



**LABORATUVAR ÖLÇEKLİ SANTRİFÜJ
DENEY SİSTEMİ İLE ZEMİN
PARAMETRELERİNİN TAYİNİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mehmet Hanifi ALKAYIŞ

Eskişehir 2019

**LABORATUVAR ÖLÇEKLİ SANTRİFÜJ DENEY SİTEMİ İLE ZEMİN
PARAMETRELERİNİN TAYİNİ**

Mehmet Hanifi ALKAYIŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR**

**Eskişehir
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Temmuz 2019**

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 1803F066 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mehmet Hanifi ALKAYIŞ 'ın “ Laboratuvar Ölçekli Santrifüj Deney Sitemi İle Zemin Parametrelerinin Tayini” başlıklı tezi 01/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Jüri Üyeleri</u>	<u>Unvanı Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR	
Üye	: Prof. Dr. Yücel GÜNEY	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir AFACAN	

Enstitü Müdürü

ÖZET

LABORATUVAR ÖLÇEKLİ SANTRİFÜJ DENEY SİSTEMİ İLE ZEMİN PARAMETRELERİNİN TAYİNİ

Mehmet Hanifi ALKAYIŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç Onur

Nümerik analiz programları ve bilgisayarlar yardımı ile deformasyonlar rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Ancak, zemin parametrelerinde ve modellerinde oluşabilen farklılıklardan dolayı zemin davranışının tam olarak tahmin edilemediği durumlarda kesin deformasyonların oluşumu ve büyüklüğü konusunda belirsizlikler yaşanmaktadır. Bu belirsizlikler telafisi zor sonuçları ortaya çıkarabilmektedir. Belirsizliklerin giderilebilmesi ancak gerçek bir modelleme ve zeminin gerçek davranışının belirlenmesi ile mümkündür. Zemin problemleri açısından en gelişmiş modelleme tekniklerinden birisi de geoteknik santrifüj model deneyleridir.

Bu çalışmada, geoteknik santrifüj deney aleti tasarımı gerçekleştirilmiş ve zemin parametrelerinin değişimi araştırılmıştır. İmal edilen deney aleti 1.50 m kol uzunluğu ve 40 g ivme kapasitesine sahiptir. İmal edilen deney sistemi birkaç konsolidasyon modeli ile doğrulanmıştır. Deney sistemi ayrıca modellerin kendi aralarında eş prototiplerde farklı yükseklik ve ivmeler ile de doğrulanmıştır. Ardından farklı şekillerde yüzeysel temellerin oturma davranışları incelenmiş ve literatür ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Geoteknik Santrifüj Tasarımı, Geoteknik Santrifüj Modelleme, Konsolidasyon

ABSTRACT

DETERMINATION OF SOIL PARAMETERS WITH LABORATORY SCALE CENTRIFUGE TEST SYSTEM

Mehmet Hanifi ALKAYIŞ

Department of Civil Engineering

Programme in Geotechnical

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, July 2019

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet İnanç Onur

Deformations can be easily calculated with the usage of numerical analysis programs and computers. However, there are uncertainties about the formation and size of permanent deformations when the soil behavior cannot be predicted completely due to differences in soil parameters and models. These uncertainties can lead to uncompensated results. Uncertainties can only be eliminated by real modeling and determining the actual behavior of the ground. One of the most advanced modeling techniques in terms of soil problems is geotechnical centrifuge model testing.

In this study, geotechnical centrifugal test equipment was designed and the change of soil parameters was investigated. The test instrument has 1.50 m arm length and 40 g acceleration capacity. The test system was confirmed by several consolidation models. The test system was also confirmed by different heights and accelerations in the same prototypes between the models. Then, the settlement behaviors of the shallow foundations in different shape were examined and compared with the literature.

Keywords: Geotechnical centrifuge design, Geotechnical centrifuge modelling, Consolidation

TEŞEKKÜR

Hayatımın her anında bana desteklerini hissettiren babam Bahri ALKAYIŞ, annem Zeliha ALKAYIŞ, abim Asım ALKAYIŞ, erkek kardeşim Abdurrahman ALKAYIŞ ve kız kardeşim Emine Nur ALKAYIŞ 'a desteklerini esirgemedikleri için çok teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca her türlü desteğiyle bana destek olan Vet. Hek. Resul Doğan abime çok teşekkür ederim.

Yaptığım laboratuvar çalışmaları sırasında desteğini esirgemeyen arkadaşım Asena KARSLIOĞLU ve analizler sırasında ve yazım aşamasında desteğini esirgemeyen arkadaşım Mehmet Ali YİĞİT 'e çok teşekkür ederim.

Bu çalışma sırasında elinden gelen her türlü yardımı yapan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç Onur'a teşekkürü bir borç bilmekteyim.

Bu çalışmanın son aşaması olan tez savunmasında çok değerli katkılarını sunan sayın jüri üyeleri Prof. Dr. Yücel GÜNEY ve Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir AFACAN 'a çok teşekkür ederim.

Mehmet Hanifi ALKAYIŞ

....../....../20...

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mehmet Hanifi ALKAYIŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Geçmişte Yapılan Çalışmalar.....	2
2. GEOTEKNİK SANTRİFÜJ MODELLEME DENEY SİSTEMİ.....	8
1.1. Geoteknik Santrifüj Deney Sistemi Tanıtım.....	8
2.2. Yarı Statik Model İçin Ölçeklendirme Kuralları.....	9
2.2.1. Doğrusal boyutlar	9
2.2.2. Geoteknik santrifüjde konsolidasyon ve sızma	13
2.3. Ölçek Etkisi.....	15
2.3.1. Danecik büyüklüğü etkileri	16
2.3.2. Dairesel ivme alanı	17
2.3.3. Modelde inşaat etkisi	18
2.4. Model Deneyleri	20
3. GEOTEKNİK SANTRİFÜJ MEKANİK ÖZELLİKLERİ	21
3.1. Geoteknik Kiriş Santrifüjleri.....	21
3.2. Geoteknik Tambur Santrifüjleri	23

3.3. Model Kutuları	24
3.4. Deney Tasarımı	26
3.5. Model Hazırlığı.....	28
3.6. Sıvı Kontrolü	30
3.7. Modelleme Aletleri	30
3.8. Veri Edinme.....	35
4. ZEMİNİN SIKIŞMASI	36
4.1. Zeminlerde Oturma	36
4.1.1. İnce daneli zeminlerin sıkışması	37
4.1.2. Konsolidasyon (Ödometre) deneyi	38
4.1.3. Ön konsolidasyon basıncı	38
4.1.4. Aşırı konsolidasyon oranı.....	39
4.2. Oturma Hesapları	40
4.2.7. Oturma zaman bağıntısı.....	42
4.2.7.1. Casagrande metodu	43
4.2.7.2. Taylor metodu	44
4.3. Deneysel Çalışma.....	45
5. TEZ ÇALIŞMASI.....	52
5.1. Tasarlanan Geoteknik Santrifüj Tanıtımı	52
5.2. Geoteknik Santrifüj Konsolidasyon Deneyleri.....	58
5.3. Geoteknik Santrifüj Model Deneyleri	81
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	89
KAYNAKÇA.....	92
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Geoteknik Santrifüj Modellemede Ölçek Faktörü (Ferstl, 1998)	16
Tablo 4.1. Konsolidasyon yüzdesi ve zaman faktörü arasındaki bağıntı	43
Tablo 4.2. Beşevler zemini endeks özellikleri	45
Tablo 4.3. Gerilme aralıkları için laboratuvar oturma süreleri ve konsolidasyon katsayısı.....	51
Tablo 5.1. Üretilen geoteknik santrifüj motor devri ve geoteknik santrifüj ivmesi tablosu ($Re=1.467$ m).....	56
Tablo 5.2. Geoteknik Santrifüj Deney Programı ($\omega=0,37$)	59
Tablo 5.3. Konsolidasyon ve geoteknik santrifüjde kullanılan zemin özellikleri	61
Tablo 5.4. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeli boyutu ve yükü	61
Tablo 5.5. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototip büyüklükleri. 61	
Tablo 5.6. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototipin oturma hesabı	61
Tablo 5.7. Konsolidasyon deneyi gerilmeleri için boşluk oranı ve hacimsel sıkışma katsayısı büyüklükleri	61
Tablo 5.8. Prototip $0-0.25\text{kg/cm}^2$ için %50 ve %90 oturma zamanı.....	61
Tablo 5.9. Prototip teorik oturma yüzdeleri için oturma süreleri.....	62
Tablo 5.10. Geoteknik santrifüj model teorik konsolidasyon sürelerinde gözlemlenen oturma miktarları.....	62
Tablo 5.11. Geoteknik Santrifüj Deney Programı ($\omega=0,45$).....	71
Tablo 5.12. Konsolidasyon ve geoteknik santrifüjde kullanılan zemin özellikleri	72
Tablo 5.13. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeli özellikleri.....	72
Tablo 5.14. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototip özellikleri... 72	
Tablo 5.15. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototipin oturma hesabı.....	72
Tablo 5.16. Konsolidasyon deneyi gerilmeleri için boşluk oranı ve hacimsel sıkışma katsayısı büyüklükleri.....	72
Tablo 5.17. Prototip için %50 ve %90 oturma zamanı	72
Tablo 5.18. Prototip teorik oturma yüzdeleri için oturma süreleri.....	73

Tablo 5.19. Geoteknik santrifüj model teorik konsolidasyon sürelerde gözlemlenen oturma miktarları.....	73
---	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Solda prototip ve sağda buna eş geoteknik santrifüj modeli	10
Şekil 2.2. Geoteknik Santrifüj ivmesi altında modeldeki gerilmeler ile yerçekimi ivmesi altında prototipteki gerilmelerin derinlikle değişimi (R.N. Taylor, 1980).....	10
Şekil 2.3. Geoteknik Santrifüj Modeli ve bu modele eş Prototipte gerilme değişiminin derinlik ile değişimi (Schofield, 1980).....	13
Şekil 2.4. Sabit sızma akışını gösteren deney düzeneği(B. M. DAS, 2014)	15
Şekil 2.5. Geoteknik santrifüjde modellenen zeminin, deney sırasındaki oluşan gerilmeleri	15
Şekil 2.6. Kazık hızlı yükleme model deneyi tasarımı, a: Geoteknik santrifüj deney düzeneğinin tasarımı, b: Geoteknik santrifüj deney düzeneğinin yüklemeye hazır hali (P. Hölscher, 2012).....	19
Şekil 2.7. Geotekstil donatılı istinat duvarı tasarımı ve geoteknik santrifüj modelinin gerçekleştirilen deney sonucu gözlemlenen göçme bölgesi (A. N. Sommers, 2009)	19
Şekil 3.1. Kiriş santrifüj platformunun çeşitleri: soldan sırasıyla sabit, tutulan, sallanan.....	21
Şekil 3.2. Geoteknik Kiriş Santrifüj Tasarımı (Ryan D. Beemer, 2015).....	22
Şekil 3.3. Geoteknik kiriş santrifüjü (University of California).....	23
Şekil 3.4. Geoteknik tambur santrifüjü tasarımı (Western University).....	24
Şekil 3.5. Geoteknik kiriş ve tambur santrifüjleri (Thomas Broadbent & Sons Ltd.)....	24
Şekil 3.6. Tünel başlığının etrafında görülen hareket. Sol, tam model; sağ, yarım model (R. Phillips).....	25
Şekil 3.7. Modelleme prensipleri (Ko, 1988).	27
Şekil 3.8. Boşluk basıncı transdüseri PDCR81, (Druck).....	31
Şekil 3.9. Geoteknik santrifüj rıhtım duvarı modeli ve aletsel yerleşim tasarımı (Kobe,1995).....	32
Şekil 3.10. Geoteknik santrifüj şev modelinde yatay ve düşey LVDT yerleşimi ve kullanılan cihaz (M.C.R. Davies, 2003).	32
Şekil 3.11. PIV görüntü analiz prensipleri (White vd. , 2002)	34

Şekil 3.12. Sol; deney başlangıcında çekilen tünel modeli referans görüntüsü, sağda ise deplasmanların 5 mm aştığı deney sırasında alınan görüntü (Tuğçe ERTAN, 2012).....	34
Şekil 3.13. Tünel modelinde 5mm kadar ki ve 5 mm den fazla oluşan deplasman durumlarında GeoPIV8 ile kayma gerilmesi analizi (Tuğçe ERTAN, 2012).....	35
Şekil 4.1. Yükleme sonucu oluşan zaman- oturma grafiği; Bölüm 1: ilk sıkışma, Bölüm 2: konsolidasyon oturması, Bölüm 3: ikincil konsolidasyon, (Braja M. DAS,2014)	37
Şekil 4.2. Konsolidasyon deneyinden elde edilen boşluk oranı- logaritmik ölçekli gerilme eğrisi ve Casagrande metodu ile ön konsolidasyon basıncı hesabı	39
Şekil 4.3. Zeminin faz diyagramı	40
Şekil 4.4. Konsolidasyon için yay modeli ve sırasıyla yükleme görseli (Braja M. DAS,2014)	42
Şekil 4.5. Logaritma zaman metodu hesaplama görseli	44
Şekil 4.6. Karekök zaman metodu hesap görseli	45
Şekil 4.7. Beşevler zemini gradasyon eğrisi	46
Şekil 4.8. Konsolidasyon deneyinden elde edilen boşluk oranı- logaritmik ölçekli gerilme grafiği ve Casagrande metodu ile Beşevler zemini ön konsolidasyon basıncı hesabı	46
Şekil 4.9. 0-0,25 kg/cm ² gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre t(90) süresi	47
Şekil 4.10. 0-0,25 kg/cm ² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre t(50) süresi	48
Şekil 4.11. 0,25-0,50 kg/cm ² gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre t(90) süresi	48
Şekil 4.12. 0,25-0,50 kg/cm ² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre t(50) süresi	49
Şekil 4.13. 0,50-1 kg/cm ² gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre t(90) süresi	49

Şekil 4.14. 0,50-1 kg/cm ² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre t(50) süresi	50
Şekil 4.15. 1-2 kg/cm ² gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre t(90) süresi	50
Şekil 4.16. 1-2 kg/cm ² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre t(50) süresi	51
Şekil 5.1. Geoteknik Santrifüj Ansysys Mecanical APDLNodal analizi.....	57
Şekil 5.2. Geoteknik santrifüj ivmesi 10 g de ivme ölçerden alınan frekans ve Rpm analizi	58
Şekil 5.3. GSK1 oturma eğrileri	63
Şekil 5.4. GSK2 oturma eğrisi.....	63
Şekil 5.5. GSK3 oturması eğrisi	64
Şekil 5.6. GSK4 oturma eğrisi.....	64
Şekil 5.7. GSK5 oturma grafiği.....	65
Şekil 5.8. GSK6 oturma eğrisi.....	65
Şekil 5.9. GSK7 oturma eğrisi.....	66
Şekil 5.10. GSK8 oturma eğrisi.....	66
Şekil 5.11. GSK9 oturma eğrisi.....	67
Şekil 5.12. GSK 10 oturma eğrisi.....	67
Şekil 5.13. GSK11 oturma eğrisi.....	68
Şekil 5.14. GSK12 oturma eğrisi.....	68
Şekil 5.15. GSK13 oturma eğrisi.....	69
Şekil 5.16. GSK14 oturma eğrisi.....	69
Şekil 5.17. GSK15 oturma eğrisi.....	70
Şekil 5.18. GSK16 oturma eğrisi.....	70
Şekil 5.19. GSK17 oturma eğrisi.....	71
Şekil 5.20. GSK18 oturma eğrisi.....	74
Şekil 5.21. GSK19 oturma eğrisi.....	74
Şekil 5.22. GSK20 oturma eğrisi.....	75
Şekil 5.23. GSK21 oturma grafiği	75
Şekil 5.24. GSK22 oturma grafiği	76
Şekil 5.25. GSK23 oturma grafiği	76

Şekil 5.26. GSK24 oturma grafiği	77
Şekil 5.27. GSK25 oturma grafiği	77
Şekil 5.28. GSK26 oturma grafiği	78
Şekil 5.29. GSK27 oturma grafiği	78
Şekil 5.30. GSK28 oturma grafiği	79
Şekil 5.31. GSK29 oturma grafiği	79
Şekil 5.32. GSK30 oturma grafiği	80
Şekil 5.33. GSK31 oturma grafiği	80
Şekil 5.34. Geoteknik santrifüj ve ödometre deneyi konsolidasyon yüzdesi- log gerilme grafiği ($\omega=0,37$)	81
Şekil 5.35. Kohezyonsuz zemine oturan üniform yüklü rijit temelin basınç ve oturma grafiği.....	82
Şekil 5.36. Kohezyonlu zemine oturan üniform yüklü esnek temelin basınç ve oturma grafiği.....	82
Şekil 5.37. Model Kutusuna zeminin sırasıyla yerleştirilmesi	83
Şekil 5.38. Geoteknik santrifüj model tasarımı ve üniform yüklü rijit temelin oturma davranışı.....	84
Şekil 5.39. Geoteknik santrifüj tasarımı modelinde üniform yüklü rijit kare temelin altındaki zeminlerin oturma davranışı	84
Şekil 5.40. Geoteknik santrifüj tasarımı modelinde üniform yüklü rijit dairesel temelin altındaki zeminlerin oturma davranışı	85
Şekil 5.41. Kohezyonlu zemine oturan üniform yüklü rijit temel basınç ve oturma grafiği.....	85
Şekil 5.42. Geoteknik santrifüj model tasarımı ve üniform yüklü rijit temelde kil oturma davranışı	86
Şekil 5.43. Geoteknik santrifüj modelinde kohezyonlu zemine oturan üniform yüklü rijit temelin oturma davranışı.....	86
Şekil 5.55.44. Geoteknik santrifüj model tasarımı ve eksantrik yüklü rijit temelin oturma davranışı.....	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

σ_{vm}	: Model Düşey Gerilmesi
σ_{vp}	: Prototip Düşey Gerilmesi
γ	: Birim Hacim Ağırlık
N	: Ölçek katsayısı
g	: Yerçekimi İvmesi
h_m	: Model Zemini Yüksekliği
h_p	: Prototip Zemini Yüksekliği
ω	: Dairesel Hız
T_v	: Zaman Faktörü
C_v	: Konsolidasyon Katsayısı
H_{dr}	: Drenaj Mesafesi
R_e	: Geoteknik Santrifüj Etkili Yarıçapı
v	: Sızma Akış Hızı
k	: Permeabilite Katsayısı
i	: Hidrolik Eğim
YASS	: Yeraltı Su Seviyesi
PSDDF	: Primary Consolidation, Secondary Compression and Desiccation of Dredged Fill
SSI	: Soil Structure İnteraction
GIAS-c	: Santrifüj için Geo-Image Analiz Sistemi
RPM	: Revolutions Per Minute
LEAP	: Liquefaction Experiments and Analysis Projects
PPT	: Pore Pressure Transducer
LVTD	: Linear Variable Differansial Transformes
CCD	: Charge Coupled Device
PIV	: Particle İmage Velocimetry
ADC	: Analogue-To-Digital Convertor

1. GİRİŞ

Geoteknik santrifüj modellemesi, geoteknik problemlerin simüle edilmesi ve incelenmesi için gelişmiş bir fiziksel modelleme tekniğidir. Genellikle deformasyon ve göçme mekanizmalarını araştırmak, analitik ve sayısal yöntemleri doğrulamak için fiziksel veri sağlamaktadır. Geoteknik santrifüj, zeminlerin taşıma kapasitesi, oturması, şevlerin stabilitesi, tünel stabilitesi, kazık davranışı, zemin-yapı etkileşimi, zemin dinamiği, zemin-kaya mekaniği vd. geoteknik problemleri incelemek için kullanılmaktadır. Geoteknik santrifüj modellemesi, güvenilirliği, maliyet ve zaman yönetimi nedeniyle karmaşık geoteknik problemleri çözmek için genellikle tercih edilen ve en gelişmiş fiziksel modelleme yöntemi olmuştur.

Geoteknik santrifüj deney sistemi, yerçekimi ivmesinin kat kat büyütülmesiyle yapay bir ivmeye maruz kalan küçük ölçekli modeller kullanılması ile geoteknik problemlerin incelenmesine olanak sağlayan deney sistemidir. Bu teknikle, Prototip zeminindeki gerilmeler, yerçekimine bağlı süreçler ile modelde yeniden üretilir.. Ayrıca prototip, gerilme ve mühendislik özellikleri doğru belirlenmiş ölçekleme yasaları kullanılması ile küçük ölçekli model ile özdeş hale getirilmektedir. Anlaşıldığı gibi zeminde aynı gerilme oluşmasına rağmen, model gerçekteki prototip koşullarından N kat küçük olarak modellenebilmektedir. Bu yöntemin kullanılmasıyla tüm büyüklükler yapay yerçekimi ivmesi ve aynı zamanda ölçek faktörü olan N' in katları olarak küçültülebilmektedir. Geoteknik santrifüj model deneyleri sağlıklı sonuçlar vermektedir çünkü modeldeki ve prototipteki eş noktalardaki zeminin efektif ve boşluk sıvısı basınçları aynıdır.

Geoteknik santrifüj zemin modelleri; zemin tabakalarının sayısı, zemin cinsi, mühendislik özellikleri (boşluk oranı, permeabilite, su muhtevası, birim hacim ağırlık, rölatif sıklık vb.) göz önünde tutularak hazırlanmaktadır. Model kutusu içinde zemin tabakalarının hazırlanışı sırasında veri alınması gereken noktalara aygıtlar (ivme, boşluk suyu basıncı, ısı, deformasyon vb. ölçerler) yerleştirilmektedir. Araştırmacılar açık veri ağı ve güvenilirliği sayesinde zemin davranışı teorilerini test etmek ve analiz yöntemlerini sorgulamak için genellikle geoteknik santrifüj modelleme deney sistemini kullanmaktadır.

Bu teze konu olan çalışmada ise laboratuvar ölçeğinde olan geoteknik santrifüj deney aleti tasarımı yapılmış ve zeminlerin parametreleri ve davranışı incelenmiştir. Geoteknik santrifüj deney aleti 1.50 m çapında kiriş santrifüj olarak tasarlanmıştır. Deney

aleti 1/4 HP motora sahip ve 0 ile 40 g arasında dairesel ivmeye ulaşmaktadır. Geoteknik santrifüj merkezinde sabit bir kolu olan ve bir ucunda model kutusunun yerleştirildiği bir platforma sahip ve karşısında ise dengeleyici ağırlıklar mevcuttur. Tasarım yapılırken model kutusu tek kişi tarafından taşınabilen boyutta tasarlanmıştır. Deney sırasında video kamera yardımıyla numune davranışı incelenebilmektedir. Ayrıca düşey deformasyonlar mekanik saatli komparatörler ile takip edilebilmektedir. Deney aleti konsolidasyon teorisine göre yapılan ödometre deneyleri ve geoteknik santrifüj konsolidasyon deneyleri ile deney sisteminin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Farklı boyutlarda, farklı ivmelere ve sürelerle tabi tutulan zeminin oturma davranışı incelenmiştir. Deney sistemimiz yapılan konsolidasyon deneyleri doğrulanmıştır. Ardından aslına uygun olarak Geoteknik santrifüj model deneyleri yapılmıştır. Modelimizde dairesel ve kare rijit temelin oturma davranışı incelenmiş olup, literatür ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışma üniversitemize ülkemizde bulunmayan bir deney sistemi kazandırmış ve daha birçok alanda araştırma yapılmasına kapı açmıştır. Tasarlanan deney sistemi oldukça sade ve geliştirilmeye açıktır.

1.1. Geçmişte Yapılan Çalışmalar

L. M. Zhang vd. [1] geniş çapa sahip ve kusurlu imal edilen kazık gruplarının davranışlarını gözlemek için geoteknik santrifüj deney modelinde yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. İlk deneyler referans olması için kayaya oturan tek kazık ve yumuşak kazık ucu bulunan tek kazık şeklindedir. Sonraki deney süreci ise üç adet 2 metre genişliğe ve 15 metre uzunluğa sahip 2x2 kazık grubunun performansını simüle etmesi şeklindedir. Bunlar hata bulunmayan bir referans grubu, yumuşak kazık ucu içeren bir grup ve sağlam zemin üzerinde bulunmayan iki kısa kazık içeren bir grup şeklindedir. Deneyler sonucunda kazık hatası varlığının, kazık grubu rijitliğini ve taşıma kapasitesini oldukça azalttığı gözlemlenmiştir. Uygulanan yükün hatasız kazıklar arasında paylaşıldığı ve kusurlu kazıklarda eğilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hatalı kazık gruplarının dönme hareketi, grup kazıklarında ve kazık kafalarında büyük eğilme momentlerine yol açtığı gözlemlenmiştir. Genel olarak deney sonuçları literatürdeki sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

B.VS. Viswanadham vd. [2] düşük seviyeli radyoaktif atık imha alanlarının kaplamasında kullanılan kil tabakası yüksekliğinin ve aşırı sürşarj yükünün kil

tabakasının bütünlüğü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kil tabakasının ve model araçlarının özellikleri gerçek kil tabakası ve yapılarının özelliklerini yansıtan ve kil tabakasının sıklığının da optimum su muhtevasına göre ayarlanılan bir dizi geoteknik santrifüj deneyi gerçekleştirilmiştir. Kil tabakasının etkin hidrolik tabaka olarak çalışma sürecinde deformasyonlar işaretleyici tabanlı dijital görüntü analizi yöntemi yardımıyla takip edilmiş ve kil tabakası yüzeyi boyunca gerilme dağılımı gözlemlenmiştir. Deney sonucunda 12.5 kPa bir üst yük basıncına sahip 1.2 m kalınlığında bir kil katmanının, alt derinliklerine kadar uzanan çoklu çatlamlar yaşadığı ve 25 kPa çıkıldığında bu çatlakların baskılandığı gözlemlenmiştir.

M. Tricarico vd. [3] tarafından doymuş kum zeminde bulunan esnek istinat duvarları için geoteknik santrifüj dinamik modelleme deneyleri yapılmıştır. Deney çalışmasında, doymuş kum modele sinüs ivmeleri verilmesi ile ivme ve boşluk basınçlarının yapının dinamik davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Farklı modeller ve farklı birim hacim ağırlıklarına göre boşluk basıncı, göçme mekanizması ve eğilme momentleri arasında karşılaştırmalar sunulmuştur. Zemine gelen basınçlar temaslı basınç sensörleri ile ölçülmüştür ve ayrıca istinat duvarına gelen basınçlarda gözlemlenmiştir. Deney sonucunda kalıcı deplasmanların büyük çoğunluğunun zeminin rölatif yoğunluğunu göz ardı edilirse boşluk basınçlarının oluşumunun neden olduğuna gözlemlenmiştir.

J. G. Ha vd. [4] zemin-yapı etkileşiminin (SSI) nükleer santral tesisi yapılarının sismik tasarımında oldukça etkili olduğu için Hualien’deki Chi-Chi depreminin SSI davranışını taklit etmek için bir dinamik santrifüj deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney aynı zamanda yapı zemin etkileşimi konusunda nümerik analiz yöntemlerini de sorgulamaktadır. Bina modeli alüminyum ve uygun ölçekleme yasaları kullanılarak modellenmiştir. Chi-Chi depreminde kaydedilen deprem hareketi kullanılarak 1/50 ölçekli bir modelle dinamik santrifüj deneyi gerçekleştirilmiştir. Maksimum ivme 0.4 g'a yükseltildiğinde, zeminin deformasyonları ölçülmüştür. Bu çalışma, dinamik Santrifüj testlerinin, bölgeye özgü SSI analizleri için deneysel bir modelleme aracı olarak kullanılma potansiyelini göstermektedir. Nümerik analiz yöntemini kalibre etmek ve nükleer santral yapısının sismik tasarımı için iyi tanımlanmış bir geoteknik santrifüj model kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Z. Li vd. [5] tarafından bir dinamik santrifüj deney programının sonuçları kullanılarak kayma modülü ve sönüm oranı ile kayma gerilmesi eğrilerinin tanımlanması için bir işlem sonrası stratejisi sunulmaktadır. Tüm dinamik santrifüj deneyleri, statik 40

g seviyesinde kuru kum ile gerçekleştirilmiştir. Zemin tabakasının davranışını yakalamak ve böylece kabın herhangi bir olası sınır durumunu kontrol etmek için yoğun biçimde ivme sensörleri yerleştirilmiştir. Sonuçlara dayanarak, Ishibashi ve Zhang tarafından önerilen kayma modülünün ve sönümleme oranının ampirik denklemi için Fontainebleau kumunun özgül parametreleri tanımlanmıştır. Literatürdeki ampirik denklemler doğrulanmış ve Fontainebleau kumu için belirli sayısal değerler önerilmiştir.

T. Ertan [6] geoteknik santrifüjde Gregor Idinger tarafından tanımlanan deney sistemi ile sürşarj yükünün ve tünel üzerindeki zemin tabakasının tünel yüzey basıncı ve oturmaları üzerindeki etkisinin incelenmiştir. Geoteknik santrifüj model kutusu 441x155 cm iç boyutlardadır ve 3 yan duvarı alüminyum ve tek yan duvarı ise görsel olarak izlenebilmesi için 10 cm camdan oluşmaktadır. Tünelin maksimum deformasyonlarını görsel olarak incelemek için tünel simetrik iki parçaya ayrılmış biçimde modellenmiş ve kameralarla izlenmiştir. Tünel modelinde yük hücresi, deformasyon ölçer, CCD kamera ve aydınlatma araçları mevcuttur. Deney sonucunda tünel yüzey basıncı ve oturmaları minimize eden modeller ve çözümler sunulmuştur.

P. Chakraborty vd. [7] depremler anında kohezyonsuz zeminde sismik hasarın başlıca nedeni olan sıvılaşmayı modellemişlerdir. Geçmişteki sayısal ve deneysel araştırmalardan, heterojen bir zemin tabakasında, deprem anında aynı bir hacim ağırlığa sahip homojen zeminden daha fazla aşırı boşluk suyu basıncının oluştuğu gözlenmiştir. Bu konu 2 ve 3 boyutlu sıvılaşma analizi yapabilen sonlu elemanlar yazılımı Dynaflow modeli ve zeminin dinamik santrifüj sıvılaşma deneyleriyle araştırılmıştır. Araştırılan konu heterojen zeminde dinamik etki ile gevşek zeminden sıkı zemine suyun geçişi olarak açıklanmıştır. Ayrıca homojen ve heterojen zeminlerde sıvılaşma, geoteknik santrifüj deneylerinin sayısal benzetimi olarak Dynaflow' da açıklanmıştır.

J. Yu vd. [8] normal konsolide kilde rijit tekil kazık temelin nihai yanal kapasitesini geoteknik santrifüj deneyi ile araştırmışlardır. Deney Singapur Ulusal Üniversitesi geoteknik santrifüj laboratuvarında 50 g'de gerçekleştirilmiştir. Kil zemini 550 mm çapında ve 400 mm derinlikte silindirik bir kaptan hazırlanmıştır. Geoteknik santrifüj deneyi ile yükleme esnasında reaksiyon kuvvetlerinin etkisi ile zemin direnç mekanizmalarının gelişimi analiz edilmiştir. Ayrıca normal konsolide kilde farklı eksantriklik / uzunluk oranları ve uzunluk / çap oranları olan tekil kazık limit göçme yüklerini tahmin etmek için ampirik bir ifade ve normal konsolide kilde rijit bir tekil kazığın yanal limit yükünü tahmin etmek için de ampirik bir ifade sunulmuştur. Aynı

zamanda sonlu elemanlar analizleri, geoteknik santrifüj deneyinin modellenmesi ve doğrulanması için de kullanılmıştır.

M. Horace vd. [9] deniz sediment kaplama tabakasının etkilerini incelemek için gerçekleştirilen geoteknik santrifüj deneylerini, tabakanın yerleştirilmesiyle deniz sedimentinin konsolidasyonunu öngörmek için kullanmışlardır. Geoteknik santrifüj deneylerinden elde edilen sonuçlar ve yorumlar, yüksek oranda deforme olabilen yumuşak killerde doğrusal olmayan konsolidasyon davranışını elde etmek için kullanılan PSDDF yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda geoteknik santrifüj deney sonuçları ile PSDDF tahmini arasında bir uyum gözlemlenmiştir ve maksimum sapmanın %20 olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle tasarımcılar için PSDDF' in konsolidasyon hesabı güvenilir olduğu ancak çözüm sonuçlarını dikkatle kullanılması tavsiye edilmiştir.

K. Kayabalı [10] araştırmasında geoteknik santrifüj deney aletinin 0.35 metre yarıçapındaki prototipini üretip geleneksel konsolidasyon deneyinin süresini kısaltmak ve deneyler arasında ampirik bir denklem üretmeyi amaçlamıştır. 32 adet numune için yapılan 1-D ödometre ile prototip santrifüj arasında deneye dayalı denklem kurulmuştur. 1-D ödometre testleri ile ilgili olarak üç çeşit zemin numuneleri sırayla 25 kPa ile başlayarak 1200 kPa' a kadar efektif gerilmeye maruz bırakılmıştır. Santrifüj konsolidasyon testi için ise numuneler 300 ile 1350 RPM arsında bir hızlarda döndürülmüştür. Sonuç olarak geoteknik santrifüj konsolidasyon yöntemi ile genel deney süresi 3 saate indirgenmiştir. Her zemin numunesi için şekil değiştirme ve kümülatif efektif gerilme verileri ile iki deney parametreleri arasında deneye dayalı formüller türetilmiştir.

K. Kayabalı [10] standart yöntemlerle ince taneli zeminlerin hidrolik iletkenliğinin ölçümü sıklıkla uzun süreler gerektirdiğinden geoteknik uygulamalarda hidrolik iletkenlik için bir geoteknik santrifüj kullanmıştır. Hidrolik iletkenlikleri geniş bir spektrumunda değerlendirmek için kil ve kum karışımları kullanılmıştır. Spesifik olarak, geleneksel düşen seviyeli permeabilite deneyleri 15 karışım üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen teknik, gerekli test süresini birkaç günden başlayarak iki saate düşürmüştür. Önerilen yöntem doymuş, ince taneli zeminlerde hidrolik iletkenlik hesaplamasında kullanışlı bir alternatif olabileceği savunulmuştur. Santrifüj konsolidasyon testi, küçük boyutlu bir aparat kullanarak düşük aralıklarda hidrolik iletkenliğin öngörülmesi için makul bir derecede başarı sağladığı gözlemlenmiştir.

H. G. B. Allersema vd. [11] geoteknik santrifüjler, zeminin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, yapıların davranışlarını araştırmak için dünya çapında kullanıldığından Delft Üniversitesi'nde 2 m yarıçaplı ve 200g'ye kadar ivmelendirilebilen bir geoteknik santrifüj deney aleti geliştirilmiştir. Geoteknik Santrifüj sistemi tasarım kavramı cihazı mümkün olduğunca basit tutmak ve numunelerin ağırlığını bir kişi tarafından taşınabilecek kadar düşük tutmaktır. Çok çeşitli deneylerin gerçekleştirilebilmesi için bir kum püskürtücü, iki boyutlu yükleme sistemi, hava besleme sistemi, su besleme sistemi gibi birkaç minyatür cihaz geliştirilmiştir. Sensor alanları sınırlandırılmış ve deformasyonu ölçmek için görüntü işleme teknikleri (PIV) kullanılmıştır. Modern elektronik ölçüm teknikleri ve özel aletlerin uygulanmasından dolayı, dönme sırasında gelişmiş deneyler yapılabilmektedir. Delft Üniversitesi'ndeki aslına göre küçük tasarlanan geoteknik santrifüj, yapılan kalibrasyon deneyleri sonucunda başarıyla imal edilmiştir.

PATRICK J. FOX vd. [12] tarafından geoteknik santrifüjde tek boyutlu yüksek deformasyon konsolidasyonu için CCI olarak adlandırılan sayısal bir model sunulmuştur. Model, normal yerçekimi koşullarında sürşarj yüklemesi için oluşturulmuş, büyük deplasman konsolidasyon kodu CS2'nin tüm özelliklerini yansıtmaktadır. Ayrıca CCI, ivme faktörü N'nin bir santrifüj model numunesi derinliği boyunca oluşan büyüklük değişimini açıklamaktadır. CCI' in analizi Singapur deniz kili için deneysel ölçümlerle elde edilmiş oturma-zaman eğrilerinin karşılaştırılması ve üniform olmayan N dağılımının geoteknik santrifüj konsolidasyon davranışı üzerindeki etkilerini gösteren parametrik bir çalışma ile sunulmuştur. Simülasyonlar, düzlem boyunca değişken N'nin etkisinin, model yüksekliğinin santrifüj kol uzunluğuna oranıyla en güçlü şekilde kontrol edildiğini göstermiş ve bu oran 0.2 ya da daha düşükse, sabit N varsayımı ile ilgili hatanın göz ardı edilebileceğini göstermiştir.

GA ZHANG vd. [13] geoteknik santrifüj model deneylerinde kullanılan ilişkilendirme esaslı görüntü analizi ile zeminin deplasmanını ölçmek için "GIAS-c" olarak adlandırılan bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem geoteknik santrifüj deney aletine monte edilebilmektedir ve bilgisayarlara yüksek çözünürlüklü fotoğraflar ve veriler sağlamaktadır. Zeminin şekil değiştirmeye zorlayan kuvvetleri belirlemek için zeminin şeklini bozmayan görüntü ilişkilendirme algoritması kullanılmıştır. Zemin yüzeyindeki herhangi bir noktanın yer değiştirme süreci, alt piksel doğruluğu ile ölçülerek

ve grafiğe dökülmüştür. Geliştirilen görüntü analiz tekniği bir şev göçme mekanizması deneyinde test edilmiştir ve doğrulanmıştır.

P. Kokkali vd. [14] sıvılaşma Deneyleri ve Analizi Projesi (LEAP) ile sayısal modelleyicilerin modelleme kabiliyetlerini daha iyi değerlendirmek ve daha doğru sonuca varmak için geoteknik santrifüjden yüksek kaliteli deneysel veriler sunmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla, 2015 yılı başlarında dünyadaki farklı tesislerde birkaç santrifüj testi gerçekleştirilmiş ve ardından sayısal simülasyonlar izlenmiştir. Rensselaer Politeknik Enstitüsü'ndeki Deprem Mühendisliği Simülasyon Merkezi'nde %5 eğimli şevde sıvılaşma deneyi yapılmıştır ve zeminin deformasyonları görüntü izleme teknikleriyle incelenmiştir. Sonuçta Sayısal modelleyiciler kalibre edilmiştir, dolayısıyla daha karmaşık sıvılaşma problemleri için araştırmaya kapı açılmıştır.

D. Reid vd. [15] çok düşük geçirgenlik ve rijitliğe sahip zeminlerin tam bir konsolidasyon süreci için masaüstü santrifüj geliştirilmiştir. Boşluk oranı- efektif gerilme eğrisi, santrifüj teorisi ve doğrudan su içeriği ölçümüne dayanan bu deneylerden geliştirilmiştir. Boşluk suyu basıncı ölçümü için piezometreler zemin bloğunun tabanına yerleştirilmiştir. Deney sistemi 2 dakika içerisinde 1000-1400 Rpm hızına çıkarılabilmekte ve boşluk suyu basınçları sabit olduğunda deney sonlandırılmıştır. Deney sonunda zemin suyu alınmış ve numune bir tüp yardımıyla alınmış ve birkaç parçaya bölünerek zemin boyunca su muhtevası deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak konsolidasyon süresini azaltmak için yüksek hızlı bir masaüstü santrifüj tasarlanmıştır ve elde edilen sonuçlar ile geleneksel konsolidasyon deneyi arasında sayısal bir model geliştirilmeye çalışılmıştır.

S. Imamura vd. [16] vakumlu drenaj metodu ile 2 boyutlu santrifüj modelinde yumuşak deniz kilinin konsolidasyon mekanizmasını araştırmışlardır. Deneyde 50 g' de farklı vakum basınçlarındaki boşluk suyu basıncı ve oturmalar kaydedilmiş, ilk ve son su muhtevası da incelenmiştir. Sonuç olarak vakum drenajının kil üzerinde etkinliği doğrulanmış, sistemin kil zeminin su içeriğini açıkça azalttığı ve kilin kayma gerilmesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca vakum basıncının adım adım artırılması birden arttırılmasına göre daha etkili bir su çıkışı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu tekniğin kil zemininden suyun uzaklaştırılması ile oluşan etkilerinden zemin iyileştirme tekniği olarak kullanmaya ihtiyaç duyulabileceği önerilmiştir.

