan çevrim sayısına bağlı olarak deviatör gerilmelerin de artan eğilim gösterdiğini fakat 4 çevrim sonundaki deviatör gerilmedeki artışın diğer çevrimlere oranla daha fazla olduğu görülmüştür.

6 numaralı numuneye ait elastisite değerleri incelendiğinde statik deneye göre, başlangıç elastisite modülü ($E_{I(0I)}$) 34675 *kPa*'dır. Dinamik deneylere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 25952 *kPa*, 10 çevrim sonunda 12360 *kPa*, 20 çevrim sonunda 21427 *kPa*, 40 çevrim sonunda 12356 *kPa* olarak hesaplanmıştır.

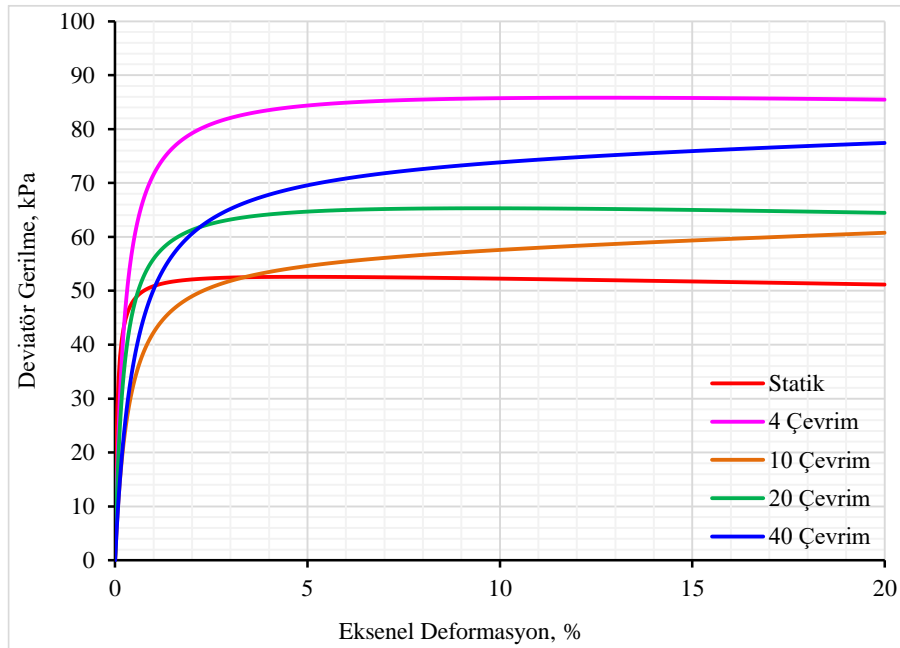
6 numaralı numuneye ait kiriş elastisite değerleri (E_{50}) incelendiğinde ise statik yüklemeye göre 52591 *kPa* olarak hesaplanmıştır. Dinamik yüklemelere göre sırasıyla 4 çevrim sonunda 17164 *kPa*, 10 çevrim sonunda 7596 *kPa*, 20 çevrim sonunda 16328 *kPa*, 40 çevrim sonunda 7039 *kPa* olarak bulunmuştur.

Açıklamaları sunulan bu deviatör gerilme değerleri ve elastisite modülü değerleri Tablo 4.6. üzerinde deformasyon yüzdelere göre farklı çevrim sayılarında verilmiştir. Tüm deviatör gerilme değerlerinin birimi *kPa*'dır.

Tablo 4.6. Çevrim sayısına, deformasyon ve elastisite modüllerine göre deviatör gerilmeler (6 no'lu numune).

