

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KUM KATKILI KİL ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

NUR SELİN TUNÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Arzu OKUCU (Tez Danışmanı)**
Doç. Dr. Eyyüb KARAKAN
Dr. Öğr. Üyesi Banu YAĞCI

BALIKESİR, HAZİRAN- 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Kum Katkılı Kil Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
 - Yararlandığım esere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nur Selin TUNÇ

ÖZET

**KUM KATKILI KİL ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
NUR SELİN TUNÇ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BALIKESİR, HAZİRAN -2025**

İnşaat sahasında karşılaşılan zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilir. Zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde çeşitli yöntemler olup bunlardan biri de katkı malzemelerinin kullanılmasıdır. Kil zeminler çoğunlukla dayanımı düşük zeminler olup şişme, geçirgenlik, dayanım gibi geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde kireç, asfalt, kum, çimento gibi malzemeler kullanılabilir. Bu tezde; kil zemine ince kum ve çimento katılarak geoteknik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Kullanılan kile ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranlarında ince kum, %1 ve %3 oranlarında çimento katılarak kil-kum-çimento karışımı numuneler hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde likit limit, plastik limit, standart proktor, konsolidasyon, permeabilite ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin plastisite indisleri ve zemin sınıfları, kuru birim hacim ağırlıkları, optimum su içerikleri, şişme yüzdeleri, permeabilite katsayıları ve serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Karışımların zemin sınıfı CL olarak belirlenmiştir. Karışımlarda gerçekleştirilen proktor analizlerine göre, içerikteki kum oranının artması su muhtevasında azalmaya yol açarken; kum ve çimento katkıları kuru birim hacim ağırlık değerlerini arttırmıştır. Kil zemine oranla da karışımların kuru birim hacim ağırlık değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Kil zeminde ölçülen su muhtevası değerlerinin karışım zeminlere kıyasla daha düşük olduğu ve kum ve çimento oranı arttıkça bu değerde azalma gösterdiği söylenebilir. Karışım zeminlerde, kum ve çimento oranı arttıkça şişme basınç değerinin azaldığı, kil zemine oranla da azalış gösterdiği gözlemlenmiştir. Karışım zemin içeriğindeki kum ve çimento miktarının, kil zemine göre oranı arttıkça dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir. Permeabilite deneyi sonucunda karışım zeminlerde, kum oranının artmasıyla geçirimsizlik değerinde artış sağlandığı ancak çimento oranındaki artış ile azalış olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, çimento ve kum katkısıyla zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilebileceğini ve yöntemin düşük dayanımlı, şişmeye eğilimli zeminler için uygun bir iyileştirme tekniği olabileceğini düşünülmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Kaolin kili, konsolidasyon deneyi, kum katkılı kil zeminler, permeabilite deneyi, proktor deneyi, tek eksenli basınç deneyi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SAND-AMENDED CLAY SOILS

MSC THESIS

NUR SELIN TUNC

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ARZU OKUCU)

BALIKESIR, JUNE-2025

The soils encountered at construction sites do not always possess the desired properties. There are various methods for improving the geotechnical properties of soils, one of which is the use of additive materials. Clayey soils generally exhibit low strength and materials such as lime, asphalt, sand, and cement can be used to improve their geotechnical characteristics such as swelling, permeability, and strength. In this thesis, the changes in the geotechnical properties of a clayey soil were investigated by adding fine sand and cement. Mixtures of clay, sand, and cement were prepared by adding fine sand at rates of 5%, 10%, 15%, and 20% by weight, and cement at rates of 1% and 3%. The prepared specimens were subjected to liquid limit, plastic limit, standard Proctor, consolidation, permeability, and unconfined compressive strength tests. As a result of the experiments, the plasticity indices and soil classifications of the samples, dry unit weights, optimum water contents, swelling percentages, permeability coefficients, and unconfined compressive strengths were determined. The soil classification of the mixtures was identified as CL. According to the Proctor analyses conducted on the mixtures, an increase in sand content led to a decrease in water content, while the addition of sand and cement increased the dry unit weight values. It was also observed that the dry unit weight values of the mixtures were higher compared to the clayey soil alone. The water content measured in the clayey soil was found to be lower than that of the mixtures, and it was noted that as the sand and cement contents increased, the water content decreased. In the mixture soils, as the proportions of sand and cement increased, the swelling pressure values decreased, showing a reduction compared to the pure clay as well. It was observed that increasing the proportion of sand and cement in the mixtures relative to the clay increased the strength of the soil. According to the results of the permeability test, an increase in sand content led to an increase in permeability, whereas an increase in cement content caused a decrease. The results suggest that the engineering properties of soils can be improved with the addition of sand and cement, and that this method may be a suitable ground improvement technique for soils with low strength and high swelling potential.

KEYWORDS: Sand-amended clay soils, kaolin clay, consolidation test, proctor test, permeability, unconfined compressive strength test

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	7
3.1 Materyal.....	7
3.1.1 Zemin.....	7
3.1.1.1 Kum	7
3.1.1.2 Kaolin kili	8
3.1.1.3 Çimento.....	111
3.2 Yöntem	155
3.2.1 Elek analizi	16
3.2.2 Özgül ağırlık deneyi.....	17
3.2.3 Likit limit deneyi.....	17
3.2.4 Plastik limit deneyi.....	18
3.2.5 Standart proktor deneyi	19
3.2.6 Düşen seviyeli permeabilite deneyi.....	20
3.2.7 Konsolidasyon deneyi	20
3.2.8 Tek eksenli basınç deneyi.....	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	233
4.1 Kilin Atterberg Limitleri Deney Sonucu	233
4.2 Hidrometre Deney Sonucu	32
4.3 Özgül Ağırlık Deney Sonuçları	34
4.4 Standart Proktor Deney Sonuçları.....	36
4.4.1 Karışımların deney sonuçları	36
4.5 Düşen Seviyeli Permeabilite Deney Sonuçları	48
4.6 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	52
4.6.1 Kür sürelerinin tek eksenli basınç mukavemeti üzerindeki etkisi.....	54
4.6.1.1 Üç günlük kür sonundaki tek eksenli basınç mukavemeti değerleri.....	55
4.6.1.2 Yedi günlük kür sonundaki tek eksenli basınç mukavemeti değerleri.....	58
4.6.1.3 On dört günlük kür sonundaki tek eksenli basınç mukavemeti değerleri.....	61
4.7 Konsolidasyon Deney Sonuçları.....	65
5. SONUÇ	93
6. KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	101

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Çimento-kum ve kil	7
Şekil 3.2: İnce kum elek analizi sonucu.....	8
Şekil 3.3: Kaolin kilinin granülometri eğrisi	11
Şekil 3.4:Çimentonun granülometri eğrisi.....	14
Şekil 4.1: Kilin likit limit ve plastik limit deneysel uygulama görselleri.....	24
Şekil 4.2: Kilin likit limit grafiği.....	25
Şekil 4.3: %5 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	26
Şekil 4.4: %5 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	27
Şekil 4.5: %10 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	28
Şekil 4.6: %10 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	28
Şekil 4.7: %15 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	29
Şekil 4.8: %15 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	30
Şekil 4.9: %20 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	30
Şekil 4.10: %20 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği	31
Şekil 4.11: Hidrometre deneyi görselleri.....	32
Şekil 4.12: Kilin granülometri eğrisi.....	33
Şekil 4.13: %1 çimento içeren karışımlara ait granülometri eğrisi.....	33
Şekil 4.14: %3 çimento içeren karışımlara ait granülometri eğrisi.....	34
Şekil 4.15: Tüm karışımlara ait granülometri eğrisi.....	34
Şekil 4.16: Saf kil zeminin kuru birim ağırlık-su muhtevası grafiği.....	38
Şekil 4.17: %5 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	39
Şekil 4.18: %5 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	40
Şekil 4.19: %10 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	41
Şekil 4.20: %10 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	42
Şekil 4.21: %15 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	43
Şekil 4.22: %15 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	44
Şekil 4.23: %20 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	45
Şekil 4.24: %20 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği.....	46
Şekil 4.25: %1 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının kuru birim ağırlık–su muhtevası ilişkisi.....	47
Şekil 4.26: %3 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının kuru birim ağırlık–su muhtevası ilişkisi.....	47
Şekil 4.27: Tüm karışımlarının kuru birim ağırlık–su muhtevası ilişkisi.....	48
Şekil 4.28: Karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği.....	50
Şekil 4.29: %1 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının karışımların permeabilite katsayısı grafiği	51
Şekil 4.30: %3 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının karışımların permeabilite katsayısı grafiği	51

ŞEKİLLER LİSTESİ (devam)

Sayfa

Şekil 4.31: Tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği	52
Şekil 4.32: Proktor için tek eksenli basınç numunelerinin hazırlanması.....	53
Şekil 4.33: Proktor deneyinin yapılması	53
Şekil 4.34: Tek eksenli basınç dayanımı deneyi numuneleri.....	54
Şekil 4.35: Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin gerçekleştirilmesi.....	54
Şekil 4.36: Üç günlük tek eksenli basınç dayanımı grafiği	56
Şekil 4.37: %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	57
Şekil 4.38: %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	57
Şekil 4.39: Tüm karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	58
Şekil 4.40: Yedi günlük tek eksenli basınç dayanımı grafiği.....	59
Şekil 4.41: %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	60
Şekil 4.42: %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	60
Şekil 4.43: Tüm karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	61
Şekil 4.44: On dört günlük tek eksenli basınç dayanımı grafiği.....	62
Şekil 4.45: %1 çimento içeren karışımlara ait serbest basınç dayanımı grafiği	63
Şekil 4.46: %3 çimento içeren karışımlara ait serbest basınç dayanımı grafiği	63
Şekil 4.47: Tüm karışımlara ait serbest basınç dayanımı grafiği	64
Şekil 4.48: %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil 4.49: %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	65
Şekil 4.50: Tüm karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	65
Şekil 4.51: Konsolidasyon deneyine ait numune yerleştirme ve düzenek hazırlama aşamaları	66
Şekil 4.52: Konsolidasyonda kullanılan ekipmanlar: yükleme ünitesi ve hassas ölçüm sistemi	67
Şekil 4.53: Saf kil konsolidasyon grafiği.....	71
Şekil 4.54: %5 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği	73
Şekil 4.55: %5 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği	75
Şekil 4.56: %10 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği.....	77
Şekil 4.57: %10 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği.....	79
Şekil 4.58: %15 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği.....	81
Şekil 4.59: %15 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği.....	83
Şekil 4.60: %20 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği.....	85
Şekil 4.61: %20 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği.....	87
Şekil 4.62: %1 çimentolu karışımların hacimsel sıkışma-konsolidasyon yükü grafiği.....	88
Şekil 4.63: %3 çimentolu karışımların hacimsel sıkışma-konsolidasyon yükü grafiği.....	89
Şekil 4.64: Tüm karışımların hacimsel sıkışma-konsolidasyon yükü grafiği.....	89
Şekil 4.65: %1 çimentolu karışımların boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği	90
Şekil 4.66: %3 çimentolu karışımların boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği	90
Şekil 4.67: Tüm karışımlara ait boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği.....	91