2. GEOTEKNİK SANTRİFÜJ MODELLEME DENEY SİSTEMİ

1.1. Geoteknik Santrifüj Deney Sistemi Tanıtım

Geoteknik mühendisliğinde küçük ölçekli zemin modelleri ile mevcut zemin durumunu incelemek için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Geoteknik santrifüj model deneyi, geoteknik malzemeler kullanarak tasarım problemlerinin incelenmesine ve analiz edilmesine olanak sağladığı için geoteknik mühendislerinin kullandığı gelişmiş bir sistemdir. Model deneyleri benzer şekilde inşaat mühendisliğinin diğer dallarında da vardır. Örneğin bunlar Yapı mühendisliğinde hidrolik basınç, Hidrolik mühendisliğinde savaklar ve hatta Geoteknik mühendisliğinde üç eksenli basınç deneyi vb. gibidir. Bu deneylerin her birinde bir model test edilir ve daha sonra sonuçlar teoride var olan ya da olacak prototipe uyarlanır. Bu deney çalışmalarında model genellikle prototipin küçültülmüş ölçekli bir biçimidir ve bu özellikle geoteknik santrifüj modellemesi için geçerlidir.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde çok çeşitli zemin davranışı gözlemlenebilmektedir. Bunun temel nedeni ilk olarak zeminin cinsi, tabakalı olması, farklı şekillerde tabakaların bulunması ve diğeri zeminin mevcut gerilmesi ve gerilme geçmişi. Başarılı bir modelleme için bu nedenler göz önüne alınmalıdır. Özellikle zeminin mevcut gerilme nedeni Geoteknik mühendisliğinde açıkça geoteknik santrifüj modellemeyi gerekli kılmıştır. Bu sebeple kendi ağırlık gerilmelerini simüle etmek için geoteknik santrifüj kullanılmaktadır.

Geoteknik santrifüj ana hatlarıyla bir döndürme kolu ve bu kolun ucundaki bir modelden oluşmaktadır. Geoteknik santrifüj temel olarak zemin deneylerinin yapıldığı kapsamlı bir yük çerçevesidir. Geoteknik santrifüj modellemesinin dayandığı temel prensip, model ile prototipteki ilişkilendirilen noktalardaki gerilmelerin aynı olmasıdır. Bunun gerçekleşmesi için iki varsayımın yerine getirilmesi gerekir. Bunlar; modelin prototipin doğru ölçeklendirilmiş bir örneği olması gerektiği ve geoteknik santrifüjün ideal yerçekimi alanını üretmesi gerektiğidir.

Geoteknik santrifüjde bulunan zemin modellerinin dairesel olarak döndürülmesi ve yapay bir yerçekimi ivmesi oluşturulması ile bu koşullar sağlanmaktadır. Geoteknik santrifüj zemin modelinin üst yüzeyi sürşarj yükü olmadığında gerilmeksiz ve zemin içerisinde gerilmenin büyüklüğü zeminin birim hacim ağırlığı ve maruz kalınan yapay ivmeye bağlı olarak dünya üzerinde olduğu gibi derinlikle artmaktadır. Geoteknik santrifüj deneyinin en önemli ve diğer deneylerden üstün kılan fark budur.

Geoteknik santrifüj modellemede en önemli nokta ölçek faktörüdür. Ölçeklendirme yasaları, boyutsal analiz kullanılarak ve temel diferansiyel denklemlerin dikkate alınmasından elde edilmiştir. Bu yöntem geniş bir model çeşitliliği için gerekli ölçeklendirme yasalarını türetmek için kullanılmıştır. Geoteknik santrifüj modellemesi genellikle doğrusal olmayan ivme alanı nedeniyle ölçeklendirme hataları yapılması ve ayrıca küçük ölçekli bir modelde prototipin tam olarak detaylandırılması zorluğu nedeniyle eleştirilmektedir. Bu nedenle geoteknik santrifüj deney sisteminin dayandığı hesaplar ve kuşku duyulan konular hakkında ispatlar ve çıkarımlar açıklanmıştır.

2.2. Yarı Statik Model İçin Ölçeklendirme Kuralları

2.2.1. Doğrusal boyutlar

Temel ölçeklendirme yasası, model ile prototip arasında gerilme eşitliğini sağlama ihtiyacından yola çıkılarak elde edilmiştir. Eğer dünyanın yerçekimi g 'nin N katı, birim hacim ağırlığı γ olan bir zemine uygulanırsa, modeldeki zeminin h_m derinliğindeki düşey gerilmesi σ_{vm} aşağıdaki gibidir:

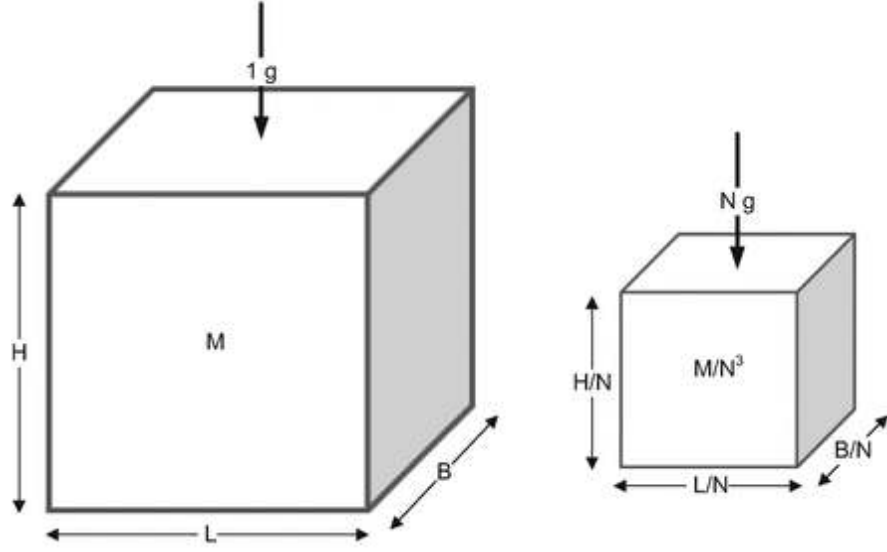
$$\sigma_{vm} = \gamma N g h_m \quad (2.1)$$

Prototipteki zeminin h_p derinliğindeki düşey gerilme ise σ_{vp} ile gösterilirse:

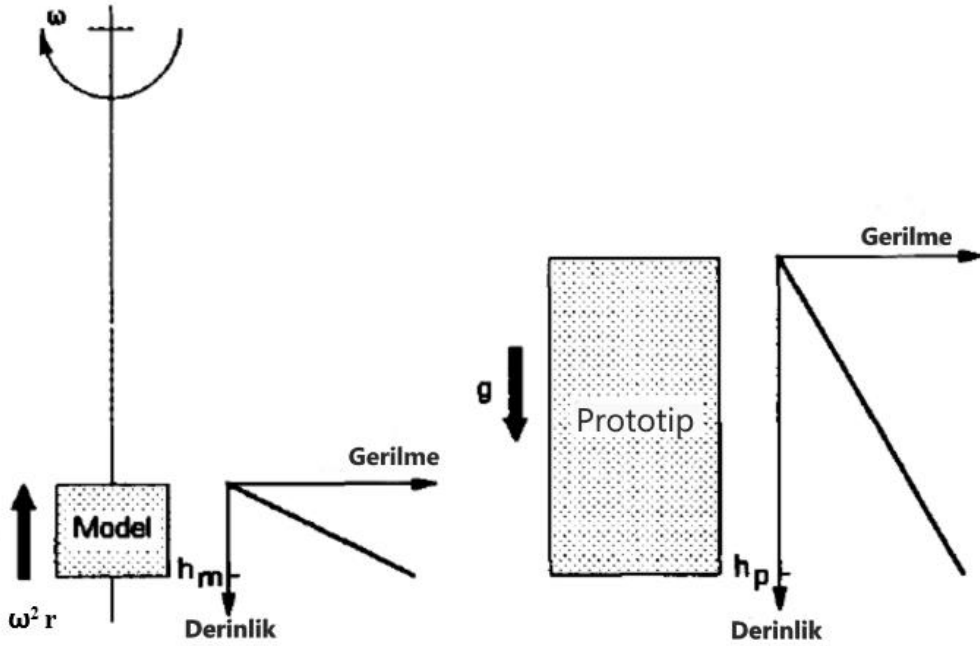
$$\sigma_{vp} = \gamma g h_p \quad (2.2)$$

olur [17].

Bu iki gerilmeyi eşitlersek birim hacim ağırlık (γ) aynı ve yerçekimi ivmesi (g) birbirinin katı olduğundan eşitlik sadeleştirilirse $h_m = h_p N^{-1}$ olur ve doğrusal modeller için ölçek faktörü $1/N$ olur. Böylelikle model prototipin doğrusal ölçeği olur ve uzunluklar içinde ölçek faktörü $1/N$ olur. Gerilmeler eşitlenerek hesap yapıldığından gerilme için ölçek faktörü $1/1$ dir. Dolayısıyla model ile prototipin gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi de aynı olmaktadır.



Şekil 2.1. Solda prototip ve sağda buna eş geoteknik santrifüj modeli



Şekil 2.2. Geoteknik Santrifüj ivmesi altında modeldeki gerilmeler ile yerçekimi ivmesi altında prototipteki gerilmelerin derinlikle değişimi (R.N. Taylor, 1980)

İnşaat mühendisliğinde karşılaşılan pratik zemin derinlikleri için dünyanın merkezine olan uzaklıklarının önemsenecek farklılıkta olmamasından dolayı yerçekimi aynı kabul edilmektedir. Geoteknik santrifüj modelleme için gereken yüksek ivme alanını oluşturmak için dairesel hareket kullanırken, model yüksekliğinin geoteknik santrifüj yarıçapına oranı önemli bir büyüklük teşkil ettiği için model boyunca ivme küçük de olsa değişiklik göstermektedir. Bunun nedeni, atalet ivmesi alanının açısal hız ve yarıçapın

bileşimi olan $\omega^2 r$ ile oluşturulmasıdır. Burada ω santrifüjün açısal dönme hızıdır ve r zemin modelinde herhangi bir taneciğin geoteknik santrifüj merkezine olan uzaklığıdır. Geoteknik santrifüj yapay ivmesi zemin taneciği ile geoteknik santrifüj merkezi arasındaki yarıçapa bağlı olduğundan yarıçap arttıkça artmaktadır. Bu artış gerçektekinden daha farklıdır. Bu problem, ölçek faktörü N' in belirlendiği yarıçapı seçerken doğru zemin derinliğine eşleştirilince önemsiz olmaktadır. Aşağıdaki hesaplamalarda bu konu açıklanmaktadır [17].

Prototipteki $h_p = h_m N$ derinliğindeki düşey gerilme:

$$\sigma_{vm} = \gamma N g h_m = \sigma_{vp} = \gamma g h_p \quad (2.3)$$

Ölçek faktörü N , etkili geoteknik santrifüj yarıçapı olan R_e ile hesaplanmaktadır böylelikle model ve prototipteki gerilme değişimlerinin önüne geçilebilmektedir.

$$N g = \omega^2 R_e \quad (2.4)$$

R_t model en üstü için yarıçaptır ve z derinliğindeki düşey gerilme aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\int_0^z \gamma \omega^2 (R_t + z) dz = \gamma \omega^2 z \left(R_t + \frac{z}{2} \right) \quad (2.5)$$

Model ve prototipteki düşey gerilme $z = h_i$ derinliğinde aynı olduğunu kabul edilirse, (2.3), (2.4) ve (2.5) ile aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$R_e = R_t + 0.5h_i \quad (2.6)$$

Gerilme dağılımındaki hatayı en aza indirmek, düşük ve yüksek gerilme saplamaları büyüklükleri göz önüne alınarak sağlanmaktadır. (bkz. Şekil 2.3). $0.5h_i$ model derinliğinde meydana gelen düşük gerilme sapması ile bu derinlikteki prototip gerilmesi oranı r_u aşağıdaki gibidir [17]:

$$r_u = \frac{0.5h_i \gamma g N - 0.5h_i \gamma \omega^2 \left(R_t + \frac{0.5h_i}{2} \right)}{0.5h_i \gamma g N} \quad (2.7)$$

Bu da (2.4) ve (2.6) ile birleştirilirse;

$$r_u = \frac{h_i}{4R_e} \quad (2.8)$$

Geoteknik santrifüj modelde ayrıca h_m derinliğindeki yüksek gerilme sapmasının prototipteki gerilmeye oranı olan r_o aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$r_o = \frac{h_m - h_i}{2R_e} \quad (2.9)$$

İki oranın (r_u ve r_o) eşitliği Şekil 2.3' deki oranı vermektedir:

$$h_i = \frac{2}{3} h_m \quad (2.10)$$

Bu yüzden:

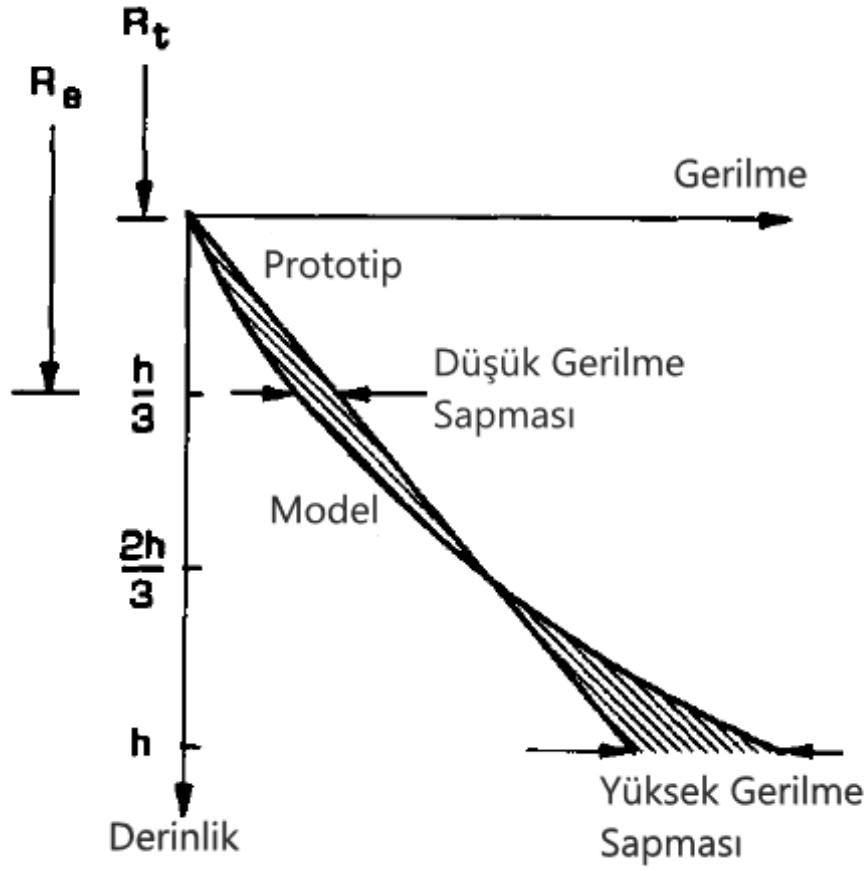
$$r_u = r_o = \frac{h_m}{6 R_e} \quad (2.11)$$

Ayrıca eşitlik (2.6) 'ı kullanarak (2.12) elde edilmektedir.

$$R_e = R_t + \frac{h_m}{3} \quad (2.12)$$

Bu hesaplamalarla modelin $1/3 h_m$ derinliğine göre etkili yarıçapın seçilmesiyle ve buna göre santrifüj ivmesinin hesaplanması ile model ve prototip arasındaki gerilmede neredeyse tam eşitlik olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yani etkili geoteknik santrifüj yarıçapı, santrifüj merkez ekseninden modelin derinliğinin üçte biri kadar ölçülmelidir. Maksimum gerilme hatası ise (2.11) denklemi ile verilmiştir.

Çoğu geoteknik santrifüj için h_m/R_e oranı 0.2'den düşüktür. Bu kurala bağlı tasarımlarda gerilme profilindeki maksimum hata oldukça küçük (%3) kalmaktadır. Örnekleme gerekirse küçük yarıçaplı geoteknik santrifüjlerde dahi (1,5 m yarıçap gibi), doğrusal olmayan gerilmeden kaynaklanan hatanın, 300 mm yüksekliğe sahip orta büyüklükteki modeller için oldukça küçük olduğu açıktır. Bu kural göz önünde tutularak dünyanın yerçekimi ve yapay yerçekimi arasında oluşacak gerilme hatalarının önüne geçilmiştir [17].



Şekil 2.3. Geoteknik Santrifüj Modeli ve bu modele eş Prototipte gerilme değişiminin derinlik ile değişimi (Schofield, 1980)

2.2.2. Geoteknik santrifüjde konsolidasyon ve sızma

Konsolidasyon, aşırı boşluk basınçlarının dağılması yani ortamdan suyun ve havanın uzaklaşması olayıdır. Geoteknik santrifüjde ölçeklendirme yasasını boyutsal analiz kullanarak konsolidasyon ve süresi için incelemek oldukça kolaydır. Konsolidasyon derecesi, boyutsuz zaman faktörü T_v ile tanımlanır:

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2} \quad (2.13)$$

Aynı konsolidasyon derecesi için, T_v model ve prototipte aynıdır, böylece:

$$\frac{C_{vm} t_m}{H_m^2} = \frac{C_{vp} t_p}{H_p^2} \quad (2.14)$$

$H_p = N H_m$ olduğundan:

$$t_m = \frac{1}{N^2} \frac{C_{vp}}{C_{vm}} t_p \quad (2.15)$$

olur.

Eğer model ve prototipte aynı zemin kullanılırsa konsolidasyon katsayısı aynı olduğundan, konsolidasyon süresi için ölçek faktörü $1:N^2$ olmaktadır. Eğer konsolidasyon katsayıları model ve prototipte aynı değilse, denklem (2.15) ile gösterildiği gibi ölçek faktörünün ona göre ayarlanması gerekmektedir. Örneklendirmek gerekirse prototipte 400 gün süren bir konsolidasyon olayı geoteknik santrifüj deneyinde 100g ivmede 1 saatte gerçekleşmektedir. Konsolidasyon zamanının görünür şekilde hızlanmasının, modeldeki geometrik ölçeğin küçülmesinin bir sonucudur. Yani geoteknik santrifüj konsolidasyonu hızlandırmamaktadır. Aynı tür ölçek faktörü, konsolidasyon davranışını belirlemek için laboratuvarında küçük bir zeminin test edildiği durum için de geçerlidir [26].

Sızma akışı süresi için ölçeklendirme yasaları, hidrolik eğim ve Darcy permeabilite kanunlarına göre şekillenmiştir. Açıkça geoteknik santrifüj modelinde sızma akış hızı hidrolik basınca bağlı olarak değişmektedir. Darcy sızma akışı kanunu:

$$v = ki \quad (2.16)$$

Akışkanlar mekaniği ve hidrolikte, mutlak permeabilite olan K aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$K = \frac{vk}{\gamma g} \quad (2.17)$$

v ve γ sırasıyla, akışkanın dinamik viskozitesi ve birim hacim ağırlığıdır. K, zemin tanelerinin şeklinin, büyüklüğünün ve diziliminin bir fonksiyonudur. Bu durumda, aynı boşluk sıvısı modelde ve Prototipte kullanılıyorsa, Darcy geçirgenlik katsayısı, yerçekimi ivmesinin N kat değişimi ile $k_m = N k_p$ olur. Hidrolik eğim, boşluk sıvısı yüksekliğindeki bir düşüş olan Δs , uzunluğu Δl in oranı olarak Şekil 2.4. de gösterildiği tanımlanmıştır. Dolayısıyla, hidrolik eğiminin boyutsuz olduğu görülmektedir yani tartışıldığı gibi, hidrolik eğim ivmeyle ölçeklenmemektedir.

$$v_m = i_m k_m = i_p N k_p = N v_p \quad (2.18)$$

etmek için geoteknik santrifüj modelleri, uygun prototiplere karşılık gelecek şekilde test edilmektedir. Test edilen modeller aynı davranışı göstermeli ve bu nedenle modelleme süreci için faydalı bir iç kontrol sağlamalıdır. Ayrıca ölçek etkilerini araştırmak ve doğrulamak için ‘Modellerin Modellenmesi’ gibi bir teknikte kullanılmaktadır. Örneğin aynı prototipin geoteknik santrifüjde 40 g ve 120 g’de ölçek kurallarına uygun modellendiğinde aynı davranışın gözlemlenmesi beklenmektedir. Bu teknik geoteknik santrifüjün kalibrasyonu içinde oldukça etkili bir yoldur. Tablo 2.1’de çeşitli değer ve olgulara göre geoteknik santrifüj ölçeklendirmesi verilmektedir.

Tablo 2.1. *Geoteknik Santrifüj Modellemede Ölçek Faktörü (Ferstl, 1998)*

Fiziksel değer veya olgu	Prototip boyutu	Santrifüj model boyutu
Yerçekimi	1	N
Uzunluk	1	1/N
Deplasman	1	1/N
Alan	1	1/N ²
Hacim	1	1/N ³
Gerilme	1	1
Birim Şekil Değiştirme	1	1
Kuvvet	1	1/N ²
Hız	1	N
İvme	1	N
Kütle	1	1/N ³
Enerji	1	1/N ³
Birim Hacim Ağırlık	1	1
Zaman	1	1/N ²
Frekans	1	N

2.3.1. Danecik büyüklüğü etkileri

Geoteknik santrifüj araştırmacıları zemin danelerinin boyut olarak N ölçek faktörü ile küçültülmemesi durumunda geoteknik santrifüj modellemesinin doğru olup olmayacağını da sorgulamaktadır. Model ölçeğinin artması ile modeldeki kum tanecığının gerçekte çakılı temsil ettiği düşünülebilmektedir. Aynı öneri için bir kilin iyi bir kumu temsil ettiği düşünülebilmektedir. Bir kil, ince bir kum için çok farklı gerilme-birim şekil değiştirme özelliklerine sahip olduğundan, bu düşünce açıkça hatalıdır. Deney çok yüksek ivme ile yapılmışsa ve küçük bir model kutusunda çakıl modellenmişse tane

büyükliđünün model kutu boyutlarına kıyaslanabilir olacađından ve modelin prototipteki aynı gerilme-birim Őekil deđiŐtirme eđrisini oluŐturması műmkűn deđildir. Yani danecik büyüklüğü etkisi ancak iri daneli zeminlerde sorun olmaktadır [20].

Danecik büyüklüğü etkileri sorunlarından kaçınmak için modeldeki ana boyut ile ortalama tane çapı arasındaki kritik oran hakkında basit kılavuzlar geliŐtirilmiŐtir. Ovesen tarafından kum zemine oturan dairesel bir temelin farklı ebatlarda model kullanılarak kumun tanecik büyüklüğünün etkisini araŐtırmıŐtır. Sonuçta temel çapının kum dane büyüklüğüne oranının 15 ten küçük olduğu durumlarda ortak zemin davranıŐından sapma olduğunu gözlemlemiŐtir. Veriler geoteknik santrifűj tekniğini dođrulamıŐtır. Bu yüzden tanecik büyüklüğü ölçek etkisi yalnızca kaba daneli zeminlerde yanlış modelleme ile görűlebilmektedir [20].

2.3.2. Dairesel ivme alanı

Geoteknik santrifűj yapay bir yüksek yerçekimi ivmesi űretebilmesine rađmen bunun yanında Radyal dűnmeye bađlı olarak bazı problemler oluŐturabilmektedir. Radyal ivme, modelde derinlikte deđiŐmektedir ve yarıçapla orantılıdır. İvme geoteknik santrifűj dűnme merkezinden yönlendirilmekte ve dűnmeye bađlı olarak modelin geniŐliđi boyunca dikeye göre yönelme olmaktadır. Bu nedenle etkisi tanınması gereken yanal bir ivme bileŐeni vardır. Bu sorun genellikle büyük model ve küçük yarıçaplı geoteknik santrifűjlerde problem yaŐatmaktadır. Bu problem zaten geoteknik santrifűj model yüksekliđi ve etkili yarıçap oranının 0,2'den küçük tasarlanarak aŐılmaktadır. Genel olarak, yűkleme vs. gibi uygulamaların modelin orta bűlgesinde meydana gelmesini sađlamak bu duruma karŐı etkili bir uygulamadır [17].

Dairesel ivmenin dűndűrűlerek oluŐturulmasından dolayı, model dűnme dűzleminde hareket halindeyken modelde bir hareket olduđunda Coriolis ivmelerinin etkisi deđerlendirilmelidir. Coriolis ivmesi kısaca dűnen referans dűzlemi űzerindeki modele etkiyen ivmedir. Geoteknik Santrifűj tasarımcıları Coriolis etkilerinin ihmal edilebildiđi hız aralıkları belirlemiŐlerdir. a_c Coriolis ivmesi, ω santrifűj açısal hızı ve v ise model kűtlesinin hızına bađlıdır.

$$a_c = 2 \omega v \quad (2.21)$$

Modeldeki baŐlangıç ivmesi a ise santrifűj dűnerken ki modelin hızı V ve ω santrifűj açısal hızına bađlıdır.

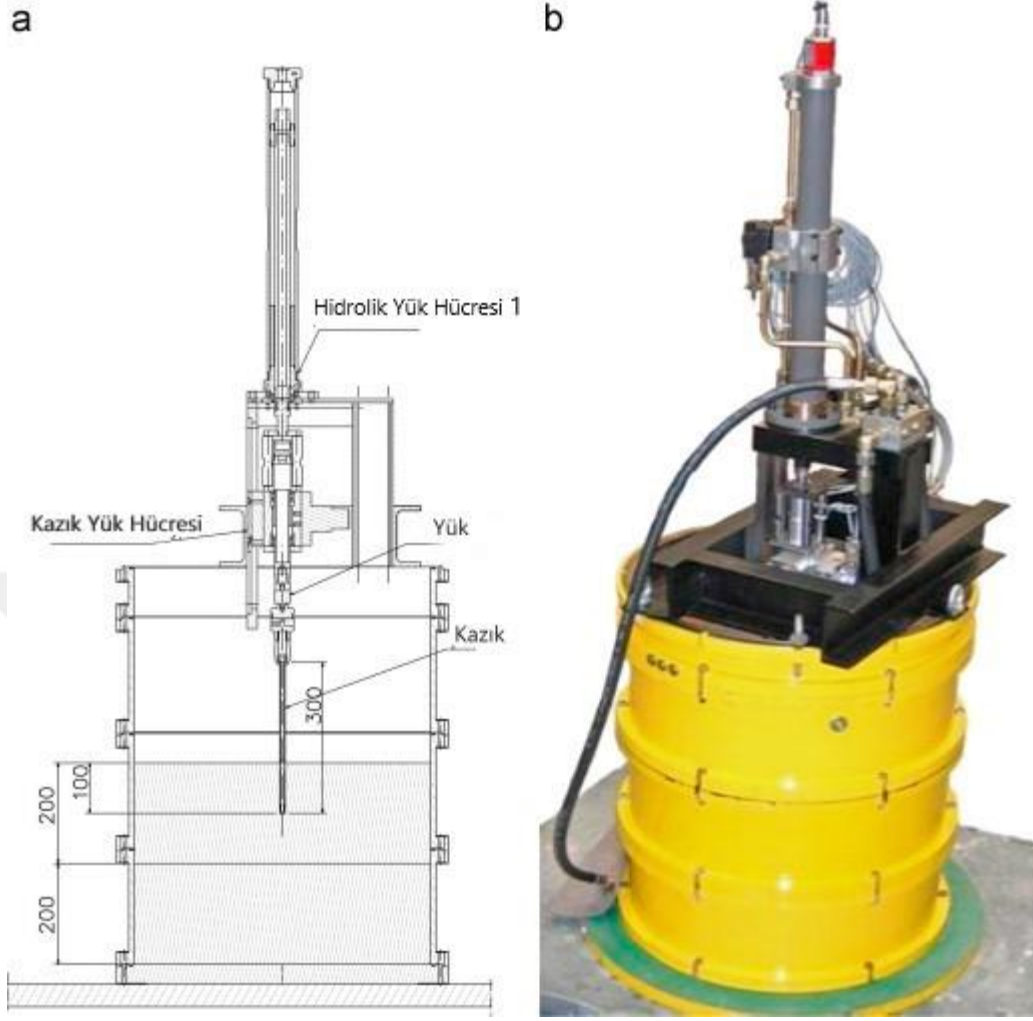
$$a = \omega^2 R_e = \omega V \quad (2.22)$$

Coriolis etkisinin a_c/a oranının 0.1'den küçük olduğunda yani $v < 0.05V$ durumunda ihmal edilmektedir. Bu ivme Geoteknik santrifüj dinamik deneylerinde modelin sarsma tablasındaki hareketi sonucu oluşmaktadır [17].

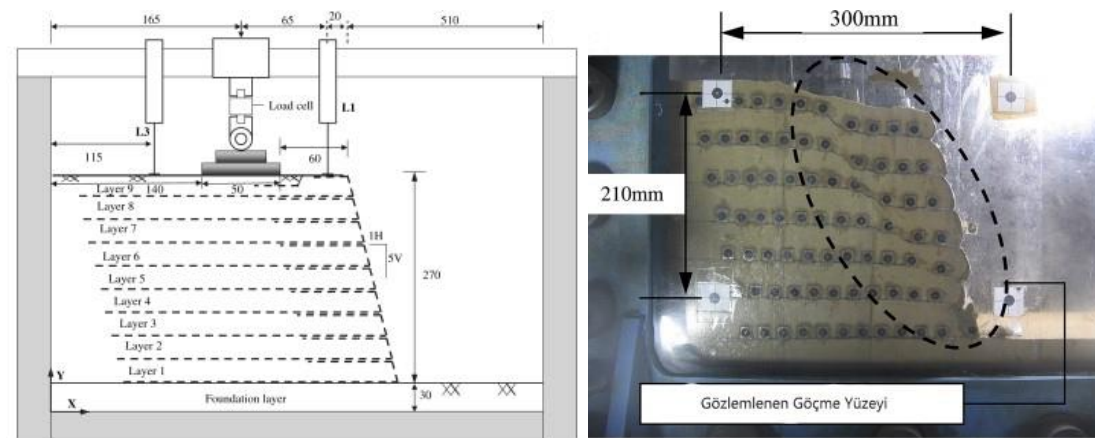
2.3.3. Modelde inşaat etkisi

Geoteknik mühendisliği inşa aşamaları ve yapı-zemin etkileşimi ile de ilgilenmektedir. Geoteknik santrifüj deneyi sırasında kazı yapılabilen veya yapı inşa edilebilmektedir ancak bunlar oldukça zor yöntemlerdir. Deney sırasında geoteknik santrifüj ivmesine bağlı olarak zemin çok ağırlaşmakta ve tüm model araçlarının küçük, hafif ve çok güçlü olması gerekmektedir, bu yüzden model için birçok tasarım gerekmektedir.

İnşaat veya montaj işlemlerinin modellenmesinde ilk iş, modellenmesi gereken detaylar ve kabul edilmesi gereken yaklaşımlardır. İnşa edilecek yapı veya kazı işleri gerekli ölçek etkilerine ve gerçekteki mühendislik özelliklerine bağlı kalınmalıdır. Ayrıca inşa süreci de prototipteki gibi aslına uygun yapılmalıdır. Örneğin bir kazıklı temelin aksel yüklemesi araştırılacaksa öncelikle kazıklar deney sırasında zemine yerleştirilmelidir. Genellikle geoteknik santrifüj deneyinde yükleme için hidrolik basınç aletleri, görsel veri toplamak için CCD kamera, sıvı akışı için drenaj kanalları, yeraltı su seviyesi için su kanalları ve ayrıca hava kanalları kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Kazık hızlı yükleme model deneyi tasarımı, a: Geoteknik santrifüj deney düzeneğinin tasarımı, b: Geoteknik santrifüj deney düzeneğinin yüklemeye hazır hali (P. Hölscher, 2012)



Şekil 2.7. Geotekstil donatılı istinat duvarı tasarımı ve geoteknik santrifüj modelinin gerçekleştirilen deney sonucu gözlemlenen göçme bölgesi (A. N. Sommers, 2009)

2.4. Model Deneyleri

Geoteknik santrifüj deneyi, Geoteknik olayların fiziksel modellenmesi ile ilgilidir. Bu yüzden santrifüj test serisi farklı hedefleri göz önünde bulundurarak tasarlanabilmektedir; aşağıdaki model test kategorileri James vd. tarafından tanımlanmıştır [19].

- Alınması zor prototip tasarım kararlarının alındığı belirli bir problemin incelenmesi durumudur. Bu çalışmalarda amaç Geoteknik Santrifüj model deney verilerinin Prototip ölçeğine aktarıldığı yani model davranışının değerlendirmesi sonucu prototip tasarlanmaktadır.
- Akılda belirli bir prototip olmadan genel bir problemin incelenmesi durumudur. Araştırma, belirli bir problem türü hakkında genel açıklamalar yapmaya ve öneriler sunmaya yöneliktir. Her model kendi başına bir prototiptir ve bir dizi testin sonuçları, boyutsal analizden iyi bir şekilde yararlanılarak ilişkilendirilmektedir. Ayrıca yeni analiz yöntemleri geliştirmek için de yapılmaktadır.
- Gerilmelerin ve deplasmanların değişiminin bir problemde ayrıntılı çalışılması durumudur. Bu tür deneyleri amacı, daha sonra başlıca modellerin geliştirilmesine ve dolayısıyla analizlerin geliştirilmesine yardımcı olabilecek zemin davranışı hakkında bilgi edinmektir.

Geoteknik santrifüj araştırmaları başlangıçta göçme mekanizmaları ile ilgilenmekteydi. Geoteknik santrifüj özellikle bu araştırmalarda kullanışlıdır çünkü zemini kendi ağırlığının etkilerinin uygun bir şekilde oluşturulması söz konusudur. Bu göçme olayı iki boyutlu modeller bir model kabının Plexi, cam vb. türde şeffaf yan duvarından dikey bir kesitin gözlemlenmesiyle göçme yüzeyleri açıkça incelenmektedir.

Geoteknik santrifüj model çalışmaları kendi başlarına prototip olarak kabul edilebilmektedir. Doğrudan prototiplerle karşılaştırılabilen detayları, özellikle de gerilme-birim şekil değiştirme için doğru dağılımını göstermeleri bunun kanıtıdır. Bu nedenle, sayısal kodlar ve analizlerin doğrulanması için mükemmel veriler sağlamaktadırlar. Bunlar, göçme tahminlerinden detaylı deformasyon modellemeye kadar uzanmaktadır. Geoteknik santrifüj deney verilerinin ayrıntılı sonlu elemanlar hesaplamaları ile faydalı karşılaştırmalar sağladığı birçok araştırmada kanıtlanmıştır [19].

3. GEOTEKNİK SANTRİFÜJ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Geoteknik santrifüjler mekanik olarak iki ana sınıfa ayrılırlar. Bunlar Geoteknik Kiriş Santrifüjleri ve Geoteknik Tambur Santrifüjleridir. Çalışma prensipleri aynı ancak mekanik görünüşleri birbirinden farklıdır.

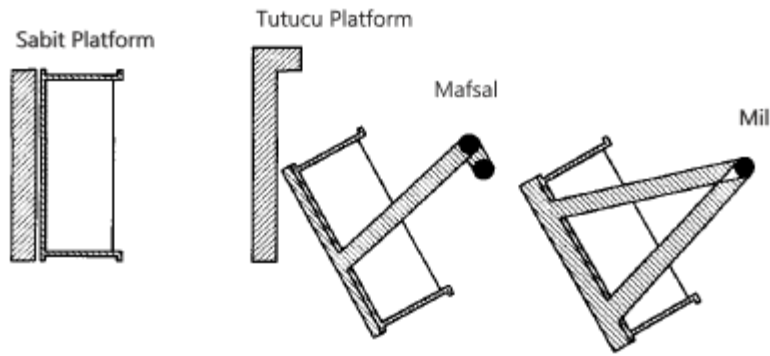
3.1. Geoteknik Kiriş Santrifüjleri

Geoteknik Kiriş Santrifüjleri geleneksel olarak model kutusunun konulduğu platformu bir çift mil ile taşıyan bir kolu bulunan ve bu kolun karşısında dengeleyici kol veya simetrik kolu bulunan Geoteknik santrifüj deney sistemidir. Bu sistemde platform dairesel hareket ile yükseleceğinden merkezdeki mile etkiyecek dairesel kuvvetler minimize edilmelidir.

$$\sum m r \omega^2 \longrightarrow 0 \quad (3.1)$$

Buradaki m geoteknik santrifüj merkezi eksenindeki bir r vektörünün kütle merkezi ve ω açısal hızıdır. Geoteknik santrifüj merkezindeki mili tek yöne çeken kuvvetlerden kaçınmak için dengeleyici ağırlıklar kullanılmaktadır ve karşılıklı dikey vektörler oluşturularak milde denge sağlanmaktadır. Ayrıca dengeleyici ağırlık yerine karşılıklı çift model platformu olan geoteknik santrifüjlerde mevcuttur [17].

Geoteknik kiriş santrifüjleri, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi üç platform tipine (sabit, tutulan ve sallanan) sahiptir.



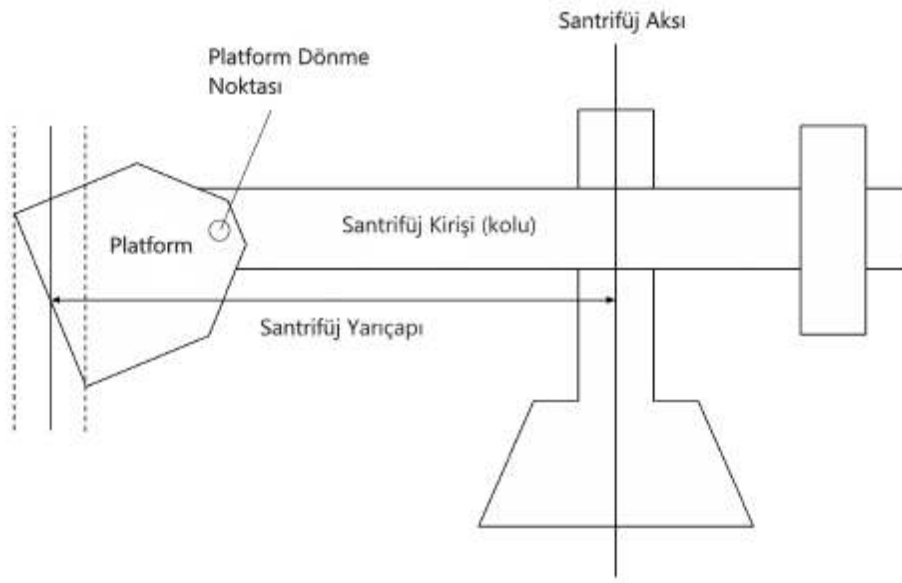
Şekil 3.1. Kiriş santrifüj platformunun çeşitleri: soldan sırasıyla sabit, tutulan, sallanan

Sabit platformda, model kutusu dikey platforma sabitlenmektedir. Bu yüzden oluşturulan modele ivme sürekli olarak dik etkimektedir. Geoteknik santrifüj başlatıldığında veya durdurulduğunda, zemin ve sıvılar gibi düşük kayma modüle sahip

malzemeleri model kutusunda tutmak için bazı yöntemler gerekmektedir. Bu yöntemlerde bir vakum ile birlikte esnek membranlar kullanılmıştır. Model davranışları üzerindeki etkilerini en aza indirmek için geoteknik santrifüj deneyi sırasında membranlar gevşetilmesi gerekmektedir. Bu platforma sahip deney sistemlerinde modelin platforma yüklenmesi sırasında model şeklinin bozulmasına sebep olabilmektedir. Özellikle gevşek zemin modelleri ve üzerindeki model yapıları için kullanışlı bir platform değildir [17].

Tutulan platformlar, sallanan platform yüzeyi hafifçe yataya eğimlidir. Santrifüj hızı arttıkça yaklaşık 10 g de platform bir destek platformu ile tutulup desteklenmektedir. Burada platform eğimi 84 derecedir. Ayrıca aşırı ivme artışları, platformun artan ağırlığının destek bağlantısını bükmesine neden olur, böylece platform destek platformuna dayanır ve onun tarafından taşınır. Bu eğimden kaynaklanacak hatalardan kaçınmak için zemini eğimli tasarlanabilmekte veya model kutusunun altına bir kama yerleştirilerek de eğim verilerek tasarlanabilmektedir.