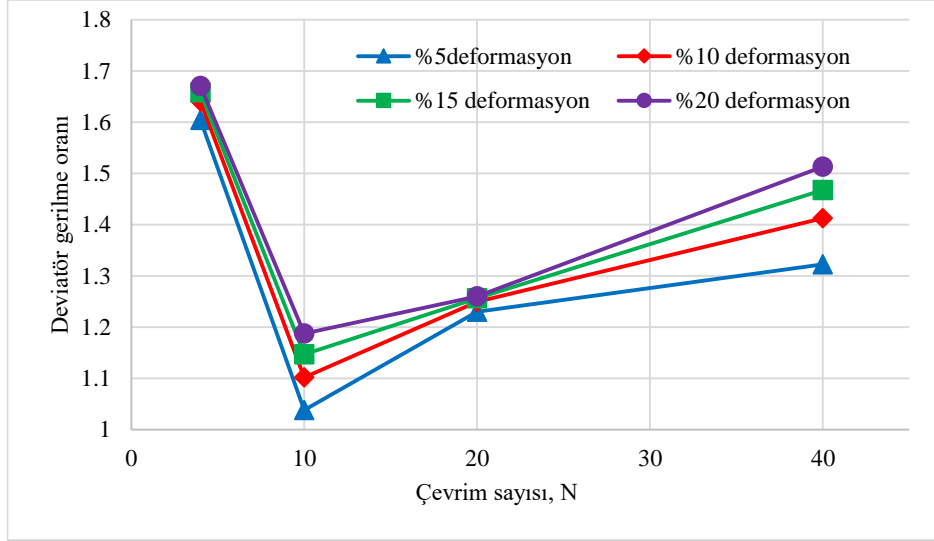
| | Statik | 4 Çevrim | 10 Çevrim | 20 Çevrim | 40 Çevrim |
|-------------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|
| s_d (%5) (kPa) | 53 | 84 | 55 | 65 | 70 |
| s_d (%10) (kPa) | 52 | 86 | 58 | 65 | 74 |
| s_d (%15) (kPa) | 52 | 86 | 59 | 65 | 76 |
| s_d (%20) (kPa) | 51 | 85 | 61 | 64 | 77 |
| $E_{i(01)}$ (kPa) | 34675 | 25952 | 12360 | 21427 | 12356 |
| E_{50} (kPa) | 52591 | 17164 | 7596 | 16328 | 7039 |

6 numaralı numuneye ait 4 farklı çevrim sayısında incelenen dinamik sonu statik deviatör gerilme ve sadece statik deviatör gerilme, eksenel deformasyon durumlarına göre Şekil 4.16. üzerinde gösterilmiştir.



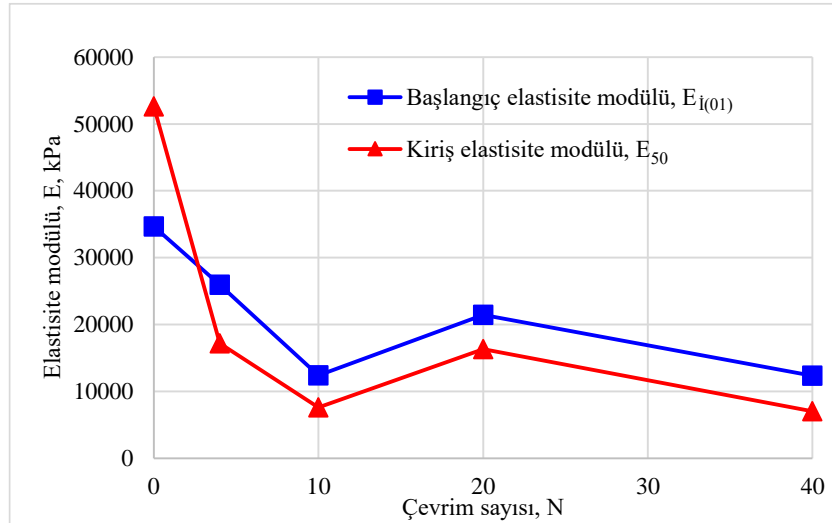
Şekil 4.16. Eksenel deformasyona bağlı deviatör gerilmeler (6 no'lu numune).

Deviatör gerilme oranı, dinamik yükleme sonunda statik yükleme değerlerinin, dinamik yükleme olmadan sadece statik yükleme değerlerine oranlanarak elde edilmiştir. Bu oranlamaya göre 1'den büyük olan değerler numunenin dayanımının arttığını göstermektedir. Farklı deformasyon durumlarında çevrim sayılarına bağlı deviatör gerilme oranları grafiksel olarak Şekil 4.17. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Çevrim sayılarına göre deviatör gerilme oranı (6 no'lu numune).