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Kaolin kilinin kimyasal özellikleri.....	11
Tablo 3.2: Çimentonun kimyasal özellikleri	14
Tablo 3.3: Çimentonun fiziksel özellikleri.....	15
Tablo 3.4: Çimentonun diğer özellikleri	15
Tablo 3.5: Deney numunelerine ait notasyonlar.....	16
Tablo 3.6: Deney numunelerinde kullanılacak malzeme gramajları	16
Tablo 4.1: Zemin sınıflandırma tablosu.....	24
Tablo 4.2: Kilin likit limit tablosu	25
Tablo 4.3: %5 Kum %1 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu.....	26
Tablo 4.4: %5 Kum %3 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu.....	27
Tablo 4.5: %10 Kum %1 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu	27
Tablo 4.6: %10 Kum %3 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu	28
Tablo 4.7: %15 Kum %1 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu	29
Tablo 4.8: %15 Kum %3 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu	29
Tablo 4.9: %20 Kum %1 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu	30
Tablo 4.10: %20 Kum %3 çimento katkıli zeminin likit limit tablosu	31
Tablo 4.11: Zeminlerin kıvam limitleri, plastisite indisleri ve zemin sınıfları tablosu.....	31
Tablo 4.12: Kullanılan malzemelerin özgül ağırlık tablosu	36
Tablo 4.13: Saf kil zeminin proktor deney sonuçları.....	37
Tablo 4.14: %5 kum %1 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	38
Tablo 4.15: %5 kum %3 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	39
Tablo 4.16: %10 kum %1 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	40
Tablo 4.17: %10 kum %3 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	41
Tablo 4.18: %15 kum %1 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	42
Tablo 4.19: %15 kum %3 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	43
Tablo 4.20: %20 kum %1 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	44
Tablo 4.21: %20 kum %3 çimento katkıli zeminin proktor deney sonuçları.....	45
Tablo 4.22: Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık tablosu	46
Tablo 4.23: Karışımların geçirgenlik katsayıları	49
Tablo 4.24: Tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı tablosu.....	50
Tablo 4.25: Üç günlük tek eksenli basınç dayanımı sonuçları	56
Tablo 4.26: Yedi günlük tek eksenli basınç dayanımı sonuçları	59
Tablo 4.27: On dört günlük tek eksenli basınç dayanımı sonuçları.....	62
Tablo 4.28: Katkı oranlarına bağlı şişme davranışları	67
Tablo 4.29: Saf kil konsolidasyon sonuçları	70
Tablo 4.30: %5 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları	72
Tablo 4.31: %5 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları	74
Tablo 4.32: %10 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları	76
Tablo 4.33: %10 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları	78
Tablo 4.34: %15 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları	80
Tablo 4.35: %15 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları	82
Tablo 4.36: %20 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları	84
Tablo 4.37: %20 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları	86
Tablo 4.38: Tüm karışımların konsolidasyon yükleri altında hacimsel sıkışma değerleri..	88

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al₂O₃	: Alüminyum oksit
ASTM	: Amerikan test ve malzeme enstitüsü
a_v	: Sıkışma katsayısı
BaO	: Baryum oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
Cc	: Şişme indisi
CL	: Düşük plastisiteli kil
Cl	: Klorür
Cm	: Santimetre
Cr₂O₃	: Krom (III) oksit
cv	: Konsolidasyon katsayısı
Ç	: Çimento
e %	: Boşluk oranı
EN	: Avrupa standardı
Fe₂O₃	: Demir (III) oksit
Gr	: Gram
G_s	: Özgül ağırlık
h	: Oturma farkı
H₂O	: Hidrojen oksit
h_b	: Boşluk yüksekliği
h_o	: Numune yüksekliği
ISO	: ISO teknik şartnamesi
k	: Geçirgenlik katsayısı
K	: Kum
K. num. ağ.	: Kuru numune ağırlığı
K. num.	: Kuru Numune
K₂O	: Potasyum oksit
Kgf	: Kilogram kuvvet
KK	: Kaolin kil
k_t	: Deney sırasında ölçülen geçici geçirgenlik katsayısı
L_p	: Plastik indis
MPa	: Megapaskal
M_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
Na₂O	: Sodyum oksit
qu	: Tek eksenli basınç mukavemeti
SiO₃	: Silikat
SO₃	: Kükürt trioksit
Su muh.	: Su muhtevası
TiO₂	: Titanyum dioksit
TS	: Türk Standartları
UCS	: Tek eksenli basınç dayanımı
W_L	: Likit limit
W_p	: Plastik limit
Y. num.	: Yaş numune
μ₂₀	: 20° sıcaklıktaki suyun viskozitesi
μ_t	: Deneyin yapıldığı sıcaklıktaki viskozitesi
ρ_L	: Kullanılan sıvının yoğunluğu
ρ_w	: Suyun Yoğunluğu

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi ve katkılarıyla yanımda olan başta değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Arzu OKUCU ile Araş. Gör. Sayın Ali POLAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik gelişimime sağladıkları katkılar ve sabırlı rehberlikleri, bu çalışmanın en önemli yapı taşlarından biri olmuştur.

Laboratuvar süreçlerinde bana destek veren Protest Yapı Araştırma ve Test Merkezi ile Rota Jeoteknik Zemin ve Kaya Laboratuvarı'na; deneylerde teknik yardım sağlayan tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu süreçte her koşulda yanımda olan, sabırları ve sevgileriyle bana güç veren canım annem Tülin TUNÇ, babam İsmail TUNÇ ve kardeşim Elif TUNÇ'a; ailem gibi hissettiren yakın arkadaşlarıma ve benden desteğini esirgemeyen Mücahit İNCE'ye sonsuz teşekkür ederim.

Balıkesir, 2025

Nur Selin TUNÇ

1. GİRİŞ

Zemin Mekaniği bilimi, inşaat mühendisliğinin temel dallarından biri olup, yapıların güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü şekilde inşa edilebilmesi için zemin davranışlarının doğru analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu bilim dalı, ilk kez 1920’li yıllarda Karl Terzaghi tarafından sistematik olarak ele alınmış ve mühendislik literatürüne “Zemin Mekaniği’nin babası” olarak geçmiştir. Terzaghi’nin öncülüğünde geliştirilen temel prensipler, günümüzde de yapı temellerinin tasarımı, oturma hesapları ve zemin iyileştirme yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır. (Karslıoğlu, Mert ve Onur, 2021; Sünbül vd., 2021).

Tarihsel olarak zemin, barınak yapımından sulama kanallarına kadar çok çeşitli alanlarda kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olmuştur. Ancak günümüzde modern mühendislik yapılarının karmaşıklığı arttıkça, zeminin yalnızca doğal bir taşıyıcı değil, aynı zamanda tasarımla uyumlu hâle getirilmesi gereken bir mühendislik alanı olduğu anlaşılmıştır. Nitekim proje sahalarında karşılaşılan doğal zemin koşulları çoğu zaman yapıların gereksinimlerini karşılamaktan uzaktır. (Gürel ve Dereli, 2023; Çakmak, 2021).

İnşaat projelerinde yapıların güvenli bir şekilde inşa edilebilmesi, temel zeminin taşıma gücüne ve mühendislik özelliklerine doğrudan bağlıdır. Ancak çoğu zaman yapıların inşa edileceği doğal zeminler, ideal mühendislik niteliklerinden uzak olup; yüksek plastisite, düşük dayanım ve aşırı oturma gibi problemler gösterebilmektedir. Bu gibi durumlarda, yapı güvenliğini sağlamak ve servis ömrünü uzatmak amacıyla zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulması kaçınılmaz hâle gelmektedir. Tarihte de benzer uygulamalar görülmektedir. Örneğin, Osmanlı döneminde deniz kıyısında inşa edilen Haydarpaşa Garı gibi yapıların, zemin yetersizliği nedeniyle ahşap kazıklar üzerine oturtulduğu bilinmektedir. (Öser, 2010; Çimen ve Keleş, 2020).

Günümüzde zemin iyileştirme teknikleri, mühendislik disiplinleri içerisinde daha sistematik ve bilimsel yaklaşımlarla ele alınmakta; her zemin türü için farklı çözümler geliştirilmektedir. Özellikle taşıma kapasitesi düşük, yüksek oturma potansiyeline sahip kumlu kil zeminler, mühendislik yapılarında sorun teşkil edebilecek nitelikte olduğundan bu zeminlerin özelliklerinin detaylı şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu zeminlerin davranışlarını anlamaya yönelik çalışmalar, iyileştirme ihtiyacının hangi koşullarda ortaya çıktığını ve hangi yöntemlerle müdahale edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu

bağlamda, bu tez çalışması; kaolin esaslı kumlu kil zeminlerin mühendislik özelliklerini deneysel olarak incelemeyi, çeşitli karışım oranlarıyla oluşturulan numunelerin taşıma gücü, sıkışabilirlik ve geçirgenlik gibi parametreler açısından değerlendirilmesini ve elde edilen verilerin literatürle karşılaştırılarak optimum davranış gösteren bileşimleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Çimento katkısı bu değerlendirme kapsamında yalnızca bir iyileştirici parametre olarak ele alınmıştır. (Selçukhan ve Ekinci, 2021; Soysal ve Dehghanian, 2021).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Alkroosh vd., (2021) yapmış olduğu bu çalışma, Irak'ın güneyindeki Sumer kasabasından alınan düşük plastisiteli bir kilin mekanik davranışı üzerine kum içeriğinin etkisini araştırmaktadır. Numuneler, kil ağırlığının %0, %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında kum içerecek şekilde hazırlandığı görülmüştür. Standart Proktor ve serbest basınç deneyleri yapılmış ve optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve kayma dayanımı belirlenmiştir. Sonuçlar, kum içeriği %30'a kadar arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığında kademeli bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. En yüksek kuru birim hacim ağırlığı, %12'lik optimum su muhtevasına karşılık gelen 1,90 g/cm³ değerine ulaşmaktadır. Ayrıca, bu çalışma kayma dayanımının kum yüzdesindeki artışla ters orantılı olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, kuru birim hacim ağırlığının, numune ağırlığının %30'una kadar olan kum oranı artışıyla birlikte arttığını göstermektedir. Kuru birim hacim ağırlığındaki maksimum artış, eklenen kum oranı %30 olduğunda elde edildiği saptanmıştır. Eklenen kumun yüzdesi arttıkça optimum su muhtevası azalmıştır. Kayma dayanımı, artan kum oranıyla ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Kum oranındaki artışla birlikte, başlangıçta kayma dayanımında belirgin bir azalma gözlemlenmiş, ardından bu azalmanın daha dengeli bir şekilde devam ettiği belirlenmiştir.

Batman'ın (2015) yaptığı çalışmada, %0 ile %12 arasında kum oranları içeren kum-kil karışımları üzerinde serbest basınç deneylerinin gerçekleştirildiği görülmüştür. Karışımın maksimum kayma direncinin %10 kum içeren karışıma kadar arttığını ve daha yüksek kum oranı içeren karışımlarda kayma direncinin azaldığının belirlendiği tespit edilmiştir. %10'dan daha fazla kum içeren karışımlarda, drenajsız kayma mukavemetindeki azalmanın deney sırasında ölçülemeyen sürtünme parametresinin gelişiminden kaynaklanabileceği ifade edilmektedir.

Topçuğlu ve Gürocak (2022) tarafından yapılan çalışmada, bentonit zemin üzerinde farklı oranlarda kullanılan katkı malzemelerinin kompaksiyon özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, sönmüş kireç, uçucu kül ve farklı karakterdeki tuf örnekleri (asidik ve bazik) belirli oranlarda bentonit ile karıştırılmış ve bu karışımlar üzerinde Standard Proktor deneyleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar hem tekli katkı hem de ikili katkı kombinasyonlarının zemin davranışına olan etkilerini ortaya koymuştur. Tek katkı içeren karışımlar içinde %10 oranında sönmüş kireç ve %5 oranında asidik tufün en iyi

iyileştirmeyi sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, %10 sönmüş kireç ile %10 asidik tuf kombinasyonunun kullanıldığı karışımda optimum su içeriğinde önemli oranda artış ve kuru birim ağırlıkta belirgin azalma elde edilmiştir. Bu sonuçlar, CaO içeriği yüksek olan kireç ile silisyum ve alüminyum açısından zengin asidik tufün birlikte kullanımının zeminde güçlü bağlayıcı reaksiyonlar oluşturduğunu ve stabilizasyon etkisini artırdığını göstermektedir. Çalışma, özellikle bentonit gibi yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde volkanik türevli puzolanların kireçle birlikte kullanımının etkin bir yöntem olabileceğini ortaya koymuştur.