Sallanan platformlar yeni nesil geoteknik santrifüjlerde kullanılmaktadır. Platform yüzeyi, mafsalsız sürtünmesiz olması ve platformun simetrik olarak yüklenmesi koşuluyla, ortaya çıkan ivmeyi karşılamaktadır. Model yüzeyi dönme eksenine tam olarak paralel olmadığında (10 g altındaki ivmelerde), yatay bir düzlemde dikey gerilme oluşabilmektedir. Bu platformların en büyük faydası araştırmacılar için rahat erişim olanağıdır.



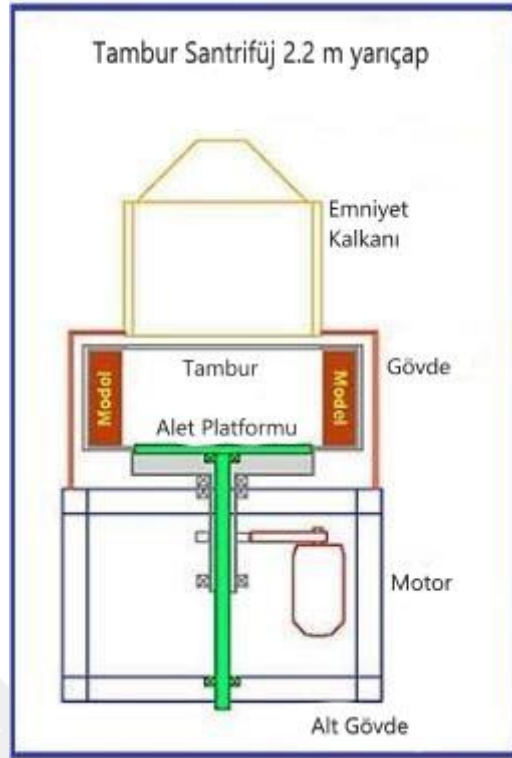
Şekil 3.2. Geoteknik Kiriş Santrifüj Tasarımı (Ryan D. Beemer, 2015)



Şekil 3.3. *Geoteknik kırıç santrifüjü (University of California)*

3.2. Geoteknik Tambur Santrifüjleri

Geoteknik tambur santrifüjleri günümüzde geoteknik araştırmalarda artarak kullanılmaya başlanmıştır. Geoteknik tambur santrifüjleri etrafı kapalıdır ve üzerindeki platformu döndüren bir motor mekanizmasına sahiptir. Geoteknik tambur santrifüjünün sabit bir platforma sahip olduğu görülmektedir bu da modelleri platformda tutmayı zorlaştırmaktadır. Geoteknik santrifüj, model araçları ve sürücülerini yerleştirmek için durdurulduğunda bir çekme kuvveti gerekmektedir. Bazı geoteknik tambur santrifüjleri dikey bir düzlemde dönebilmektedir ve modeldeki ivme bileşeni Dünya'nın yerçekimi nedeniyle döngüsel bir bileşene sahip olmaktadır. Bu döngüsel bileşen, model deneylerinde sıvı akışı oluşturmak için kullanılabilir.



Şekil 3.4. Geoteknik tambur santrifüjü tasarımı (Western University)



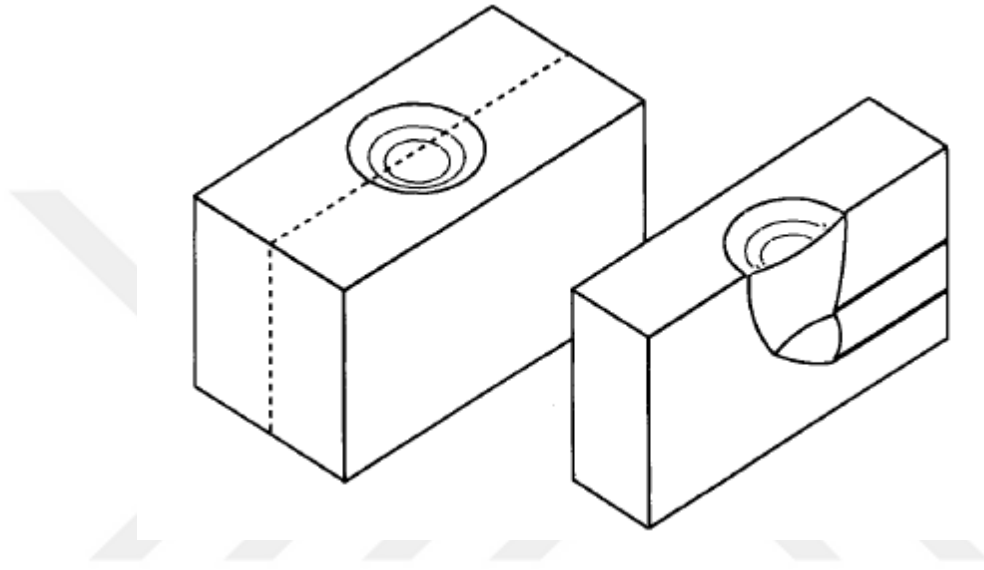
Şekil 3.5. Geoteknik kiriş ve tambur santrifüjleri (Thomas Broadbent & Sons Ltd.)

3.3. Model Kutuları

Geoteknik tambur santrifüjünde, model tamburun içinde yer almaktadır. Kiriş santrifüjlerinde ise model kutusunda modellenmekte ve platforma yerleştirilmektedir. Geoteknik santrifüj modeli deneyi normalde sonsuz yarı uzay davranışının bir simülasyonudur. Kutu sınırları, yarı uzayı tanımlamaktadır. Statik yükleme modellerinde, genellikle yanal zemin deplasmanını önlemek için yüksek rijitliğe sahip ideal sürtünmesiz

dikey duvarlar kullanarak tek boyutlu konsolidasyon sınır koşulları oluşturulabilmektedir.

İlgili yarı uzay dikey simetri düzlemleri içerebilmektedir. Bu düzlemler düşük kayma rijitlikli yüzey ile değiştirilebilmektedir. Bu düzlem boyunca yer alan yüzey altı deformasyon desenleri, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, yüzeyler şeffaf seçilerek de görsel verilere ulaşılabilir.



Şekil 3.6. Tünel başlığının etrafında görülen hareket. Sol, tam model; sağ, yarı model (R. Phillips)

Pratik olarak, model duvarlarında sürtünme vardır. Kil zeminler için, düzgün kaplanmış sert duvarların suya dayanıklı bir yağ ile yağlanmasıyla, yan duvar sürtünmesi minimize edilebilmektedir. Kum zemin için, kum kütlesi ve model kutusu duvarı arasında rijit bir cam levha yerleştirilebilmektedir. Kumdaki küçük deformasyon problemleri için, sürtünme direnci kutu sınırlarında yağlanmış lateks levhalar kullanılarak daha da azaltılabilmektedir.

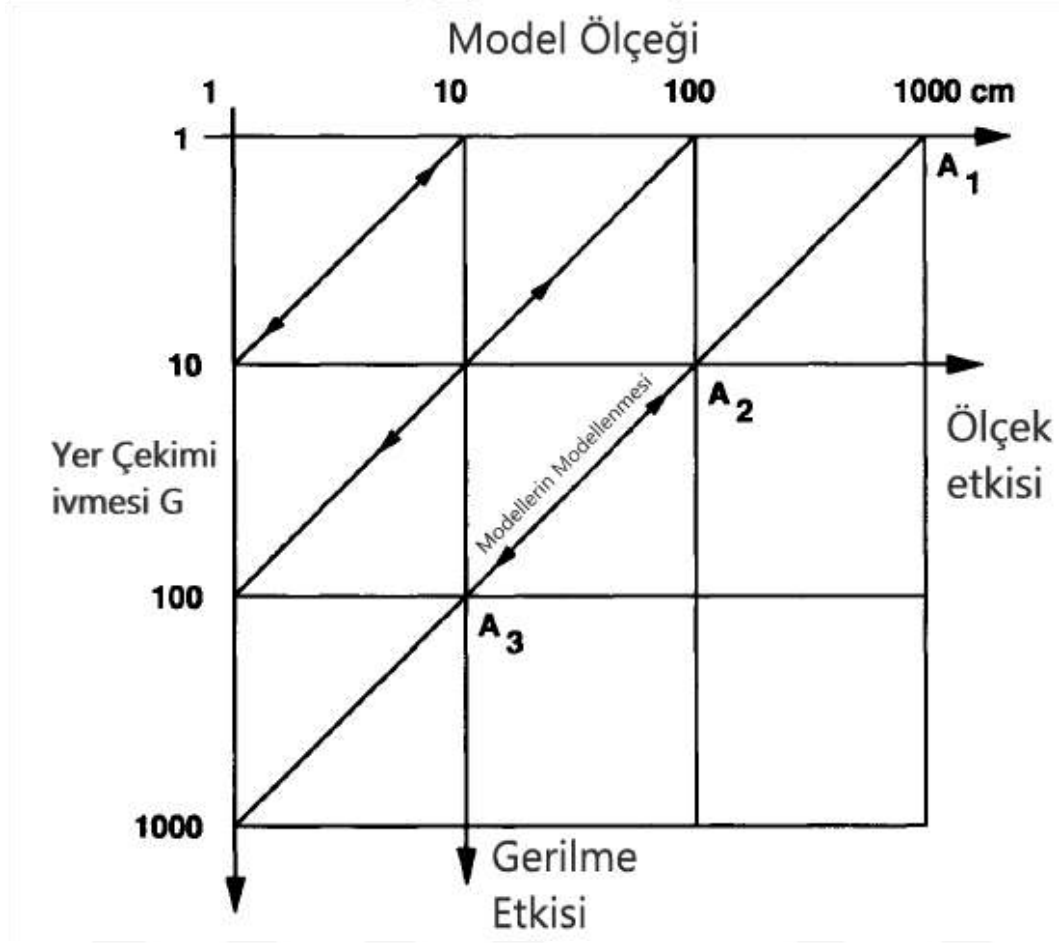
Düzlemsel deformasyon deneylerinde model sürtünmeden etkilenebilmektedir. Yani yan duvar sürtünmesi her zaman bir dereceye kadar mevcut olduğundan düzlemsel deformasyon modelleri yeterince geniş olmalıdır. Böylelikle yan duvar sürtünme direnci önemli oranda azalmaktadır.

İki ve üç boyutlu modelleme için model kutusu genişliği, sürtünme etkilerini en aza indirmek için içerdikleri zemin derinliğinin en az iki katı olmalıdır. Model kutusu duvarlarının üst kısımları, sürücü ve ara yüzeyler için ve model yapımı sırasında bir veri yüzeyi olarak destek sağlamak için kullanılmaktadır [17].

Genel olarak dairesel model kapları, doğal yanal rijitlikleri ve hafif kütleleri nedeniyle oldukça kullanışlıdır. Ayrıca dikdörtgen model kutuları, aynı taşıma kapasitesine ve rijitliğe sahip bir dairesel model kaplarından daha büyük ve pahalıdır. Bununla birlikte, geoteknik santrifüj platformları genellikle dikdörtgen olduğundan, model kutuları mevcut zemin plan alanının maksimum kullanımı için daha elverişlidir. Yine de dikdörtgen kutular aşırı konsolide örneklerin hazırlanması sırasında zemin basınçlarını koruyacak kadar güçlendirilmiş model kutuları gerekmektedir. Burada konsolidasyon aleti ve model kutusunun boyutlarının aynı olmasına dikkat edilmelidir, aksi takdirde zemin numunesinin yanal deformasyonlar meydana gelmektedir. Model kutusunun tabanı, model hazırlama ve mekanik kullanım sırasında taban desteklenmediğinde bile numunenin deformasyonunu önleyecek kadar rijit olmalıdır. Ayrıca model kutusu tabanı geoteknik santrifüj platformuna dengeli ve tam olarak yerleştirilebilmelidir. Model kutusu aynı zamanda zemin modelinin drenajını da uygun şekilde sağlamalıdır.

3.4. Deney Tasarımı

Geoteknik Santrifüj modelinde sadece aşırı yerçekimi etkileri otomatik olarak gelişmektedir. Bu yerçekimi etkilerinin prototip davranışı üzerindeki etkilerini doğrulamak için, “modellerin modellenmesi” tekniği Schofield tarafından açıklanmıştır. Farklı modeller arasındaki benzerlikler, davranıştaki farklılıklar, farklı süreçlerin etkilerini ayırmada yardımcı olmaktadır. Örneğin; araştırmacılar yumuşak kil sedimentasyon ve konsolidasyon sürecini modellemiş ve modelleri modelleyerek iki olayı ayırmışlardır [19].



Şekil 3.7. Modelleme prensipleri (Ko, 1988).

'Modellerin modellenmesi' ilkesi Ko tarafından tartışılmıştır ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Aynı 10 m yüksekliğinde prototip, tam ölçekte yani 1/1, 1 / 10'da veya 1 / 100'de ölçekte sırasıyla yani A1, A2 ve A3 noktalarında modellenebilmektedir. Ancak modellerin modellenmesinde kullanılan ölçek aralığı gösterilenden daha dardır ve yaklaşık olarak 3 katıdır, bu teknik tam ölçekli deneyler içermemektedir [22].

Model için geometrik ölçek faktörü, incelenen prototip durumuna minimum sınır koşullarıyla model kabına sığacak şekilde seçilmektedir. Ayrıca ölçek faktörü seçimi, Geoteknik santrifjün taşıma kapasitesi ve çalışma alanından dolayı maksimum model büyüklüğü de sınırlıdır. Genel olarak, ölçek faktörü modelin boyutunu en üst düzeye çıkarmak için mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Çünkü küçük modellerde aletsel etkiler fazla, model oluşturma daha zordur ve zemin daha duyarlıdır. Bununla birlikte, basit sınır değer problemlerinin küçük modelleri için parametrik çalışma yapmak elverişlidir.

Geoteknik santrifüj ivme seviyesi sabit değildir ancak Geoteknik Santrifüj yarıçapı ile doğrusal olarak artmaktadır. Uygun ivmenin, zemin modelinin derinliğinin üçte birinde seçilmesi gerektiğini ve genel zemin derinliğinin, etkili geoteknik santrifüj yarıçapının yüzde 10'unu geçmemesi koşuluyla, bunun önemsiz olduğunu göstermiştir [20].

Zemin genellikle tabakalar halinde bulunur bu yüzden geoteknik santrifüj modellemede de zemin tabakalarına dikkat edilmektedir. Bu zemin tabakaları model kutusu yan duvarlarına bir basınç uygulamaktadır. Model kutusu genişliği, Geoteknik santrifüj yarıçapının yaklaşık %20'si ise, etkili geoteknik santrifüj yarıçapı ivmesinin %10'u yanal ivme olarak zemin tabakaları ile model kutusuna etkimektedir. Bu etki, modellenecek yapının model kutusunun ortasında modellenmesiyle aşılmaktadır [17].

Geoteknik santrifüj deneyinde modelleme, deney aletinin özelliklerine uyumlu modellenmektedir. Model ile iletişimin nasıl kurulduğunu ve modelin geoteknik santrifüj ivmesinden nasıl etkilendiği gözlemlenmektedir. Geoteknik santrifüj döndükçe sıcaklık kontrolü gerekebilmektedir. Ayrıca geoteknik santrifüj döndükçe hava hareketleri modelde titreşim ve buharlaşmaya yol açabilmektedir.

3.5. Model Hazırlığı

Geoteknik santrifüj modellemenin en önemli yanı zemin modelinin prototipin etkili gerilme profilini yansıtmasıdır. Çünkü gerilme geçmişi ve mevcut gerilme durumu zeminin davranışını belirlemektedir. Ayrıca bu davranış için örselenmemiş zemin ile geoteknik santrifüj model testleri yapılabilmekte ancak yapılar, çatlaklar, yabancı maddeler ve potansiyel drenaj yolları gibi örselenmemiş model numunesinde bulunan makro kusurlar, prototipteki koşulları temsil edecek şekilde ölçeklendirilemeye bilmektedir.

Geoteknik santrifüj modelini yeniden oluşturmak için öncelikle prototip durumunun saha araştırması gereklidir. Bunlar var olan veya olacak prototip durumunun tespiti ve zeminin mühendislik özelliklerinin tespitidir. Saha ve laboratuvar araştırmaları sonucu elde edilen zemin parametrelerine göre zeminin yeniden şekillendirilmesiyle kusurlar elimine edilmektedir. Geoteknik santrifüj modeli ince daneli zeminler için genellikle yeniden yoğrularak biçimlendirilen zeminden yapılmaktadır. Ayrıca tekrar tekrar yoğrulan zemin kullanımı, malzeme gerilme geçmişini bozduğundan dolayı tavsiye edilmemektedir [26].

Granüler zemin modelleri, sıkıştırma ve havadan düşürme teknikleri ile hazırlanabilmektedir. Çünkü geoteknik santrifüj için zemin modelleri genellikle titreşimli masalarda sıkıştırmak için oldukça büyüktür. Düzgün dereceli kuru kumlar için kuru havadan düşürme teknikleri kullanılabilmektedir. Daha ince silt zeminler havadan düşürme tekniğiyle, silt havaya yayılır ve dağılır bundan dolayı havadan düşürme tekniği uygulanmamaktadır. Havadan düşürülen numunelerin birim hacim ağırlığı, kum parçacıklarına verilen enerji ile doğru bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Yoğun numuneler, kumun bir yükseklikten yavaşça dökülmesi ile oluşturulurken, gevşek numuneler, kumun hızlı bir şekilde model kabına dökülmesiyle oluşturulmaktadır. Doygunluk için ise en basit teknik, boşluk sıvısını bir su tankından bir taban drenaj tabakasından kuru modele sokmaktır. Boşluk sıvısı verilmeden önce kum numunesinden havanın boşaltılmasıyla daha yüksek doyma dereceleri elde edilebilmektedir [17].

İnce taneli zeminler için numune, gerekli toplam birim hacim ağırlığını elde etmek için zemin harcı yoğrularak tabakalar halinde ve her tabakaya aynı enerji ile uygulanmaktadır. Aksi halde zemin içerisinde birim hacim ağırlık değişimi olabilmektedir. Ayrıca bu zeminlerde de-iyonize su, numune içindeki kimyasal etkileri ve bakteri üremesini en aza indirmek için boşluk sıvısı olarak genellikle kullanılmaktadır. Bunun yanında model harcının havasını gidermek ve pürüzsüz bir harç oluşturmak için harç vakum altında karıştırılabilmektedir.

Silt ve kil zemin geoteknik santrifüjde konsolide edilebilmektedir. Ancak zemin kütlesi içerisinde kil kütlesi boyunca tercih edilen drenaj yollarında oluşabilen yüksek boşluk basıncı oluşumu önlenmelidir. Aşırı boşluk basınçlarının dağılmasını sağlamak için öncelikle yeterli drenaj alanı ve geoteknik santrifüjün istenen deney ivmesine kademeli olarak hızlandırılmasıyla yüksek boşluk basınçlarından kaçınmakla sağlanmaktadır.

Silt ve kil numuneleri daha çok model kabı olabilen bir ödometre içerisinde oluşturulmaktadır. Mikserde yoğrulan zeminin santrifüj uçuşunun pahalı olmasından dolayı, zemin üzerine ön konsolidasyon basıncı uygulanmaktadır. Konsolidasyon cihazından dikey oturma ölçülerek ve numuneden atılan boşluk sıvısı miktarı ölçülerek ön konsolidasyon kolayca izlenmektedir. Bu konsolidasyon tekniği normalde tek tip bir konsolidasyon basıncı oluşturmak için kullanılmaktadır. Prototip zemininin ortası için gerekli olan konsolidasyon basıncı, numunenin yüzeyine uygulanmakta ve konsolidasyon sıvısının drene olması sağlanmaktadır. Uygulanan konsolidasyon basıncı için gerekli

konsolidasyon basıncını uygulayan geçirimsiz piston veya geçirimli bir piston kullanılmaktadır. Piston kaldırıldığında zaman kaybetmeden ön konsolidasyon basıncını koruyacak zemin yerleştirilip ve deneye başlanması gerekmektedir [26].

3.6. Sıvı Kontrolü

Geoteknik santrifüj model deneylerinde sıvı kontrolü, doğru drenaj ve etkili gerilme koşullarının korunması için oldukça gereklidir. Ayrıca su en yaygın deney sıvısı olarak kullanılmasına rağmen kaba taneli zeminlerde uygun viskoziteyi amaçlamak için farklı sıvılarda kullanılabilir. Kullanılan sıvı ne olursa olsun geoteknik santrifüj hızlandıkça serbest sıvı (zemin yüzeyindeki sıvı) akmaya çalışmaktadır. Sıvının numune yüzeyi boyunca bu hareketi, numunede aşınmaya veya aşırı deformasyonlara neden olabilmektedir. Bu etkiler tüm zemin yüzeyini suya daldırarak veya hız değişimleri sırasında yüzeydeki sıvı miktarını sınırlayarak azaltılabilmektedir. Ayrıca zemin yüzeyi suya batmazsa, aşırı buharlaşma zemin yüzeyinin kurummasına neden olabilmektedir. Bu buharlaşma, zeminin davranışını önemli ölçüde etkilemeden yüzey buharlaşmasını en aza indirecek olan sıvı parafin gibi koruyucu bir kaplama ile kaplanarak kontrol edilebilmektedir. Aksi takdirde buharlaşma ve ardından kılcallıktan dolayı yüzeye yakın bölgelerde negatif basınç ile zemin iskeletindeki efektif gerilmenin artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca numune içindeki sıvı seviyesi izlenmeli ve kontrol edilmelidir. Numuneden buharlaşma ya da kutudan sızması nedeniyle sıvı kaybı olabilmektedir.

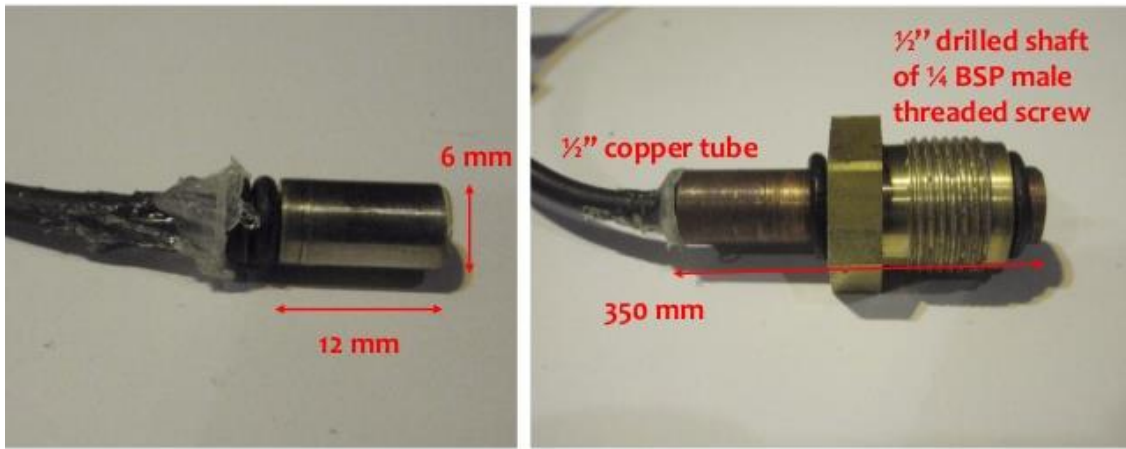
Sıvı seviyesi, dikey piyezometreler kullanılarak kontrol edilebilmektedir. Bunlar deney kutusunun dışındadır ve zemin numunesi içindeki drenaj katmanlarına boru döşemesi ile bağlanmaktadır. Geoteknik santrifüj ivmesi arttıkça boşluk basıncından dolayı bu borularda basınç yüksekliği artmaktadır. Deney türüne göre sıvı sabit bir taşma sistemi ile dışarı çıkabilir veya sıvı seviyesinin sabit kalması gereken durumlarda su seviyesini koruyan dozaj pompası kullanılabilir [26].

3.7. Modelleme Aletleri

Geoteknik santrifüj modelleme birçok farklı alet ile kontrol edilebilmekte, veri elde edilmekte ve gerçekleştirilmektedir ancak bu aletler sadece transdüserlerden ibaret değildir. Aynı zamanda görsel teknikler de mevcuttur. Modelleme ve veri alma aletlerinde önemli olan nokta kullanışlı olması ve modelin davranışını bozmamasıdır.

Transdüserler genellikle geoteknik santrifüj modeli içerisinde bulunur ve zemin ile temas halindedir. Bu yüzden hem kendi ağırlıklarını hem de üzerinde bulunan zemini taşıyabilecek kadar sağlam ve zeminin davranışını etkilemeyecek kadar küçük olmalıdır. Zeminin içerisine yerleştirilen transdüserler 10 mm civarında bir kenar uzunluğuna sahip olmalıdır. Ayrıca bu transdüserler deney sırasında sürekli veri almaya uygun olmalıdır. Transdüserlerin yönlendirilmesine ve esnekliğine dikkat edilmeli, aksi durumlarda bu aletler modelde ankraj veya toprakarme rolü oynayabilmektedir. Ayrıca bu aletlerin yerleştirildiği yerler potansiyel bir drenaj yolu görevi de görebilmektedir ve ayrıca suyun bulunduğu modellerde transdüserler aşırı su basıncına da dayanıklı olmalıdır.

Boşluk basıncı transdüserleri (PPT) ölçüm sırasında sıvı basıncıyla bir bağlantısı olmaması için gözenekli yapıdadır. Genellikle ticari olarak mevcut olan ‘Druck PDCR81’ transdüserler deneylerde kullanılmaktadır. Ayrıca bu transdüserlerden daha küçük ve büyük olanları vardır yalnız diğerleri zemin içerisinde bulunmaya elverişli değildir. Druck PDCR81 bir diferansiyel basınç transdüseridir [17].



Şekil 3.8. Boşluk basıncı transdüseri PDCR81, (Druck).

Bir de toplam gerilme transdüserleri vardır ancak bunlar boşluk basınçlarına göre zemindeki gerilmeleri daha iyi belirtmelidir. Ayrıca zeminin sınır durumlarındaki gerilmeleri doğru yansıtması için zemine benzer rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Ayrıca zemin içerisine geoteknik santrifüj ivmesini takip edebilmek ve özellikle dinamik deney modelleri için zemine ivme ölçerler de yerleştirilmektedir.

Deplasmanlar ise çoğunlukla kullanılan LVTD ile ölçülebilmektedir. Bunların ölçüm için zemin ile temas halinde olması gerekmektedir. Düşey ölçümlerde bu cihazlar

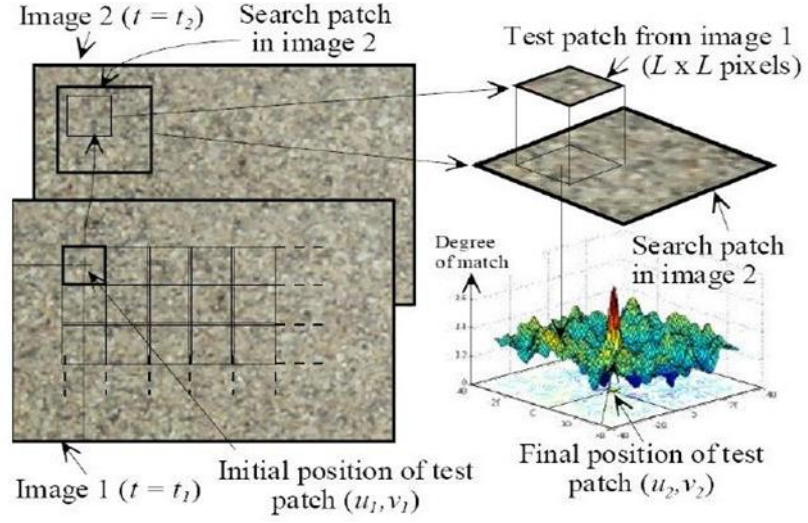
toprakarme şeklinde olabilmektedir. Genellikle metal olan aletsel tasarımlarda gerilimden faydalanarak, birim şekil değiştirmeleri ölçümünde strengeçler kullanılmaktadır. Uzun süreli olmayan deneylerde ucuz ve kullanışlı olmasından strengeçler kullanılmaktadır.

Mekanik ve elektronik ölçüm aletlerinin çoğunluğu modeldeki belirli noktalar hakkında veri sağlar. Bunun yanında görsel ölçümler modelin davranışı hakkında genel bir görünüş sunmaktadır. Burada zemin içerisine işaretleyiciler yerleştirilerek zeminin hareketi incelenebilmektedir. Kum zeminlerde bu işaretleyiciler genellikle renkli ince kum şeritlerdir. Kil zeminde ise işaretleyici olarak kurşun lifler kullanılmaktadır. Geoteknik santrifüj deneyinde ve sonrasında bu işaretleyicilerde oluşan etkiler zemindeki deformasyonları kolaylıkla ortaya çıkarmaktadır. Bu işaretleyicilerin durumları ardı ardına çekilen fotoğraflar ile izlenebilmektedir. Ayrıca modelde Stereo kameralar ile izlenerek zeminin topografisi, derinliği ve gerçekliği arttırılmış bir şekilde gözlemlenmek de mümkündür.

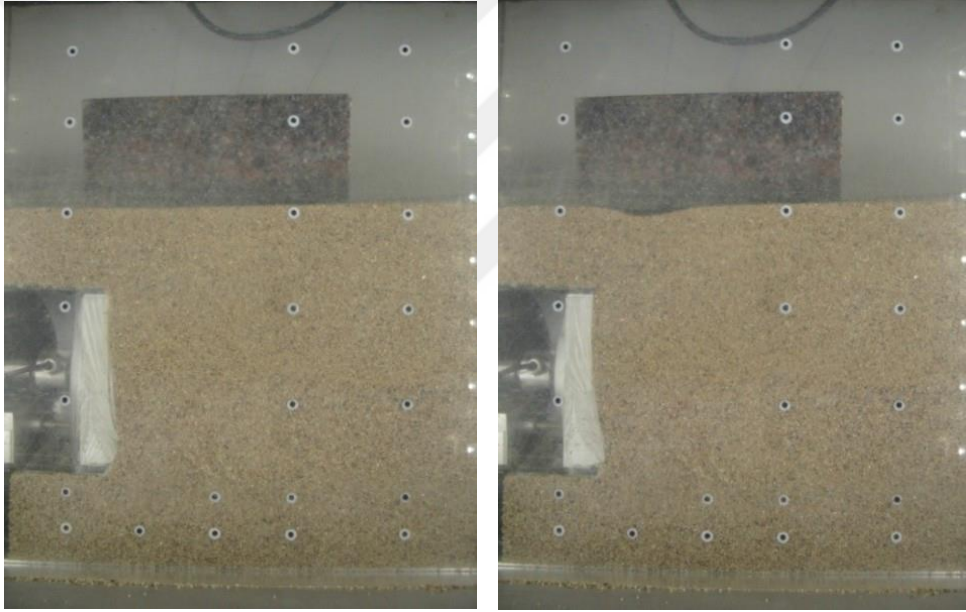
İşaretleyiciler özellikle son zamanlarda en çok kullanılan görüntü analiz teknikleriyle de kullanılmaktadır. Burada alınan görüntüler doğru sonuç için dijital olarak muhafaza edilmekte ve belirli periyotlarda alınan görüntüler bilgisayar yazılımı programlarıyla art arda karşılaştırılarak yapılan analizde zemin hareketi kesin olarak gözlemlenmektedir.

Günümüzde yeni kullanılan PIV diye adlandırılan analiz yöntemi görüntü analiz yöntemlerinden biridir. Bu yöntem tüm incelenen alan için yüksek doğrulukta veri sağlamaktadır. Bu yöntem illaki işaretleyicilerden değil de direk olarak zeminin kendisini referans noktalar olarak görebilmekte ve ona göre analizi gerçekleştirebilmektedir. Burada ilk olarak dijital fotoğraf çekilmekte ardından bu görüntü ağ örgüsü yapılarak küçük parçalara ayrılmakta ve bu referans resim olarak kullanılmaktadır. Kum zeminlerde taneciklerdeki renk farkından dolayı PIV için kolay veri sağlamaktadır ancak kil zeminlerde gerekli durumlarda işaretleyiciler kullanmakta fayda vardır [6].

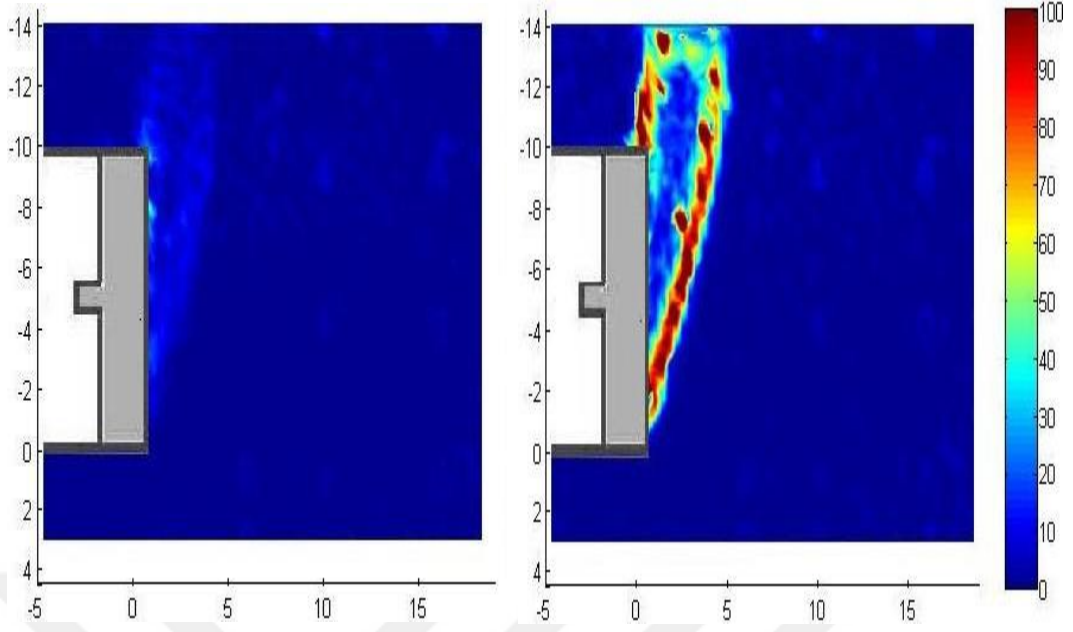
Ayrıca genellikle deneyin bütününi gözlemlemek için model kutusuna CCD kameralar yerleştirilmektedir. Ayrıca CCD kameraların modelin tamamını görmesini engelleyen durumlarda ide yansıtıcı aynalar kullanılabilir. Bu kameralar deney boyunca zeminin topografyası hakkında oldukça fazla veri sağlamaktadır.



Şekil 3.11. PIV görüntü analiz prensipleri (White vd. , 2002)



Şekil 3.12. Sol; deney başlangıcında çekilen tünel modeli referans görüntüsü, sağda ise deplasmanların 5 mm aştığı deney sırasında alınan görüntü (Tuğçe ERTAN, 2012)



Şekil 3.13. Tünel modelinde 5mm kadar ki ve 5 mm den fazla oluşan deplasman durumlarında GeoPIV8 ile kayma gerilmesi analizi (Tuğçe ERTAN, 2012)

3.8. Veri Edinme

Elektronik ve dijital teknoloji geoteknik santrifüj modellerine uzaktan erişimi ve bütünüyle veri toplamayı sağlamıştır. Veriler genellikle analog alınmakta ve depolanmaktadır. Bu analog sinyaller ısı, basınç, ses vb. dünyadaki verilerdir. Ancak bizim bu verileri analizde işleyen cihazlar dijitaldir. Bu yüzden başlıca veri kaydetme sisteminde analog-dijital transdüserler mevcuttur. Burada veriler sensor ve transdüserler ile analog elektrik gerilimine çevrilmektedir. ADC ise Analog gelen veriyi dijital sistemimizde kullanabileceğimiz eş dijital veriye dönüştürmektedir. Dönüştürülen bu veriler bilgisayar uygulamaları ile analiz edilmekte veya depolanmaktadır [17].

4. ZEMİNİN SIKIŞMASI

Malzemeler yük etkidiğinde deformasyona uğradıkları bilinmektedir ve zeminde ise deformasyon sürecinin ani oturma ve zamana bağlı oturma şeklinde gerçekleşmektedir. Bu deformasyon süreci gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile incelenmektedir. Elastik malzemeler için eğriler anında yüke bağlı olarak gelişir ve yük kaldırılınca malzeme ilk halini alır ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri lineer veya nonlinear olabilmektedir. Ayrıca bazı malzemeler yüke hemen tepki vermezler ve ne kadar hızlı yüklenirlerse o kadar direnç gösterirler bunlara visko-elastik malzeme denmektedir. Ek olarak plastik malzemelerde ise elastik malzemelerin yanı sıra yük boşaltıldığında kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir.

Zeminler ise açıklanan malzemelerden daha karmaşık yapıdadır. Zeminler nonkonservatif malzemeler olduğundan zeminlerin bir hafızaya sahip olduğu kabul edilmektedir. Yani zemin yüklenip boşaltıldığında, gerilme geçmişinin bir kısmını saklamaktadır. Bu olaydan dolayı zeminin tekrar yüklenmesinde ve davranışında rol oynamaktadır.

Zeminlerin nonlinear gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, yükleme sonrası zamana bağlı tepkisi (viskozite), elastik davranış, plastik davranış, gerilme geçmişinden kaynaklı hafızası zemin davranışını en karmaşık mühendislik hesaplamaları arasına koymaktadır[23].

4.1. Zeminlerde Oturma

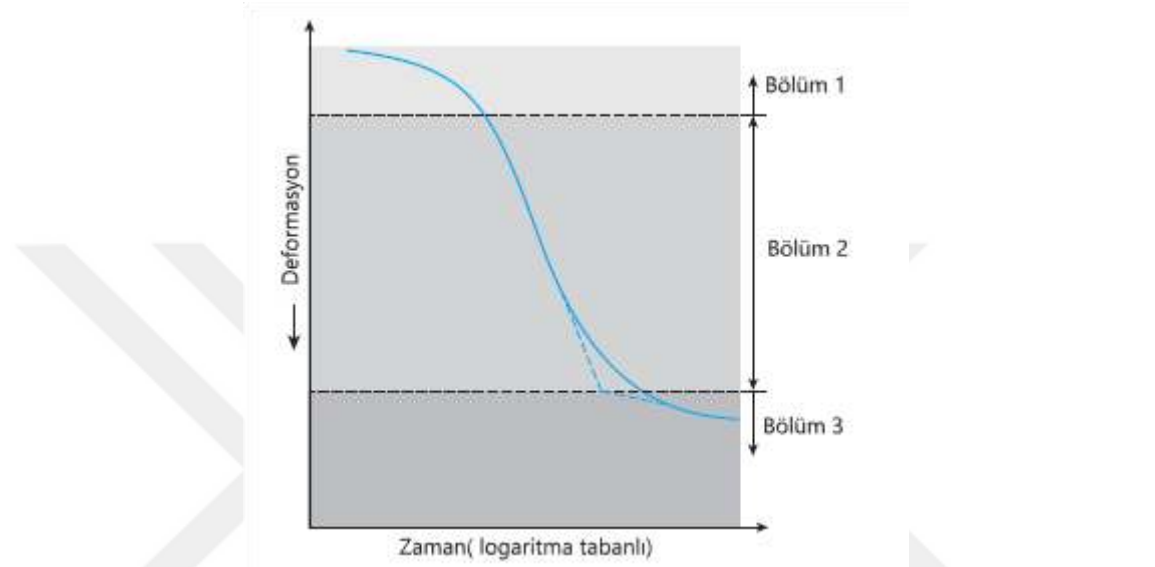
Bir zemin bloğu yüke maruz kaldığında bu yüke bağlı olarak gelişen düşey deformasyon oturma olarak adlandırılır. Zemindeki deformasyon yük artışında oturma, azalışında ise şişme şeklinde gerçekleşebilmektedir. Araştırmacılar özellikle oturmanın nasıl, ne kadar ve ne zaman olacağı araştırırlar çünkü zeminin toplam oturma miktarı ani oturma, konsolidasyon oturması ve sekonder oturmanın birleşiminden oluşmaktadır.

$$S_t = S_i + S_c + S_s \quad (4.1)$$

Ani oturma zeminde yükün uygulandığında hacim değişmeksizin meydana gelen oturmadır. Kaba daneli zeminlerde genellikle yüksek geçirgenliğe sahip oldukları için su ve hava çıkışının hızlı olmasından dolayı ani oturma gerçekleşmektedir.