6 numaralı numuneye ait statik ve dinamik deney sonu elde edilen başlangıç elastisite modülü ve kiriş elastisite modülü Şekil 4.18.'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

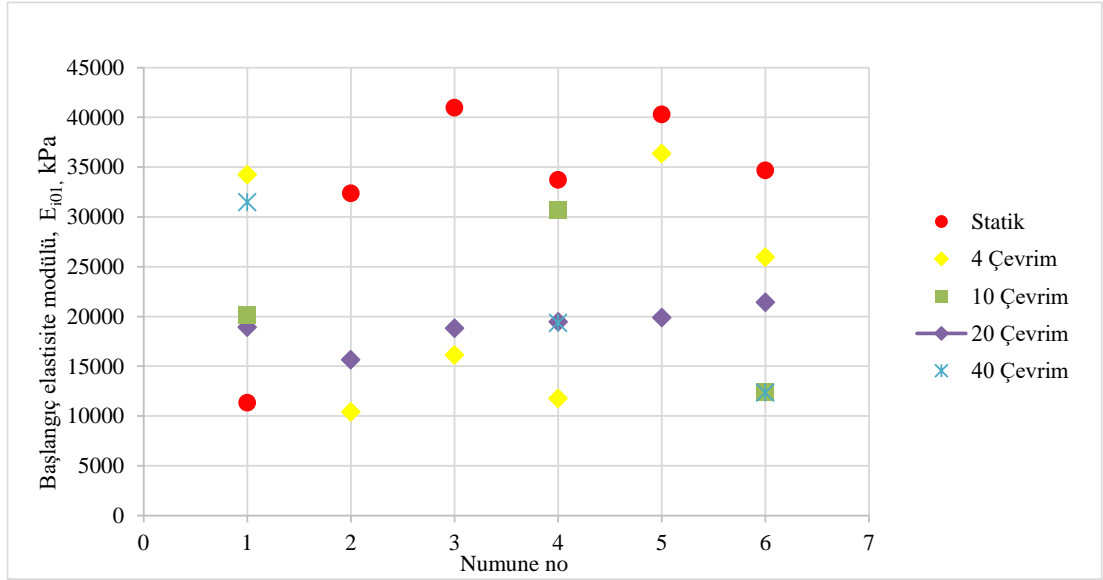


Şekil 4.18. Çevrim sayılarına göre elastisite modülleri (6 no'lu numune).

4.7. Tüm Karışımlara Ait Deney Sonuçları

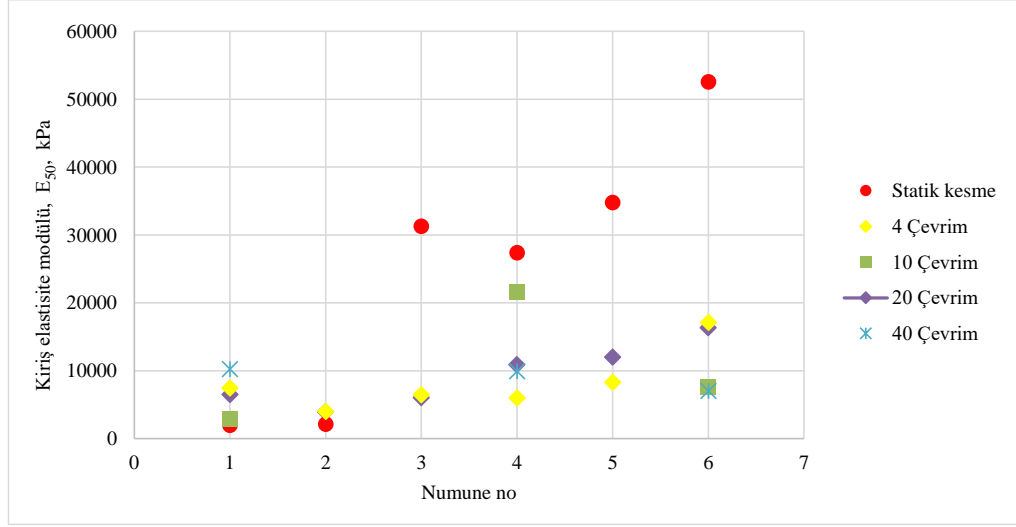
Başlangıç elastisite modülü değerinde ($E_{i(01)}$) tüm numunelere ait statik ve dinamik sonrası statik kesme değerleri birlikte incelenmiştir. Bu durumun neticesinde 1 no'lu numunede (Silt içeriği en yüksek olan) başlangıç durumdaki elastisite modülü

değerleri tüm dinamik sonu statik deneylerde artmış bulunmaktadır. 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı numunelerde ise başlangıç durumdaki elastisite modülü değerleri dinamik sonrası statik kesmelerde düşmüş bulunmaktadır. Bu durum Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. 1 no'lu numuneden 6 no'lu numuneye doğru silt yüzdesi düşmektedir.