Kılıç'ın (2008) yaptığı çalışmada, farklı bölgelerden (West Ashling, Hamble ve Emsworth) alınan kil zeminlerin çimento katkısıyla iyileştirilebilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda zemine %6, %10 ve %15 oranlarında çimento eklenerek veyn ve üç eksenli basınç deneyleri; %20 ve %25 katkı oranları için ise farklı sürelerde (7, 14 ve 28 gün) serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları, çimento katkısının özellikle düşük oranlarda drenajsız kayma mukavemetini artırdığını ve genel olarak zemin direncinde olumlu etkiler sağladığını göstermiştir. Ancak Emsworth kilinde, çimento oranı arttıkça bazı deneylerde beklenen artış gözlemlenememiştir. Bu durumun, zeminle çimento arasındaki reaksiyon sürecinin farklılığından veya deneysel koşullardan kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Sonuç olarak, çimento katkısının bu tip kohezyonlu zeminlerde mukavemet özelliklerini geliştirdiğini; ancak bölgesel farklılıkların dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Karakan ve Demir (2018) tarafından yapılan çalışmada farklı kil türleri (bentonit ve kaolinit) ile kumun çeşitli oranlarda karıştırılması sonucu oluşan karışımların likit limit değerleri Casagrande ve düşen koni testleriyle incelenmiştir. Araştırmada, kuvars ve ince kum olmak üzere iki farklı kum türü kullanılarak %0'dan %100'e kadar değişen kil-kum karışımlarının hazırlandığı görülmüştür. Deney sonuçları, düşen koni penetrasyonunun karışımdaki su içeriğine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Kaolinit oranının %30'a kadar artmasıyla penetrasyon azalırken, daha yüksek oranlarda tekrar yükseliş gözlemlenmiştir. Bentonit katkısında ise penetrasyon su içeriği sabit tutulduğunda sürekli artmıştır. Hem kaolinit hem de bentonit oranının artması karışımların likit limit değerlerini yükseltmiş, ancak bentonitli karışımlar daha yüksek likit limit değerleri sergilemiştir. Casagrande ve düşen koni testlerinden elde edilen likit limit sonuçları genel olarak uyumlu olup, her iki yöntem için karışım türüne özel bağıntılar önerilmiştir. Literatür bulguları, düşen koni testinin likit

limitin yanı sıra plastik limit belirlemede de güvenilir ve pratik bir yöntem olduğunu desteklemektedir.

Kaathon vd., (2021) yaptığı çalışmada düşük plastisiteli kaolinit içeriğinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bu çalışmada, CEN standardında bir kum ile hazırlanan zemin karışımları laboratuvar ortamında test edilmiştir. Altı farklı oranda kaolinit (%10–%70) kullanılarak hazırlanan örneklerde özgül ağırlık, Atterberg limitleri, kompaksiyon ve mikroskobik yapı analizleri yapılmıştır. Deneysel bulgular, kaolinit oranı arttıkça karışımın suya duyarlılığının yükseldiğini, maksimum kuru birim ağırlığın düştüğünü ve optimum su içeriğinin arttığını göstermiştir. Atterberg limit değerleri kaolinit oranıyla birlikte artış göstermiş, bu da bağ yapısının geliştiğini ve buna bağlı olarak plastisite kapasitesinin yükseldiğini göstermektedir. Mikroskobik incelemelerde, belirli kaolinit oranlarında (özellikle %25–40 arası) iri ve ince taneler arasında etkili bir yapı oluştuğu gözlemlenmiş, bu oranlar mühendislik açısından geçiş bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu çalışma, doğal zeminlerin düşük plastisiteli ince taneler içermesi durumunda hem kompaksiyon hem de yapısal bağlamda beklenen zemin davranışlarının tahmin edilebilmesi açısından değerli katkılar sunmaktadır.

Alnımr ve Ray (2023), Suriye'nin Damserkhu bölgesinden alınan yüksek plastisiteli kil zeminler üzerinde yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda (%0–50) kum katkısının zeminin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada; likit limit, plastik limit, plastisite indisi, boyuna deformasyon, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, optimum su muhtevası gibi temel mühendislik parametreleri değerlendirilmiştir.

Araştırma sonuçlarına göre, kum katkısı arttıkça likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde artış ve optimum su muhtevasında düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca %30 kum katkısı ile zeminin rijitliği ve stabilitesi belirgin şekilde artmış, permeabilite değerlerinde ise önce artış sonra düşüş eğilimi tespit edilmiştir. Yazarlar, özellikle %30 ve üzeri kum katkısının; düşük permeabilite, yüksek taşıma kapasitesi ve minimum hacim değişimi hedeflenen mühendislik projelerinde (yol dolguları, baraj gövdeleri, dolgu alanları vb.) kullanılabileceğini önermektedir.

Dehghanian ve İnan'ın (2020) kaolin kil, kum ve çimento kullanarak gerçekleştirdiği bu çalışmada, bu üç bileşenin farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen zemin karışımlarının mekanik davranışları laboratuvar ortamında değerlendirilmiştir. Öncelikle %70 kaolin kil ve

%30 kum oranındaki karışıma ait temel fiziksel özellikler belirlenmiş, bu kapsamda özgül ağırlık, tane dağılımı, kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre zemin, yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girdiği tespit edilmiştir. Standart Proktor deneyiyle numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,62 g/cm³ ve optimum su içeriği %17,9 olarak belirlenmiştir. Ardından, bu karışıma %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento eklenerek hem katkısız hem de katkılı numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, çimento oranındaki artışla birlikte zeminin dayanım özelliklerinde önemli değişimler gözlemlenmiştir. Özellikle %20 oranında çimento içeren numunelerde, oturmanın %9,8'den %1,9'a ve şişme potansiyelinin %4,4'ten %1,4'e düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, çimentonun zemin içerisindeki bağlayıcılığı sayesinde, birim hacim deformasyonlarını azalttığını ve dayanımı artırdığını göstermiştir. Ayrıca, içsel sürtünme açısının belirli bir katkı oranına kadar arttığı, ancak bu değerden sonra düşüş gösterdiği de belirtilmiştir. Çalışma, farklı katkı oranlarının hem kısa vadeli hem de kür süresi boyunca zemin davranışını etkilediğini ortaya koymakta; dolayısıyla çimento katkısının mühendislik açısından uygun oranlarda uygulanmasının, zemin iyileştirme hedeflerine ulaşmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Çabalar vd., (2018) yaptığı araştırmada, yüksek plastisiteli bentonit kili ile farklı tane boyutuna ve şekil özelliklerine sahip kum malzemeleri kullanılarak çeşitli karışımlar hazırlandığı görülmüştür. Amaç, geçirimsizlik gerektiren zemin uygulamalarında optimum malzeme oranlarının belirlenmesi olduğu saptanmıştır. Çalışmada kullanılan bentonit, sodyum-kalsiyum türünde olup doğal olarak temin edilmiş, kum malzemeleri ise yuvarlatılmış dere kumu ve köşeli kırmataş kumu olarak iki farklı şekilde ele alınmıştır. Karışımlar %5, %10, %15 ve %20 oranlarında hazırlanarak optimum su muhtevası, kuru birim hacim ağırlığı, şişme potansiyeli ve plastisite özellikleri deneysel olarak test edilmiştir. İnce taneli (0.075–0.15 mm) kum ile yapılan karışımların, iri taneli (1.0–2.0 mm) olanlara göre daha yüksek kuru birim hacim ağırlığına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, küçük tane çapına ve yuvarlak şekle sahip kumların şişme ve büzülme özelliklerini azaltma konusunda daha etkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda, karışımlarda tane çapı dağılımının mühendislik özellikleri üzerinde şekle oranla daha baskın bir etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu araştırmada ana hedef, kaolin kili, imento ve ince kum kullanılarak zemin özelliklerinin iyileştirilmesidir. Şekil 3.1’de deneylerde kullanılan üç temel malzemenin görsellerine yer verilmektedir. Bu bölümde hazırlanan karışımlar, bu karışımlara uygulanan deneyler, kullanılan standart yöntemler ve hazırlanan numunelere ilişkin bilgiler sunulmaktadır.



Şekil 3.1: Çimento-kum ve kil

3.1.1 Zemin

3.1.1.1 Kum

Deneylerde kullanılacak kum zemin Kosova maden A. Ő.’den temin edildikten sonra yıkama işlemine tabi tutulmuş ve 105 C ($\pm 5^\circ$) sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numune, 0,425 mm ve 0,075 mm açıklığındaki eleklerden geçirilerek elenmiş; bu işlem sonucunda 0,075 mm’nin üzerinde kalan fraksiyon ince kum olarak tanımlanmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Kullanılan kumun özgül ağırlığı 2.66 g/cm³tr. Zeminin temel mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık, elek analizi ve standart Proktor deneyleri ilgili standartlara uygun Şekilde gerçekleştirilmiştir. İnce kumun tane dağılımına ilişkin granülometri eğrisi Şekil 3.2’de sunulmuştur. İri daneli zeminlerin sınıflandırılmasında C_c (eğrilik katsayısı) ve C_u (niformluk katsayısı) kullanılmaktadır. Yapılan elek analizi sonucuna göre C_c değeri 0.9, C_u değeri 5.33 bulunmuştur. Yıkamalı elek analizi sonuçlarına göre zemin, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi kapsamında SP (kötü derecelenmiş kum) grubu içerisinde yer almaktadır. niformluk katsayısı formülü C_u denklem 3.1’de, C_c eğrilik katsayısı formülü ise denklem 3.2’de verilmiştir. İnce kum elek analizi sonucu Şekil 3.2’de verilmiştir.

C_u (niformluk katsayısı) formülü:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

C_c (eğrilik katsayısı) formülü:

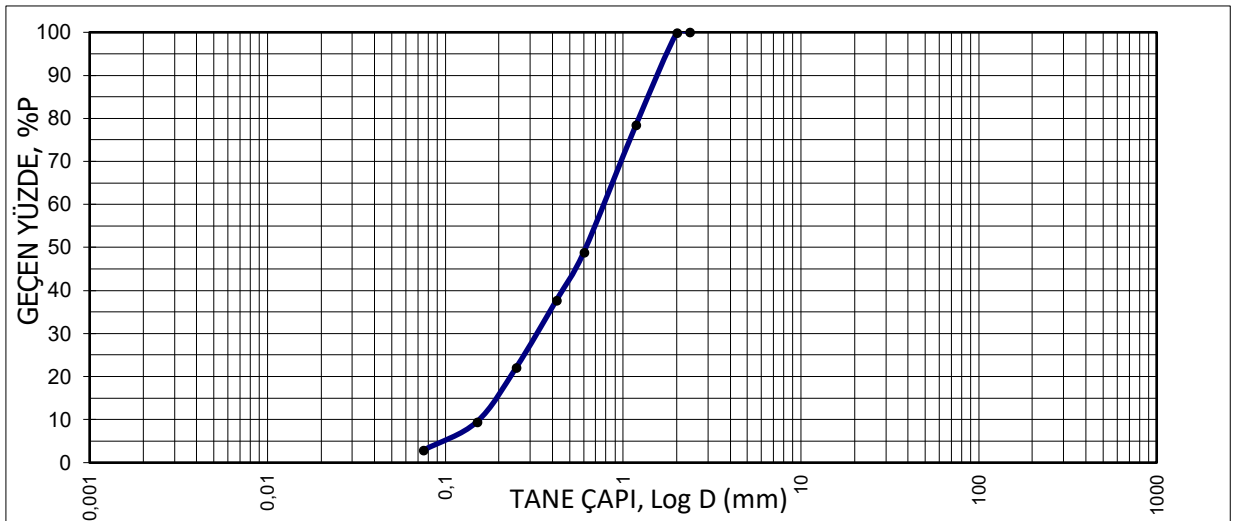
$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (3.2)$$

C_u (üniformluk katsayısı) değerinin bulunması örneği:

$$C_u = \frac{0.7891}{0.1479}$$
$$= 5.33$$

C_c (eğrilik katsayısı) değerinin bulunması örneği:

$$C_c = \frac{(0.3241)^2}{0.1479 \times 0.7891}$$
$$= 0.9$$



Şekil 3.2: İnce kum elek analizi sonucu

3.1.1.2 Kaolin kili

Genel Tanımı ve Mühendislikteki Önemi

Kaolin kili, başta granit olmak üzere çeşitli magmatik ve volkanik kayaların kimyasal ayrışması sonucu oluşan, ince taneli, beyaz renkli ve düşük plastisiteli bir doğal malzemedir. Başlıca minerali kaolinit olan kaolin, özellikle düşük geçirgenliği, düşük plastisite indeksi ve yüksek termal direnci ile dikkat çeken mühendislik özelliklerine sahiptir. Zemin

stabilizasyonunda, zemin iyileştirme projelerinde ve beton katkı maddesi olarak sıkça kullanılmaktadır. Bu yönleriyle kaolin, geoteknik mühendisliği açısından önemli bir doğal zemin malzemesi olarak değerlendirilmektedir (Özer, 2009; Dağar,2017).