Konsolidasyon oturması, yüklenen zemin içerisindeki suyun zamanla dışarı çıkması ve zemin danelerinin yeniden yerleşmesi olarak tanımlanır ve ince daneli zeminlerde oluşmaktadır.

Sekonder(ikincil) oturma ise killi zeminlerde boşluk suyu basıncının sabitlendiği konsolidasyon oturması sonrasında meydana gelen, zeminin aşırı yüklenmesinden kaynaklanan oturmadır. Aşırı yük olmadığında genellikle ihmal edilmektedir.[25]



Şekil 4.1. Yükleme sonucu oluşan zaman- oturma grafiği; Bölüm 1: ilk sıkışma, Bölüm 2: konsolidasyon oturması, Bölüm 3: ikincil konsolidasyon, (Braja M. DAS,2014)

4.1.1. İnce daneli zeminlerin sıkışması

Bir zemin bloğu yüklendiğinde zemin danelerinin deformasyonu, zemin boşluklarındaki su ve havanın sıkışması ve bu boşluklardaki su ve havanın sıkışarak dışarı çıkmasından dolayı meydana gelmektedir. Ancak mühendislik hesaplamalarında, zemin danelerinin ve boşluk sıvısının sıkışma miktarı oldukça küçük olduğundan su ve havanın sıkışarak dışarı çıkması zeminin sıkışmasında en önemli etken olarak kalmaktadır. Bu su ve hava çıkışına bağlı olarak zemin daneleri yeniden düzenlenmekte ve sıkışmaktadır.

İri daneli zeminlerde boşluklardaki su için sıkışarak dışarı çıkmak kolay olduğu için oturma ani gelişmekte ancak ince daneli zeminlerde küçük geçirgenlikten dolayı suyun çıkması zamana bağlı gelişmektedir ve bu konsolidasyon olarak adlandırılmaktadır. İri daneli zeminlerin sıkışması ile kohezyonlu zeminlerin konsolidasyonu arasındaki en temel ve tek fark zamana bağlı gelişmesidir.

Konsolidasyon deneyi ile zeminin oturma davranışı belirlenmektedir ancak numunenin örselenmemiş olması önemlidir, ince daneli zeminlere nazaran kaba daneli

zeminlerin oturmaları ise arazi deneylerinden elde edilen verilere göre belirlenmektedir [23].

4.1.2. Konsolidasyon (Ödometre) deneyi

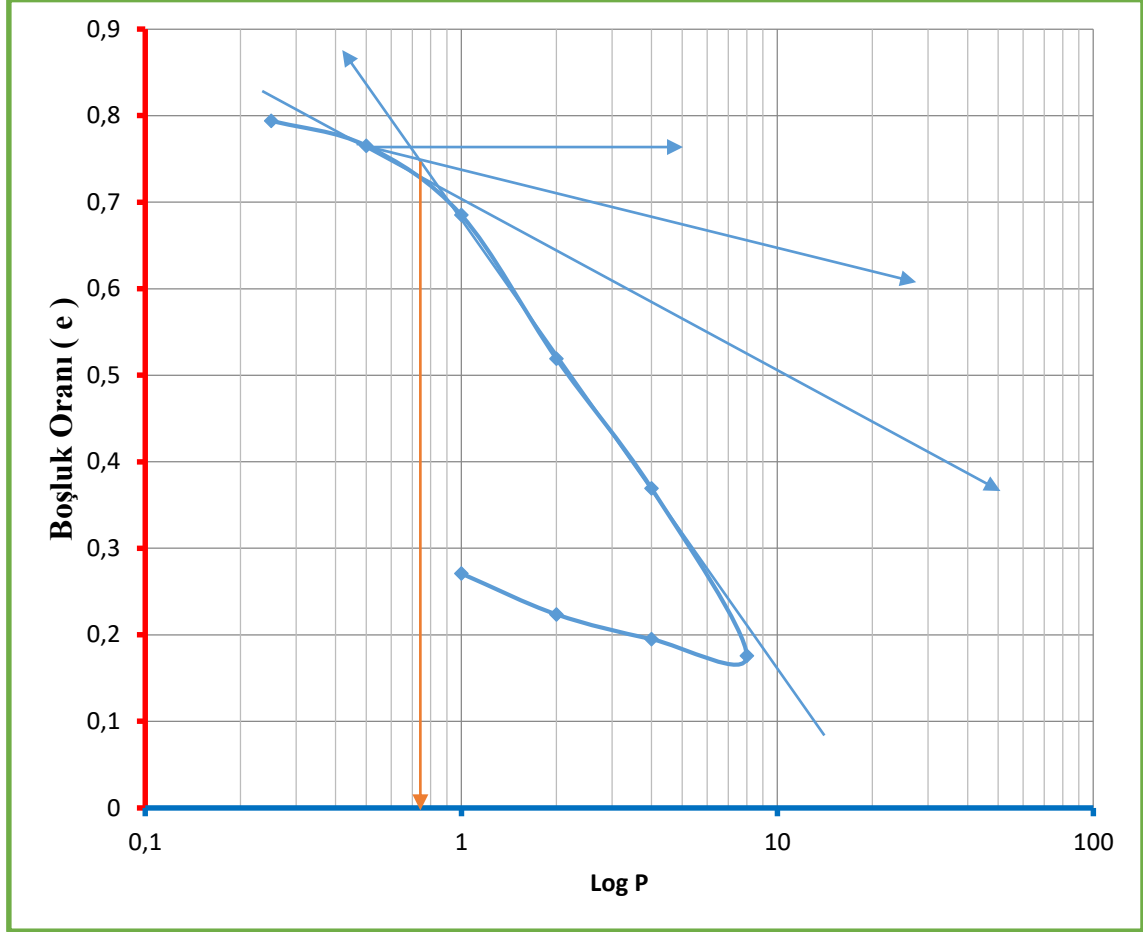
Zemine gelen yük geniş bir zemin tabakasına etkidiğinde sıkışma bir boyutlu olarak düşünülebilmektedir. Laboratuvar da zeminin bir boyutlu sıkışmasını gerçekleştirebilmek için konsolidasyon diğer adıyla ödometre deney aleti kullanılmaktadır. Zemin numunesi konsolidasyon halkasına tam olarak yerleştirilmekte ve fazla kısımlar tıraşlanmaktadır. Konsolidasyon halkaları rijit olduğundan yanıl deplasman gerçekleşmemekte ve tek boyutlu konsolidasyona izin verilmektedir. Zemin numunesinin alt ve üstünde drenaja müsaade eden poroz taşlar mevcuttur. Zeminin oturma parametreleri için yük artışı ve şişme özelliği için yük boşaltımı yapılmaktadır. Her yük artırımı sonrası numunenin konsolidasyon süreci takip edilmekte ve fazla boşluk suyu basınçlarının sıfıra gelmesiyle o yük kademesi sonlanmaktadır. Genellikle yük artırımı önceki seviyenin iki katı şeklinde gerçekleşmektedir. Böylelikle konsolidasyon deneyinde zeminin yük–deformasyon eğrisi takip edilmektedir. Elde edilen basınç-deformasyon verileri, düşey şekil değiştirme yüzdesi-efektif konsolidasyon basıncı eğrisi veya boşluk oranı- efektif konsolidasyon basıncı eğrisi şeklinde gösterilebilmektedir [23].

4.1.3. Ön konsolidasyon basıncı

Zeminler geçmişte aldıkları yüklerden dolayı bir basınç hafızası olduğu kabul edilmekte ve bu hafızasındaki yükten daha fazla bir yük aldığıında zeminde aşırı deformasyonlar oluşmaktadır. Laboratuvar da elde edilen grafiklerde genellikle iki doğrunun bir geçiş eğrisi bölgesiyle birbirine bağlandığı görülmektedir. Bu geçiş eğrisinde maruz kaldığı maksimum basınç ön konsolidasyon basıncı olarak adlandırılmaktadır.

Boşluk oranı- log P olarak çizilen konsolidasyon grafiğinde başlangıçtaki yaklaşık doğruya yeniden sıkışma bölgesi ve eğriden sonraki kısma ise bakir sıkışma bölgesi denmektedir. Burada bakir sıkışma bölgesi zeminin daha önce ön konsolidasyon basıncından daha büyük bir gerilmeye maruz kalmadığını göstermektedir. Ön konsolidasyon basıncı Casagrande Yöntemi ile belirlenmektedir. Önce maksimum eğrilik noktası seçilir ve yatay bir doğru çizilir. Ayrıca bu noktaya bir teğet çizilir ve bu iki

doğrunun açkırtay doğrusu çizilir. Bakır sıkışma eğrisinden de bir doğru çizilir ve bu doğru ile açkı ortayın kesiştiği noktadaki basın ön konsolidasyon basıncıdır [24].



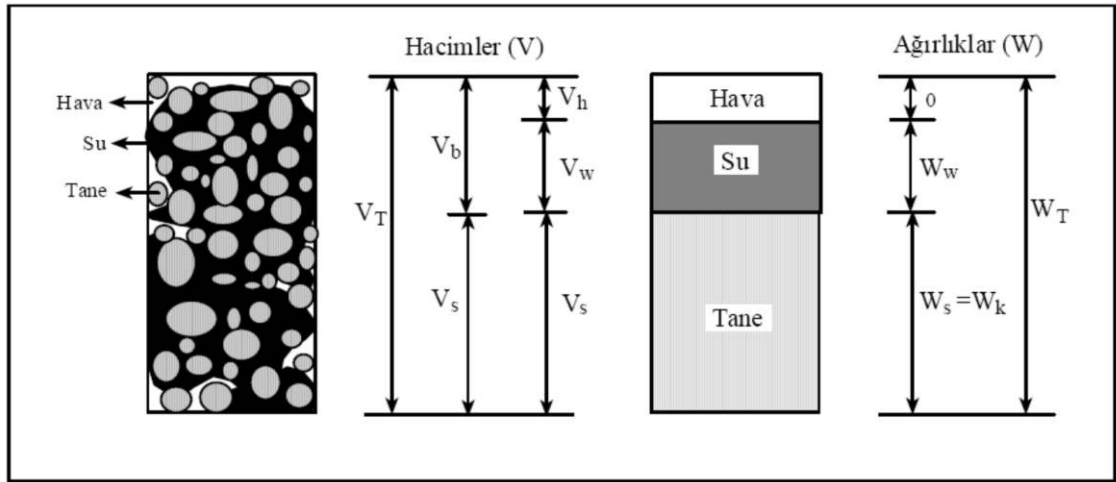
Şekil 4.2. Konsolidasyon deneyinden elde edilen boşluk oranı- logaritmik ölçekli gerilme eğrisi ve Casagrande metodu ile ön konsolidasyon basıncı hesabı

4.1.4. Aşırı konsolidasyon oranı

Zeminler geçmişte ve mevcut bulundukları ortamdaki gerilmeler karşılaştırılarak normal ve aşırı konsolide olarak sınıflandırılmaktadır. Zeminin mevcut efektif gerilmesi ön konsolidasyon basıncından büyük ise normal konsolide, zeminin mevcut efektif gerilmesi ön konsolidasyon basıncından küçük ise aşırı konsolide olarak adlandırılmaktadır. Bu adlandırma aşırı konsolidasyon oranı (AKO) kullanılarak da gösterilmektedir. Aşırı konsolidasyon oranı zeminin ön konsolidasyon basıncının, zeminin mevcut efektif gerilmesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Normal konsolide zeminlerde AKO 1'e eşittir ve 1'den büyük ise aşırı konsolide kabul edilirler. Ayrıca AKO 1'den küçük ise zemin zaten konsolide olmamıştır [23].

4.2. Oturma Hesapları

Bir zemin profilinin faz diyagramında V_s dane hacminin 1'e eşit ve boşluk hacminin de eo olduğu kabulüyle, toplam düşey deformasyon ε_v boy değişiminin toplam boya oranı olarak tanımlandığında oturma boşluk oranından yararlanarak elde edilmektedir.



Şekil 4.3. Zeminin faz diyagramı

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{veya} \quad \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{s}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+eo} \quad (4.2)$$

$$s = \frac{\Delta e}{1+eo} H_0 = \varepsilon_v H_0 \quad (4.3)$$

böylelikle konsolidasyon deneyi ile belirlenebilen boşluk oranı ve efektif basınç ile oturma hesaplanabilmektedir. Konsolidasyon sonucundan elde edilen boşluk oranı– efektif gerilme grafiğinde sıkışma eğrisinin eğimi sıkışma katsayısı olarak adlandırılır ve a_v olarak gösterilmektedir ve eğriler doğrusal olmadığı için her basınç kademesinde sıkışma katsayısının hesaplanması gerekmektedir.

$$a_v = \frac{-de}{d\sigma_v} \quad (4.4)$$

e_1 ve e_2 boşluk oranlarında ve sırasıyla σ_1 ve σ_2 efektif basınçlarındaki zeminin sıkışma katsayısı aşağıdaki gibidir.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v} = \frac{e_1 - e_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \quad (4.5)$$

ayrıca konsolidasyon grafiği konsolidasyon yüzdesi–şekil değiştirme cinsinden gösterildiğinde sıkışma eğrisinin eğimi hacimsel sıkışma katsayısı olan m_v ile tanımlanır. Burada ε_v düşey şekil değiştirme ve D ise sıkışma modülüdür.

$$m_v = \frac{d\varepsilon_v}{d\sigma_v} = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma_v} = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{1}{D} \quad (4.6)$$

Deney sonuç grafiği ayrıyeten boşluk oranı – logaritmik tabanlı efektif basınç grafiğinde bakir sıkışma eğrisinin eğimi C_c sıkışma indisini vermektedir.

$$C_c = \frac{-de}{d \log \sigma_v} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{e_2}{e_1}} \quad (4.7)$$

Normal konsolide killerde oturma yukarıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_c = c_c \frac{H_0}{1+e_0} \log \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = c_c \frac{H_0}{1+e_0} (\log \sigma_{vf} - \log \sigma_{v0}) \quad (4.8)$$

Ayrıca a_v ve m_v kullanılarak da elde edilmektedir.

$$m_v = \frac{a_v}{1+e} \text{ ve } S_c = m_v \Delta\sigma_v H \quad (4.9)$$

Zeminin aşırı konsolide durumu normal konsolide killerden daha çok gözlemlenmektedir. Eğer zemin aşırı konsolide ise yüklenen yükün ön konsolidasyon basıncını aşıp aşmadığına bakılmaktadır. Eğer ön konsolidasyon basıncı aşılmıyorsa eşitlik (4.8) deki sıkışma indisi c_c yerine yeniden sıkışma indisi c_r yazılarak hesaplanabilmektedir. Bu iki indisin hesaplanması aynıdır tek fark yeniden sıkışma indisi yeniden sıkışma eğrisinin eğimine eşittir. Burada c_r genellikle c_c den oldukça az olduğundan bu durumda zemin normal konsolide olduğu durumdakinden daha az oturmaktadır.

$$S_c = c_r \frac{H_0}{1+e_0} \log \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = c_r \frac{H_0}{1+e_0} (\log \sigma_{vf} - \log \sigma_{v0}) \quad (4.10)$$

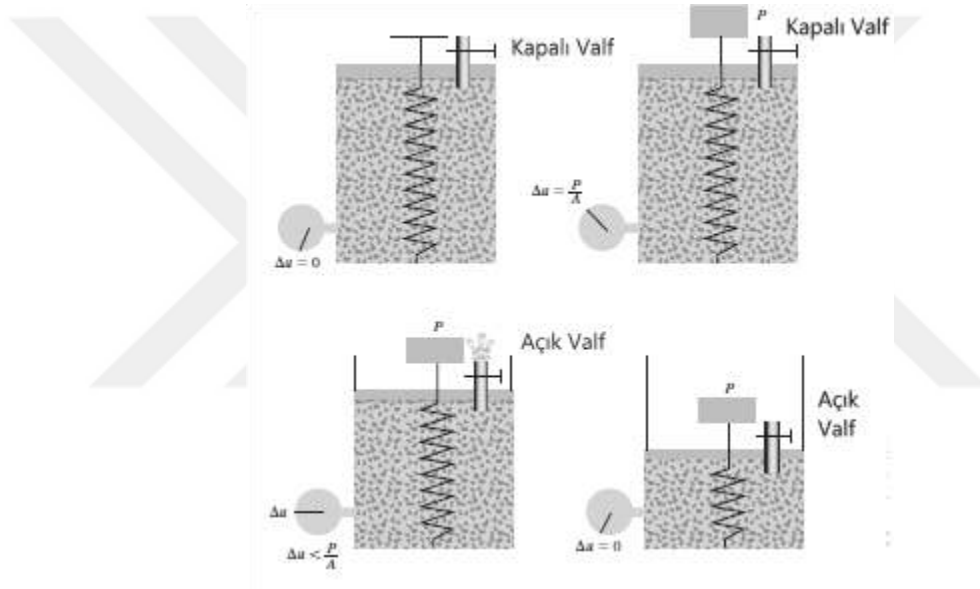
Eğer zemine gelen mühendislik yükü ön konsolidasyon basıncını aşarsa oturma hesabı için yeniden sıkışma ve bakir sıkışma eğrisinden de yararlanmak gerekmektedir.

$$S_c = c_r \frac{H_0}{1+e_0} (p - \log \sigma_{v0}) + c_c \frac{H_0}{1+e_0} (\log \sigma_{vf} - \log \sigma_{vp}) \quad (4.11)$$

Normalde formülün sağındaki boşluk oranı ön konsolidasyon basıncındaki boşluk oranı kullanılabilir ancak çok büyük farklar oluşmadığından başlangıç boşluk oranı kullanılmaktadır [23].

4.2.1. Oturma zaman bağıntısı

İnce daneli zeminlerde oluşan oturmanın boşluk suyu hızına bağlı olarak zamanla oturmasından dolayı bir de oturma ve zaman arasındaki ilişkisinde hesaplanması gerekmektedir. Konsolidasyon hesabı yapılırken zemin bir yay modeli olarak kabul edilmektedir. Model yüklenmeden önce yay ile denge halindedir. Burada ek bir yük su ile dolu bir silindir modele yüklenmekte ve silindir içerisindeki yay sıkıştırılmaktadır. Buradaki su zemin suyunu, valf V zeminin geçirgenliğini temsil ederken yay ise zemini temsil etmektedir. Ayrıca modele bağlı olan basınçölçer ise su basıncını göstermektedir [23].



Şekil 4.4. Konsolidasyon için yay modeli ve sırasıyla yükleme görseli (Braja M. DAS,2014)

Zemin yüklendiğinde su basıncı artmakta ve su ortamdan uzaklaşmaya başlamaktadır, zemin sıkışmaya başlamakta ve efektif basınç artmaktadır. En sonunda fazla boşluk suyu basıncı sıfırlanmakta ve boşluk suyu basıncı ilk boşluk suyu basıncına varıncaya kadar konsolidasyon sürmektedir. Aynı şekilde yay modelinde de piston ile yüklendiğinde boşluk basıncı artmakta ve valften su çıkışıyla su basıncı da yavaş yavaş azalmakta ve yaydaki gerilmede artmaktadır [23].

Terzaghi bir boyutlu konsolidasyon denklemini tanımlamıştır. Burada kil zeminin tamamen homojen ve doymuş olduğu, drenajın zeminin hem alt hem de üstünde olduğu, su akışı için Darcy kanununun geçerli olduğu, zemin danelerinin ve suyun sıkışmadığı,

sıkışma ve su akımının tek boyutlu olduğu, sıkışma katsayısı a_v ve Darcy permeabilite katsayısı k konsolidasyon boyunca sabit olduğu kabul edilmektedir.

$$c_v = \frac{k}{\gamma \omega g} \frac{1+e_o}{a_v} \quad (4.12)$$

Burada c_v konsolidasyon katsayısıdır ve birimi m^2/s ' dir. Terzaghi ve Fröhlich tarafından matematiksel çözüm Fourier serilerine dönüştürülmüş geliştirilmiştir.

$$U = (\sigma_2 - \sigma_1) \sum_{n=0}^{\infty} f_1(Z) f_2(T) \quad (4.13)$$

Buradaki Z parametresi z/H oranıdır ve boyutsuzdur. T ise zaman faktörü olarak adlandırılır ve bu da boyutsuzdur. Ayrıca konsolidasyon oranı ile zaman faktörü arasında bir tablo bağıntısı da tanımlıdır.

$$T = c_v \frac{t}{H_{dr}^2} \quad (4.14)$$

Tablo 4.1. Konsolidasyon yüzdesi ve zaman faktörü arasındaki bağıntı

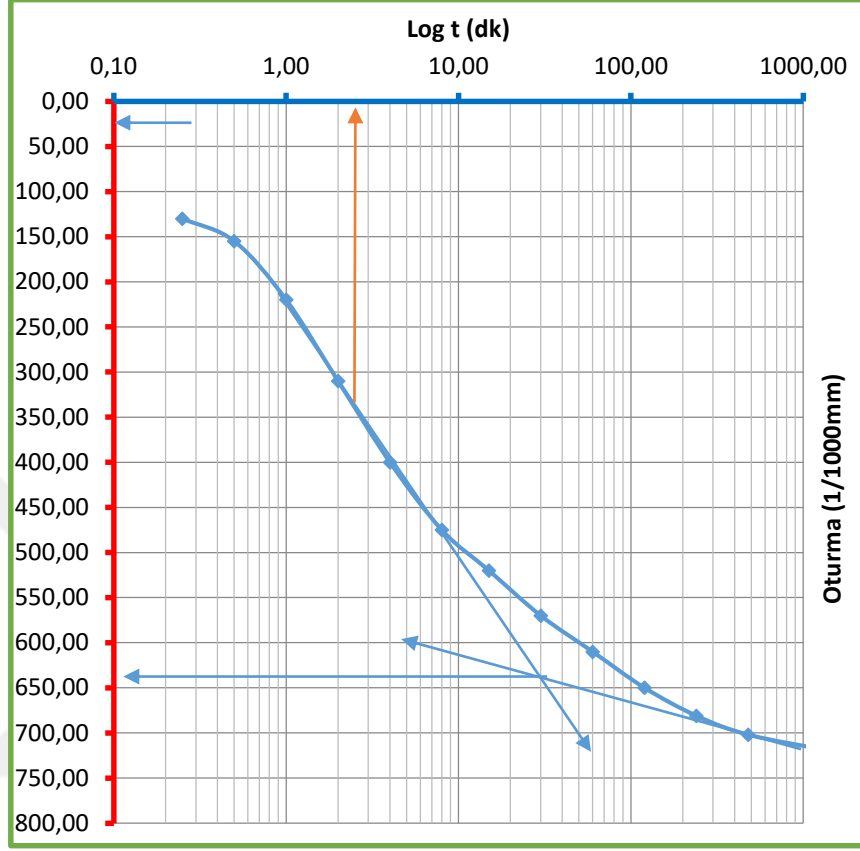
U	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
T	0,008	0,031	0,071	0,126	0,197	0,287	0,403	0,567	0,848	∞

Zeminin konsolidasyon sürecindeki en önemli etkenlerden biri olan konsolidasyon katsayısı c_v deformasyonun zamana bağlı değişiminden elde edilmektedir. Konsolidasyon katsayısı Casagrande'nin logaritma- zaman ve Taylor'un karekök- zaman metotları ile hesaplanmaktadır. Bu metotlar uygun eğri oluşturma teknikleri ve laboratuvar verileriyle konsolidasyon katsayısını elde edilmesini sağlamaktadır [24] .

4.2.7.1. Casagrande metodu

Laboratuvarda her yük kademesi için oturma ve logaritma tabanlı süreden elde edilen eğriden %50 oturma süresini elde edildikten sonra c_v konsolidasyon katsayısını elde etmek için uygulanan yöntemdir. Bu yöntemde eğrinin teğetlerinin kesişimi bize o gerilme aralığı için yaklaşık %100 oturmayı vermektedir. Bu eğrinin %60 a kadar kısmı parabol ($y^2 = ax$ eğrisi) olduğundan oturmanın başlangıç okuması, $1/4$ oranını sağlayan iki zaman aralığı seçilir ve bu zaman aralığındaki deformasyon farkı ilk deformasyondan çıkartılarak düzeltilmiş başlangıç oturma elde edilmektedir. Bu iki oturmanın ortalaması alındığında bize %50 oturma miktarını, bu oturma ile de eğriden %50 için geçen zaman

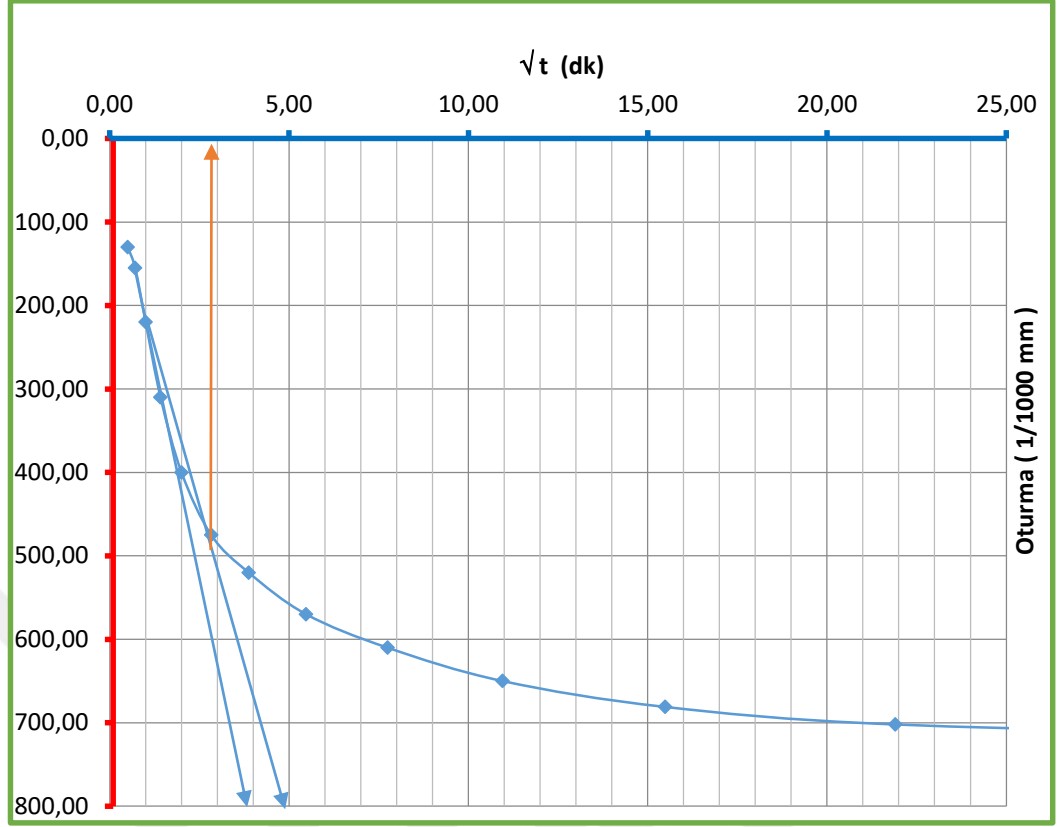
elde edilmektedir. Bu elde edilen zaman ile drenaj mesafesi ve bu oturma yüzdesi için zaman faktörü bilindiğinden konsolidasyon katsayısı elde edilebilmektedir [23].



Şekil 4.5. Logaritma zaman metodu hesaplama görseli

4.2.7.2. Taylor metodu

Laboratuvarında her yük kademesi için oturma ve karekök zaman eğrisinden %90 oturmaya karşılık gelen zaman ile c_v konsolidasyon katsayısını elde etmek için uygulanan yöntemdir. Bu eğrinin başlangıcı parabol olması gerekirken doğru şeklindedir. Doğru olan kısmı uzatıldığında eksen kestiği yer düzeltilmiş başlangıç noktasını vermektedir. Bu eğri oturmanın %60 değerine kadar doğru olarak gözükmemektedir ve bu eğrinin apsisi 1.15 kat büyütülüp tekrar doğru çizildiğinde eğriyi kesen noktadan oturmanın %90 olduğu süre elde edilmektedir. Bu elde edilen zaman ile drenaj mesafesi ve bu oturma yüzdesi için zaman faktörü bilindiğinden konsolidasyon katsayısı elde edilebilmektedir [23].



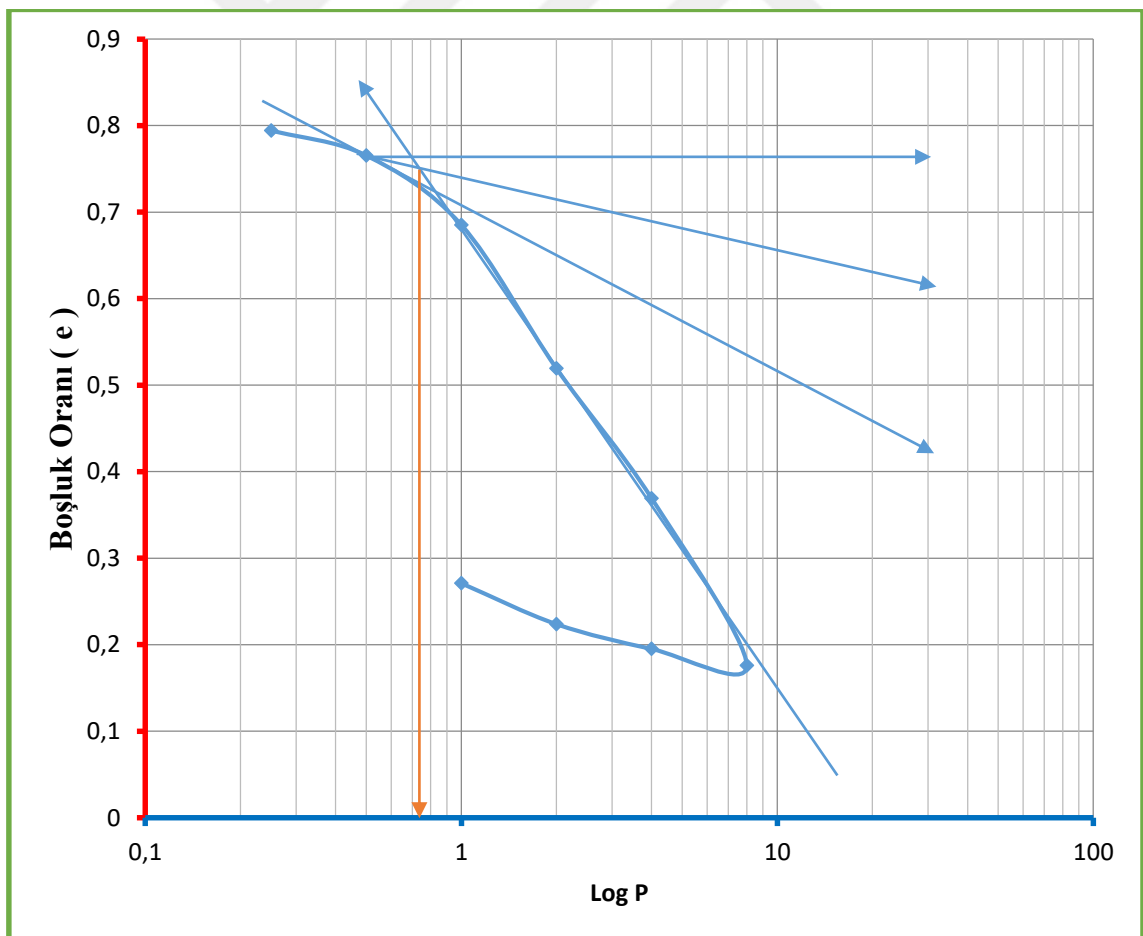
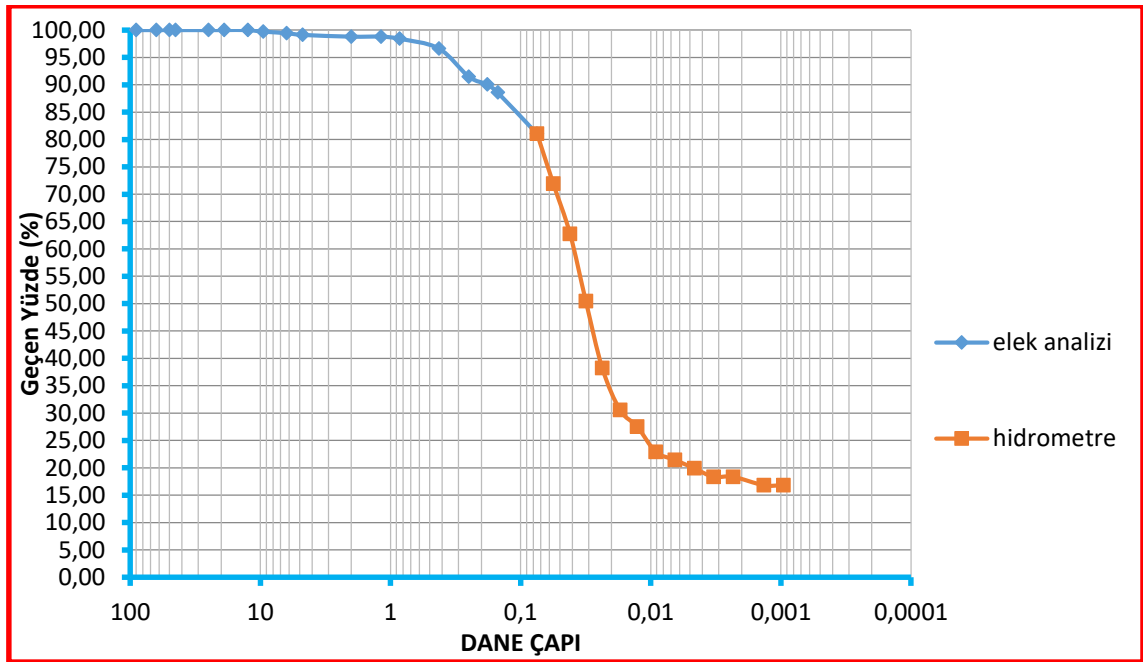
Şekil 4.6. Karekök zaman metodu hesap görseli

4.3. Deneysel Çalışma

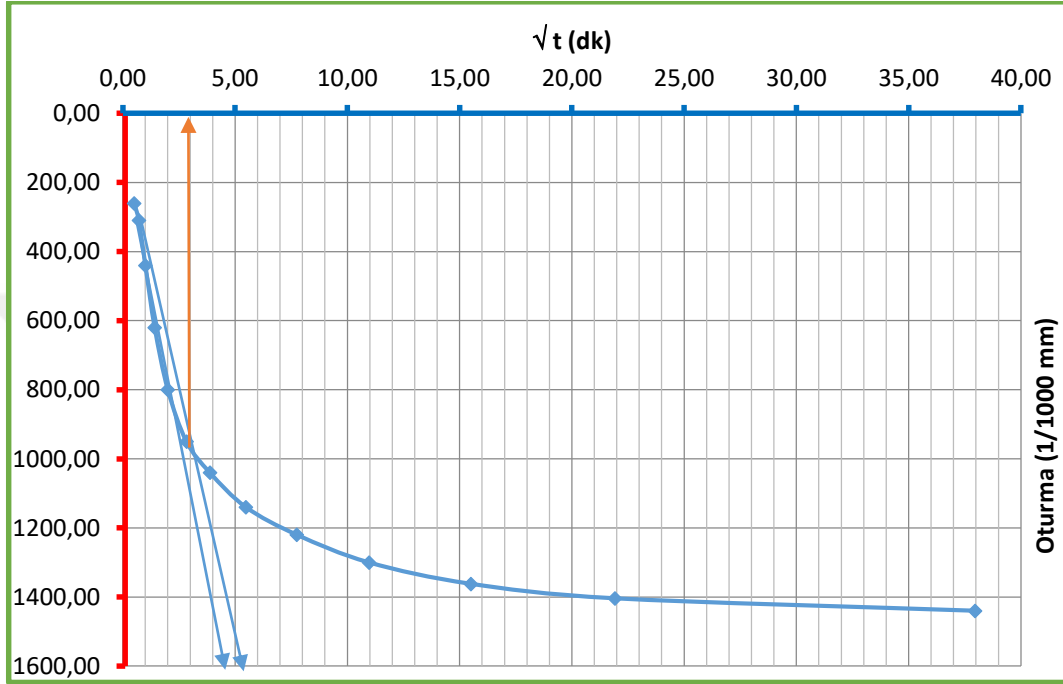
Endeks özellikleri bilinen zeminin öncelikle ödometre deneyleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Özellikle zeminin büyük oturmalar gerçekleştirmesi için likit limit değerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıda zemin endeks özelliklerine ve Ödometre deney sonuçları ve yapılan hesaplamalara yer verilmiştir.

Tablo 4.2. Beşevler zemini endeks özellikleri

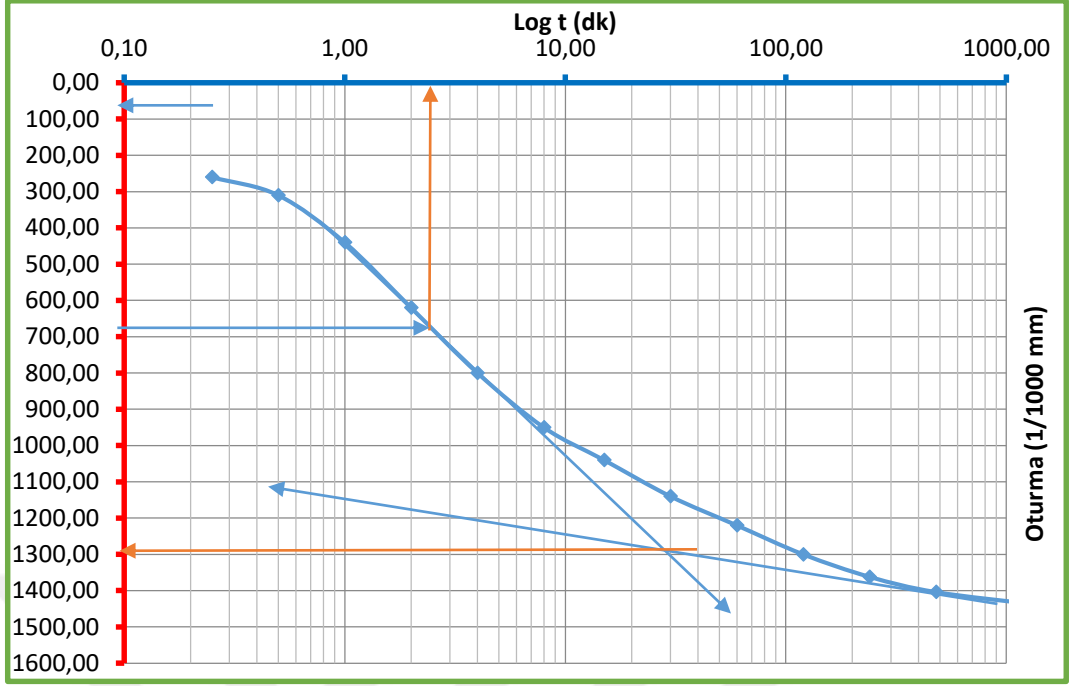
Zemin Sınıfı	CL	
Doğal Su muhtevası (w)	16.35	(%)
Özgül ağırlık (Gs)	2.56	-
Optimum su muhtevası (w _{op})	20.12	(%)
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ _{kmax})	1.60	t/m ³
LL	37	(%)
PL	24	(%)
İDO	81	(%)



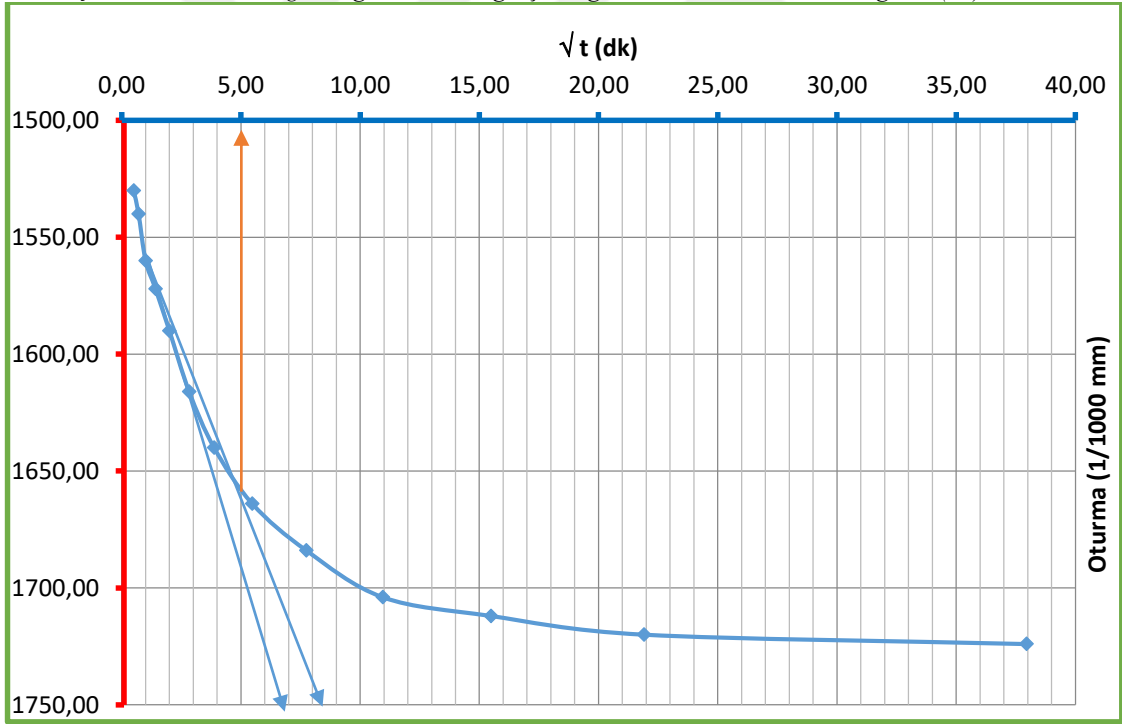
Zemine ait ön konsolidasyon basıncı ise $0,75 \text{ kg/cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca aşağıda Beşevler zeminine ait $0-2 \text{ kg/cm}^2$ gerilme aralığındaki karekök– zaman ve logaritma– zaman yöntemlerine göre laboratuvar oturma süreleri de hesaplanmıştır.