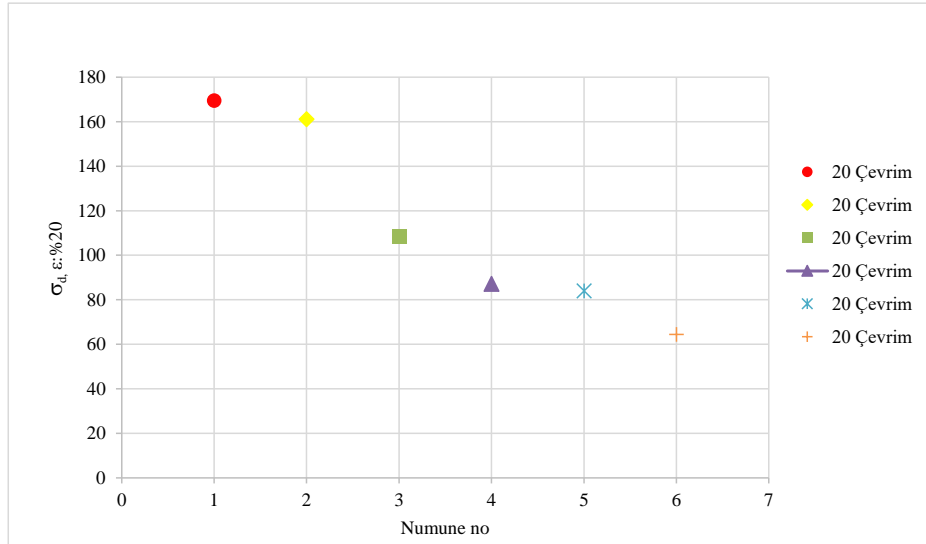
Şekil 4.19. Numune numarasına göre başlangıç elastisite modülü değerleri.

Kiriş elastisite modülü değerinde (E_{50}), tüm numunelere ait statik ve dinamik sonrası statik kesme değerleri birlikte incelenmiştir. Bu durumun neticesinde 1 ve 2 no'lu numunelerde (sırasıyla silt içeriği en yüksek olan numuneler) başlangıç durumdaki elastisite modülü değerleri tüm dinamik sonu statik deneylerde artmış bulunmaktadır. 3, 4, 5 ve 6 no'lu numunelerde ise başlangıç durumdaki elastisite modülü değerleri dinamik sonrası statik deneylerde düşmüş bulunmaktadır. Bu durum Şekil 4.20.'de gösterilmiştir. Başlangıç durumuna göre değişen bu elastisite modülü değerleri çevrim sayısına göre belirli bir oranda artış ya da azalış göstermemektedir. Bu nedenle de çevrim sayısı ile elastisite modülü arasında bir ilişkiye varılamamıştır.



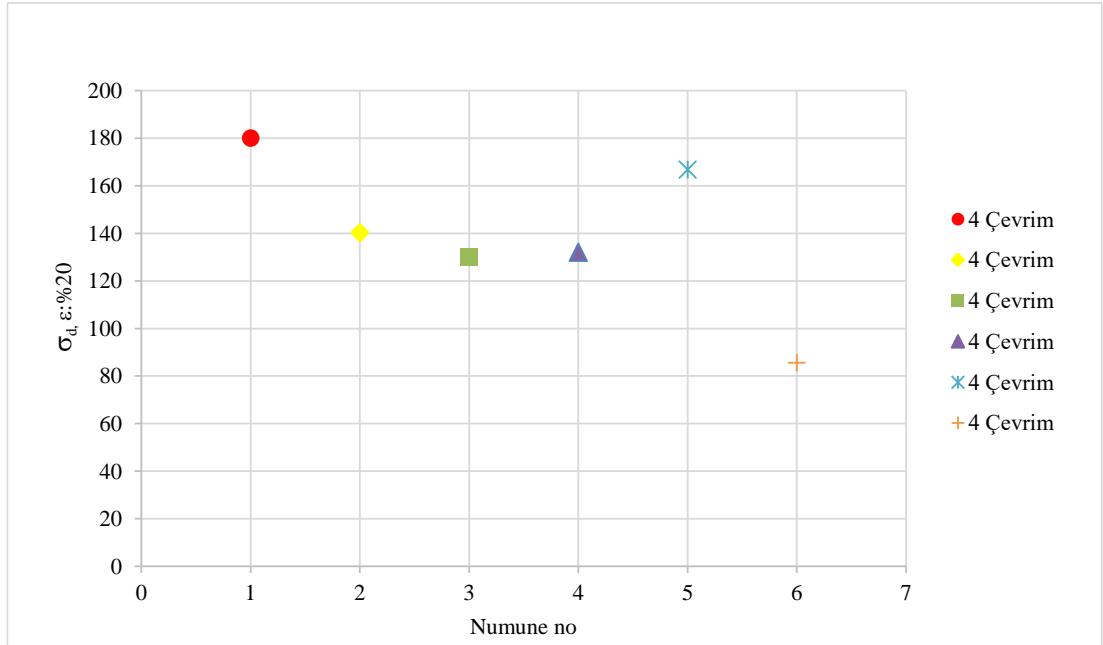
Şekil 4.20. Numune numarasına göre kiriş elastisite modülü değerleri.