Kaolinin mineralojik yapısı gereği su tutma kapasitesi düşüktür ve şişme-potansiyeli zayıftır. Bu nedenle özellikle suya doygun zemin koşullarında hacim değişimi açısından güvenli bir dolgu malzemesi olarak tercih edilmektedir. Yapılan laboratuvar deneylerinde, kaolin katkılı zeminlerin kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi temel parametrelerinde anlamlı değişiklikler gözlemlenmiştir.

Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kaolin killeri mühendislik uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, mineralojik saflığı ve kimyasal bileşimi oldukça önem arz etmektedir. Kaolinin ideal kimyasal bileşimi yaklaşık olarak %46,5 SiO₂, %39,5 Al₂O₃ ve %14 H₂O'dan oluşmaktadır (Canbaz, Gürsoy, Gökçe, 2020). Doğal ortamda bu oranlar mineralin saflığına ve yatak özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. İnşaat mühendisliği uygulamaları için önemli olan, serbest silis miktarının düşük, alüminyum oksit oranının ise yüksek olmasıdır. Bu, malzemenin termal dayanımı kadar çevresel koşullara karşı davranışını da etkiler.

Fiziksel olarak kaolin, çok ince taneli (2 mikron altı), düşük plastisiteli, yumuşak bir kil türüdür. Serbest suya karşı gösterdiği sınırlı reaksiyon nedeniyle, taşıma gücü zayıf olan zeminlerin iyileştirilmesinde uygun bir katkı malzemesi olabilmektedir. Özgül ağırlığı yaklaşık 2,62 g/cm³ olan kaolinin, kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası gibi parametreleri zemin sınıflandırma ve mukavemet analizleri açısından önemlidir (Grim, 1968).

Kaolin Kullanım Alanları ve Geoteknik Uygulamalar

Kaolin, inşaat mühendisliğinde doğrudan ya da katkı maddesi olarak çok çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme uygulamalarında, doğal zeminlerin kohezyon ve dayanım özelliklerini artırmak amacıyla kaolin katkılı karışımlar hazırlanabilmektedir. Özellikle killi zeminlerin işlenebilirliğini artırmak, şişme ve oturma riskini azaltmak amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca kaolin, çimentoyla birlikte kullanıldığında puzolanik reaksiyonları destekleyerek zemin rijitliğini artırabilmektedir (Eskişar, 2019).

Kaolin katkılı zeminlerin laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda, kaolinin tek eksenli basınç dayanımını artırdığı, permeabiliteyi düşürdüğü ve sıkışabilirliği azalttığı gözlemlenmiştir. Bu özellikleri, özellikle dolgu, baraj çekirdekleri, zemin ankrajları ve alt yapı uygulamalarında kaolinin kullanılabilirliğini artırmaktadır.

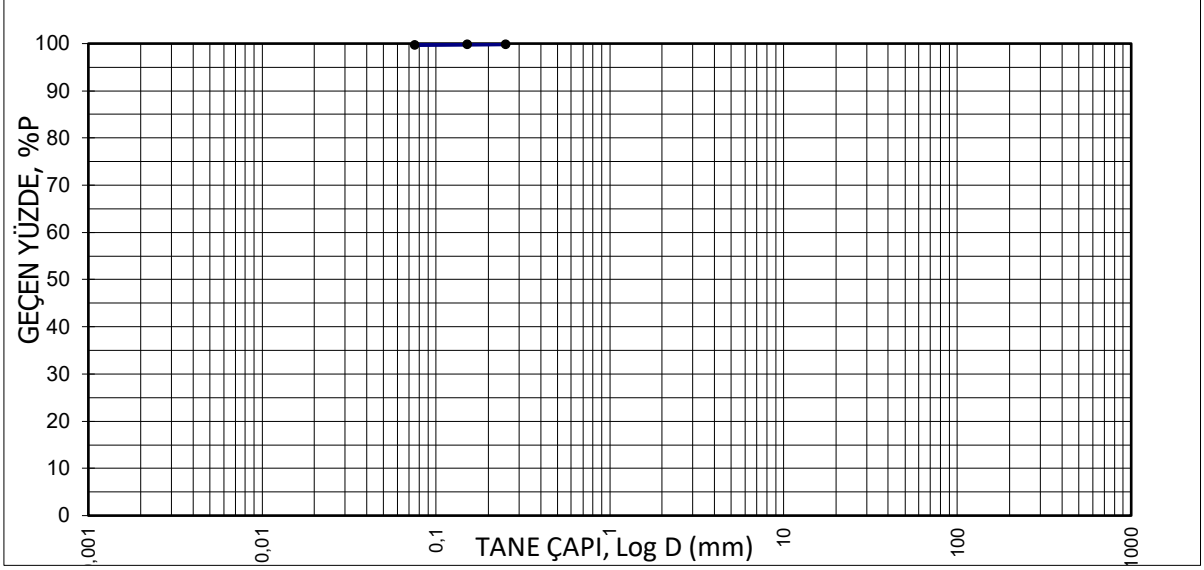
Türkiye’de Kaolin Yatakları ve Endüstriyel Kullanım

Türkiye, kaolin rezervleri bakımından önemli bir potansiyele sahiptir. En büyük rezervler Balıkesir-Sındırgı-Düvertepe sahasında yer almaktadır. Türkiye genelinde tahmini 100 milyon ton rezerv bulunduğu bildirilmekte, bunun yaklaşık 36 milyon tonu işletilebilir niteliktedir (Canbaz vd., 2020). Ancak bu rezervlerin büyük kısmı ham olarak çimento sektöründe kullanılmaktadır.

İnşaat sektöründe kullanılan kaolinler çoğunlukla arı (saf) formda değil, çeşitli safsızlıklar içeren doğal formdadır. Zemin mühendisliği açısından değerlendirildiğinde, Türkiye’deki kaolinlerin mühendislik özellikleri bölgesel farklılık göstermekle birlikte, özellikle içeriğindeki serbest silika ve demir oksit miktarı kaliteyi etkileyen en önemli faktörlerdendir. Bu nedenle kullanım öncesi laboratuvar analizleri ile kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Kaolin Numunesinin Temini ve Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında, kullanılan Kaolin kili “Utelka Maden San. Ve Tic. Ltd. Şti.” firmasından temin edilmiştir. Kaolin kili 2.62 özgül ağırlığa sahiptir. Kaolin kilinin kimyasal özellikleri firmadan alınmıştır. Sonuçlar Tablo 3.1’ de sunulmuştur. Kaolin kilinin granülometri eğrisi Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3: Kaolin kilinin granülometri eğrisi

Tablo 3.1: Kaolin kilinin kimyasal özellikleri

Kaolin kilinin kimyasal özellikleri	
SiO ₃ (%)	69
CaO (%)	0.1
Al ₂ O ₃ (%)	12.17
Fe ₂ O ₃ (%)	05
Na ₂ O (%)	0.2
K ₂ O (%)	≤13.17
TiO ₂ (%)	eser
Cr ₂ O ₃ (%)	0.01
SO ₃ (%)	≤ 7.05
BaO (%)	eser

3.1.1.3. Çimento

Çimentonun Tanımı ve Yapısal Önemi

Çimento, su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonlarla sertleşerek zamanla dayanım kazanan, hidrolik özellikteki bir bağlayıcı yapı malzemesidir. “Çimento” terimi, Latince “caementum” kelimesinden türetilmiş olup, “kırılmış taş” anlamına gelir. İnşaat sektörünün vazgeçilmez malzemesi olan çimento, beton ve harç üretiminde temel bileşendir. Mekanik dayanımı, yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığı arttırması sebebiyle modern yapıların taşıyıcı sistemlerinde ana unsur olarak yer almaktadır. (Albayrak, 2000; Aytaç, 2006)

Bağlayıcı Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Prehistorik ve Antik Çağlarda Kullanılan Bağlayıcılar

M.Ö. 8000 – 4500 (Neolitik Dönem): Kil esaslı doğal malzemeler bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Ateşin keşfi ile alçı ve kireç gibi malzemelerin üretimi başlamıştır.

Antik Mısır: Giza Piramitleri'nde alçı, kireç ve saman karışımı harçlar kullanılmış, yaklaşık 500 bin ton harç tüketilmiştir.

Antik Roma: Volkanik tüf olan puzolan ile kirecin karıştırılmasıyla elde edilen hidrolik bağlayıcılar sayesinde deniz altında bile sertleşebilen betonlar yapılmıştır. Bu dönemde geliştirilen “Roma betonu”, yapı teknolojisinin en önemli adımlarından biri kabul edilir.

Vitruvius ve Bilimsel Temeller

M.Ö. 1. yüzyılda Romalı mimar Vitruvius, De Architectura adlı eserinde, puzolan-kireç karışımının oranlarını ve kullanım alanlarını detaylandırmış; böylece ilk mühendislik yaklaşımıyla bağlayıcı tariflerini sunmuştur. (Dugan,2023)

Modern Çimentonun Doğuşu ve Gelişimi

Hidrolik Harçtan Portland Çimentosuna Geçiş

1759 – John Smeaton: İngiltere’de Eddystone Deniz Feneri’nde su altında sertleşebilen hidrolik bağlayıcı kullanılmış, bu uygulama modern çimentonun temelini atmıştır.

1796 – James Parker: “Roma Çimentosu” adıyla doğal çimento üretimi gerçekleştirilmiştir.

1824 – Joseph Aspdin: Kalker ve kilin pişirilmesiyle üretilen ve “Portland Çimentosu” adı verilen ürünün patentini almıştır. Adını, sertleştikten sonra İngiltere’deki Portland taşına benzemesinden alır.

1850–1900: Avrupa ve ABD’de çimento fabrikaları kurulmuş, betonarme yapım teknikleri yaygınlaşmıştır.

Betonarme Teknolojisinin Gelişimi

1854 – William Wilkinson: İlk betonarme konut.

1889 – Mihailich: İlk betonarme köprü.

1892 – Hennebique: Betonarme sistemin patentini alarak küresel yayılımın önünü açmıştır.

1903–1909: Almanya’da ilk hazır beton üretimi yapılmış, betonarme gökdelenler inşa edilmeye başlanmıştır.

Türkiye’de Çimento Sanayinin Tarihsel Süreci

Osmanlı Dönemi (19. yüzyıl–1923)

İlk Kullanım: İstanbul'un modernleşme süreciyle birlikte, özellikle Pera, Galata gibi bölgelerde çimento ithalatı başlamış ve kagir yapılarda kullanılmaya başlanmıştır.

İlk Fabrika (1910): İstanbul Darıca'da kurulan Arslan Çimento Fabrikası, Osmanlı'daki ilk yerli üretim tesisidir. Ardından Eskişehir fabrikası (1911) kurulmuştur.

Cumhuriyet Dönemi (1923–1950)

Modernleşme ve Sanayileşme: Betonarme yapılarla çağdaş kent görüntüsü hedeflenmiş, çimentoya olan ihtiyaç artmıştır.

Devlet Müdahalesi: 1930'larda çimento fiyatlarının artışı, ithalatın durdurulması ve üretim yetersizliği nedeniyle devlet devreye girmiş; 1937'de "Türk Çimento Normları" çıkarılmış, 1943'te Sivas Çimento Fabrikası kurulmuştur.