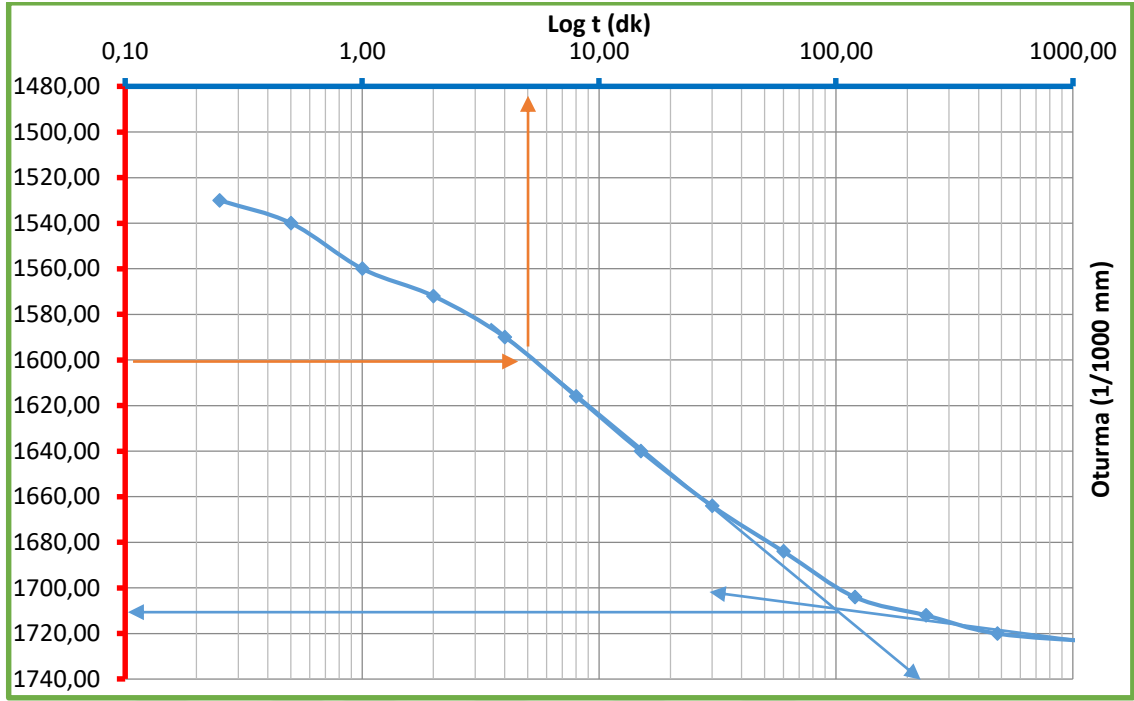
Şekil 4.9. $0-0,25 \text{ kg/cm}^2$ gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre $t(90)$ süresi



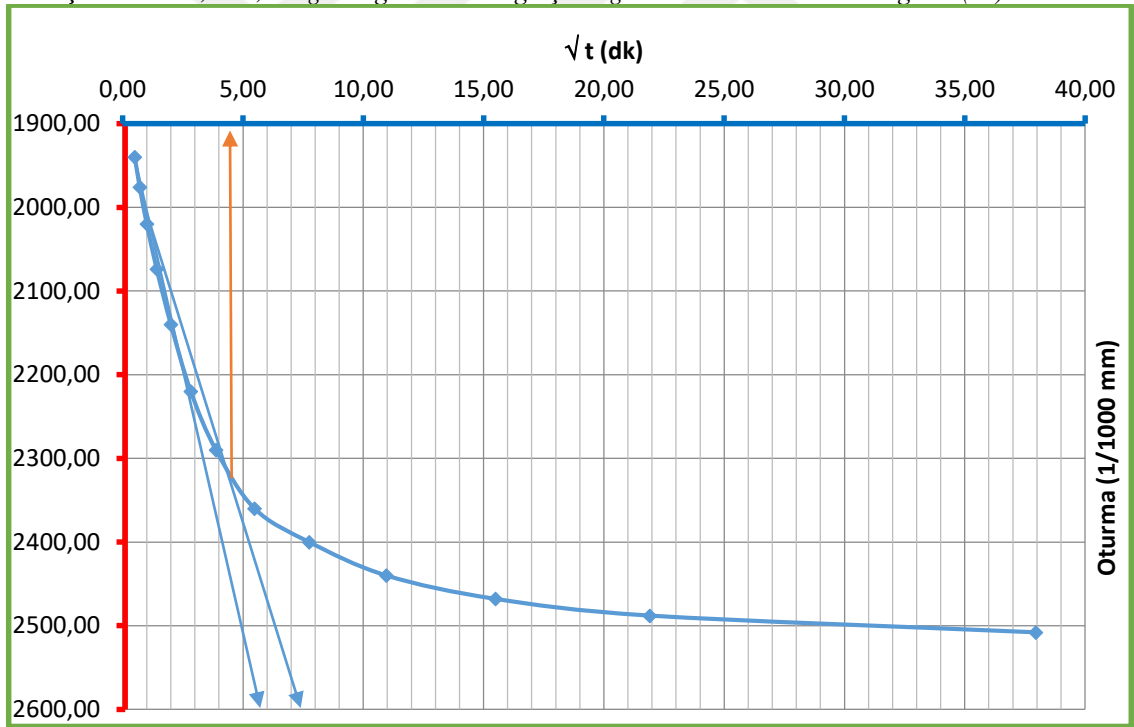
Şekil 4.10. 0-0,25 kg/cm² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre $t(50)$ süresi



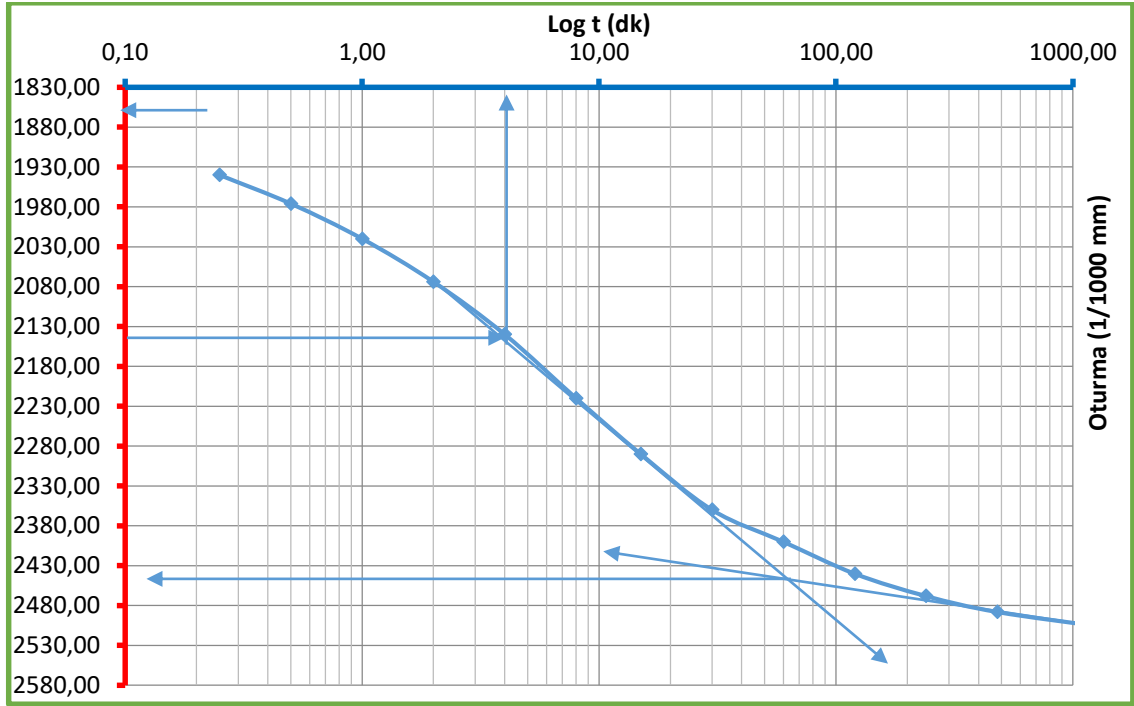
Şekil 4.11. 0,25-0,50 kg/cm² gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre $t(90)$ süresi



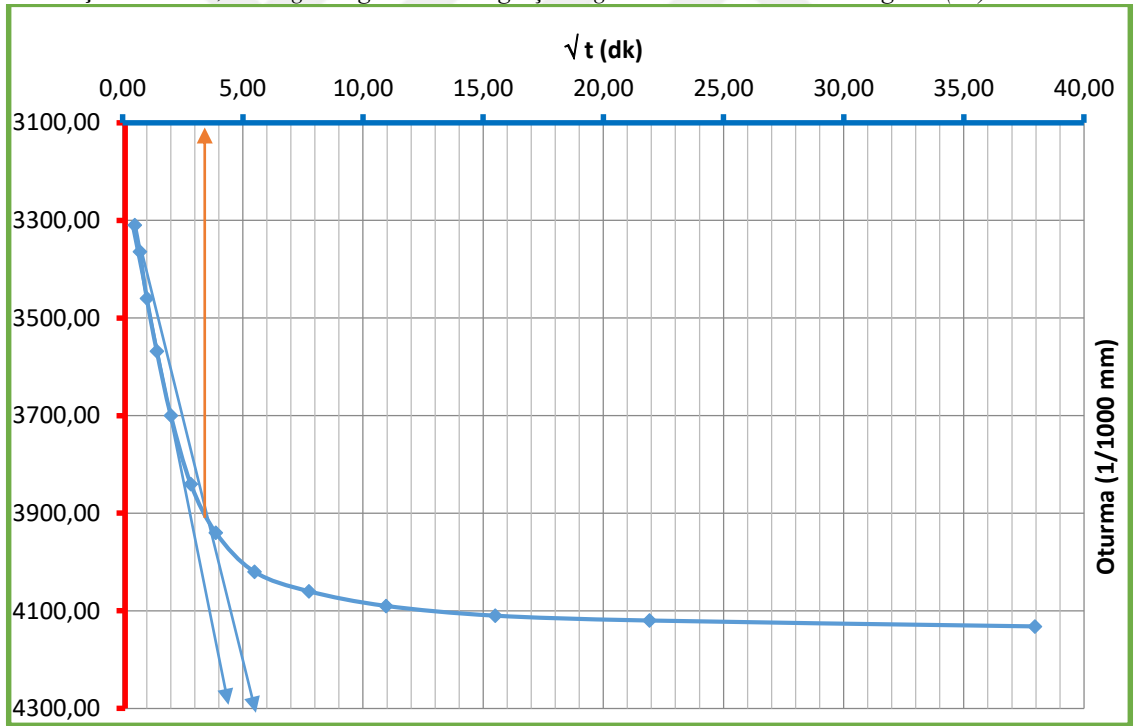
Şekil 4.12. 0,25-0,50 kg/cm² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre t(50) süresi



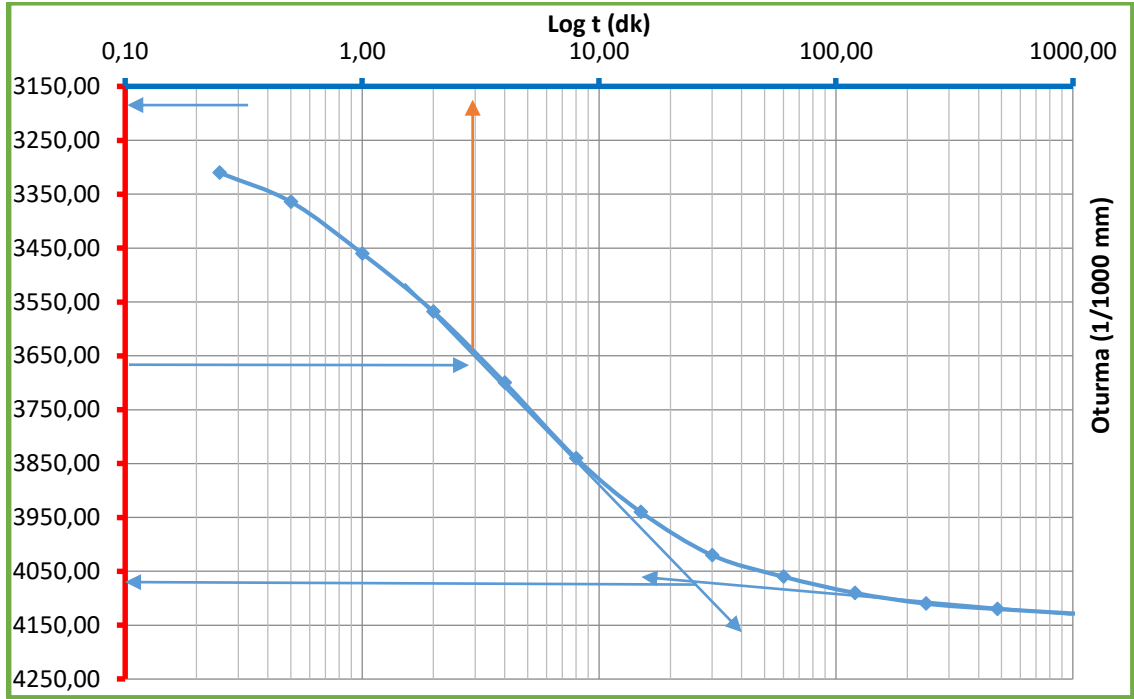
Şekil 4.13. 0,50-1 kg/cm² gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre t(90) süresi



Şekil 4.14. 0,50-1 kg/cm² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre t(50) süresi



Şekil 4.15. 1-2 kg/cm² gerilme aralığı için karekök zaman metoduna göre t(90) süresi



Şekil 4.16. 1-2 kg/cm² gerilme aralığı için logaritma- zaman metoduna göre $t(50)$ süresi

Tablo 4.3. Gerilme aralıkları için laboratuvar oturma süreleri ve konsolidasyon katsayısı

Gerilme aralığı (kg/cm ²)	t_{50} (sn)	t_{90} (sn)	h_{dr} (cm)	Cv_{t50} (cm ² /sn)	Cv_{t90} (cm ² /sn)
0 – 0.25	150	540	0.912	$1.09E^{-3}$	$1.31E^{-3}$
0.25 – 0.5	300	1500	0.862	$4.88E^{-4}$	$4.20E^{-4}$
0.5-1	270	1215	0.828	$5.0E^{-4}$	$4.78E^{-4}$
1 - 2	180	735	0.769	$6.47E^{-4}$	$6.82E^{-4}$

5. TEZ ÇALIŞMASI

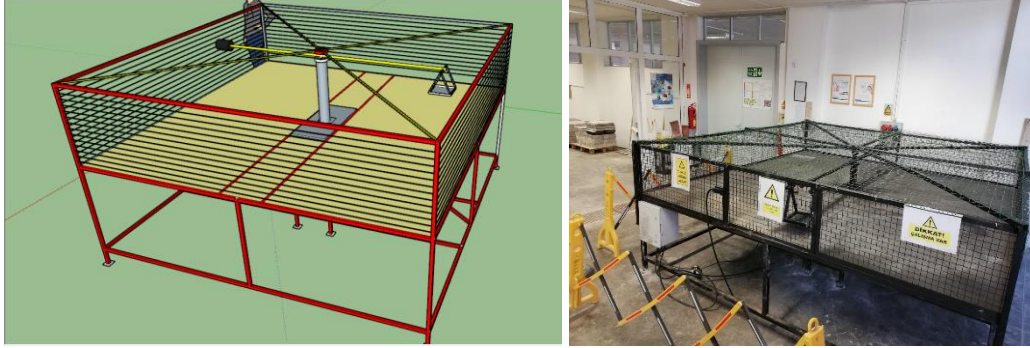
Bu teze konu olan çalışma ile laboratuvar ölçeğinde olan geoteknik santrifüj deney aleti tasarımı yapılmış ve zeminlerin parametreleri ve davranışı incelenmiştir. Geoteknik santrifüj deney aleti 1.50 m çapında kiriş santrifüj olarak tasarlanmıştır. Santrifüj kol uzunluğu yaklaşık 1.5 m ve numune boyu 30 cm alınarak tasarlanmıştır. Çünkü geoteknik santrifüj tasarımında model yüksekliği santrifüj yarıçapının %20'sini geçtiğinde model ile prototip arasında gerilme sapmaları (%3) oluşmaktadır. Bundan dolayı yaklaşık olarak 30 cm model yüksekliği deney aletimizde üst sınır olarak belirlenmiştir. Deney aleti 1,5 HP motora sahip ve 0 ile 40 g arasında dairesel ivmeye ulaşmaktadır. Geoteknik santrifüj merkezinde sabit bir kolu olan ve bir ucunda model kutusunun yerleştirildiği bir platforma sahip ve karşısında ise dengeleyici ağırlıklar mevcuttur. Tasarım yapılırken model kutusu tek kişi tarafından taşınabilen boyutta tasarlanmıştır. Deney sırasında video kamera yardımıyla numune davranışı incelenebilmektedir. Ayrıca deformasyonlar mekanik saatli komparatörler ile ölçülebilmektedir. Deney aleti konsolidasyon teorisine göre yapılan ödometre deneyleri ve geoteknik santrifüj konsolidasyon deneyleri ile deney sisteminin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

5.1. Tasarlanan Geoteknik Santrifüj Tanıtımı

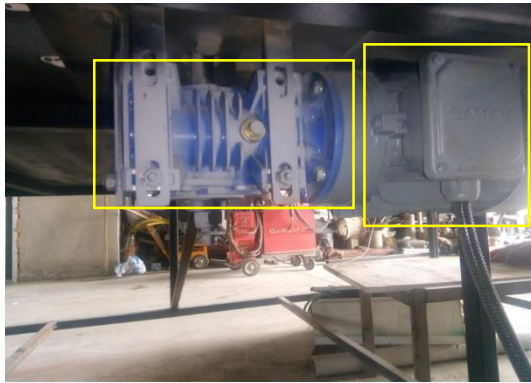
Sistemde bulunan geoteknik santrifüj sehpa (Şekil 5.1) üzerinde bir adet redüktörlü AC elektrik motoru (Şekil 5.2) bulunmakta ve bu motor sürücüye (Şekil 5.3) bağlanmaktadır. Sürücü yardımıyla sistem saat yönünde ve tersine istenilen hızda ve devirde hareket etmektedir. Aynı zamanda sehpa üzerinde emniyet kilidi (Şekil 5.4) bulunmaktadır ve motorun çalışması için sehpa çerçevesinin kilidi kapatılması gerekmektedir. Sehpanın ortasında motora gövde mili (Şekil 5.5) ile bağlı geoteknik santrifüj kolu (Şekil 5.6) bulunmaktadır. Geoteknik santrifüj kolu ise bir tarafında model kutusunun (Şekil 5.7) yerleştirileceği platform (Şekil 5.8) ve karşısında da dengeleyici ağırlık kolu (Şekil 5.9) bulunmaktadır. Geoteknik santrifüj sepetinde ise bir komparatör saati ve karşısında da kamera haznesi ve kamera (Şekil 5.10) bulunmaktadır. Geoteknik santrifüj sehpası iş güvenliği kurallarına uygun olarak çelik hasır ile sarılmıştır. Ayrıca geoteknik santrifüj gövde mili üstten çelik profillerle ve sehpanın alt kısmı da çapraz profillerle güçlendirilmiştir. Ek olarak geoteknik santrifüj sehpası 8 ayağından 2'şer adet ankraj ile yere sabitlenmiş ve ayrıca santrifüj sehpası da yatayda salınım yapmaması için yan duvarlara 2 ankraj ile sabitlenmiştir.

Geoteknik Santrifüj Parçaları ve Teknik Özellikler:

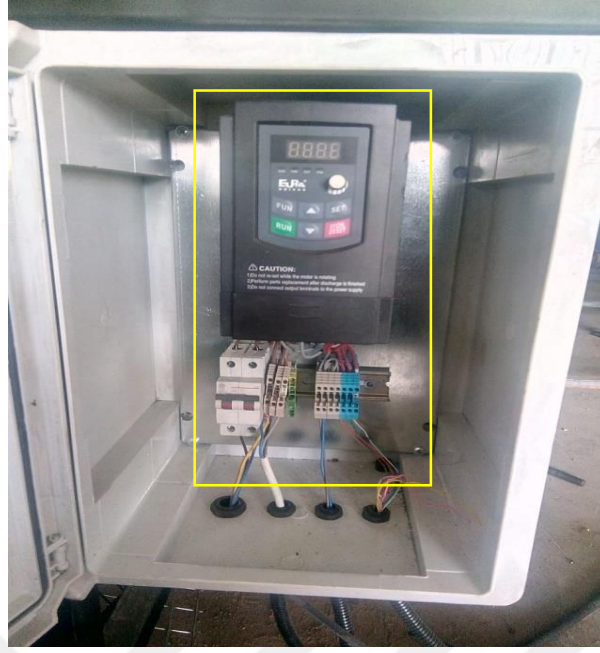
1. Santrifüj Sehpaası (3.10 m x 3.10 m)
2. Elektrik Motoru
 - AC Motor (Özellikler: 1.1 kW)
 - Redüktör (1/12.75)
 - AC Motor Sürücüsü (Özellikler: Delta VFDL 0.4 kW 230 V)
3. Emniyet kilidi
4. Motor gövde mili
5. Santrifüj kolu (1.50 m)
6. Model kutusu (20cm x 20cm x15cm)
7. Santrifüj Platformu (20cm x 20cm x30cm)
8. Dengeleyici kol ve ağırlıklar
 - Boy: 120 cm
 - Ağırlıklar: 15 kg
9. Komparatör saati, kamera haznesi ve kamera



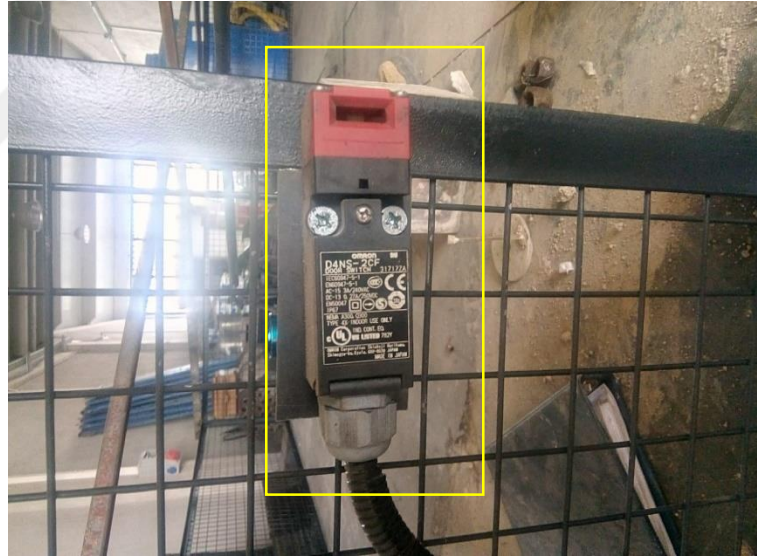
Şekil 5.1. Geoteknik Santrifüj Deney Aleti sehpaası tasarımı ve imalatı



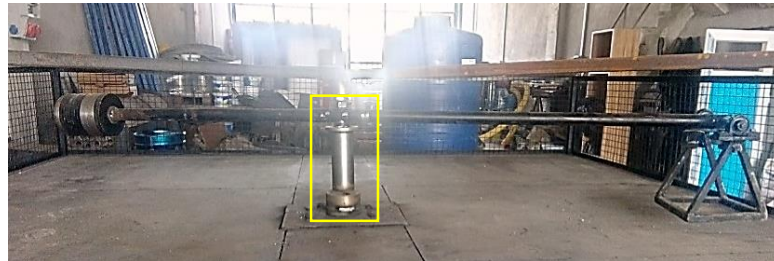
Şekil 5.2. Redüktörlü AC elektrik motoru ; Sol Redüktör, Sağ Motor



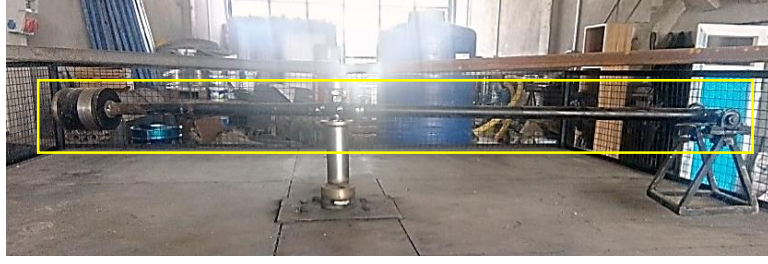
Şekil 5.3. Elektrikli AC motor sürücüsü



Şekil 5.4. Geoteknik santrifüj sehpaı emniyet kilidi



Şekil 5.5. Geoteknik santrifüj gövde mili



Şekil 5.6. *Geoteknik santrifüj kolu*



Şekil 5.7. *Geoteknik santrifüj model kutusu*



Şekil 5.8. *Geoteknik santrifüj platformu*



Şekil 5.9. *Geoteknik santrifüj dengeleyici ağırlıklar*



Şekil 5.10. Mekanik komparatör ve kamera haznesi

Geoteknik santrifüj ivmesi yerçekimi ivmesinin katları şeklinde hesap adımlarına başlanılmış ve etkili santrifüj yarıçapı baz alınarak santrifüj hızı, frekansı ve motor Rpm yani dakikada döndüğü devir (bkz. Tablo 5.1.) hesaplanmıştır.

Tablo 5.1. Üretilen geoteknik santrifüj motor devri ve geoteknik santrifüj ivmesi tablosu (Re=1.467 m)

G (m²/sn)	A (m²/sn)	V (m/sn)	F (1/sn)	RPM (dk/devir)	Motor RPM
5	49,033	8,48	0,92	55,21	703,98
10	98,06	11,99	1,30	78,08	995,58
15	147,09	14,69	1,59	95,63	1219,33
20	196,13	16,96	1,84	110,42	1407,96
25	245,17	18,96	2,06	123,46	1574,15
30	294,20	20,77	2,25	135,24	1724,39
35	343,23	22,43	2,43	146,08	1862,55
40	392,27	23,98	2,60	156,16	1991,16

5 g ölçek için santrifüj Rpm hesap adımları;

1. $A = 5 G = 5 \times 9.81 = 49.033 \text{ m}^2/\text{sn}$

2. $A = V^2/R_e, 49.033 = V^2/1.467, V = 8.48 \text{ m/sn}$

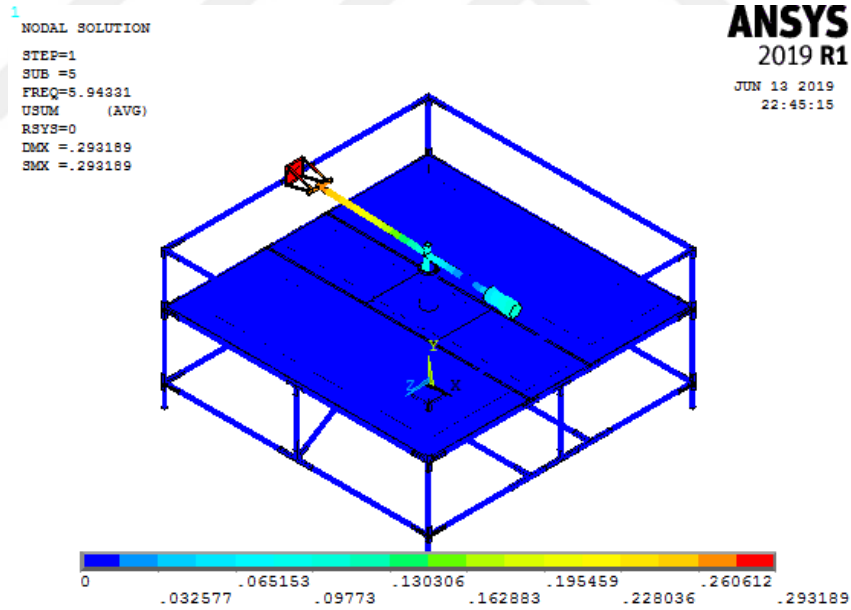
3. $V = 2\pi r f, 8.48 = 2 \times \pi \times 1.467, f = 0.92 \text{ 1/sn}$

4. $\text{RPM}_{\text{santrifüj}} = f \times 60 = 0.92 \times 60 = 55.21 \text{ dk/devir}$

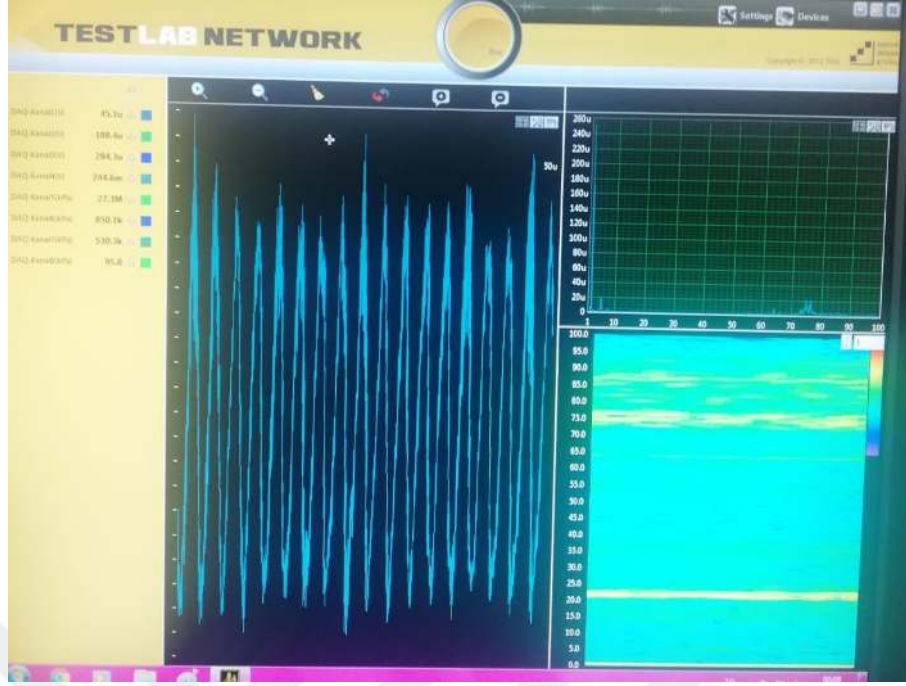
5. $\text{RPM}_{\text{motor}} = 12.75 \times \text{RPM}_{\text{santrifüj}} = 703.98 \text{ dk/devir},$

şeklinde tüm ivmeler için hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen ANSYS Mechanical APDL programı analiz sonuçlarında motor kapasitesi olarak 100 g' e kadar ivmelenmektedir ancak aletin mekanik kapasitesi 40 g ye kadar ivmelendirilebilmekte ve platform taşıma yükü ise 35 kg olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla geoteknik santrifüj sistemimiz 1.4 g-ton taşıma kapasitesine sahiptir. Analiz sonuçlarında deney sistemimizin maksimum 0.29 cm deplasman yapacağına da varılmıştır (bkz. Şekil 5.11.).



Şekil 5.1. Geoteknik Santrifüj Ansys Mechanical APDL Nodal analizi



Şekil 5.1. Geoteknik santrifüj ivmesi 10 g de ivme ölçerden alınan frekans ve Rpm analizi

İvmeölçer ile yapılan ivme ölçümünde santrifüj üniform bir frekans aralığında olduğu görülmektedir ve hesapladığımız Rpm için ölçülen Rpm arasında tam bit uyum gözlemlenmiştir. Bu ölçümlerde santrifüj ivmemizi kanıtlar niteliktedir.

5.2. Geoteknik Santrifüj Konsolidasyon Deneyleri

Beşevler zemini parametrelerine (bkz. Tablo 4.2.) göre zeminin oturma davranışı konsolidasyon teorisine göre incelenmiştir. Geoteknik santrifüj deney aletinin kalibrasyon ve aletin doğruluğu normalde birkaç model düzeneği ve bu deney içerisine yerleştirilmiş boşluk suyu basınç ölçerler, gerilme ölçerler gibi aletler ile incelenmektedir. Ayrıca Modellerin modellenmesi tekniği ile aynı prototipin birbirinin ölçek faktörü olan N katı ile modellenip karşılaştırılması da geoteknik santrifüj deney sisteminin doğrulanmasında kullanılmaktadır. Bu araştırma da aletsel yöntem yerine konsolidasyon davranışı ile geoteknik santrifüj deney aleti ispatlanmıştır. Gerçekleştirilen geoteknik santrifüj konsolidasyon deneyleri geoteknik santrifüjün ivmesini doğrulamak için 10 g, 15 g ve 20 g ivmelendirilmiştir. Konsolidasyon süreci boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeler ve su akış hızına bağlı olduğundan konsolidasyon teorisi ile hesaplanan oturma miktarı ile geoteknik santrifüj oturma miktarının uyumları ile üretilen geoteknik santrifüj deney aletinin ispatı yapılmıştır. Deneyler Tablo 5.1. deney programına göre yapılmıştır.

Tablo 5.2. *Geoteknik Santrifüj Deney Programı ($\omega=0,37$)*

İsim	Numune yüksekliği (cm)	Numune boyu (cm)	eni, Santrifüj ivmesi (g)	Gerilme kademesi (kg/cm ²)	Santrifüj Uçuşu Süresi (dk)
GSK 1	5	5.3/5.3	20	0-0.25	67
GSK 2	5	5.3/5.3	20	0.25-0.50	217
GSK 3	5	5.3/5.3	20	0.50-1	176
GSK 4	5	5.3/5.3	20	1-2	93
GSK 5	5	5.3/5.3	15	0-0.25	64
GSK 6	5	5.3/5.3	15	0.25-0.50	181
GSK 7	5	5.3/5.3	15	0.50-1	166
GSK 8	5	5.3/5.3	15	1-2	100
GSK 9	5	5.3/5.3	10	0-0.25	64
GSK 10	5	5.3/5.3	10	0.25-0.50	180
GSK 11	5	5.3/5.3	10	0.50-1	141
GSK 12	5	5.3/5.3	10	1-2	99
GSK 13	2.5	5.3/5.3	20	0-0.25	15
GSK 14	2.5	5.3/5.3	20	0.25-0.50	38
GSK 15	2.5	5.3/5.3	20	0.50-1	33
GSK 16	2.5	5.3/5.3	20	1-2	24
GSK 17	2.5	5.5/5.3	20	2-4	14

Aşağıda konsolidasyon teorisinde göre yaklaşık 1x1x1 m ebatlarındaki prototip zeminin teorik oturma hesapları ve buna karşılık gelen 5x5x5 cm ebatlarında 20 g santrifüj ivmesi altındaki modelin oturma davranışı grafiklerle karşılaştırılmıştır. Örnek olarak konsolidasyon hesapları için sadece yukarıdaki model için tablo hesabı verilmiştir, geri kalan örnekler için sadece teorik ve santrifüj konsolidasyon grafikleri verilmiştir. Geoteknik santrifüj modellerin konsolidasyon hesapları 0-2 kg/cm² gerilme aralıklarında incelenmiş ve teorik hesaplarda her gerilme aralığı için hesaplanan hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) kullanılmıştır. Bu grafiklerde oturma miktarı prototipin teorik oturma miktarı cinsinden yani santrifüj oturma miktarının ölçek faktörü N katı olarak belirtilmiş, zaman ise santrifüj deneyinde geçen süre cinsinden belirtilmiştir. Hesap adımları:

1. İlk olarak model zemini yükseklikleri ve santrifüj ivmesi çarpılarak prototip zeminin boyutları belirlenmektedir. $H_m = H_p / N$, yani 5.3/5.3/5 cm boyutunda model zemini $N=20$ için 106/106/100 cm prototip zemin bloğunu temsil etmektedir.

2. Ardından bu zemin bloğunun ortasındaki kendi ağırlık gerilmeleri hesaplanır. $\sigma_{v0} = 0.8 \cdot 0.5 = 0.4 \text{ t/m}^2 = 0.04 \text{ kg/cm}^2$ bu gerilme model zemininin yüksüz olarak döndürülmesi ile oluşmaktadır.
3. Zemin bloğunda istediğimiz gerilme kademesi $\sigma_{v1} = 0.25 \text{ kg/cm}^2$ için modele $F_{\text{model}} = m \cdot a$, $\sigma_v = F/A$ için zemine yüklenecek ağırlık 0.37 kg olarak belirlenir. Böylelikle 0.04-0.30 kg/cm^2 gerilme aralığında zeminin oturma davranışı hesabına geçilir.
4. İlk ve son boşluk oranları ödometre deneyinden ($e_1=0.91$ ve $e_2=0.78$) belirlenmiştir. Ardından bu gerilme aralığı için hacimsel sıkışma katsayısı hesaplanır. $M_v = \Delta e / (1+e_o) \cdot \Delta P$ ile hacimsel sıkışma katsayısı 0.27 belirlenmektedir. Prototip için kil bloğu yüksekliği $H_p = 100 \text{ cm}$ olduğundan, prototip oturması olan $S_p = M_v \cdot \Delta P \cdot H$ olduğundan gerekli işlemler yapıldığında $S_p = 7.02 \text{ cm}$ olarak belirlenir. Prototip ile model arasında $N=20$ ölçek olduğundan modelde beklenen oturma $S_m = S_p / 20 = 0.351 \text{ cm}$ olarak belirlenmektedir.
5. Zaten ödometre deneyinden her gerilme aralığı için elde edilen konsolidasyon katsayısı ile Prototip zemini yüksekliği $H_p = 100 \text{ cm}$ ve $H_{dr} = 50 \text{ cm}$ için % 90 oturmaya kadar oturma süreleri hesaplanmaktadır. Ardından Prototip ile model arasında zaman için ölçek $1/N^2$ olduğundan prototip için bulunan süreler 20^2 'ine bölünür ve model zemininin oturma süreleri elde edilir.
6. Laboratuvar da gerçekleştirilen deney başlangıç saatine, hesaplanan süreler eklenerek zeminin oturma davranışı elde edilip teorik $U_{\text{ort}} - T$ grafiği ile aynı grafikte verilmiştir.