%20 deformasyon seviyesinde 20 çevrimlik dinamik yüke tabii tutulan numunelerin dinamik yük sonrası statik kesme değerleri Şekil 4.21.'de gösterilmiştir. 1 numaralı numuneden 6 numaralı numuneye zeminlerin plastisite yüzdesi artmaktadır. Plastisite yüzdesi artan numunelerin aynı zamanda deformasyon değerleri de azalmıştır. Bu durumda numunelerin dayanımlarının artmış olduğu görülmektedir.



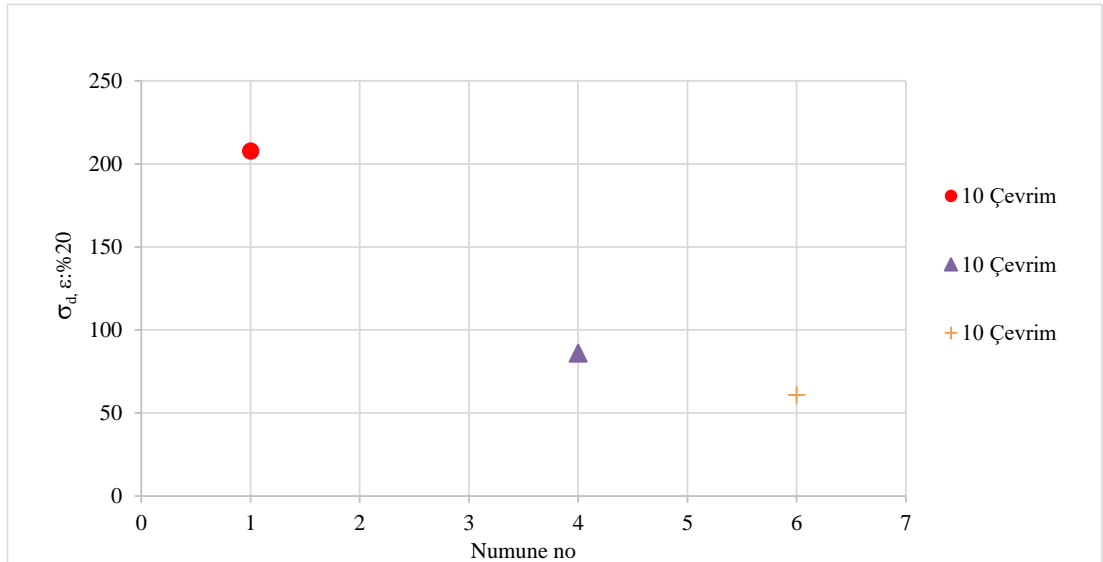
Şekil 4.21. N:20 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri.

%20 deformasyon seviyesinde 4 çevrimlik dinamik yüke tabii tutulan numunelerin dinamik yük sonrası statik kesme değerleri Şekil 4.22.'de gösterilmiştir.