Savaş Etkileri (1939–1945): 2. Dünya Savaşı süresince çimento üretimi ciddi sekteye uğramış, ithalat durmuştur. Fabrikalar kömür ve yedek parça sıkıntısı nedeniyle üretimi azaltmıştır.

1950 Sonrası Gelişmeler

Liberal Ekonomi ve Özel Sektör Katılımı: 1950'li yıllarda devlet yatırımlarına ek olarak özel sektör de çimento üretimine yönelmiş, yeni fabrikalar açılmıştır.

Kurumsallaşma: 1957 yılında Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği kurulmuştur. Bu adım sektörün teknik, ekonomik ve idari açıdan güçlenmesini sağlamıştır.

Puzolanik Katkı Maddeleri ve Çimentonun Sürdürülebilirliği

Çimento üretimi yüksek enerji gerektirmekte ve CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Bu sebeple çevre dostu katkı maddelerinin kullanımı önem kazanmıştır.

Doğal Puzolanlar: Türkiye'de özellikle tras gibi volkanik kökenli doğal puzolanlar kullanılmaktadır.

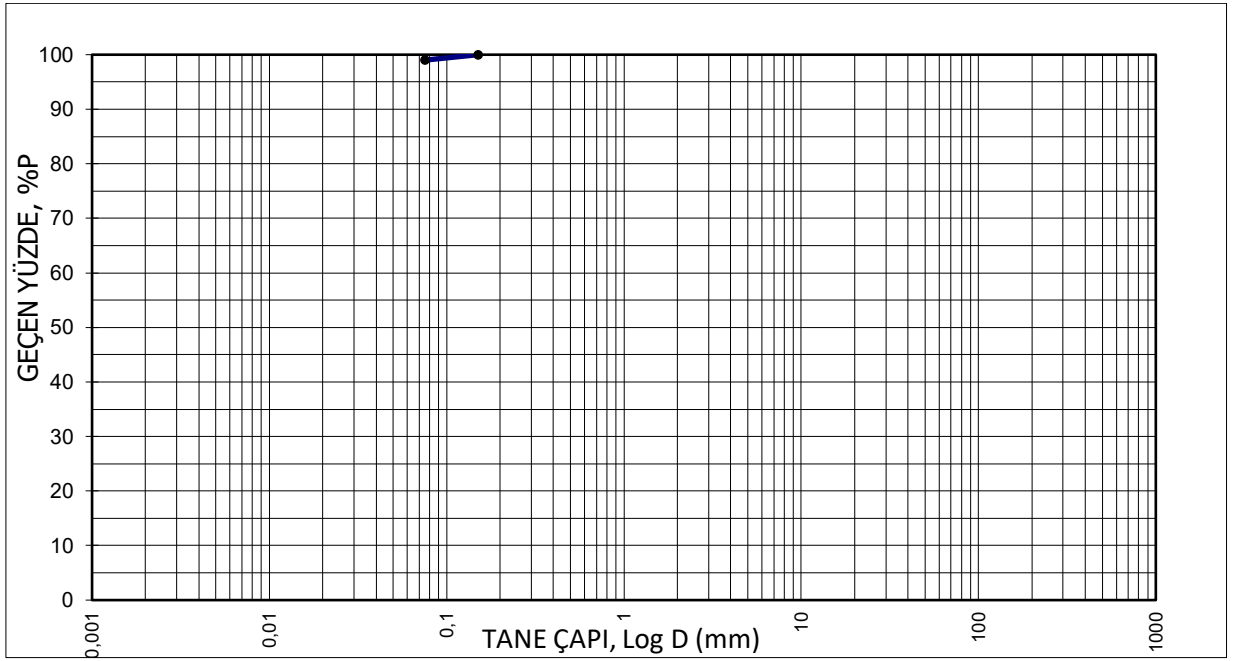
Endüstriyel Katkılar: Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler çimentonun hidratasyon ısısını azaltmakta, sülfat dayanımı, dayanıklılık ve işlenebilirlik özelliklerini artırmaktadır.

Katkı maddeleri, aynı zamanda zararlı bileşiklerle reaksiyona girerek çevresel ve yapısal riskleri de azaltmaktadır. Ancak fazla kullanımları erken dayanımda düşüş gibi olumsuzluklar yaratabilmektedir. (TS 197-1, 2012)

Portland Çimentosu

Portland çimentosu, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan hidrolik bir bağlayıcıdır. Kalker ve kil esaslı hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilerek elde edilen klinkerin, bir miktar alçı taşıyla birlikte öğütülmesi sonucu üretilir (Erdoğan, 2003). Su ile reaksiyona girdiğinde hidratasyon yoluyla sertleşen bu çimento türü, yüksek dayanımı, priz süresi kontrolü ve çevresel dayanıklılığı ile tercih edilmektedir (Neville, 2011).

Deneylerde kullanılan Çimento “Bursa Çimento A.Ş. Kestel /BURSA” tesisinden temin edilmiştir. Kullanılan Portland 42.5R çimentosu 3.13 özgül ağırlığa sahiptir. Çimento'nun kimyasal özellikleri Tablo 3.2' de, fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te, diğer özellikleriyse Tablo 3.4'te verilmiştir. Çimentonun granülometri eğrisi Şekil 3.4' te verilmiştir.



Şekil 3.4: Çimentonun granülometri eğrisi

Tablo 3.2: Çimentonun kimyasal özellikleri

STANDART KİMYASAL ÖZELLİKLER	
Kızdırma Kaybı	≤ %5
Çözünmeyen Kalıntı	≤ %5
Kükürt Trioksit (SO ₃)	≤ %4.0
Klorür (CL ⁻)	≤ %0.1

Tablo 3.3: Çimentonun fiziksel özellikleri

STANDART FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
Priz Başlama Süresi	≥ 60 dakika
Genleşme	≤ 10 mm
2 Günlük dayanım	≥ 20.0 MPa
7 Günlük dayanım	-
28 Günlük Dayanım	≥ 42.5 MPa ≤ 62.5 MPa

Tablo 3.4: Çimentonun diğer özellikleri

ÇİMENTONUN DİĞER ÖZELLİKLER	
Özgül Yüzey (Blaine)	3500 – 3700 cm ² /g
Yoğunluk	3.10 – 3.15 gr/cm ³

3.2 Yöntem

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneysel uygulamalar, ilgili Türk Standartları (TS) ve Amerikan ASTM standartları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan zemin karışımlarının mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla; kullanılan kil için özgül ağırlık tayini (TS 1900-1), elek analizi (TS 1900-2), standart Proktor kompaksiyon deneyi (TS 1900-1), tek eksenli basınç dayanımı (ASTM D2166), konsolidasyon deneyi (TS 1900-2) ve düşen seviyeli permeabilite deneyi (ASTM D5084) ve yapılmıştır. Bu deneyler sayesinde karışımların dayanım, sıkışabilirlik ve su geçirgenliği gibi temel geoteknik parametreleri değerlendirilmiştir. Hazırlanan numunelere ait notasyonlar ve içerdikleri malzeme oranları Tablo 3.5'te, deney numunelerinde kullanılan malzeme gramajları Tablo 3.6'da sunulmuştur.

Tablo 3.5: Deney numunelerine ait notasyonlar

KARIŞIMLAR	NOTASYON
%100 KAOLİN KİL	100KK
KAOLİN KİL+%5 KUM+ %1 ÇİMENTO	5K1Ç
KAOLİN KİL+%10 KUM+ %1 ÇİMENTO	10K1Ç
KAOLİN KİL+%15 KUM+ %1 ÇİMENTO	15K1Ç
KAOLİN KİL+%20 KUM+ %1 ÇİMENTO	20K1Ç
KAOLİN KİL+%5 KUM+ %3 ÇİMENTO	5K3Ç
KAOLİN KİL+%10 KUM+ %3 ÇİMENTO	10K3Ç
KAOLİN KİL+%15 KUM+ %3 ÇİMENTO	15K3Ç
KAOLİN KİL+%20 KUM+ %3 ÇİMENTO	20K3Ç

Tablo 3.6: Deney numunelerinde kullanılan malzeme gramajları

	Kil (gr)	Kum (gr)	Çimento (gr)
100KK	5000	-	-
5K1Ç	5000	250	52.5
5K3Ç	5000	250	157.5
10K1Ç	5000	500	55
10K3Ç	5000	500	165
15K1Ç	5000	750	57.5
15K3Ç	5000	750	172.5
20K1Ç	5000	1000	60
20K3Ç	5000	1000	180

3.2.1 Elek analizi

Elek analizi, zeminlerin tane çapı dağılımını belirlemek amacıyla uygulanan temel bir deney yöntemidir. Bu yöntem, zeminin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesi ve sınıflandırılması açısından önemli olup TS 1900-1 ve TS 1900-2 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmektedir (TS 1900-1, 2006; TS 1900-2, 2006).

Bu çalışmada, kum ve kil karışımları hazırlanmadan önce, kum numunesinin tane boyu dağılımı görmek ve tane boyutu kriterlerini belirlemek amacıyla elek analizi yapılmıştır. Deneylerde, ASTM elekleri kullanılmıştır; bunlar 0.425 mm (No.40) ve 0.075 mm (No.200) elekleridir.

En üste en büyük göz açıklığı gelecek şekilde dizilen eleklerde kalan kum miktarları, ilgili yönetmelikte belirtilen şekilde 0.1 g hassasiyetinde elektronik terazi ile tartılmış ve elekten geçen numune yüzdesi (%P) hesaplanmıştır. Deney yapılan kum numunesine ait

granülometri eğrisi, Şekil 3.1’te sunulmuştur. Yapılmış olan elek analizi sonuçlarına göre, bu kum numunesi, ASTM sınıflandırma sistemine göre SP (kötü derecelenmiş kum) olarak sınıflandırılmıştır.

3.2.2 Özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık deneyinin amacı, zemin danelerinin özgül ağırlığını yani boşluksuz birim hacim ağırlığını belirlemektir. Bu değer, zeminlerin mühendislik özelliklerini anlamak ve çeşitli geoteknik hesaplamalarda kullanmak açısından son derece önemlidir. Deney, özellikle ince daneli zeminlerde uygulanmakta olup, gerektiğinde iri daneli zeminler için de kullanılabilir. TS 1900-1 (2006) standardına göre yürütülen deneyde piknometre, etüv, desikatör, vakum pompası, damıtık su, terazi gibi laboratuvar ekipmanları kullanılmaktadır. Deneyin başlangıcında piknometre şişesi kurutulmuş tartılır (M_1), daha sonra içerisine kurutulmuş ve tartılmış zemin numunesi konularak tartım yeniden yapılır (M_2). Ardından şişeye hava kabarcığı kalmayacak şekilde damıtık su eklenir, vakum uygulanarak zemin içindeki hava uzaklaştırılır. Bu işlemler sonucunda şişe tekrar tartılır (M_3). Son olarak yalnızca su ile doldurulmuş piknometre tartılır (M_4). Bu dört tartım sonucu, zemin danelerinin özgül ağırlığı denklem 3.3’te gösterilen formül ile hesaplanır.

$$G_S = \frac{\rho_L(M_2 - M_1)}{\rho_W(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (3.3)$$

Deneyin güvenilirliği açısından ölçüm iki kez tekrarlanmıştır, elde edilen sonuçların farkı 0.03’ü aşmamıştır. Özgül ağırlık değeri, zeminlerin sıkışabilirliği, taşıma gücü ve geçirgenlik gibi mühendislik davranışlarını etkileyen önemli bir parametre olduğu için deneyin dikkatle ve standarda uygun şekilde yürütülmesi gerekmektedir (TS 1900-1, 2006; Çetinkaya, 2012).

3.2.3 Likit limit deneyi

Likit limit, ince taneli zeminlerin sınıflandırılmasında ve mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. Drenajsız kayma dayanımı, sıkışabilirlik, şişme potansiyeli gibi birçok özellik ile doğrudan ilişkilidir (Özer, 2008).