Tablo 5.3. Konsolidasyon ve geoteknik santrifüjde kullanılan zemin özellikleri

γ_s	w	e	n	γ_k	γ_n
2.56	0.37	0.94	0.49	1.32	1.807

Tablo 5.4. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeli boyutu ve yükü

Model Zemin Boyutları			Model Yüğü	Santrifüj İvmesi
B (cm)	L (cm)	H (cm)	kg	g (m/sn ²)
5.30	5.30	5.00	0.37	20

Tablo 5.5. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototip büyüklükleri

Zemin Boyutları			Yük Basıncı	
B (cm)	L (cm)	Z (cm)	(kg/cm ²)	(t/m ²)
106.00	106.00	100.00	0.26	2.6

Tablo 5.6. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototipin oturma hesabı

Gerilme aralığı	e ₁	e ₂	Δe	ΔP	1+e	M _v	H _{kil}	S _{prototip}	S _{model}	
(kg/cm ²)				(kg/cm ²)		(cm ² /kg)	(cm)	(cm)	(cm)	
0.04	0.30	0.91	0.78	0.13	0.26	1.91	0.27	100	7.02	0.351

Tablo 5.7. Konsolidasyon deneyi gerilmeleri için boşluk oranı ve hacimsel sıkışma katsayısı büyüklükleri

p	e	M _v
0.00	0.941	-
0.25	0.794	0.315
0.50	0.765	0.065
1.00	0.685	0.092
2.00	0.519	0.103
4.00	0.369	0.051
8.00	0.176	0.037
4.00	0.195	0.004
2.00	0.224	0.011
1.00	0.271	0.037

Tablo 5.8. Prototip 0-0.25kg/cm² için %50 ve %90 oturma zamanı

Oturma (%)	T _v	H _{dr} (cm)	t _{ödo} (sn)	C _v (cm ² /sn)	t _{prototip} (sn)	t _{prototip} (dk)
50	0.197	0.912	150.000	1.09 E-03	450859	7514
90	0.848	0.912	540.000	1.30 E-03	1480263	27179

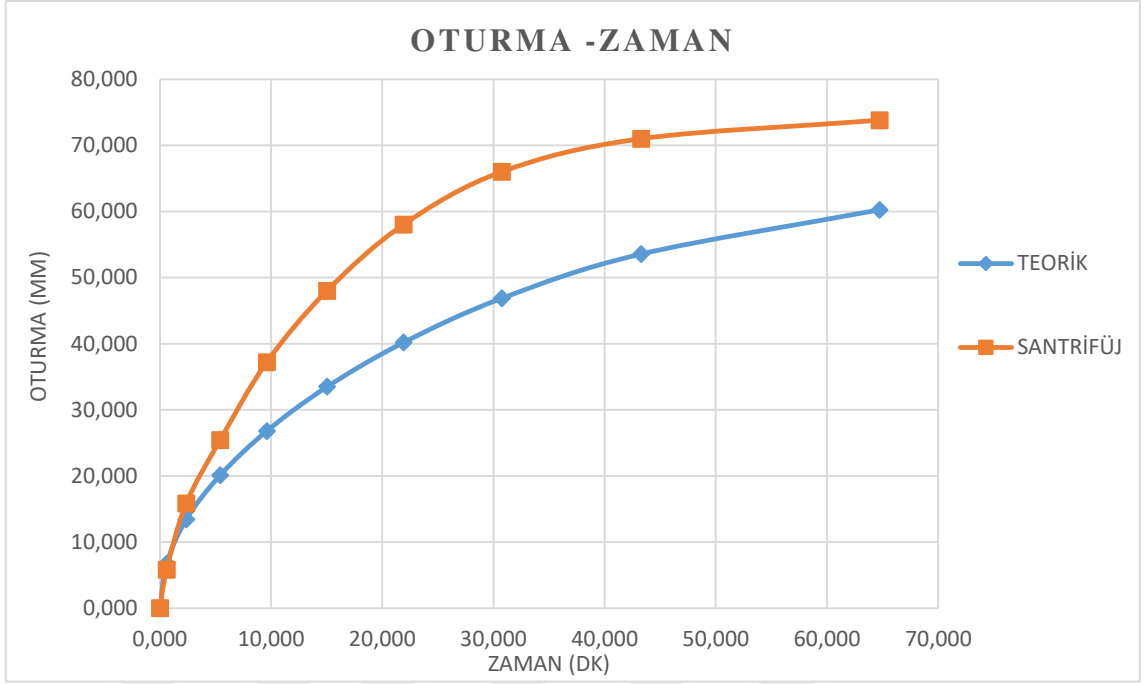
Tablo 5.9. *Prototip teorik oturma yüzdeleri için oturma süreleri*

U (%)	ΔH_{teorik} (cm)	Prototipte				
		T_v	(H_{dr}^2/C_v)	t (sn)	t (dk)	t (saat)
0	0.00	0.00	1831907	0.00	0.00	0.00
10	0.71	0.01	1831907	15388	255	4.07
20	1.41	0.03	1831907	59628	989	16.50
30	2.11	0.07	1831907	136568	2266	37.77
40	2.82	0.13	1831907	242361	4021	67.03
50	3.52	0.20	1831907	378930	6287	104.79
60	4.23	0.29	1831907	552045	9160	152.67
70	4.93	0.40	1831907	775171	12862	214.38
80	5.64	0.57	1831907	1090625	18097	301.63
90	6.34	0.85	1831907	1623985	27066	451.11
100	7.05	∞	1831907	∞	∞	∞

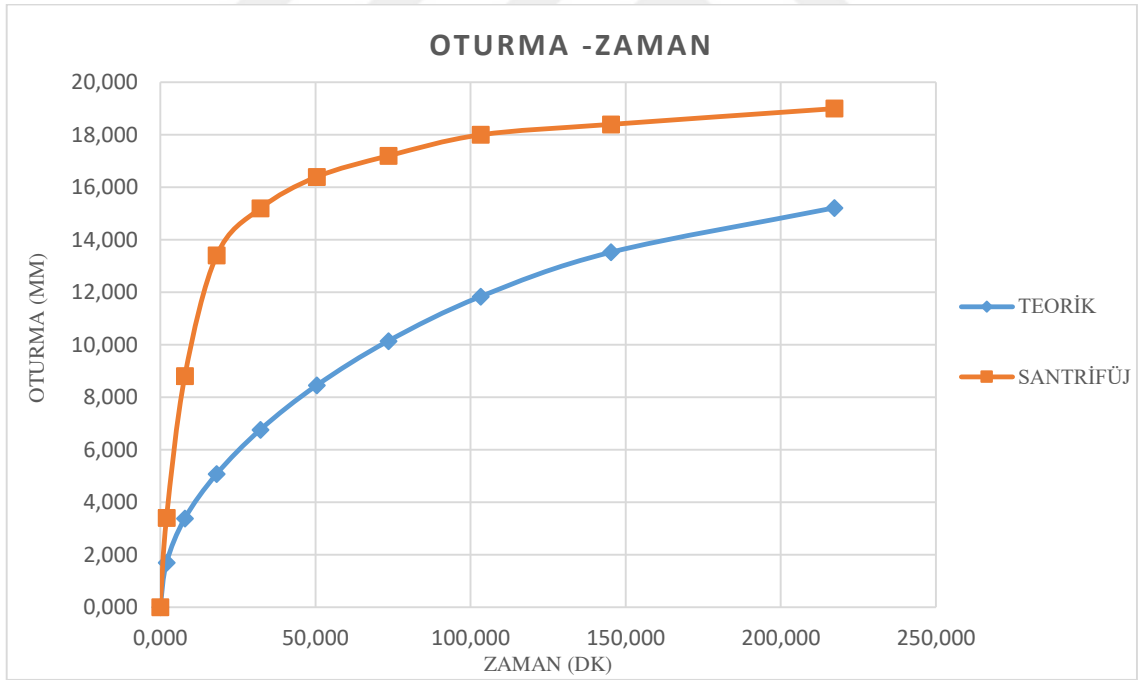
Tablo 5.10. *Geoteknik santrifüj model teorik konsolidasyon sürelerinde gözlemlenen oturma miktarları*

U (%)	H_{teorik} (mm)	$H_{\text{ölçülen}}$ (mm)	$H_{\text{santrifüj}}$ (mm)	t (sn)	t (dk)	t (saat)	Deney saati
0	0	0	0	0	0	0	10:50:50
10	7.05	0.29	5.80	38	0.61	0.01	10:51:27
20	14.10	0.79	15.80	148	2.47	0.04	10:53:12
30	21.14	1.27	25.40	339	5.67	0.09	10:56:15
40	28.18	1.86	37.20	603	10.05	0.17	11:00:27
50	35.23	2.28	45.60	943	15.72	0.262	11:06:33
60	42.28	2.90	58.00	1374	22.90	0.38	11:13:44
70	49.32	3.30	66.00	1929	32.16	0.54	11:22:59
80	56.37	3.55	71.00	2714	45.24	0.75	11:36:05
90	63.42	3.69	73.80	4059	67.66	1.13	11:58:34

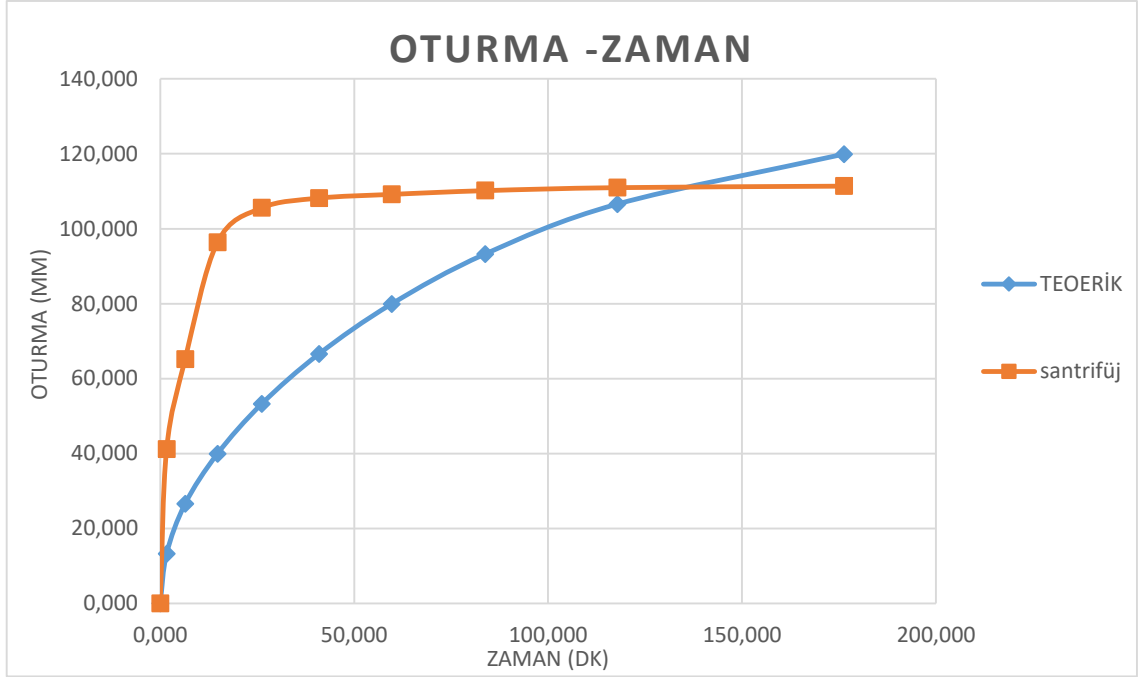
Bu hesaplarda GSK1 (Geoteknik Santrifüj Konsolidasyonu 1) için teorik oturma miktarı, süresi hesaplanmıştır ve bu sürelerde geoteknik santrifüj modelinde gerçekleşen oturmalar kamera yardımıyla izlenip tabloya işlenmiştir. Elde edilen sonuçların oturma eğrileri aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



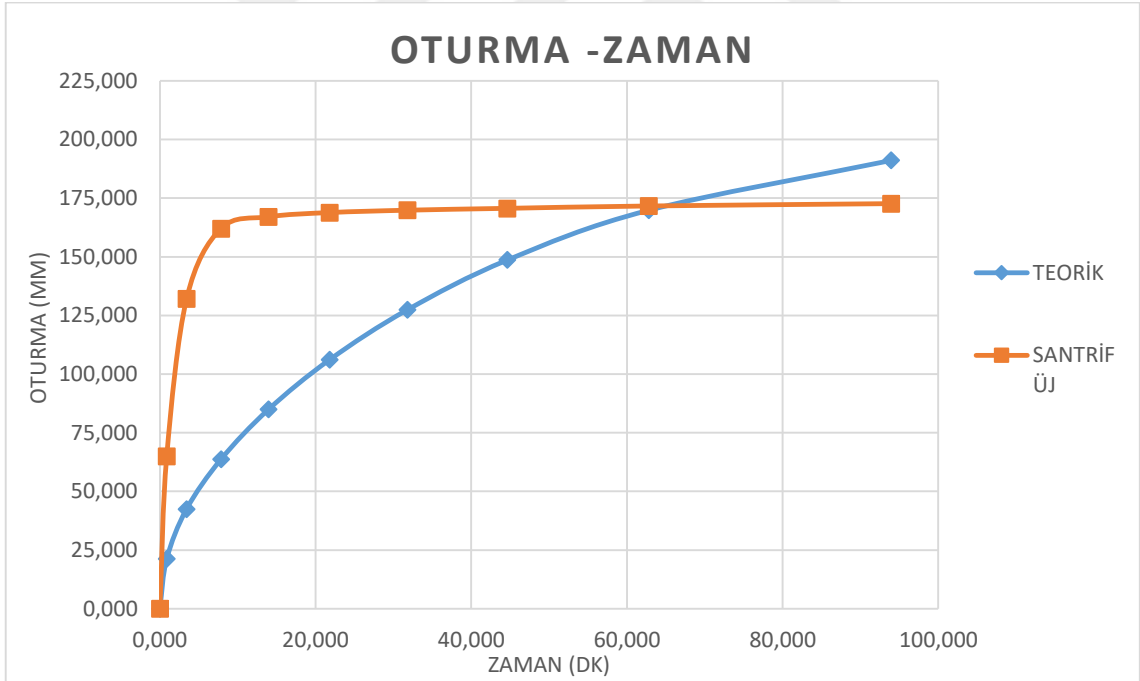
Şekil 5.2. GSK1 oturma eğrileri



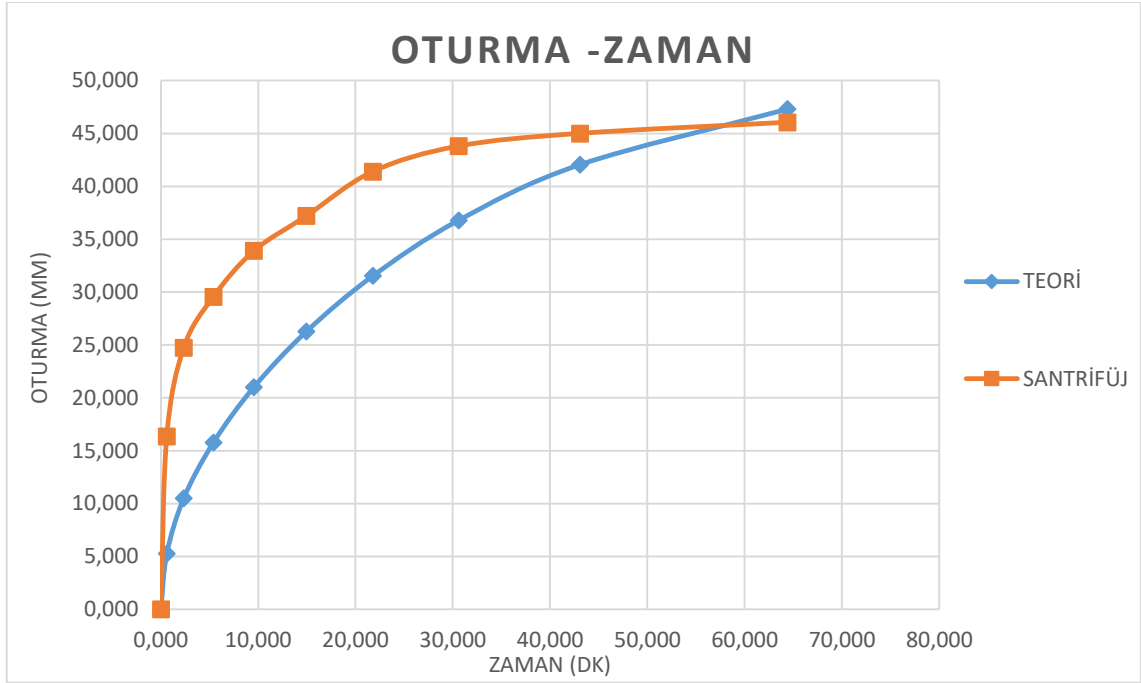
Şekil 5.3. GSK2 oturma eğrisi



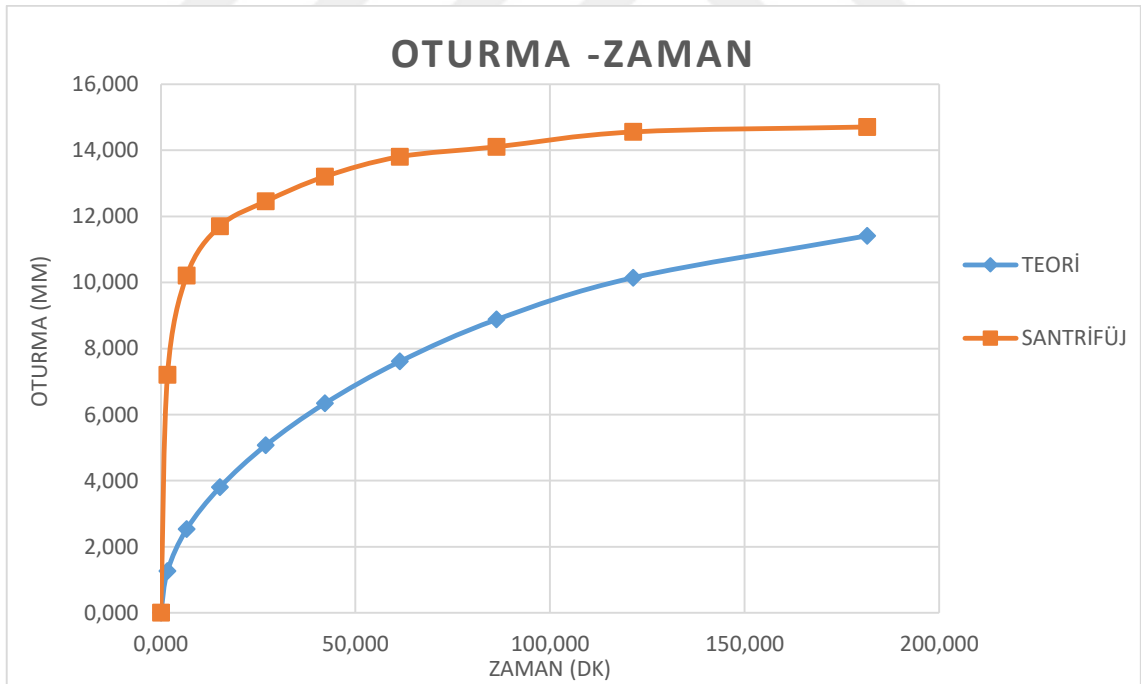
Şekil 5.5. GSK3 oturması eğrisi



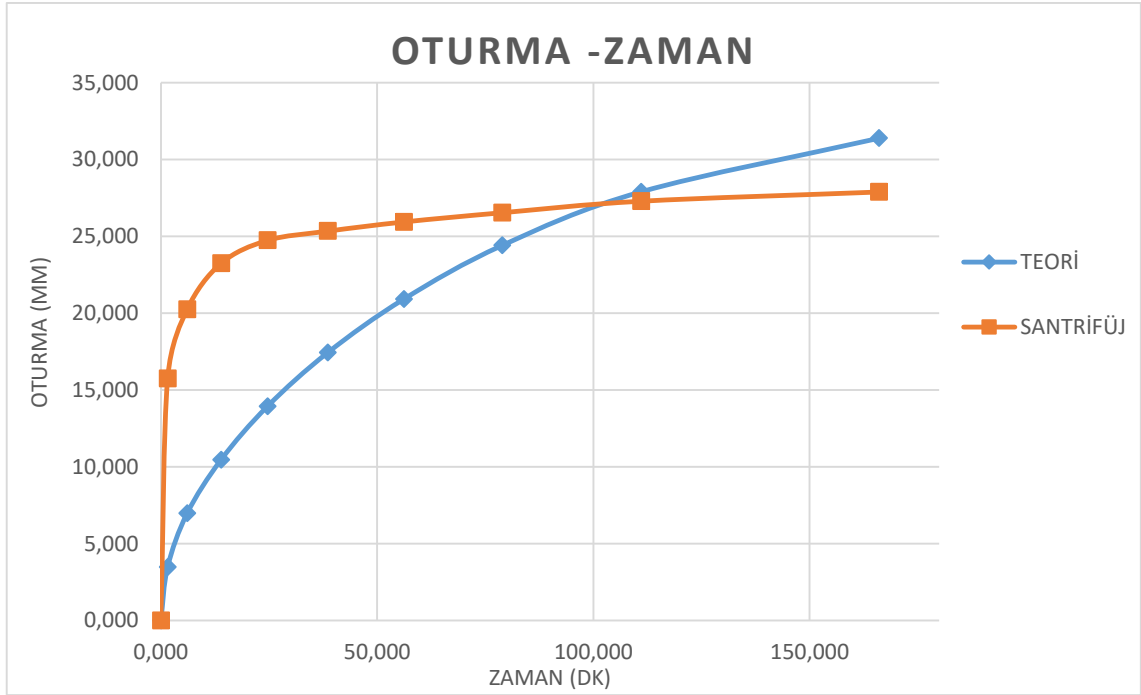
Şekil 5.4. GSK4 oturması eğrisi



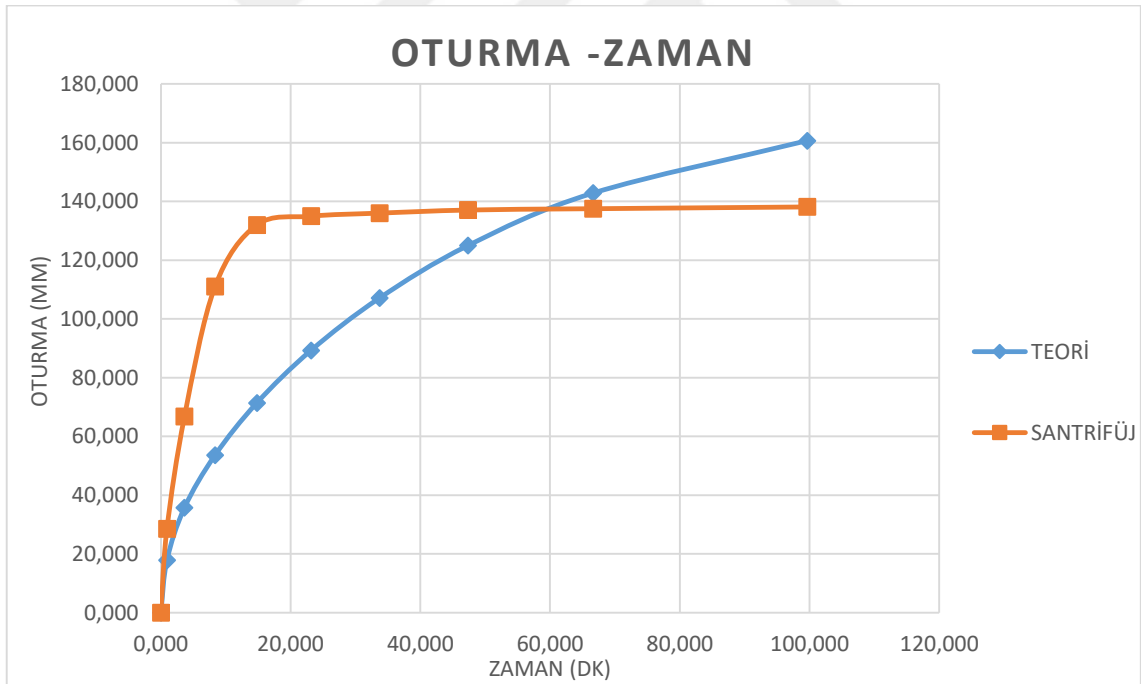
Şekil 5.5. GSK5 oturma grafiği



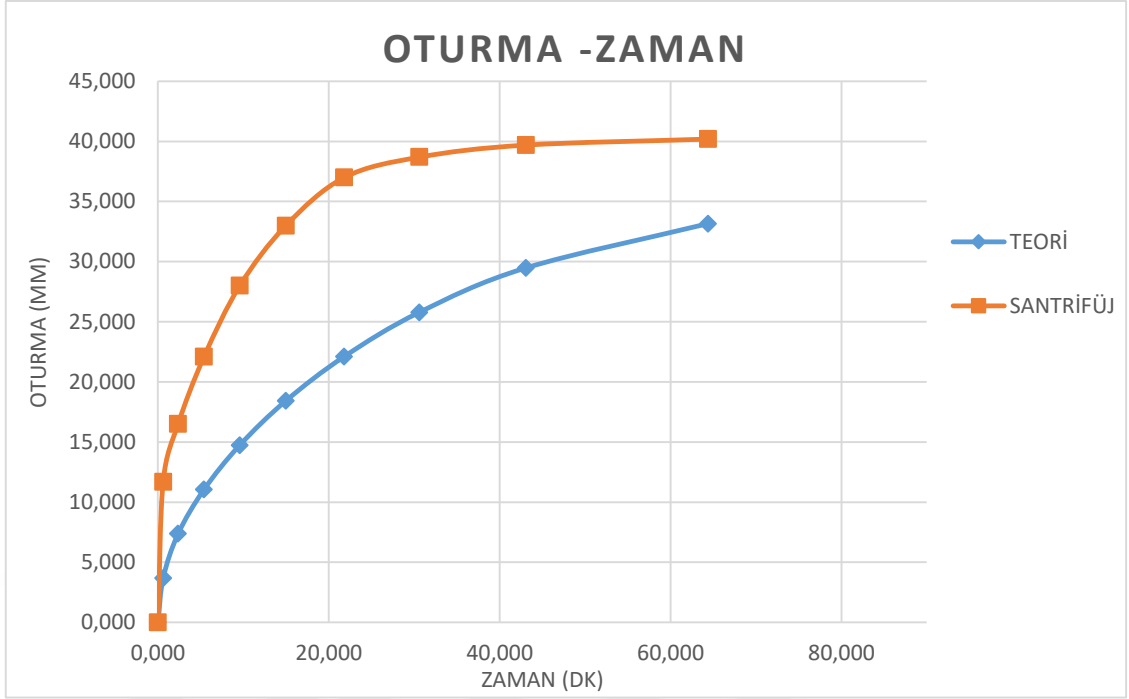
Şekil 5.6. GSK6 oturma eğrisi



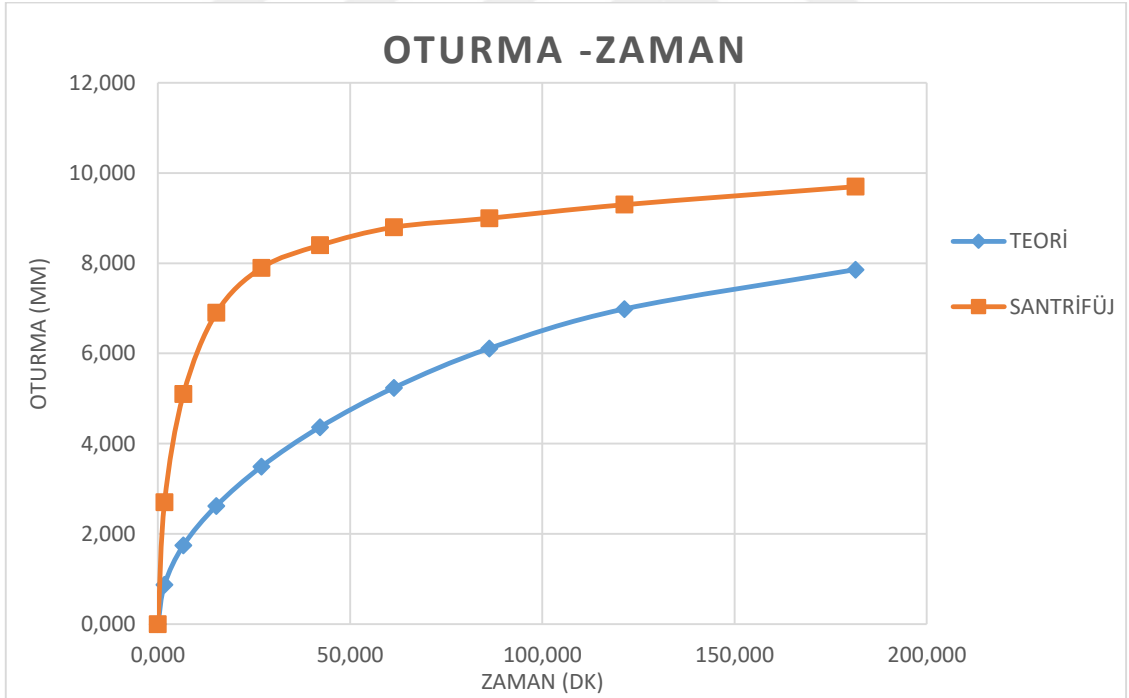
Şekil 5.7. GSK7 oturma eğrisi



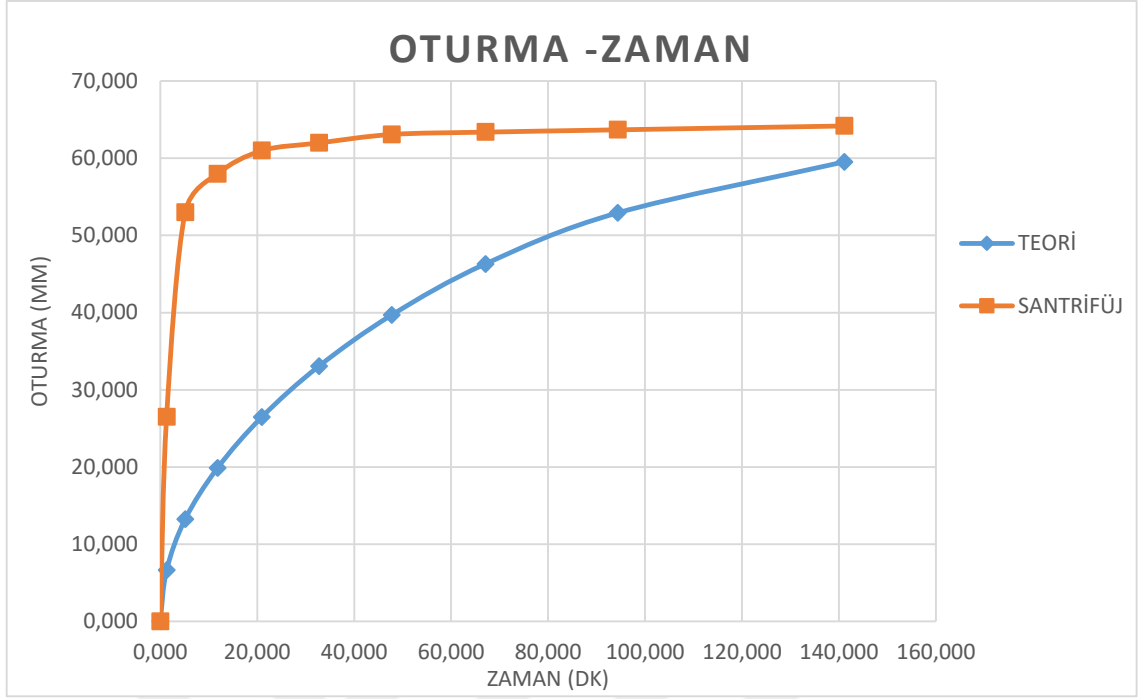
Şekil 5.8. GSK8 oturma eğrisi



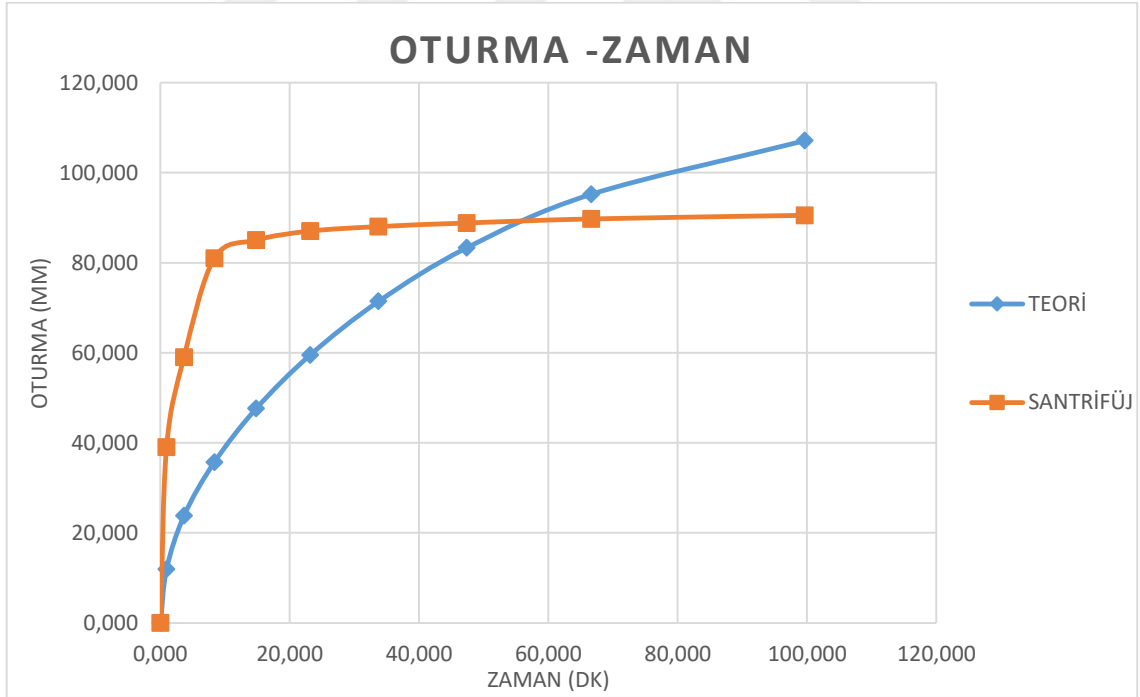
Şekil 5.9. GSK9 santrifüj oturma eğrisi



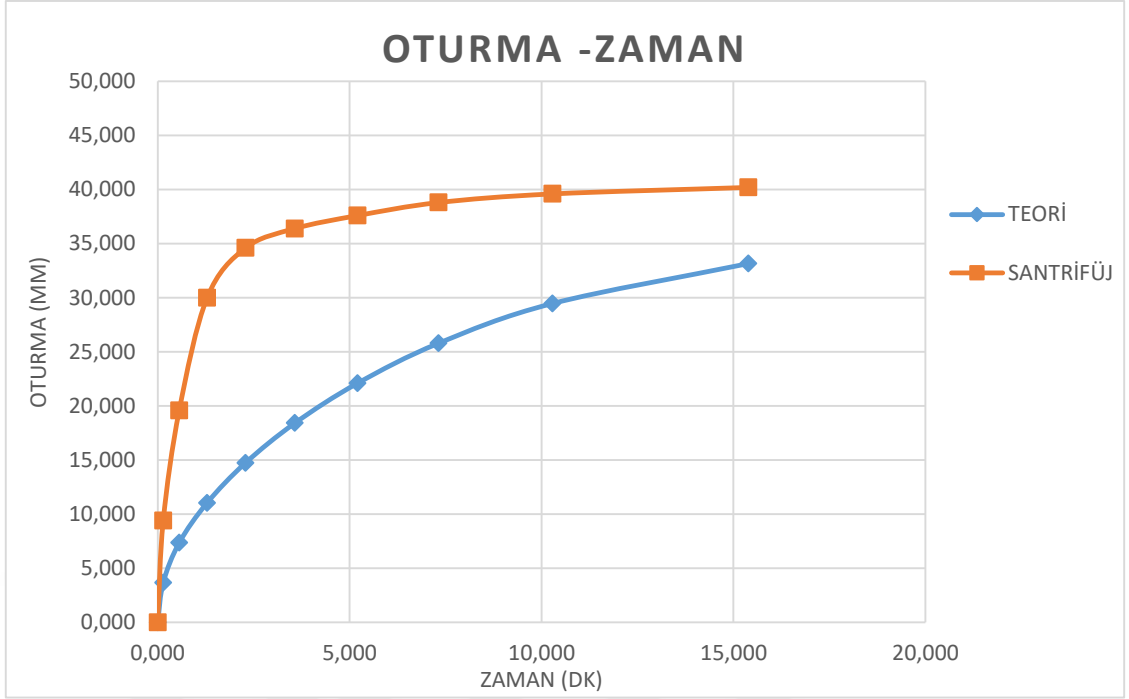
Şekil 5.10. GSK 10 oturma eğrisi



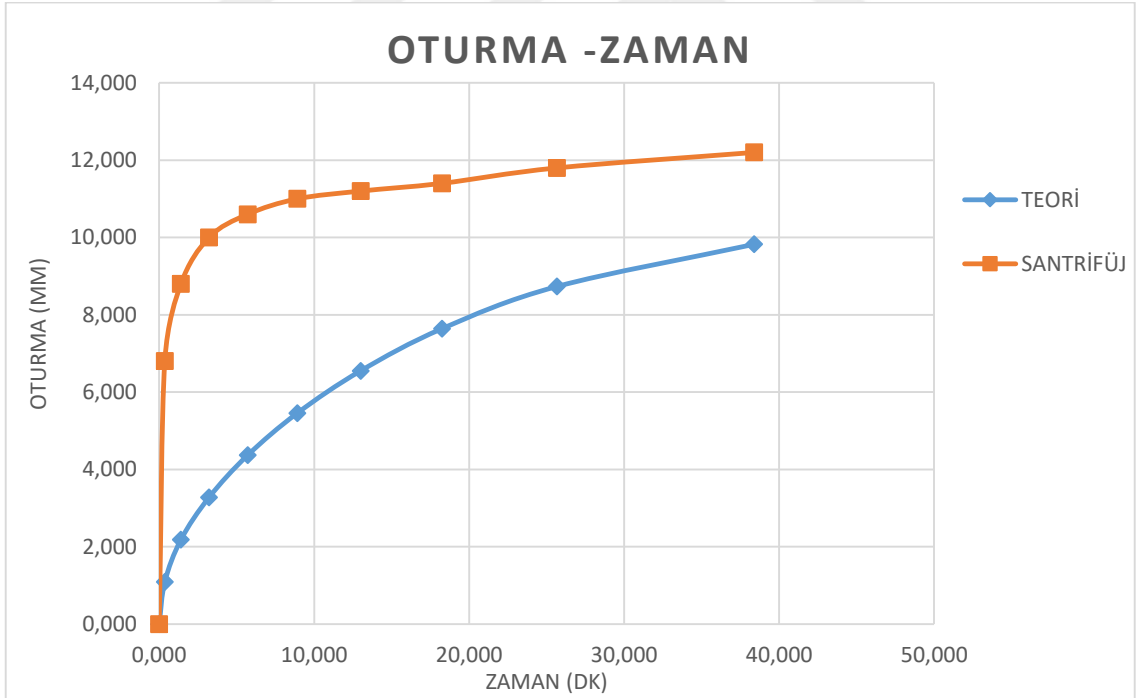
Şekil 5.11. GSK11 santrifüj oturma eğrisi