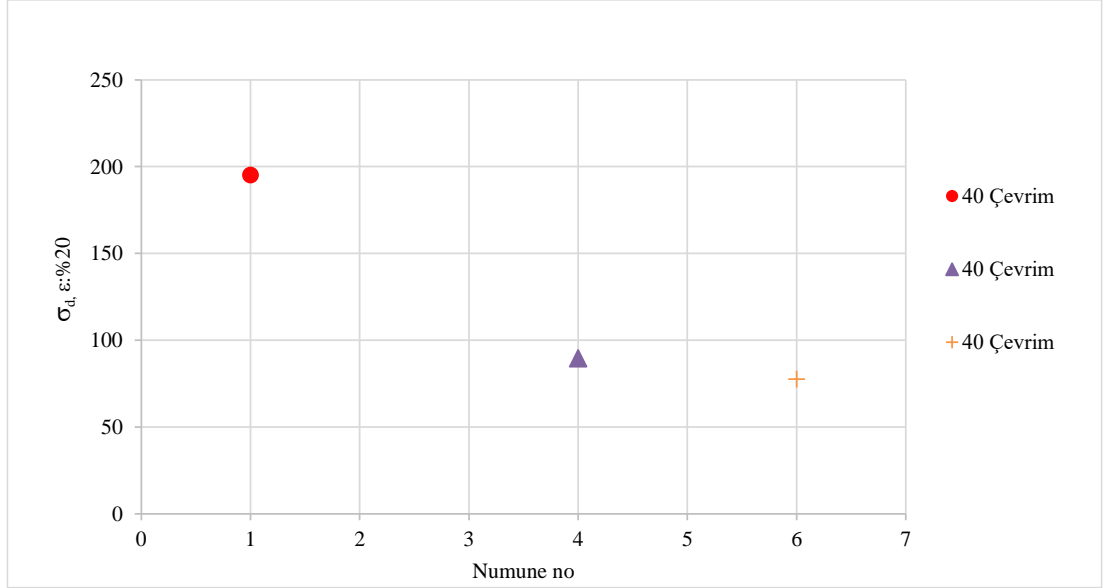
Şekil 4.22. N:4 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri.

%20 deformasyon seviyesinde 10 çevrimlik dinamik yüke tabii tutulan numunelerin dinamik yük sonrası statik kesme değerleri Şekil 4.23.'te gösterilmiştir.



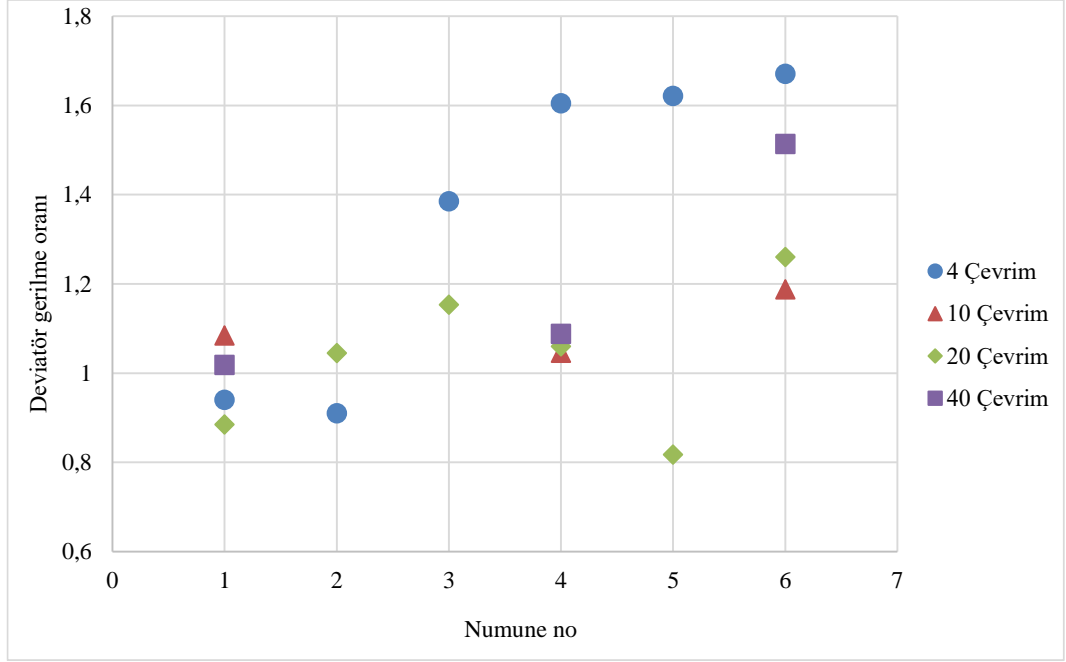
Şekil 4.23. N:10 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri.