Zeminlerin likit limiti genellikle iki yöntemle belirlenir: Casagrande ve koni batma yöntemi. Casagrande yöntemi, 1930’lu yıllarda geliştirilmiş olup, günümüzde ASTM D 4318-00 standardı ile kullanılmaktadır. Koni batma yöntemi ise 1920’lerde İsveç’te ortaya çıkmış,

başta Avrupa ülkeleri olmak üzere bazı bölgelerde standart hale gelmiştir (BS 1377: Part 2, 1990; ASTM D 4318-00, 2000).

Casagrande yönteminde, yarı logaritmik grafikte 25 vuruşta kapanan oluğun karşılık geldiği su muhtevası ölçülür. Numune 0.425 mm'lik elekten geçirilerek hazırlanır ve belirli kıvamına gelene kadar su ile karıştırılır. Elde edilen değer grafikte işaretlenir ve akış doğrusuna göre likit limit bulunur (TS 1900-1, 2006).

Koni batma yönteminde ise belirli ağırlıkta ve açıda bir koni, zemin yüzeyine batırılır. Bu yöntem özellikle yüksek plastisiteli zeminlerde daha duyarlı sonuçlar verir. Yöntemler arasında fark, kullanılan mekanizma ve ölçüm prensiplerinden kaynaklanır (Sridharan & Prakash, 2000).

Her iki yöntemin verdiği sonuçlar özellikle likit limiti %100'ü aşan zeminlerde daha fazla farklılık gösterebilir. Casagrande yöntemi genellikle daha yüksek değerler verir. Bu yöntemin yaygın kullanılmasının nedenlerinden biri de geçmişte oluşturulmuş mühendislik korelasyonlarının çoğunun bu yöntemle elde edilmiş verilere dayanmasıdır (Özer, 2008).

Likit limit deneyinde kullanılan yöntemler, farklı ülkelerdeki standartlara göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu bağlamda; İngiliz standardı BS 1377: Part 2, Amerikan standardı ASTM D 4318 ve Türk standardı TS 1900-1, uygulama esasları bakımından karşılaştırıldığında önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. BS 1377 standardında, koni batma yöntemi “kesin yöntem”, Casagrande yöntemi ise “alternatif yöntem” olarak tanımlanmıştır. Buna karşılık, ASTM D 4318 ve TS 1900-1 standartlarında yalnızca Casagrande yöntemine yer verilmekte, koni yöntemi dikkate alınmamaktadır. Bu durum, ülkeler arasında yöntem tercihinde standart farklılıklarının bulunduğunu göstermektedir. Sridharan ve Prakash (2000), farklı yöntemlerle elde edilen likit limit değerlerinin, özellikle yüksek plastisiteli zeminlerde belirgin farklılık gösterebildiğini ve yöntem seçiminin zemin türüne göre dikkatle yapılması gerektiğini vurgulamaktadır (Sridharan & Prakash, 2000).

3.2.4 Plastik limit deneyi

Zeminin su içeriği arttıkça davranışı farklı kıvam aşamalarına geçiş yapmaktadır. Bu geçişlerden biri de plâstik durumdan yarı katı duruma geçişi ifade eden plastik limit (w_p)'tir. Plastik limit, zeminin yoğrulabilir kıvamda kaldığı en düşük su içeriği olarak

tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, bir zemin örneği elde yoğrularak 3 mm çapında çubuk haline getirildiğinde, bu çubuk çatlamaya başladığında ölçülen su muhtevası plastik limiti vermektedir (Kayabalı ve Tüfenkçi, 2007).

Plastik limit, Amerikan ASTM D4318 standardında ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından yayımlanan TS 1900-1 standardında da benzer şekilde tarif edilmektedir. Deney sırasında 425 µm göz açıklığına sahip elekten geçirilen numuneler kullanılır. Hazırlanan zemin numunesi cam bir plaka üzerinde elle yoğrularak, 3 mm çapında silindirik çubuk haline getirilmektedir. Çatlama başladığı anda numune toplanır, tartılır ve etüvde kurutularak nem oranı hesaplanır (TS 1900-1, 2006).

Bu deney yöntemi manuel olup, deneysel sonuçlarda kullanıcıya bağlı olarak bazı belirsizlikler oluşabilmektedir. Whyte (1982), geleneksel elle yuvarlama yönteminde oluşabilecek belirsizlikleri şu şekilde açıklamaktadır: el ile zemine uygulanan basınç, yuvarlama hızı, el-plaka-zemin arasındaki sürtünme ve temas geometrisi gibi faktörler, sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir.

Deneyin uygulanmasında numunenin doğal su içeriği yüksekse, zemin açıkta kurumaya bırakılarak uygun kıvama getirilmelidir (Çelik ve ark., 2003). Ayrıca deneyin en az iki kez tekrar edilmesi önerilmekte olup, elde edilen su muhtevasının ortalaması plastik limit olarak kabul edilmektedir. Likit limit ile plastik limit arasındaki fark ise plâstisite indisi (I_p) olarak tanımlanmakta ve denklem 3.4'te gösterilen formülle hesaplanmaktadır:

$$I_p = w_L - w_p \quad (3.4)$$

Burada:

w_L : likit limit

w_p : plastik limit

3.2.5 Standart proktor deneyi

Standart proktor deneyi, zeminlerin optimum su muhtevası ile bu muhtevaya karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesini amaçlayan önemli bir kompaksiyon deneyidir. Bu parametreler, özellikle zemin dolgularında istenilen sıkışma seviyesinin sağlanabilmesi için kritik öneme sahiptir. Deney, farklı tane boyutu dağılımlarına göre

seçilen üç yöntemden (Metot A, B, C) biri ile gerçekleştirilmektedir. Belirli miktarda zemine aşamalı olarak su eklenip homojen şekilde karıştırılarak hazırlanan numuneler, 2.5 kg'lık tokmakla 305 mm yükseklikten düşürülerek üç tabaka hâlinde kalıpta sıkıştırılmaktadır. Her denemede elde edilen numunelerin yaş ve kuru birim hacim ağırlıkları hesaplanmakta, bu değerler su muhtevası ile birlikte grafik üzerine işlenmektedir. Eğrinin tepe noktası, zeminin optimum su içeriğini ve maksimum sıkışabilirliğini göstermektedir. Bu yöntem sayesinde, sahada uygulanacak zemin sıkıştırma işlemlerinde en verimli su oranı belirlenerek, zemin performansı artırılmış olmaktadır (TS 1900-1, 2006; Çetinkaya, 2020).

3.2.6 Düşen seviyeli permeabilite deneyi

Düşen seviyeli permeabilite deneyi, düşük geçirgenlik özelliklerine sahip ince taneli zeminlerin su geçirgenlik katsayısını belirlemek amacıyla uygulanan laboratuvar yöntemlerinden biridir. Deney, ASTM D5084 standardına uygun olarak gerçekleştirilmekte olup, geçirgenlik ölçümlerinde genellikle silindirik numunelerin yerleştirildiği sızdırmaz basınç hücreleri kullanılmaktadır. Deney öncesinde zemin numunesi doymun hale getirilmekte ve permeabilite düzeneğine yerleştirilmektedir. Numunenin üst kısmına bağlı olan su sütunundaki yükseklik serbest bırakılarak zamana bağlı olarak düşmesi izlenmektedir. Deney boyunca başlangıç ve bitiş yükseklikleri ile geçen süre kaydedilmektedir. Elde edilen veriler, Darcy yasasına dayalı logaritmik bir formül ile değerlendirilmekte ve numunenin geçirgenlik katsayısı hesaplanmaktadır. Deney sırasında sistemde hava kabarcığı bulunmamasına özen gösterilmekte ve ölçümler en az iki kez tekrarlanarak ortalama sonuçlar esas alınmaktadır. Bu yöntem, özellikle $k < 1 \times 10^{-5}$ m/s gibi düşük geçirgenlik değerlerinin belirlenmesinde tercih edilmektedir. (ASTM D5084, 2016)

3.2.7 Konsolidasyon deneyi

Numunenin alt ve üst yüzeylerinden drenaj sağlanarak her bir yük kademesi sonunda zamanla meydana gelen oturmalar komparatör saati ile kaydedilmektedir. Zaman-oturma verileri kullanılarak zeminin sıkışabilirlik parametreleri, konsolidasyon katsayısı (c_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v), şişme potansiyeli ve gerekiyorsa ön konsolidasyon basıncı gibi mühendislik özellikleri belirlenmektedir. Bu parametreler, özellikle yapı temellerinin uzun vadeli oturma analizlerinde ve zeminlerin yük altındaki davranışlarının modellenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Konsolidasyon deneyi, suya doygun, genellikle ince taneli zeminlerin zamanla uygulanan yük altında gösterdiği hacimsel değişimi, diğer bir ifadeyle sıkışma davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen temel laboratuvar deneylerinden biridir. TS EN ISO/TS 17892-5 standardı ile uyumlu olarak yürütölen deney, tek eksenli yükleme prensibine dayanmakta olup, yanal deformasyonu engellenmiş silindirik zemin numuneleri üzerinde uygulanmaktadır. Deney numunesi, iç yüzeyi pürüzsüz ve uygun oranlara sahip metal bir konsolidasyon halkasına yerleştirilmekte; üst ve alt yüzeylerine gözenekli poroz taşı ve süzgeç kağıtları yerleştirilerek eksenel doğrultuda çift yönlü drenaj sağlanmaktadır. Donanımın hazırlanmasının ardından, numune üzerine artan kademelerle düşey yükler uygulanmakta ve her kademedede belirli zaman aralıklarında numunenin düşey deformasyonu ölçölerek kaydedilmektedir. Ölçümler, komparatör veya yüksek hassasiyetli transdüser cihazlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu veriler kullanılarak konsolidasyon katsayısı (c_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v), sıkışma ve şişme indisi (C_c) ile boşluk oranı değişimi gibi mühendislik parametreleri hesaplanmaktadır. Uygulanan yüklerin büyüklüğü ve sayısı zeminin doğasına göre belirlenmekte, şişme eğilimi gösteren zeminlerde başlangıç yük seviyesi buna göre ayarlanmaktadır. Konsolidasyon deneyi sonuçları, temel altı oturmaların öngörölmesi, zemin-yapı etkileşim analizleri ve uzun vadeli deformasyon tahminleri açısından kritik önem taşımaktadır.

3.2.8 Tek eksenli basınç deneyi

Tek eksenli basınç deneyi, özellikle suya doygun, kohezyonlu ve ince taneli zeminlerin kısa süreli yükleme altındaki dayanım özelliklerini değerlendirmek amacıyla uygulanan deneysel bir yöntemdir. TS CEN ISO/TS 17892-7 standardına göre yürütölen bu deney, drenajsız koşullar altında zemin numunesinin taşıyabileceği en yüksek düşey gerilme düzeyinin belirlenmesine dayanmaktadır. Deneyde kullanılan numuneler genellikle 38 mm çapında olup, boyları çaplarının iki katı olacak şekilde hazırlanmaktadır. Yüzeyleri düzgün hale getirilen ve eksenlerine dik olacak şekilde hazırlanan numuneler, dikkatlice yükleme cihazına yerleştirilmektedir. Yük uygulaması, numunenin düşey eksenini boyunca sabit bir hızla gerçekleştirilirken; deformasyonlar, hassasiyetle sıfırlanmış komparatör saati yardımıyla sürekli olarak izlenmektedir. Uygulanan yük ve oluşan boy kısalması verileri, belirli aralıklarla kaydedilir. Kırılma yüzeyinin açıkça gözlemlendiği an veya düşey deformasyonun %15–20 seviyelerine ulaşması halinde, deneyin tamamlandığı kabul edilmektedir. Bu aşamada elde edilen maksimum gerilme değeri, tek eksenli basınç dayanımı (q_u) olarak hesaplanmaktadır. Deney sonunda su içeriği belirlenerek, gerekiyorsa

birim hacim kütlesi de ölçülmektedir. Elde edilen veriler, zeminlerin mühendislik tasarımlarında dayanım kriterlerinin değerlendirilmesinde temel girdi olarak kullanılmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan deneylerin sonuçları irdelenmiştir. Kaolin kiline ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranlarında ince kum ve sabit %1 ve %3 oranlarında çimento katılıp zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Bu katkı oranlarının zemin davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, hazırlanan karışımlar çeşitli laboratuvar deneylerine tabi tutulmuştur. Öncelikle saf kile özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Sonrasında saf kil ve 8 farklı zemin karışımı için standart Proktor deneyleri uygulanarak sıkışabilirlik ve optimum su muhtevası gibi temel kompaksiyon özellikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen optimum su içeriğinde, tüm numuneler için konsolidasyon, permeabilite ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş; böylece katkıların zeminin sıkışma potansiyeline, geçirgenliğine ve dayanım karakteristiklerine olan etkisi araştırılmıştır.