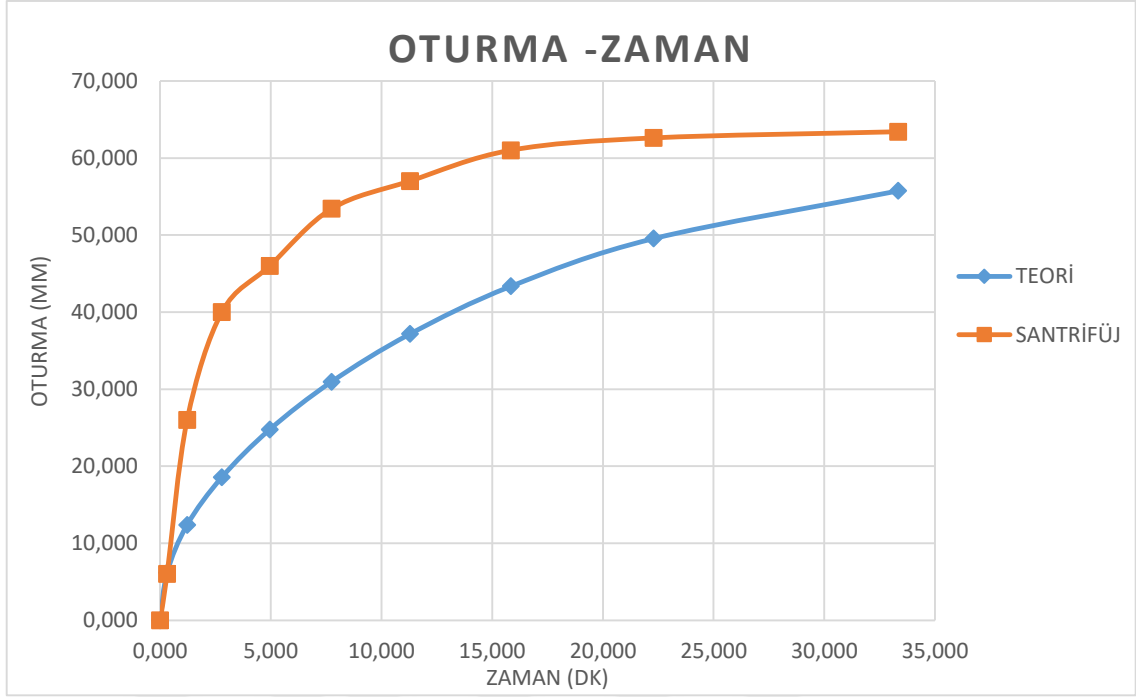
Şekil 5.12. GSK12 oturma eğrisi



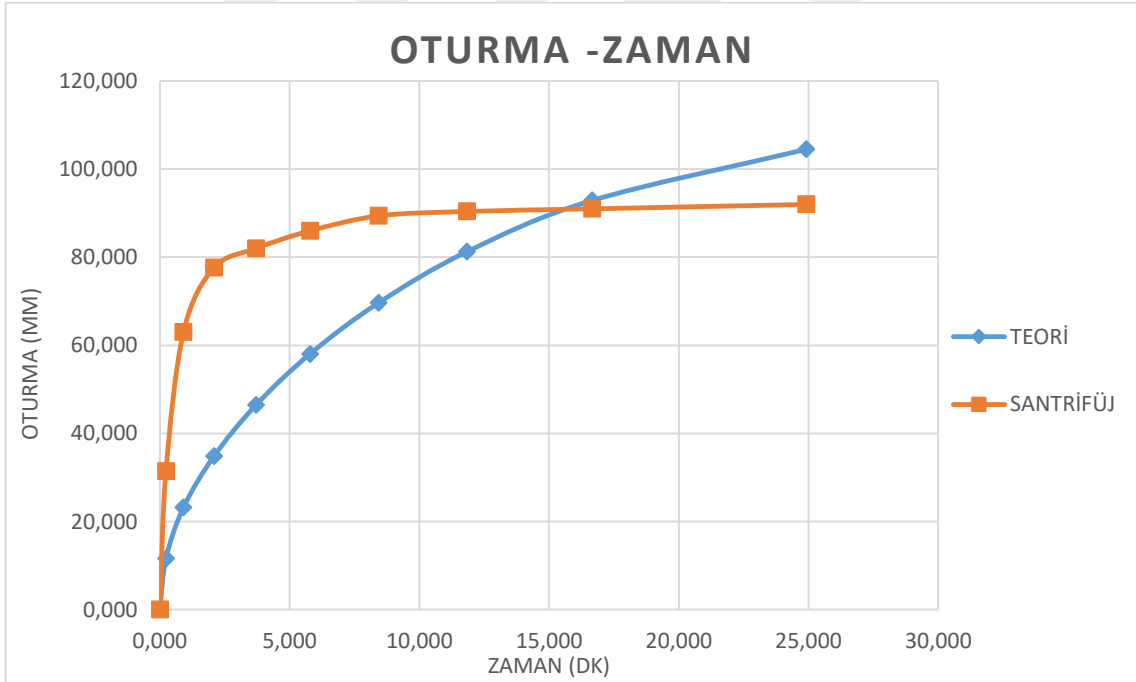
Şekil 5.13. GSK13 oturma eğrisi



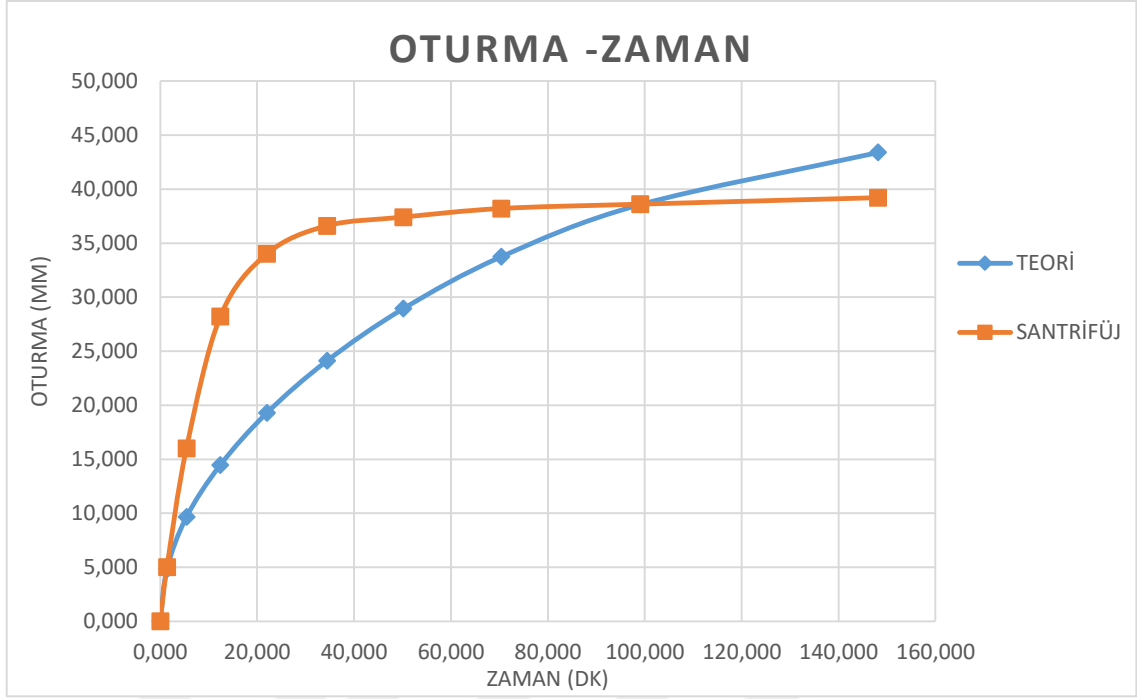
Şekil 5.14. GSK14 santrifüj oturma eğrisi



Şekil 5.15. GSK15 oturma eğrisi



Şekil 5.16. GSK16 santrifüj oturma eğrisi



Şekil 5.17. GSK17 oturma eğrisi

Tablo 5.11. Geoteknik Santrifüj Deney Programı ($\omega=0,45$)

İsim	Numune yüksekliği (cm)	Numune boyu (cm)	eni, Santrifüj ivmesi (g)	Gerilme kademesi (kg/cm ²)	Santrifüj Uçuşu Süresi (dk)
GSK 18	2.5	5.3/5.3	20	0-0.25	13
GSK 19	2.5	5.3/5.3	20	0.25-0.50	37
GSK 20	2.5	5.3/5.3	20	0.50-1	30
GSK 21	2.5	5.3/5.3	20	1-2	20
GSK 22	5	5.3/5.3	10	0-0.25	64
GSK 23	5	5.3/5.3	10	0.25-0.50	151
GSK 24	5	5.3/5.3	10	0.50-1	119
GSK 25	5	5.3/5.3	20	0-0.25	64
GSK 26	5	5.3/5.3	20	0.25-0.50	132
GSK 27	5	5.3/5.3	20	0.50-1	148
GSK 28	5	5.3/5.3	20	1-2	114
GSK 29	2.5	5.3/5.3	15	0-0.25	71
GSK 30	2.5	5.3/5.3	15	0.25-0.50	116
GSK 31	2.5	5.3/5.3	15	0.50-1	125

Tablo 5.12. Konsolidasyon ve geoteknik santrifüjde kullanılan zemin özellikleri

γ_s	w	e	n	γ_k	γ_n
2.56	0.45	1.13	0.53	1.20	1.72

Tablo 5.13. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeli özellikleri

Model Zemin Boyutları			Model Yüğü	Santrifüj İvmesi
B (cm)	L (cm)	H (cm)	kg	g (m/sn ²)
5.30	5.30	2.50	0.36	20

Tablo 5.14. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototip özellikleri

Zemin Boyutları			Yük Basıncı	
B (cm)	L (cm)	Z (cm)	(kg/cm ²)	(t/m ²)
106.00	106.00	50.00	0.26	2.6

Tablo 5.15. Geoteknik santrifüjde kullanılan zemin modeline eş prototipin oturma hesabı

Gerilme aralığı	e1	e2	Δe	ΔP	1+e	M _v	H _{kil}	H _{prototip}	H _{model}
(kg/cm2)				(kg/cm2)		(cm ² /kg)	(cm)	(cm)	(cm)
0.02	0.28	1.10	0.95	0.16	0.26	1.10	0.31	50	4.03
									0.21

Tablo 5.16. Konsolidasyon deneyi gerilmeleri için boşluk oranı ve hacimsel sıkışma katsayısı büyüklükleri

p	e	M_v
0.00	1.13	-
0.25	0.95	0.35
0.50	0.92	0.07
1.00	0.82	0.10
2.00	0.62	0.12
4.00	0.44	0.06
8.00	0.21	0.04
4.00	0.23	0.005
2.00	0.27	0.01
1.00	0.33	0.04

Tablo 5.17. Prototip için %50 ve %90 oturma zamanı

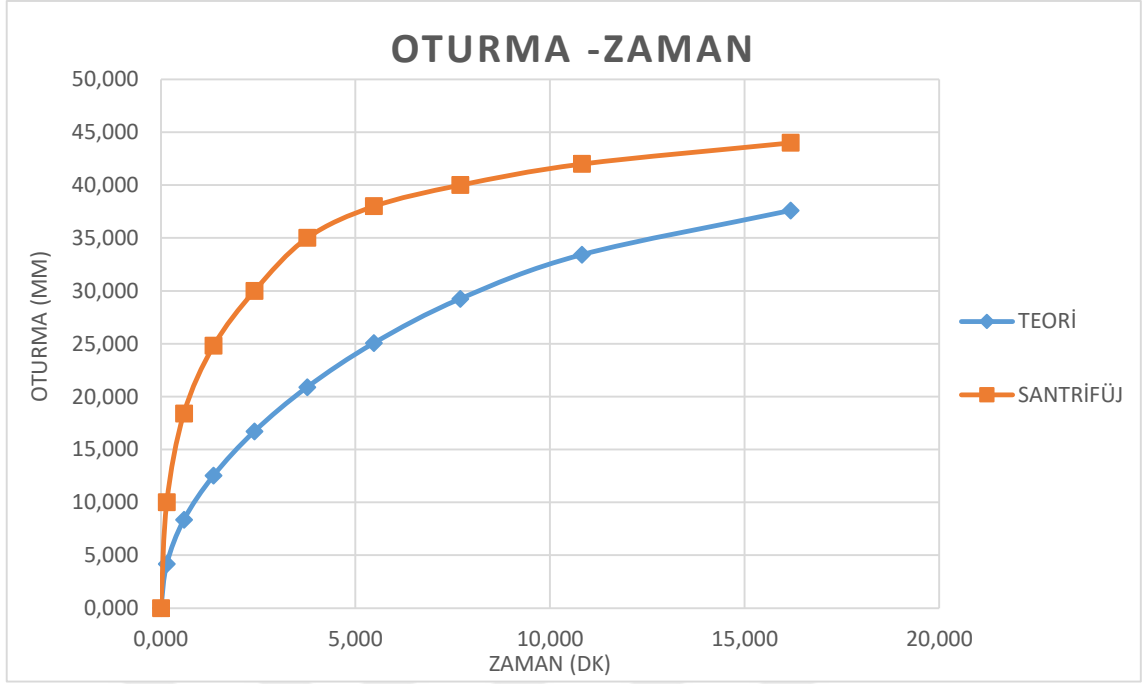
Oturma (%)	T_v	Hdr (cm)	$t_{ödo}$ (sn)	C_v (cm ² /sn)	$t_{prototip}$ (sn)	$t_{prototip}$ (dk)
50	0.197	0.90	100.000	1.60 E-03	77160	22
90	0.848	0.90	480.000	1.43 E-03	370370	6172

Tablo 5.18. *Prototip teorik oturma yüzdeleri için oturma süreleri*

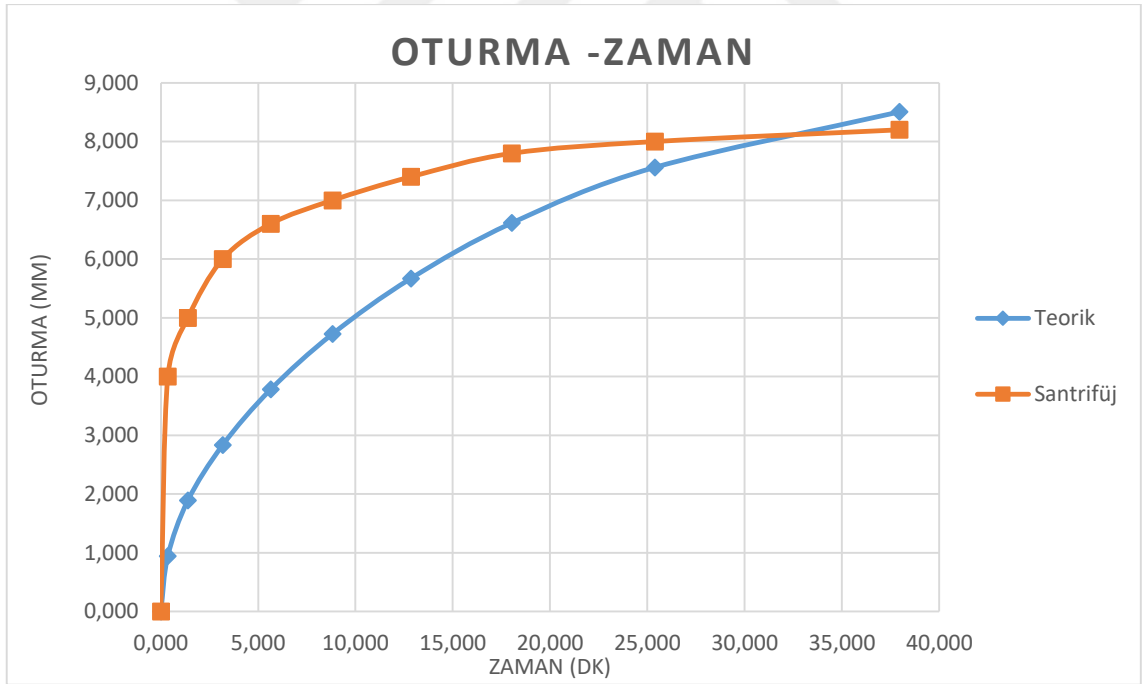
U (%)	ΔH_{teorik} (cm)	Prototipte				
		T_v	(H_{dr}^2/C_v)	t (sn)	t (dk)	t (saat)
0	0	0.00	39167	0.00	0.00	0
10	0.42	0.01	39167	3133	52	0.9
20	0.84	0.03	39167	12142	202	3.37
30	1.25	0.07	39167	27809	463	7.73
40	1.67	0.13	39167	49351	822	13.71
50	2.09	0.20	39167	77160	1286	21.43
60	2.51	0.29	39167	112411	1873	31.23
70	2.92	0.40	39167	157846	2630	43.85
80	3.34	0.57	39167	222081	3701	61.68
90	3.76	0.85	39167	332142	5535	92.26
100	4,18	∞	-	∞	∞	∞

Tablo 5.19. *Geoteknik santrifij model teorik konsolidasyon sürelerinde gözlemlenen oturma miktarları*

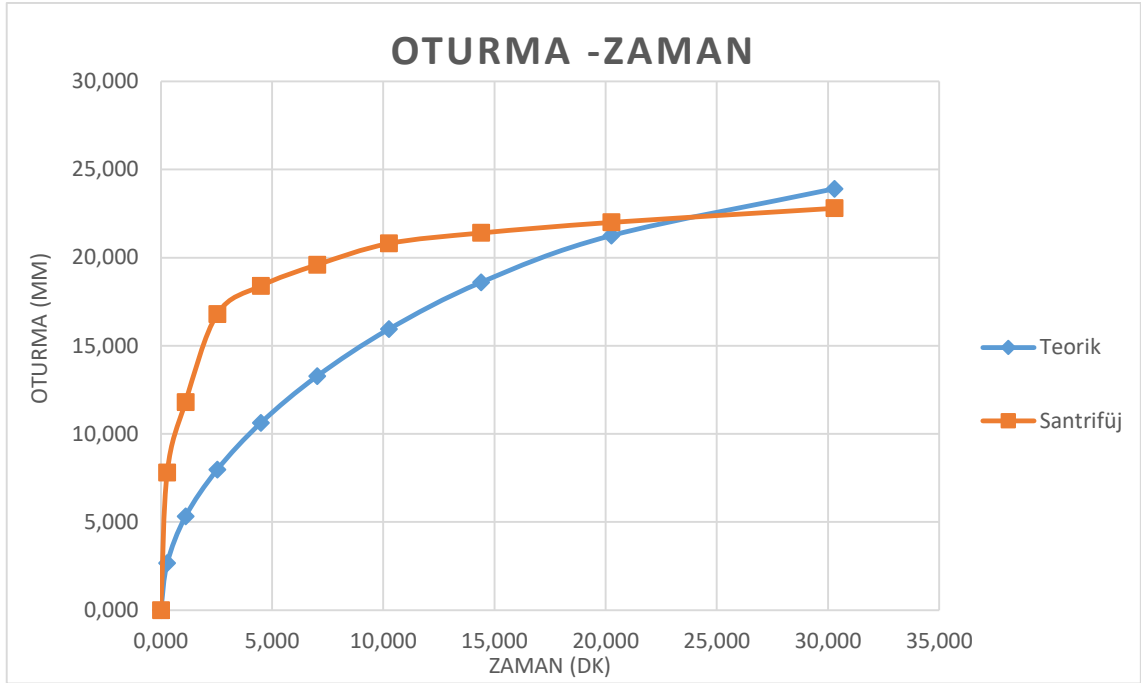
U (%)	H_{teorik} (mm)	$H_{\text{ölçülen}}$ (mm)	H_{prototip} (mm)	t (sn)	t (dk)	t (saat)	Deney saati
0	0.0	0.00	0.00	0	0	0	10:51:00
10	4.18	0.50	10.00	9	0.15	0.003	10:51:09
20	8.35	0.92	18.40	35	0.59	0.01	10:51:35
30	12.53	1.24	24.80	81	1.36	0.02	10:52:21
40	16.71	1.50	30.00	144	2.40	0.04	10:53:24
50	20.89	1.76	35.20	225	3.76	0.06	10:54:46
60	29.24	1.90	38.00	328	5.48	0.09	10:56:29
70	33.42	2.0	40.00	461	7.69	0.13	10:58:41
80	37.60	2.10	42.00	649	10.82	0.18	11:01:49
90	41.77	2.20	44.00	970	16.18	0.27	11:07:11