%20 deformasyon seviyesinde 40 çevrimlik dinamik yüke tabii tutulan numunelerin dinamik yük sonrası statik kesme değerleri Şekil 4.24.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. N:40 ve %20 deformasyon seviyesinde deviatör gerilme değerleri.

Deviatör gerilme oranları, numunelerin başlangıç durumdaki statik deviatör gerilme değerleri çevrim sayısına bağlı dinamik yük sonrası statik kesmeyle belirlenen nihai deviatör gerilme değerlerinin oranlanmasıyla elde edilmiştir. Tüm numunelerde deviatör gerilme oranları %20 deformasyon seviyesinde değerlendirildiğinde 4 çevrimlik dinamik yükleme sonrası statik yüklemeye belirlenen 3, 4, 5 ve 6 numaralı numunelerde en yüksek dayanım elde edilmiştir. 1 ve 2 numaralı numunelerde ise bu durum geçerli değildir (1 ve 2 numaralı numunelerde silt yüzdesi yüksektir.). 3, 4, 5 ve 6 numaralı numunelerde ise 40 çevrimden 10 çevrime doğru sırasıyla dayanım oranı azalmaktadır. 2 numaralı numunede çevrim sayının artışıyla dayanım artarken 1 numaralı numune için çevrim sayısına bağlı bir ilişki kurulamamıştır. Şekil 4.25.'te tüm numunelere ait deviatör gerilme oranı değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Numune numarasına göre deviatör gerilme oranı.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada Adapazarı'ndan temin edilmiş olan siltli, kumlu ve killi zeminlerde dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde (CTX) çalışılmıştır. Tüm deneyler drenajsız bir şekilde (CU) yapılmıştır. Bu kapsamda 6 farklı doğal kil ve silt yüzdesine sahip karışım oluşturulmuştur. Bu karışımlardan elde edilen numuneler laboratuvar ortamında bulamaç (Slurry) yöntemiyle likit limitin 1,5 katında su ihtiva edecek şekilde hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada dinamik kayma gerilmesi oranı 0,175 olarak sabit alınmıştır. Kesme hızı 0,8 *mm/dak* ve frekans 0,5 *Hz* seçilmiştir. Çalışmanın amacı deprem bölgesinde bulunan Adapazarı zeminlerinin dinamik yük altında (deprem yükü gibi) davranışını belirleyebilmektir. Bu sebeple zeminlerin doğal denge durumundaki hali düşünülüp başlangıç dayanımları bulunmuştur. Sonrasında bu zeminlerden 1, 4 ve 6 numaralı numunelere 4, 10, 20 ve 40 çevrimlik dinamik yük, 2, 3 ve 5 numaralı numunelere 4 ve 20 çevrimden oluşan dinamik yükler uygulandıktan hemen sonra tüm numuneler statik olarak kesilmiş ve nihai dayanımları bulunmuştur. Aynı numunelerin statik ve farklı çevrim sayılarındaki dinamik yükleme sonrası statik dayanımları karşılaştırılmıştır. Böylece zeminlerin dinamik yük sonrası davranışları değerlendirilmiştir. Bu durumun neticesinde;

- a) 1 numaralı numuneden (Kil içeriği %20) 6 numaralı numuneye (Kil içeriği %51) doğru kil yüzdesi artmaktadır. Kil zeminin kohezyon özelliğinden dolayı dinamik mukavemetin artışı olumlu etkilediği gözlenmiştir.
- b) Deneysel çalışmanın tamamında düşük çevrimsel gerilme oranı (0,175 değeri) kullanılmıştır. Genel literatür kanısına göre çevrimsel gerilmenin artmasıyla sıvılaşmanın ya da çevrimsel yumuşamanın daha kolay açığa çıkacağıdır. Bu durumda düşük CSR değerinin zeminlerin dane dizilimlerini değiştirerek pekleşme etkisi yaptığı düşünülmektedir. Aynı zamanda kesme hızının da 0,8

mm/dak gibi yüksek bir deęerle gerçekleřtirilmesinin de mukavemetin artmasında pozitif etki edeceęi dūřunūlmektedir.