4.1 Kilin Atterberg Limitleri Deney Sonucu

Bu çalışmada, kıvam özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yalnızca saf kaolin numunesine atterberg limit deneyleri uygulanmıştır. Likit limit tayini için casagrande cihazı kullanılarak farklı darbe sayılarında su muhtevası hesaplanmış ve sonuçlar logaritmik grafik üzerinde değerlendirilmiştir. Deneysel bulgulara göre likit limit %32, plastik limit %17 olarak elde edilmiş ve bu verilere göre plastisite indisi %15 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen atterberg limit sonuçları, TS 1500 standardına göre değerlendirildiğinde, zemin örneğinin “düşük plastisiteli kil” (CL) sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Bu limitler, kaolin kilinin su ile etkileşim potansiyelini ve mühendislik davranışını anlamak açısından referans kabul edilmiştir. Kil için zemin sınıflandırma tablosu Tablo 4.1’de, kilin likit limit ve plastik limit deneysel uygulama görselleri Şekil 4.1’de, saf kilin likit limitleri tablosu Tablo 4.2’de, saf kilin likit limitleri grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir, Tablo 4.3’te %5 kum %1 çimento katılı zeminin likit limiti, Şekil 4.3’te %5 kum %1 çimento katılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.4’te %5 kum %3 çimento katılı zeminin likit limiti, Şekil 4.4’te %5 kum %3 çimento katılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.5’te %10 kum %1 çimento katılı zeminin likit limiti, Şekil 4.5’te %10 kum %1 çimento katılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.6’da %10 kum %3 çimento katılı zeminin likit limiti, Şekil 4.6’da %10 kum %3 çimento katılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.7’de %15 kum %1 çimento katılı zeminin likit limiti, Şekil 4.7’de %15 kum %1 çimento katılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.8’de %15 kum %3 çimento katılı zeminin likit limiti, Şekil 4.8’de %15 kum %3 çimento katılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.9’da %20 kum %1 çimento katılı

zeminin likit limiti, Şekil 4.9'da %20 kum %1 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.10'da %20 kum %3 çimento katkılı zeminin likit limiti, Şekil 4.10'da %20 kum %3 çimento katkılı zeminin likit limit grafiği, Tablo 4.11'de zeminlerin kıvam limitleri ve plastisite indisleri tablosu verilmiştir (TS 1500, 2000).

Tablo 4.1: Zemin sınıflandırma tablosu

				SINIFI	
				SİMGE	GRUP ADI ^B
İRİ DANELİ ZEMİNLER (% 50'den Fazlası 75 µm'den büyük)	ÇAKILLAR Kaba Danelerin % 50'den Fazlası	Temiz Çakıllar (% 5'ten az ince içeriyor)	$C_u \geq 4$ ve $1 \leq C_c \leq 3$	GW	Düzensiz dane dağılımlı çakıl ^C
			$C_u < 4$ ve/veya $1 > C_c > 3$	GP	Üniform çakıl ^C
		Kırlı Çakıllar (İncesi % 5'ten fazla) ^A	İnceleri ML, MI veya MH	GM	Siltli çakıl ^C
			İnceleri CL, CI veya CH	GC	Kıllı çakıl ^C
	KUMLAR Kaba Danelerin % 50'den Fazlası	Temiz Kumlar (% 5'ten az incesi var)	$C_u \geq 6$ ve $1 \leq C_c \leq 3$	SW	Düzensiz dane dağılımlı kum ^D
			$C_u < 6$ ve/veya $1 > C_c > 3$	SP	Üniform kum ^D
Kırlı Kumlar (İncesi % 5'ten fazla) ^A		İnceleri plastisite kartında ML, MI veya MH	SM	Siltli kum ^D	
		İnceleri plastisite kartında CL, CI veya CH	SC	Kıllı kum ^D	
İNCE DANELİ ZEMİNLER (% 50'den Fazlası 75 µm'den küçük)	SİTLER VE KİLLER (Likit limiti 35'ten düşük)	Anorganik	$I_p \geq 4$ ve A-doğrusunun üstünde	CL ^E	Düşük plastisiteli kil
			$I_p < 4$ ve A-doğrusu altında	ML ^E	Düşük plastisiteli silt
	SİTLER VE KİLLER (Likit limiti 35'e eşit veya 50'den küçük)	Anorganik	I_p A-doğrusunun üstünde veya üzerinde	CI ^E	Orta plastisiteli kil
			I_p A-doğrusu altında	MI ^E	Orta plastisiteli silt
	SİTLER VE KİLLER (Likit limiti 50 veya yüksek)	Anorganik	I_p A-doğrusunun üstünde veya üzerinde	CH ^F	Yüksek plastisiteli (yağlı) kil
			I_p A-doğrusu altında	MH ^F	Yüksek plastisiteli (elastik) silt
ORGANİK ZEMİN	Koyu renkli, Kokulu, Aşırı organik malzeme içeriyor			PT	Turba

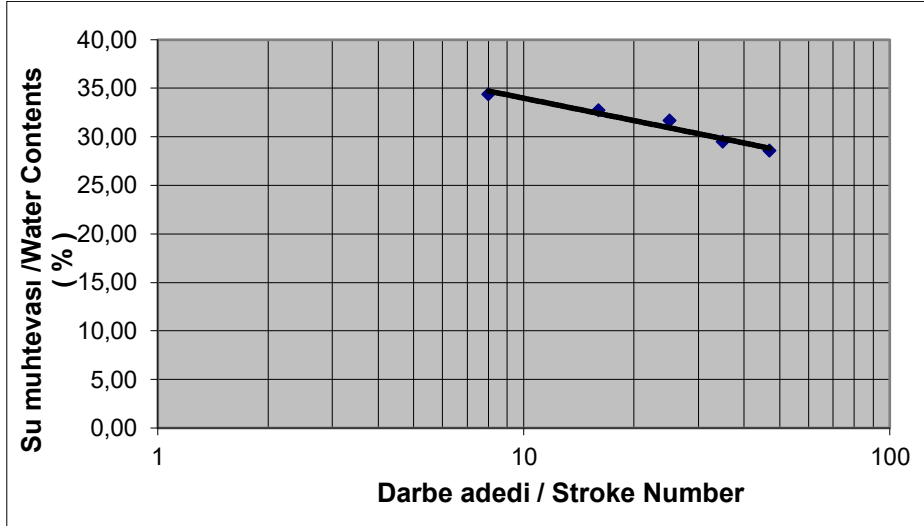
- A. İncelerin oranı %5 - %12 arası ise çift simge kullanılır (Çizelge-III).
B. Zemin moloz içeriyorsa grup adına eklenir.
C. Örnekte %15'ten fazla kum varsa grup adına "kumlu" terimi eklenir.
D. Örnekte %15'ten fazla çakıl varsa grup adına "çakıl" terimi eklenir.
E. W_L kurutulmuş / W_L doğal < 0.75 ise 'O' terimi eklenir.



Şekil 4.1: Kilin likit limit ve plastik limit deneysel uygulama görselleri

Tablo 4.2: Kilin likit limit tablosu

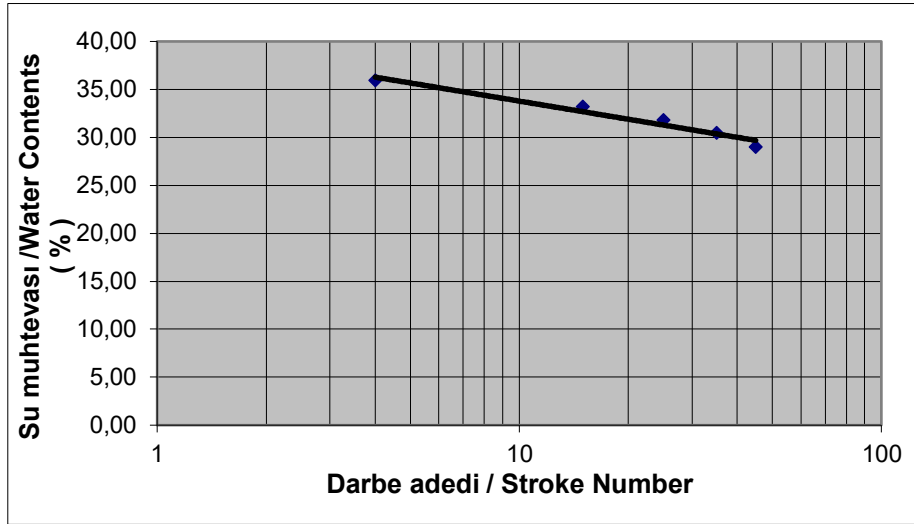
	1	2	3	4	5
Kap No / cup number:	88	89	90	91	92
Darbe adedi / Stroke number:	47	35	24	16	8
Y. num. +kap -Wet sim.+cup	32.17	36.70	32.08	35.33	33.67
K.num. +kap-Dry sim. +cup	28.62	32.37	28.88	31.12	30.08
Kap ağırlığı/ Cup Weight	16.18	17.67	18.44	18.12	19.63
Su miktarı / water Quantity	3.55	4.33	3.20	4.21	3.59
K.Nu.Ağ./Dry Sample Weight	12.44	14.70	10.44	13.00	10.45
Su Muh. /Water Contents	28.54	29.46	30.65	32.38	34.35



Şekil 4.2: Kilin likit limit grafiği

Tablo 4.3: %5 Kum %1 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

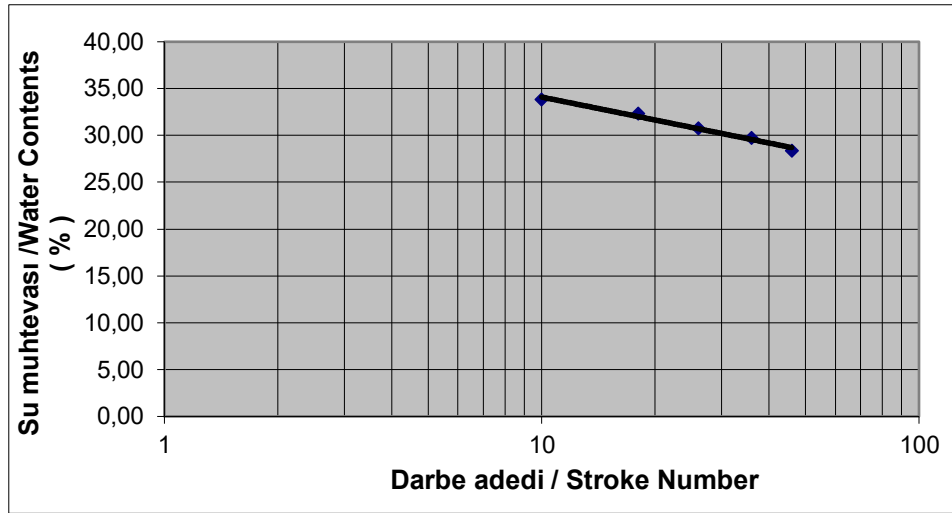
	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	1	2	3	4	5
Darbe adedi/Stroke Number	45	35	26	15	4
Y.num.+kap-WetSim.+cup	44,69	44,91	41,80	44,53	42,33
K.num.+kap-DrySim.+cup	41,30	41,35	38,35	40,04	38,78
Kap ağırlığı/Cup Weight	29,60	29,65	27,50	26,50	28,90
Su miktarı/water Quantity	3,39	3,56	3,45	4,49	3,55
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	11,70	11,70	10,85	13,54	9,88
Su Muh./Watet Contents	28,97	30,43	31,80	33,16	35,93