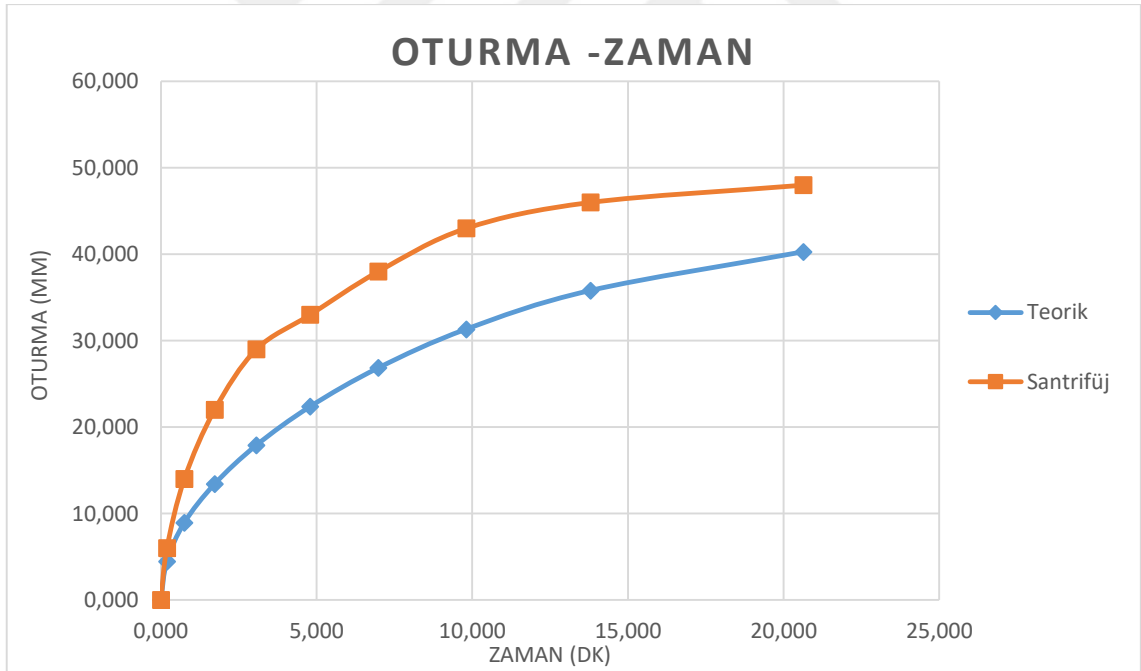
Şekil 5.18. GSK18 oturma eğrisi



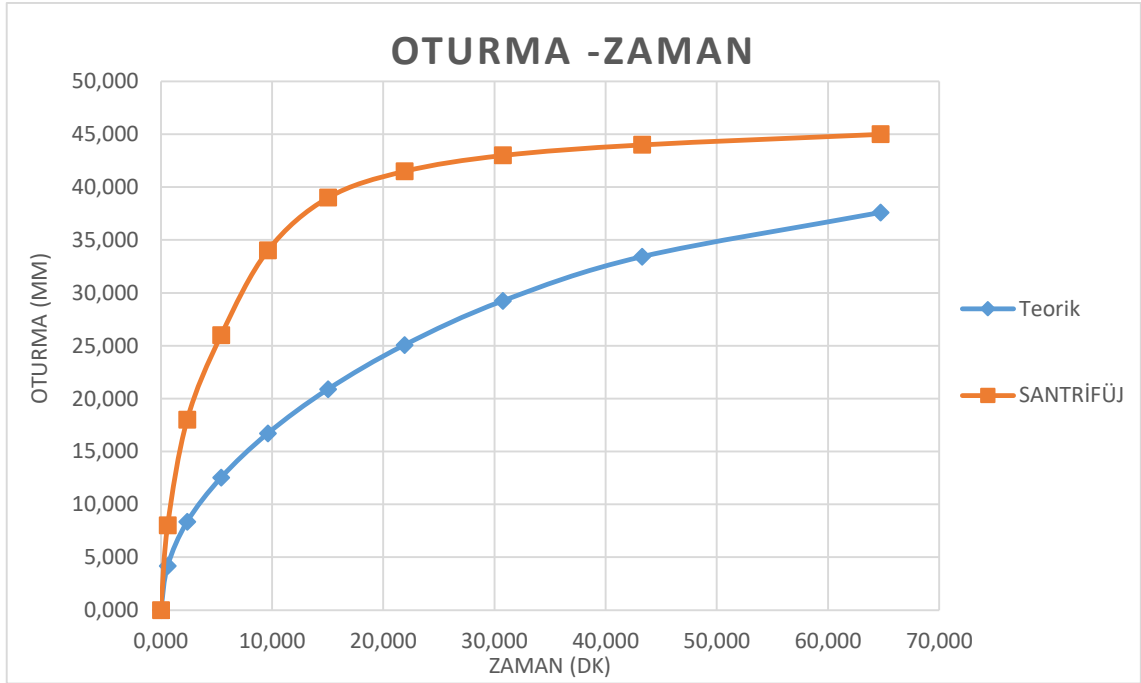
Şekil 5.19. GSK19 oturma eğrisi



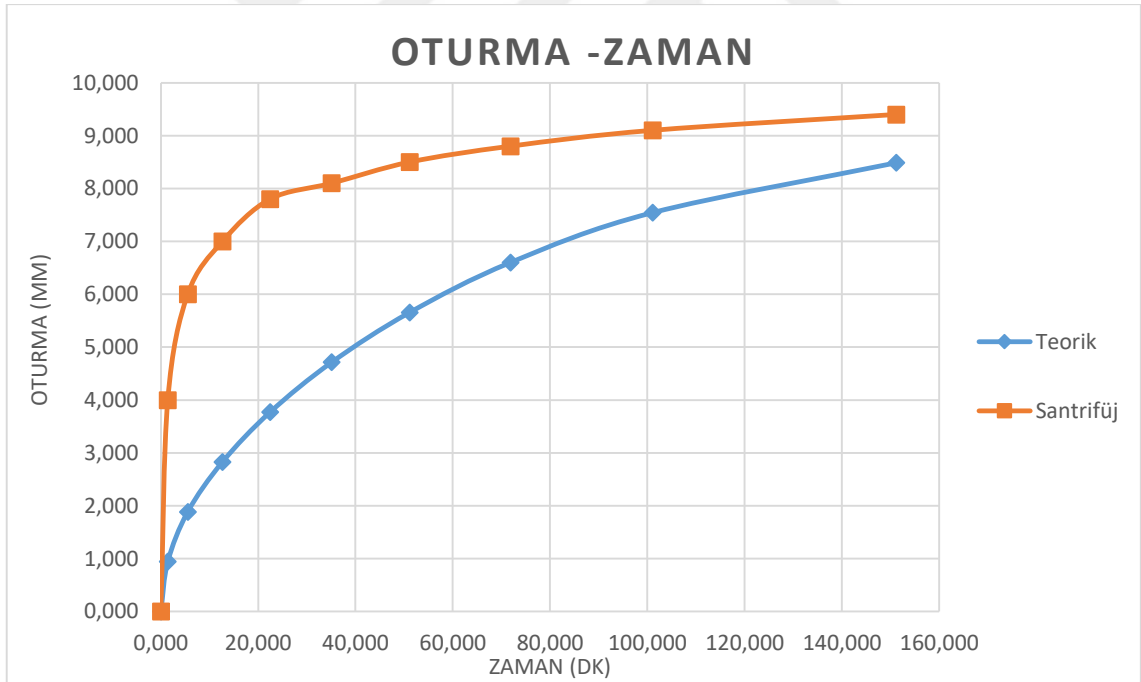
Şekil 5.20. GSK20 oturma eğrisi



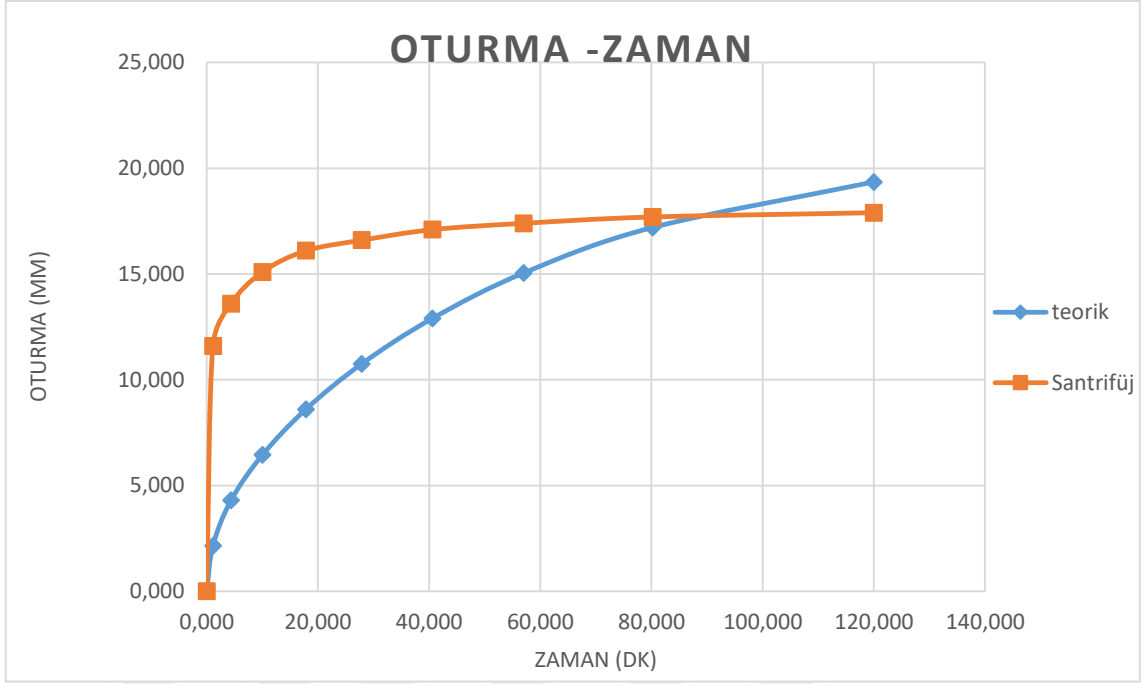
Şekil 5.21. GSK21 oturma grafiği



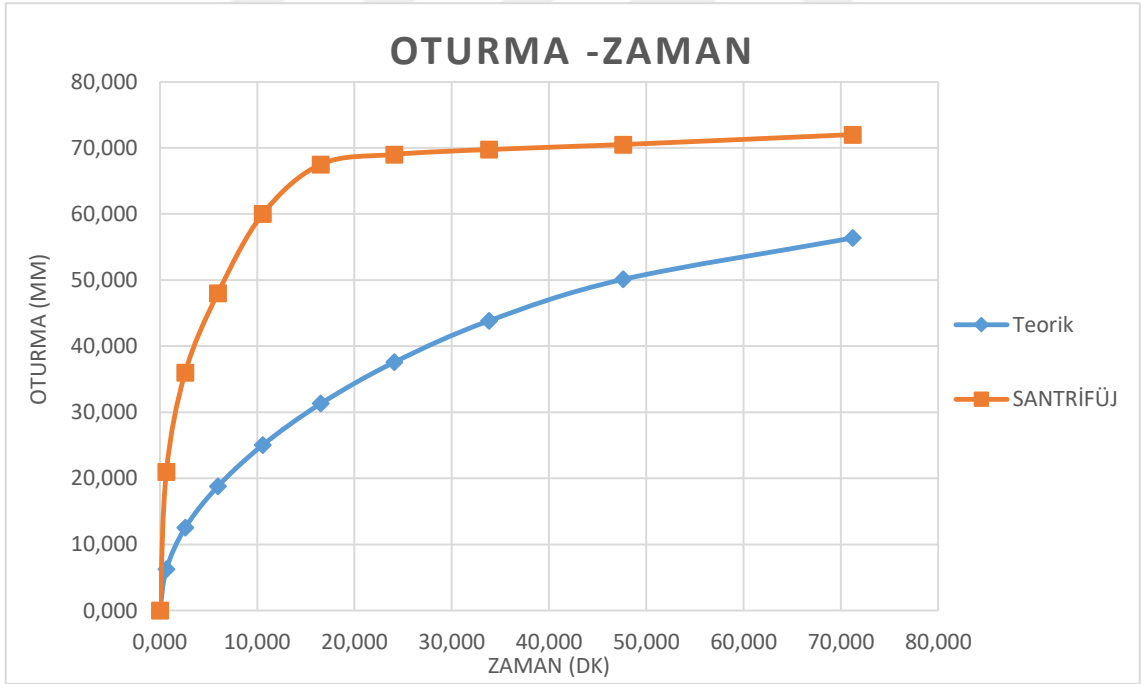
Şekil 5.22. GSK22 oturma grafiği



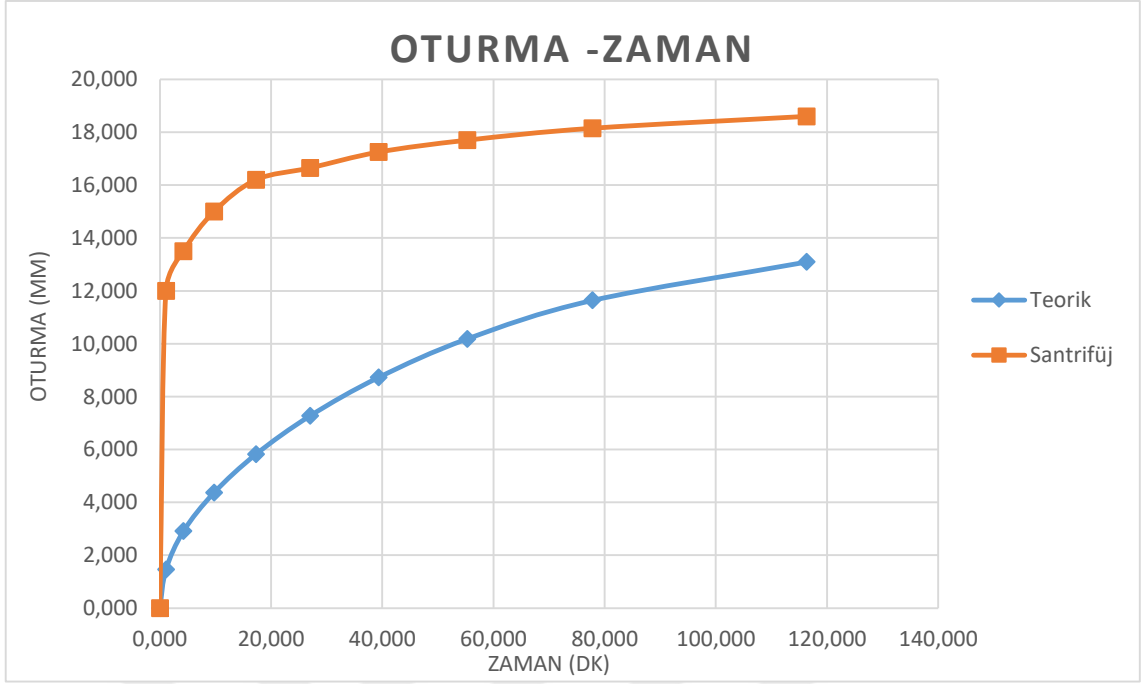
Şekil 5.23. GSK23 oturma grafiği



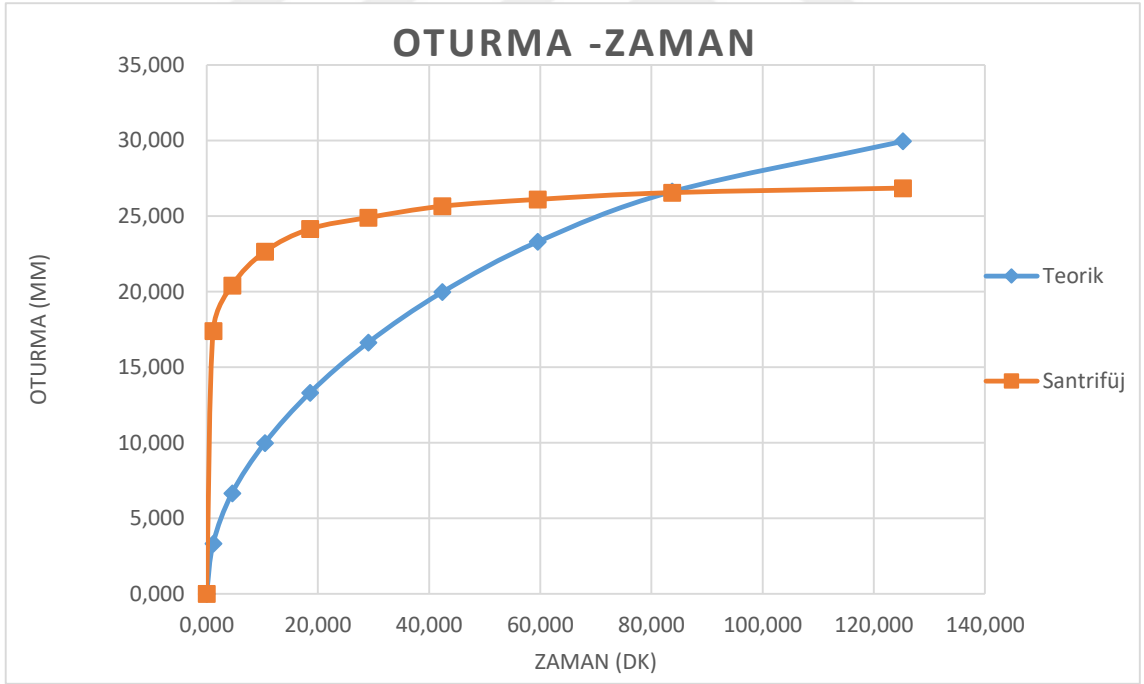
Şekil 5.24. GSK24 oturma grafiği



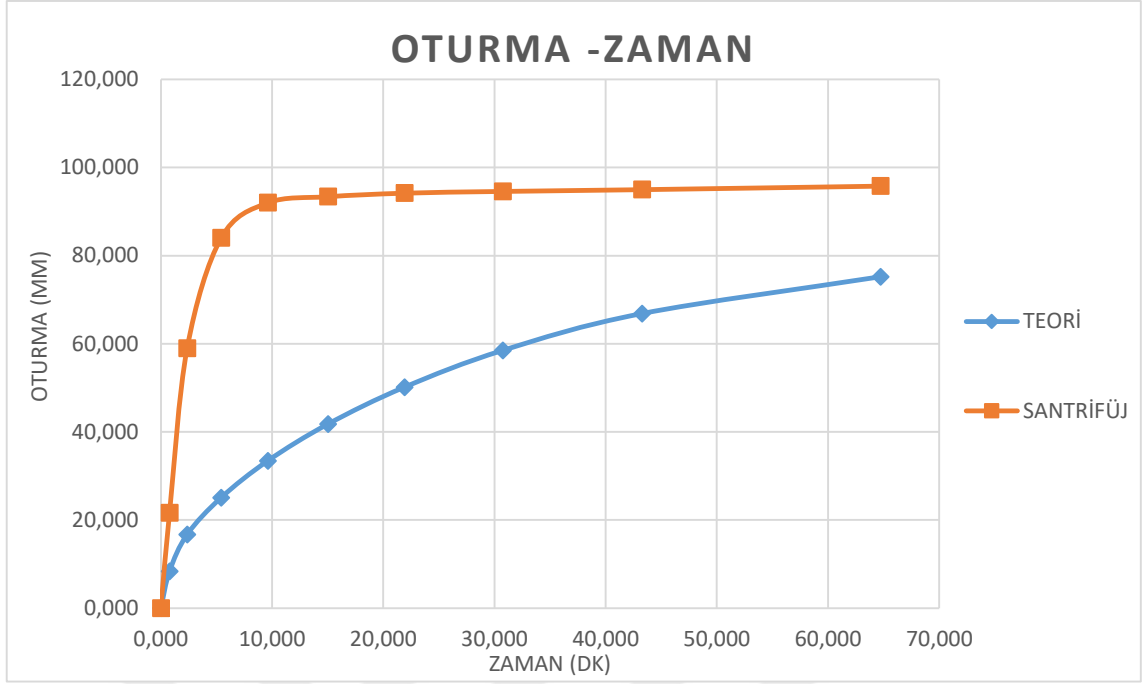
Şekil 5.25. GSK25 oturma grafiği



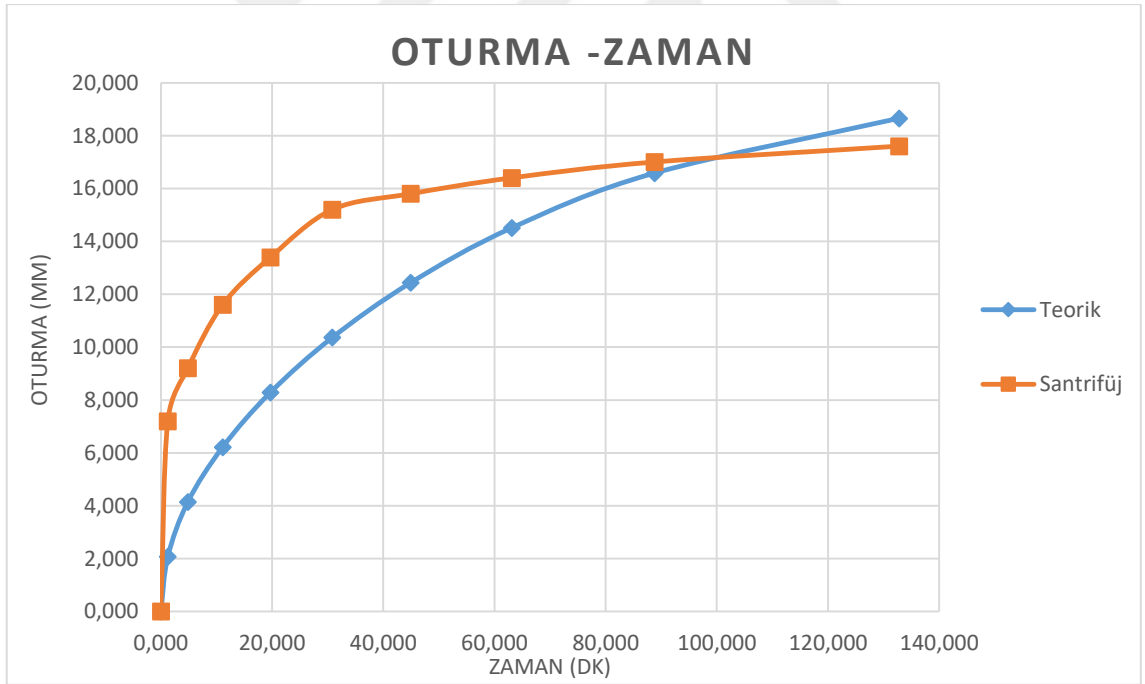
Şekil 5.26. GSK26 oturma grafiği



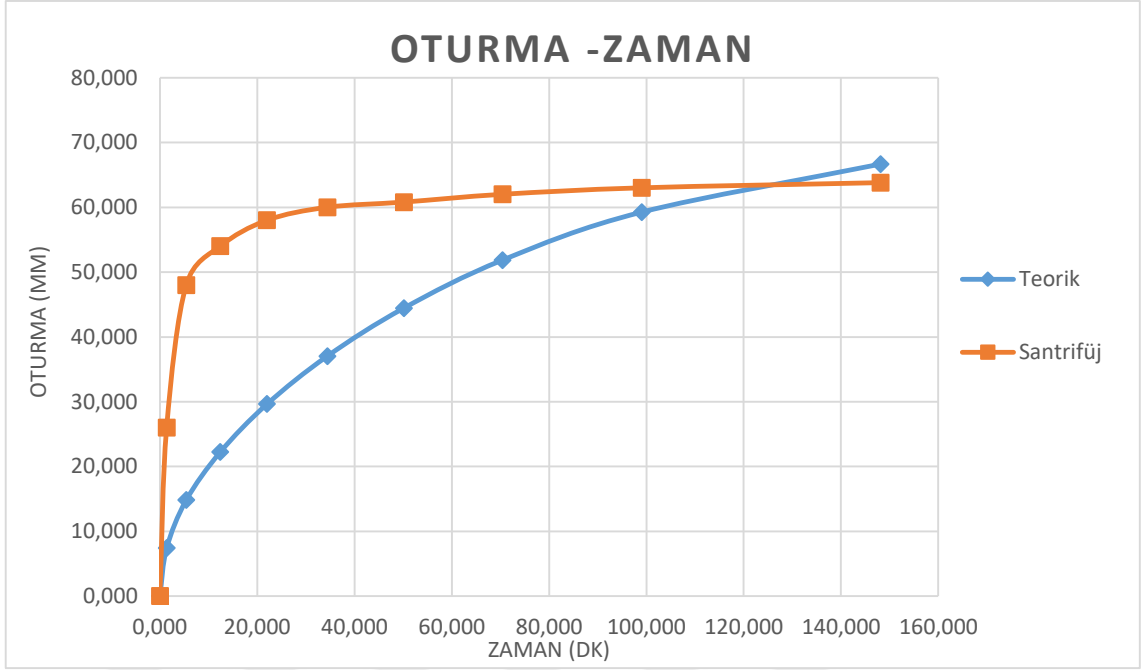
Şekil 5.27. GSK27 oturma grafiği



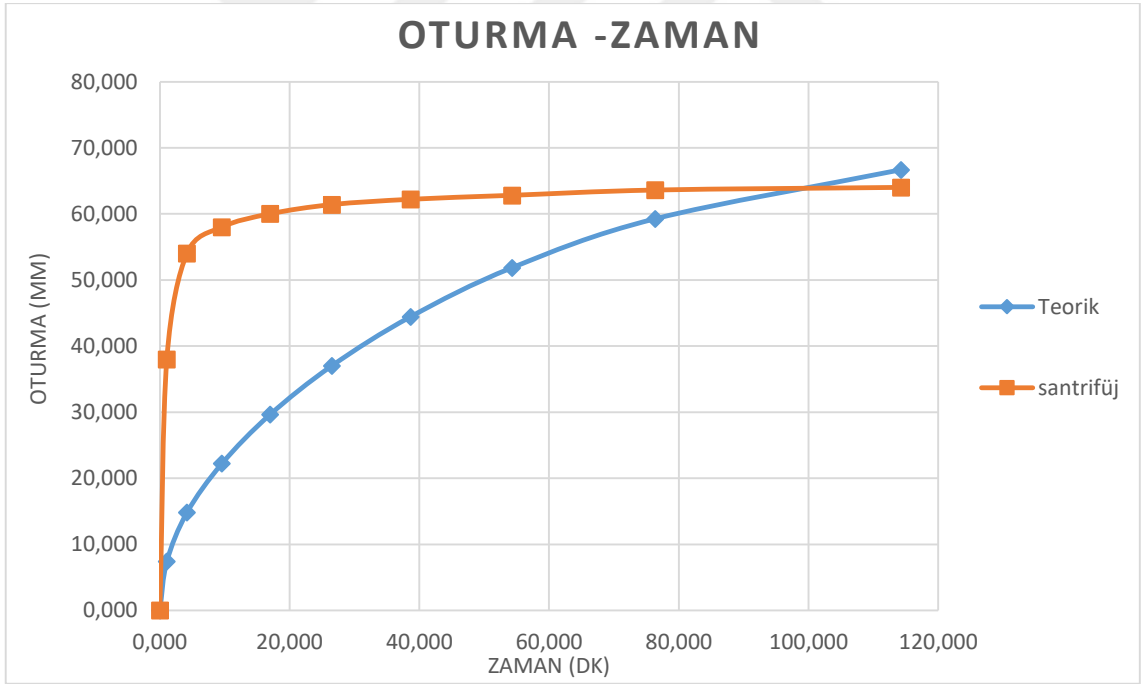
Şekil 5.28. GSK28 oturma grafiği



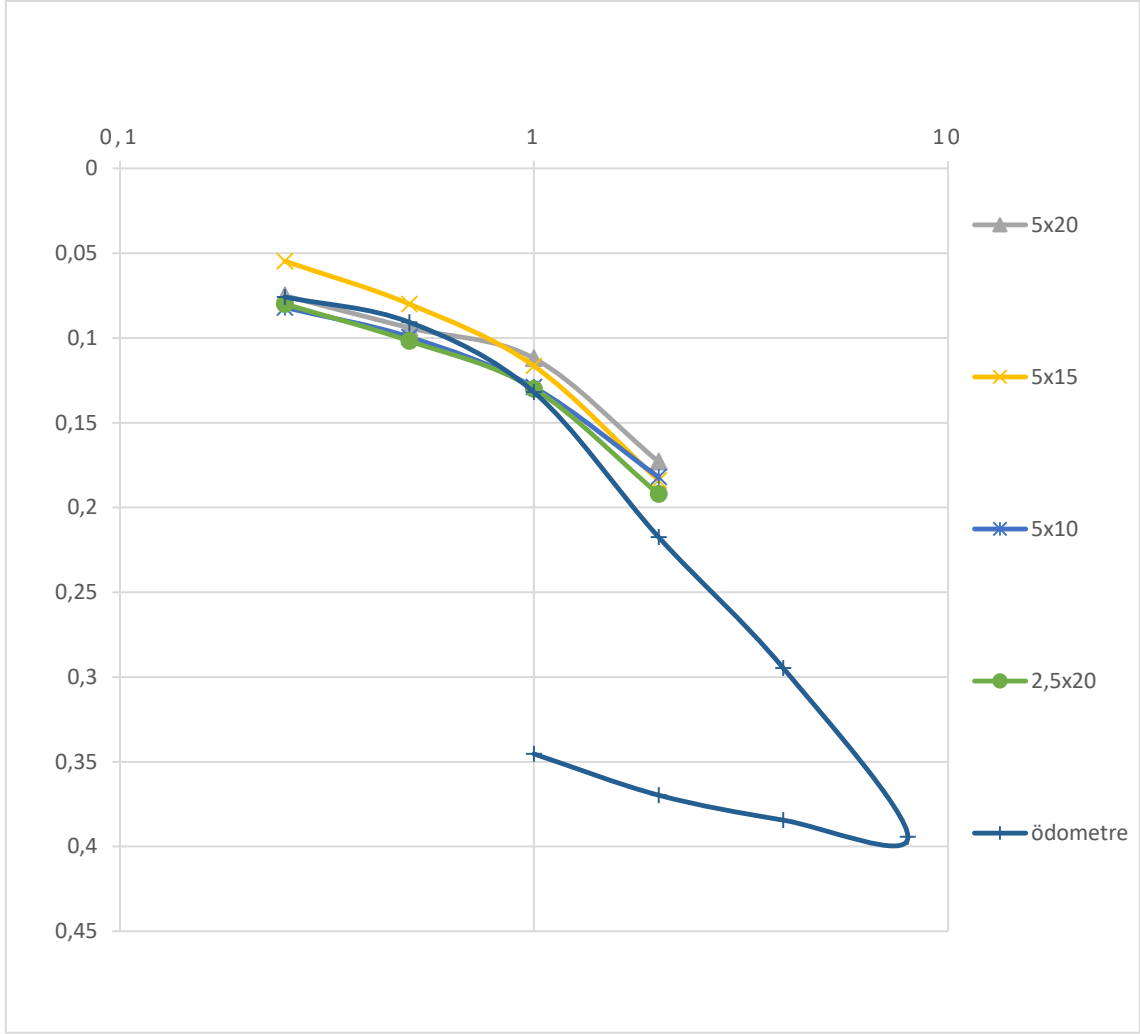
Şekil 5.29. GSK29 oturma grafiği



Şekil 5.30. GSK30 oturma grafiği



Şekil 5.31. GSK31 oturma grafiği



Şekil 5.32. Geoteknik santrifüj ve ödometre deneyi konsolidasyon yüzdesi- log gerilme grafiği ($\omega=0,37$)

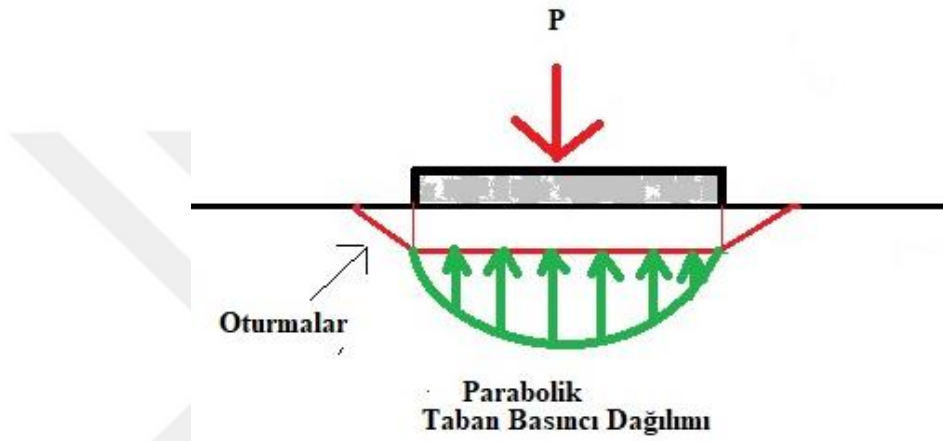
Geoteknik santrifüj ölçek kurallarında da belirtildiği gibi aynı zeminin aynı gerilme aralıklarında birim şekil değiştirme-gerilme grafiğinin aynı olması gerekmektedir. Yaptığımız deney çalışmaları sonucu Şekil 5.44.'te de görüldüğü gibi santrifüj konsolidasyon deneylerinin neredeyse aynı eğriyi oluşturduğu ayrıca ödometre eğrisi ile de uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar gerçekleştirdiğimiz santrifüj deney sistemimizi doğrular niteliktedir.

5.3. Geoteknik Santrifüj Model Deneyleri

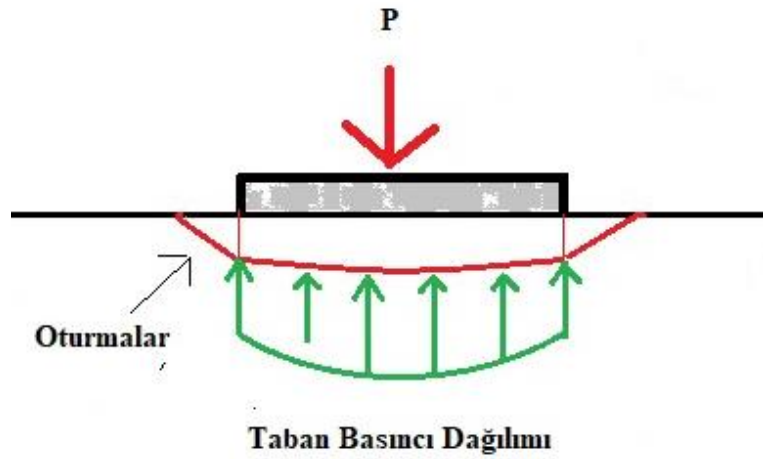
Geoteknik santrifüjün ivme ölçer ve konsolidasyon deney sonuçları deney sistemimizi doğrular nitelikte çıktığından, aslına uygun olarak geoteknik santrifüj model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda üniform ve eksantrik yüklü kare temellerin ve

ayrıca üniform yüklü dairesel temellerin oturma davranışı geoteknik santrifüj modellerle karşılaştırılmıştır.

Genellikle üniform yüklü bir temel altı gerilmelerinin, zeminde üniform aktarılacağı ve temel altı zemininin yaklaşık olarak üniform bir gerilme alacağı varsayılmaktadır. Ancak üniform yüklü temellerin taban gerilme dağılımı, temel zeminin cinsine ve temelin rijitliğine bağlıdır. Bu dağılımlar zeminin kohezyonlu ve kohezyonsuz olmasına göre ve temelin zemine göre rijitliğine göre değişmektedir [25].



Şekil 5.33. Kohezyonsuz zemine oturan üniform yüklü rijit temelin basınç ve oturma grafiği



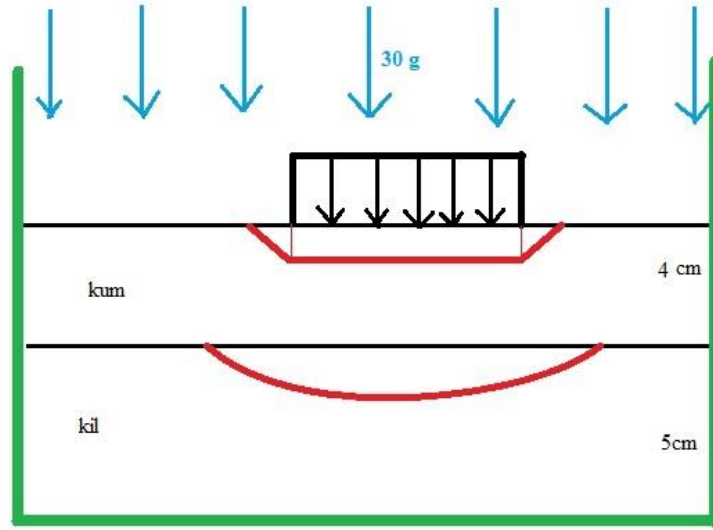
Şekil 5.34. Kohezyonlu zemine oturan üniform yüklü esnek temelin basınç ve oturma grafiği



Şekil 5.35. Model Kutusuna zeminin sırasıyla yerleştirilmesi

İlk olarak Beşevler zemini (bkz. Tablo 4.2.) ödometre deneyindeki su muhtevasında ($w=0,37$) karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Ardından model kutusu suda çözünmez yağ ile yağlanmıştır, ardından poroz kâğıdı zeminin kutudan sızmasını engellemek için kutu altına serilmiştir. Ardından zemin yüksekliği bilindiğinden hacmine göre zemin ağırlığı belirlenerek, kil zemin hafif bir şekilde tokmaklanarak (sadece fazla havanın çıkması için) 3 tabaka halinde bir şekilde yerleştirilmiştir. Ardından Toyoura kumu yaklaşık 40 cm yüksekliğinden yatayda sabit hızla düşürülmüştür. Kumda rölatif sıklılık %24 olarak elde edilmiştir. Böylelikle üstte gevşek kum tabakası oluşmuştur.

Geoteknik santrifüj deneyler sırasında yeraltı su seviyesi kil zeminin yüzeyinde tutulmuştur ayrıca üzerindeki kum zeminin ve kendi iç gerilmelerinin oluşturacağı oturmalar için zemin temel yüklemesinden önce santrifüjde döndürülmüş ve ön konsolidasyon basıncı sağlanmıştır. Ardından ara verilmeden temeller yüklenmiş ve deney başlamıştır. Aşağıda modellenen tasarımlar için oturma şekilleri gösterilmiştir.

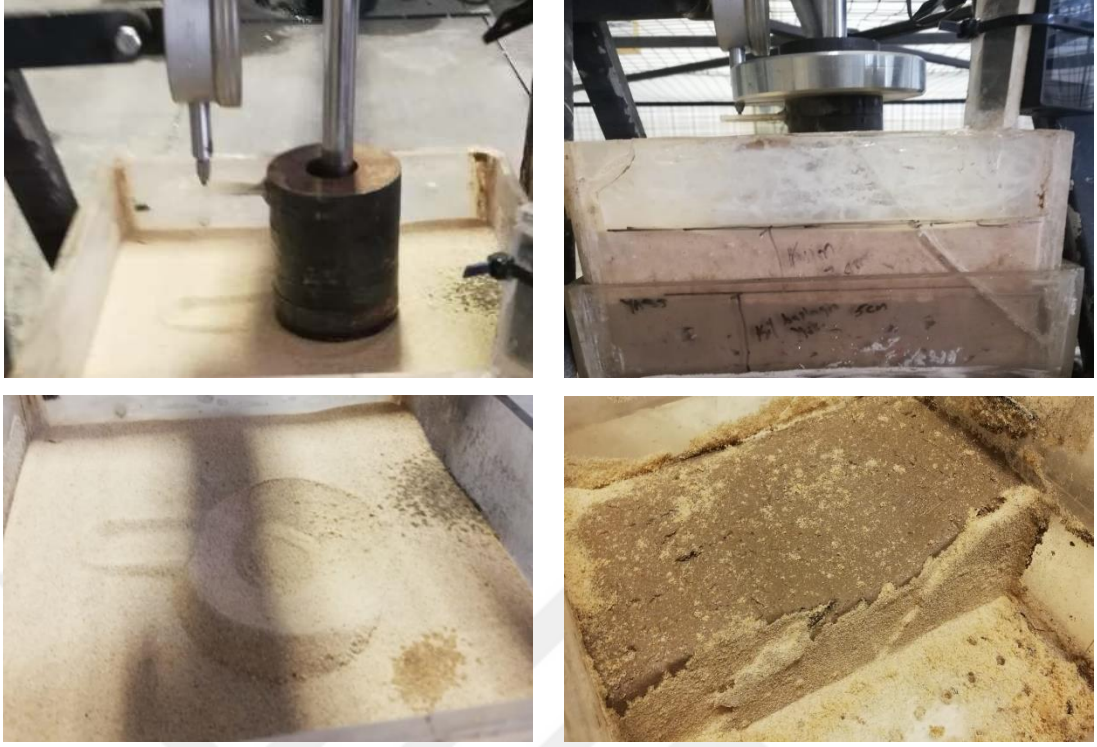


Şekil 5.36. Geoteknik santrifüj model tasarımı ve üniform yüklü rijit temelin oturma davranışı

Yukarıdaki tasarım 1.2 m kum ve altında 1.5 m kil tabakasını temsil eden üniform yüklü dairesel ve kare temeli temsil etmektedir. Burada amaçlanan temel altı oturmaların temelin şekline ve zeminin türüne göre değişimini incelemektir.

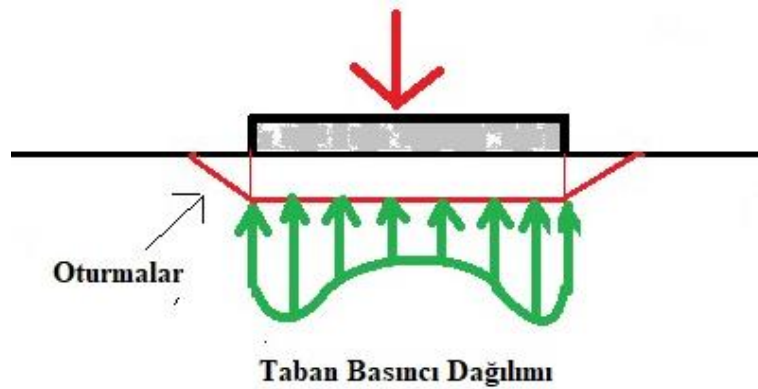


Şekil 5.37. Geoteknik santrifüj tasarımı modelinde üniform yüklü rijit kare temelin altındaki zeminlerin oturma davranışı

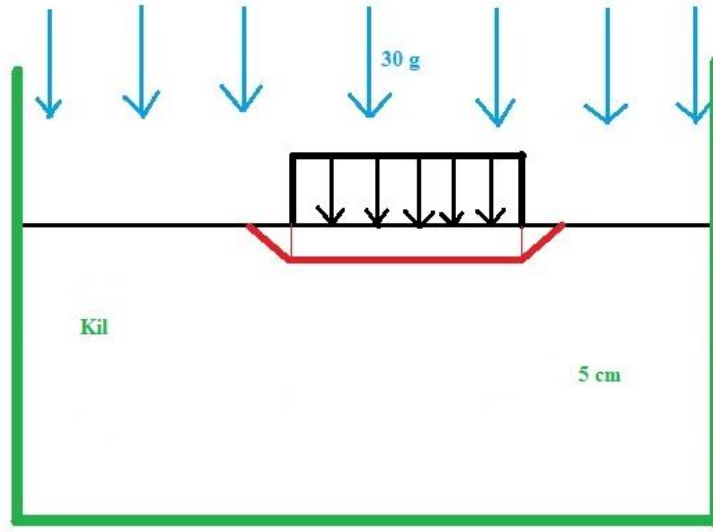


Şekil 5.38. Geoteknik santrifij tasarımı modelinde üniform yüklü rijit dairesel temelin altındaki zeminlerin oturma davranışı

Gerçekleştirilen model deneyinde üniform yüklü rijit temel altındaki kohezyonsuz zeminin oturma davranışı literatüre benzer şekilde üniform gerçekleşmiştir, alttaki kil tabakasında ise üstündeki kum zemin esnek temel görevi görmüştür ve oturmalar buna göre şekillenmiştir. Ayrıca kare ve dairesel temellerin oturma davranışı temelin kesitine benzer şekilde dairesel temelde oval ve kare temelde köşeli oluşmuştur. Kare temel belirlenen yükleme kademesinin üzerinde bir yükleme yapılarak deneye devam edilmiş ve kum zeminde yerel kayma göçmesi (bkz Şekil 5.48. sağ üst) gözlemlenmiştir.



Şekil 5.39. Kohezyonlu zemine oturan üniform yüklü rijit temel basınç ve oturma grafiği

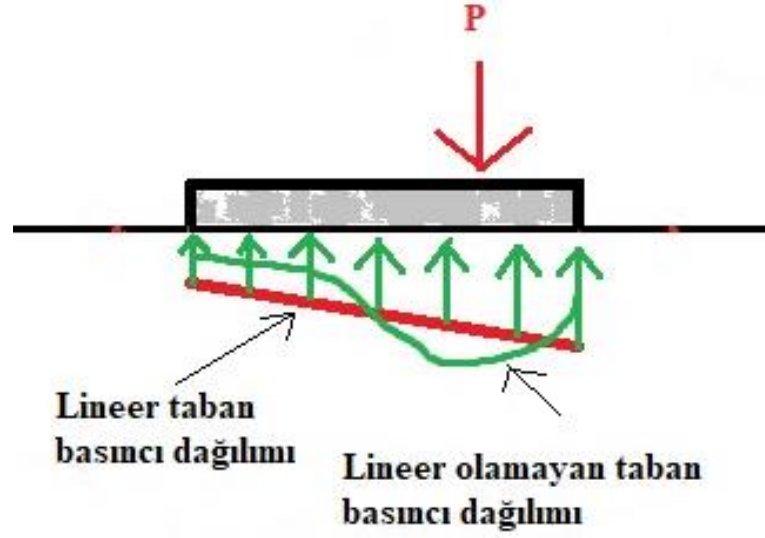


Şekil 5.40. Geoteknik santrifij model tasarımı ve üniform yüklü rijit temelde kil oturma davranışı

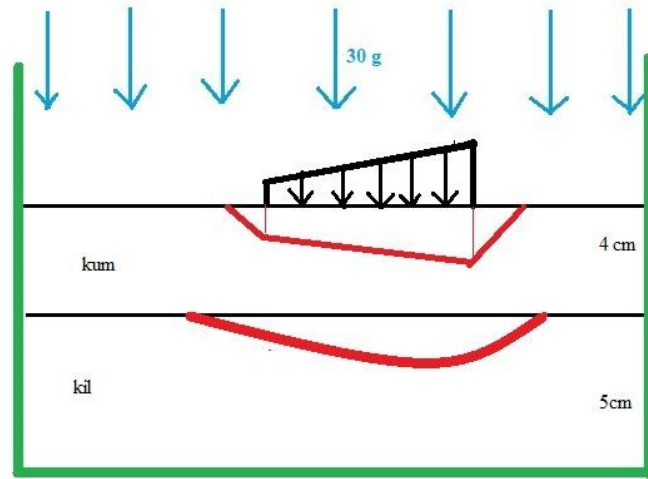


Şekil 5.41. Geoteknik santrifij modelinde kohezyonlu zemine oturan üniform yüklü rijit temelin oturma davranışı

Bu kısımda ise direk kohezyonlu zemine oturan rijit temelin oturma davranışı incelenmiştir. Temelimiz zemine göre oldukça rijit olduğundan oturmalar üniform ve literatüre uygun şekilde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.53. Kohezyonsuz zemine eksantrik yüklü rijit temel basınç ve oturma grafiği



Şekil 5.55.42. Geoteknik santrifüj model tasarımı ve eksantrik yüklü rijit temelin oturma davranışı

Yukarıda önceki modeller ile aynı zemin profiline sahip zemine eksantrik yüklü bir rijit temel oturulmuştur. Eksantrik yüklü temelde zeminin taşıma gücünü çok daha düştüğünü gözlemlenmesi ve alttaki kil zemini oturma davranışının incelenmesi açısından gerçekleştirilmiştir.



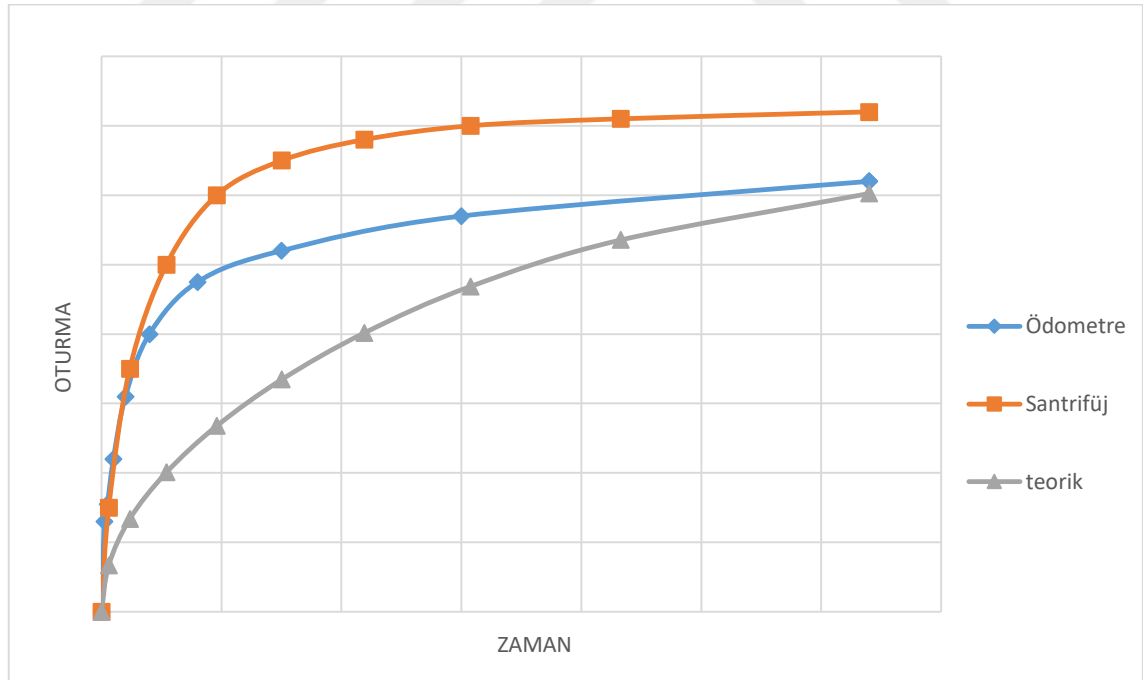
Şekil 5.55. *Geoteknik santrifüj modelinde kohezyonsuz zemine oturan eksantrik yüklü rijit temelin oturma davranışı*

Eksantrik yüklemeye bağlı olarak temel kum zemine batmıştır, genel göçme durumu gözlemlenmiştir ve alttaki kil zeminde de lokal yük artışlarından dolayı farklı oturmalar gözlemlenmiştir. Genel olarak model deneyleri literatürü doğrular nitelikte olmuştur.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

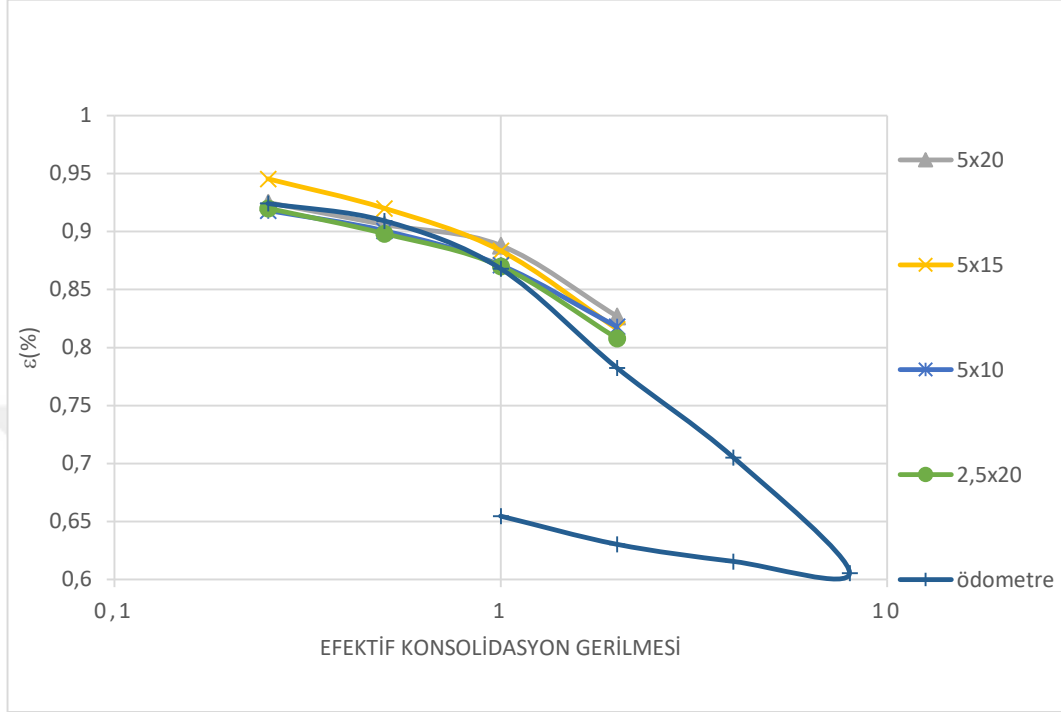
Laboratuvar ölçekli geoteknik santrifüj deney sistemi imal edilmiş olup, geoteknik santrifüj konsolidasyon deneyleri ile yüzeysel temel davranış modelleri ile deney sistemimiz doğrulanmıştır. Yapılan çalışmayla şu sonuçlara varılmıştır:

- Geoteknik santrifüj deney sistemi laboratuvar ölçeğine indirgenmiş olarak imal edilip ve başarı ile deneyler yapılmıştır.
- Gerçekleştirilen kalibrasyon deneylerinde, ödometre deneylerine bağlı teorik konsolidasyon sonuçları imal edilen deney sistemini doğrulamıştır.
- Test edilen gerilme aralıklarında Geoteknik santrifüj deney sistemi ile teorik konsolidasyon sonuçları zemin konsolidasyon davranışını yansıtmaları açısından uyumlu çıkmıştır.
- Teorik olarak hesaplanan konsolidasyon oturması ile geoteknik santrifüj oturması arasında maksimum hata payı %20 olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca modellerin kendi aralarındaki karşılaştırmalarında daha az hata payı gözlemlenmiştir.



- Geoteknik santrifüj konsolidasyonu ile teorik konsolidasyon eğrileri karşılaştırıldığında santrifüj konsolidasyon grafiğinin daha çok ödometre deneyi eğrisine benzediği zemin davranışını yakaladığı görülmektedir.

- Gerçekleştirilen deneylerde santrifüj konsolidasyon deneylerinde ivmelendirme hızının oturma grafiklerinde etkin rol aldığı gözlemlenmiştir.



- Gerçekleştirilen geoteknik santrifüj konsolidasyon ve ödometre deneylerinde, ölçek kurallarında da belirtildiği gibi aynı gerilme aralıklarında birim şekil değiştirmelerin eşit olduğu görülmektedir.

- Geoteknik santrifüj konsolidasyon deneylerinde, model yüksekliğinin model genişliğine eşit olduğu durumlarda model kutusunun yüzeylerinde sürtünmenin etkisi ile davranışta farklılıklar gözlemlenmiştir.

- Geoteknik santrifüj konsolidasyon deneylerinin oturma grafiğinin santrifüj ivmesinin ani artışlarına duyarlı olduğu gözlemlenmiştir.

- Model deneylerinde yüzeysel temel oturma davranışları temelin şekline bağlı olarak gelişmiştir, temel yükleme ile ön konsolidasyon basıncını aşan gerilmelerde aşırı deformasyonlar gözlemlenmiştir.

- Üniform yüklü temellerin oturma davranışları ayrıca geoteknik santrifüj dönme düzleminde bir sapma olmadığını göstermiştir.

- Gerçekleştirilen model deneyleri sonucu deney sisteminin gelişmeye açık olduğu ve uygun tasarımdaki platformlara, veri edinme, kontrol, yükleme gibi sistemlerin ilave edilebileceği açıktır.

- Bu çalışmada zemin konsolidasyon davranışı ile yüzeysel temellerin oturması incelenmiş olup, farklı zemin davranışları ve zemin yapıları test edilebilecektir.



KAYNAKÇA

- [1] Zhang, L. M., and Wong, E. Y. (2007). Centrifuge modeling of large-diameter bored pile groups with defects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, (9), 1091-1101.
- [2] Viswanadham, B.V.S. and Rajesh, S. (2009). Centrifuge model tests on clay based engineered barriers subjected to differential settlements. *Applied Clay Science*, 42 (3-4), 460-472.
- [3] Tricarico. M., Madabhushi. G. S. P. and Aversa. S., (2016). Centrifuge modelling of flexible retaining walls subjected to dynamic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 297-306.
- [4] Ha. J. G., Lee. S., Kim. D., Choo. Y. W. (2014). Simulation of soil–foundation–structure interaction of Hualien large-scale seismic test using dynamic centrifuge test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61, 176-187.
- [5] Li, Z., Escoffier, S. and Kotronis, P. (2013). Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil properties: Application to Fontainebleau sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 77-87.
- [6] Ertan, T. (2012). *The Investigation of stability of tunnels and settlements with centrifuge modelling*. M.Sc. Thesis. İstanbul: İstanbul technical university ,graduate school of science engineering and technology.
- [7] Chakraborty, P. and Popescu, R. (2012). Numerical simulation of centrifuge tests on homogeneous and heterogeneous soil models. *Computers and Geotechnics*, 41, 95-105.
- [8] Yu, J., Huang, M., Leung, C.F. and Siyu Li (2017). Upper bound solution of a laterally loaded rigid monopile in normally consolidated clay. *Computers and Geotechnics*, 91, 131-145.
- [9] Moo-Young, H., Myers, T., Tardy, B., Ledbetter, R., Vanadit-Ellis, W., Kim, T. (2003). Centrifuge simulation of the consolidation characteristics of capped marine sediment beds. *Engineering Geology*, 70 (3-4), 249-258.
- [10] Kayabalı, K. ve Balcı, M. C. (2013). *Santrifüj yöntemiyle geçirgenlik ve konsolidasyon parametrelerinin elde edilmesine yönelik ampirik denklemler geliştirilmesi bilimsel araştırma sonuç raporu*. Ankara: Ankara Üniversitesi.
- [11] Ng, C.W.W., Laak, P. V., Tang, W.H., Li, X.S., Shen, C.K. (2001). *The Hong Kong geotechnical centrifuge and its unique capabilities*. Hong Kong: Department of

Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology Clear Water Bay.

- [12] Fox, P. J., Lee, J. and Qiu, T. (2005). Model for Large Strain Consolidation by Centrifuge. *International Journal of Geomechanics*, 5, (4).
- [13] Zhang, G., Hu, Y. and Zhang, J. (2009). New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests. *Measurement*, 42 (1) 87-96.
- [14] Kokkali, P., Abdoun, T. and Zeghal, M. (2018). Physical modeling of soil liquefaction: Overview of LEAP production test 1 at Rensselaer Polytechnic Institute. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 629-649.
- [15] Reid, D., Fourie, A.B. and Watson, S. (2012). Accelerated consolidation of soft clays and mine tailings using a desktop centrifuge. *Proceedings of the 15th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Australia: The University of Western Australia, 43-52.
- [16] Ng, C.W.W., Wang, Y.H. and Zhang, L.M. (2006). *Physical modelling in geotechnics* (6. Edition). Hong Kong: CRC Press.
- [17] Taylor, R.N. (1995). *Geotechnical centrifuge technology*. London: Blackie academic and professional.
- [18] Ovesen, N.K. (1979) The scaling law relationship—panel discussion. *Proc. 7th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Brighton: 319–323.
- [19] James, R.G. (1972) Some aspects of soil mechanics model testing. *In Stress-Strain Behaviour of Soil, Proc. Roscoe Mem. Symp.*, Foulis, Dartmouth: 417–440.
- [20] Schofield, A.N. (1980). Cambridge geotechnical centrifuge operations. *Géotechnique*, 30 (3), 227-268.
- [21] Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J. (1991) Effect of ageing of marine clay and its duplication by high temperature consolidation. *Soils and Foundation*, 31(4), 133-147.
- [22] Ko, H.Y. (1988). Summary of the state-of-the-art in centrifuge model testing. W.H.Craig, R.G.James and A.N.Schofield (ed.), *In Centrifuges in Soil Mechanics*. Rotterdam: Biblioteca, 11–18.
- [23] Holtz, R.D., Kovacs, W.D. and Sheahan, T.C. (2011). *Geoteknik Mühendisliğine Giriş* (Çev. Editörü: A. Erken). Ankara: Nobel akademik.

- [24] Kumbasar, V. ve Kip, F. (1999). *Zemin Mekaniği Problemleri*. (6. Baskı). İstanbul: Çağlayan Basımevi.
- [25] Das, B.M. and Sobhan K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering*. (8. Edition). Stamford: Cengage Learning.
- [26] Madabhushi. G., (2014). *Centrifuge Modelling of Civil Engineering* (1. Edition). Florida: CRC Press.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet Hanifi Alkayış
Yabancı Dil : İngilizce
Doğum Yeri ve Yılı : Adıyaman/ 1994
E-Posta : mehmethanifalkayis@eskisehir.edu.tr

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2016, Erciyes Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümü
- 2011, Adıyaman Anadolu Lisesi