- c) 1 numaralı numuneden (PI:%6) 6 numaralı numuneye (PI:%30) doęru plastisite indisi deęeri artmaktadır. Artan plastisite indisi deęerinin zeminin dayanım kazanmasında etkin olabildięi dūřunūlmektedir.
- d) Numuneler n konsolidasyona en az 4 gūn sūreyle bırakılmıřtır. Bu durumun zeminde imentolanmayı açıęa çıkarabileceęinden dayanımın artmasında pozitif etki ettięi dūřunūlmektedir.
- e) 1 numaralı numunenin (%72'si silt) dinamik yūkleme sonrası elastisite modūlū deęeri de artmıřtır. Dinamik mukavemetin artıřı elastisite modūlū deęerinin de artmasıyla pekiřmektedir. Dięer numunelerin ise dinamik yūk sonrası elastisite modūlū deęerleri dūřmūřtur. Çevrimsel yūklemelerden sonra nihai mukavemetin artmıř olmasına karřın deformasyon modūllerindeki azalımın bu tūr zeminlere sahip ortamlarda deprem sonrası göçmeler gözlenmese de deformasyonların statik duruma göre daha fazla olabileceęini iřaret ettięi dūřunūlmektedir.

Son olarak dinamik mukavemetin artmış olmasının zeminin deprem sırasında deformasyona uğramayacağı anlamına gelmediği unutulmamalıdır. Zeminlerin sıkışarak dane dizilimlerinin değişip pekleşmesinden dolayı zeminde ani ya da kısmi oturmalar açığa çıkabilir. Bu durumun sonucunda ūst yapıların zarar görme durumları açığa çıkarken can ve mal tehdidi kaçınılmaz olmaktadır.

KAYNAKÇA

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara.
- Altun, S. ve Ansal, A. 2003. Tekrarlı yükler altında kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri. *İtüdergisi/d* 2003 c:(2) s(4):25-34.
- Ansal, A. M. ve Erken, A. 1989. Undrained behaviour of cly under cyclic shear stresses. *J. Geotech. Engrg.*, 115(7): 968-983.
- ASTM D-5311, Standard Test Method for: Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil.
- Bol, E. 2003. Adapazarı zeminlerinin geoteknik özellikleri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Castro, G. 1975. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.101, No. GT6, s.551-569.
- Elibol, B. ve Erken, A. 2005. Doygun, kısmi doygun ve kuru kum numunelerin dinamik davranışlarının incelenmesi. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, Antalya.
- Guo, T. ve Prakash, S. 1999. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 125(8): 706-710.
- Hyodo, H. Hyde, A.F.L. Yamamoto, Y. ve Fujii, T. 1999. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays. *Soils and Foundations* 39(2), 45-58, Japanese Geotechnical Society
- Ishihara, K. 1996. Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford University Press., Oxford.
- Kadakçı Koca, T. ve Koca, M. Y. 2017. Dinamik eksenel yük uygulanan kumlu marn ve marnlı kumtaşı örneklerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin incelenmesi. MÜHJEO'2017: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, ÇÜ, Adana.
- Kaya, Z. ve Erken, A. 2009. Adapazarı zeminlerinin dinamik davranış özellikleri. *İtüdergisi/d* Cilt: 8, Sayı:5, 157-168.
- Kramer, S. L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, UpperSaddle River, NewJersey.
- Okur, V. ve Ansal, A. 2009. Tekrarlı yük etkisinde kil zeminlerin lineer olmayan elastik davranışı. *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Muhendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* Cilt:XXII, Sayı:1.

- Önalp, A. Sert, S. ve Bol, E. 2000. Adapazarı zeminlerinin deprem performansı. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, s.375-382, 26-27, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Özay, B. ve Erken, A. 2003. Killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi. Itüdergisi/d, 2(1), 55-63.
- TS1500, 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırması. TSE1500, Ankara.
- TS1900 TSE, 2006. İnşaat Mühendisliği Zemin Laboratuvar Deneyleri. TSE1900-1, Ankara.
- Ural, N. Özocak, A. Önalp, A. 2007. Dinamik üç eksenli deneyde frekansın etkisi. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Ülker, M. B. C. 2004. Siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yasuhara, K. ve Andersen, H. 1991. Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading. Soils and Foundations, 31(1):83–94.

ÖZGEÇMİŞ

Elif Uygun, 08.08.1987'de Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2006 yılında Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında bitirdi. 2012 yılında yapı denetim kuruluşunda görev almış ve halen bu işte devam etmektedir. Aynı zamanda yüksek lisans eğitimine de devam etmektedir.