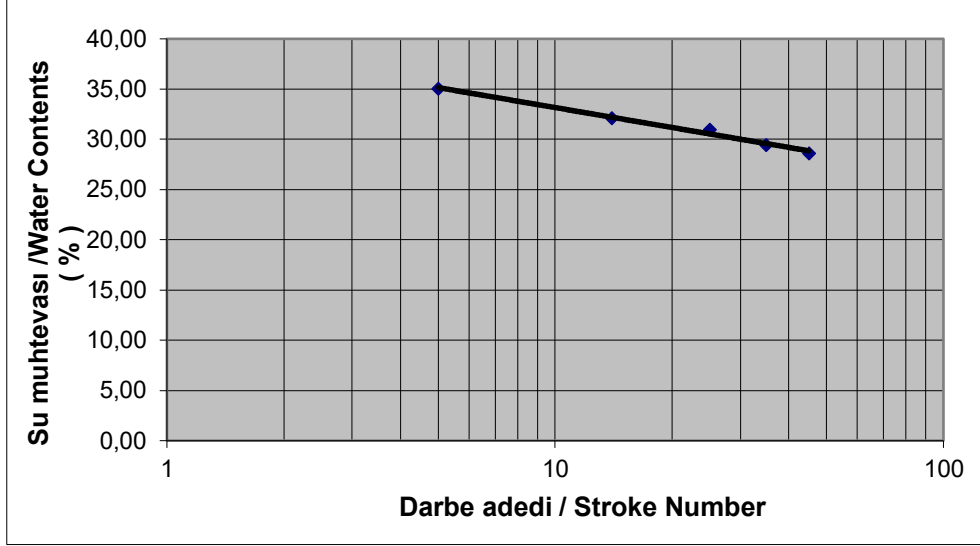
Şekil 4.3: %5 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği

Tablo 4.4: %5 Kum %3 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	6	7	8	9	10
Darbe adedi/Stroke Number	46	36	27	18	7
Y.num.+kap-WetSim.+cup	45,16	43,67	43,67	44,30	42,50
K.num.+kap-DrySim.+cup	41,51	39,72	40,39	40,71	38,25
Kap ağırlığı/Cup Weight	28,65	26,44	29,73	29,61	25,69
Su miktarı/water Quantity	3,65	3,95	3,28	3,59	4,25
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	12,86	13,28	10,66	11,10	12,56
Su Muh./Watet Contents	28,38	29,74	30,77	32,34	33,84

**Şekil 4.4:** %5 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği**Tablo 4.5:** %10 Kum %1 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

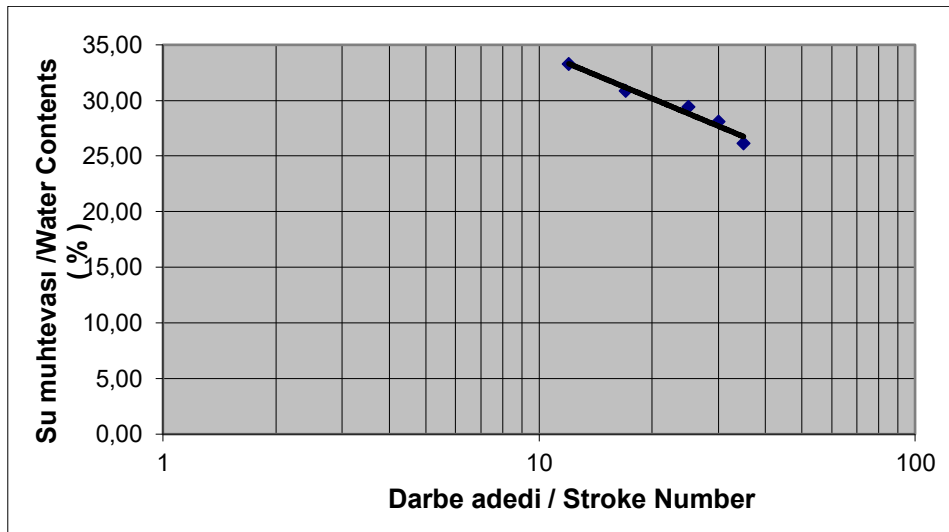
	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	11	12	13	14	15
Darbe adedi/Stroke Number	44	33	23	14	5
Y.num.+kap-WetSim.+cup	44,23	45,68	45,23	42,60	43,80
K.num.+kap-DrySim.+cup	40,58	42,15	41,57	39,16	39,89
Kap ağırlığı/Cup Weight	26,88	29,65	29,64	28,45	28,74
Su miktarı/water Quantity	3,65	3,53	3,66	3,44	3,91
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	13,70	12,50	11,93	10,71	11,15
Su Muh./Watet Contents	26,64	28,24	30,68	32,12	35,07



Şekil 4.5: %10 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği

Tablo 4.6: %10 Kum %3 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

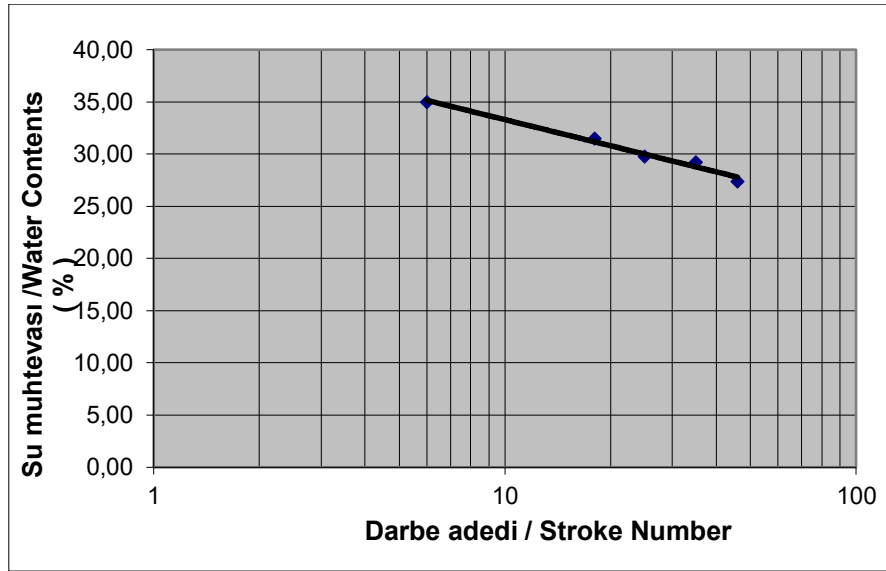
	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	16	17	18	19	20
Darbe adedi/Stroke Number	33	29	23	18	13
Y.num.+kap-WetSim.+cup	41,62	42,35	42,24	45,20	44,26
K.num.+kap-DrySim.+cup	39,00	39,51	39,33	41,02	40,24
Kap ağırlığı/Cup Weight	28,96	29,40	29,44	27,46	28,16
Su miktarı/water Quantity	2,62	2,84	2,91	4,18	4,02
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	10,04	10,11	9,89	13,56	12,08
Su Muh./Watet Contents	26,10	28,09	29,42	30,83	33,28



Şekil 4.6: %10 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği

Tablo 4.7: %15 Kum %1 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

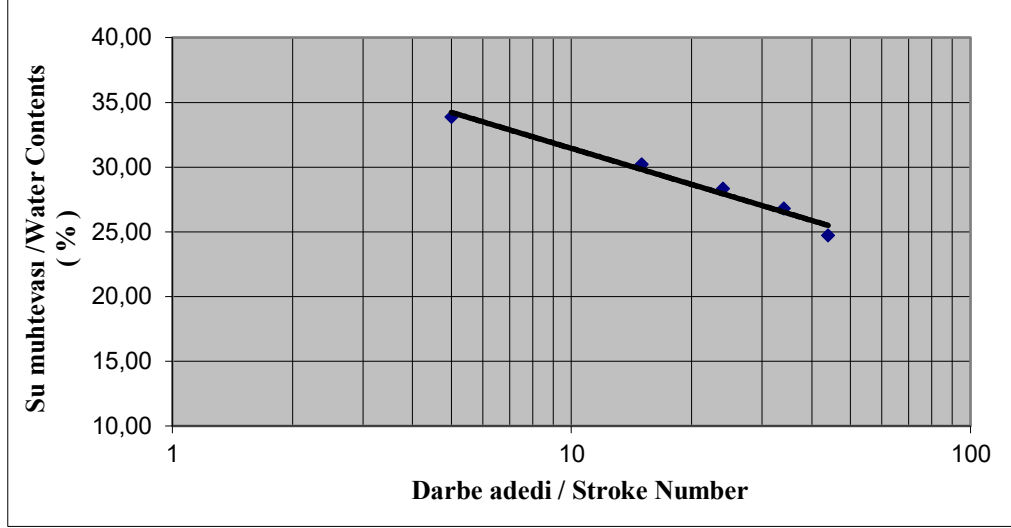
	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	21	22	23	24	25
Darbe adedi/Stroke Number	46	35	26	17	6
Y.num.+kap-WetSim.+cup	42,60	41,93	41,93	45,30	42,90
K.num.+kap-DrySim.+cup	39,79	39,29	39,18	40,97	39,24
Kap ağırlığı/Cup Weight	28,54	29,49	29,44	26,70	28,66
Su miktarı/water Quantity	2,81	2,64	2,75	4,33	3,66
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	11,25	9,80	9,74	14,27	10,58
Su Muh./Watet Contents	27.1	28,2	28,23	30,34	34,59



Şekil 4.7: %15 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği

Tablo 4.8: %15 Kum %3 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

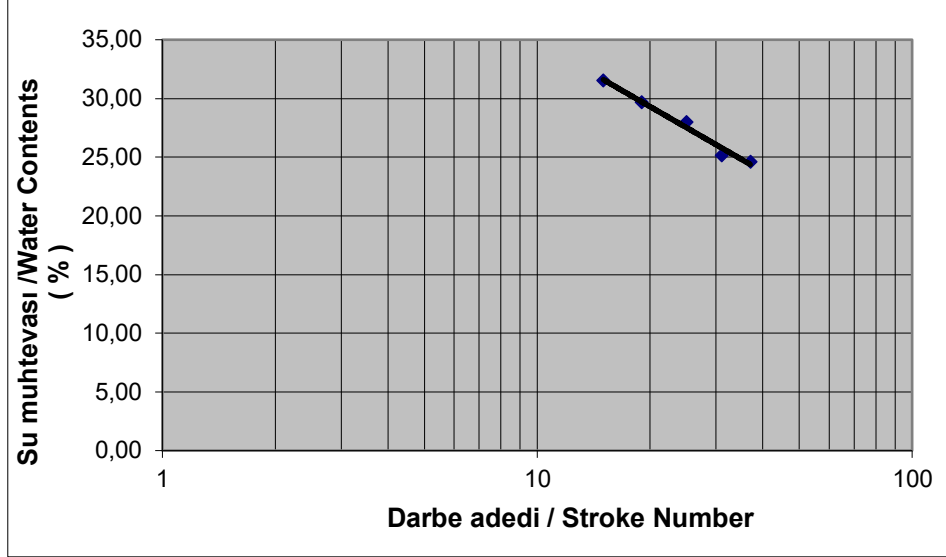
	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	6	7	8	9	10
Darbe adedi/Stroke Number	44	34	24	15	5
Y.num.+kap-WetSim.+cup	42,90	47,77	40,36	46,13	45,68
K.num.+kap-DrySim.+cup	39,41	43,98	38,04	42,09	41,50
Kap ağırlığı/Cup Weight	25,30	29,85	29,85	28,72	29,16
Su miktarı/water Quantity	3,49	3,79	2,32	4,04	4,18
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	14,11	14,13	8,19	13,37	12,34
Su Muh./Watet Contents	24,73	26,82	28,33	30,22	33,87



Şekil 4.8: %15 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği

Tablo 4.9: %20 Kum %1 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

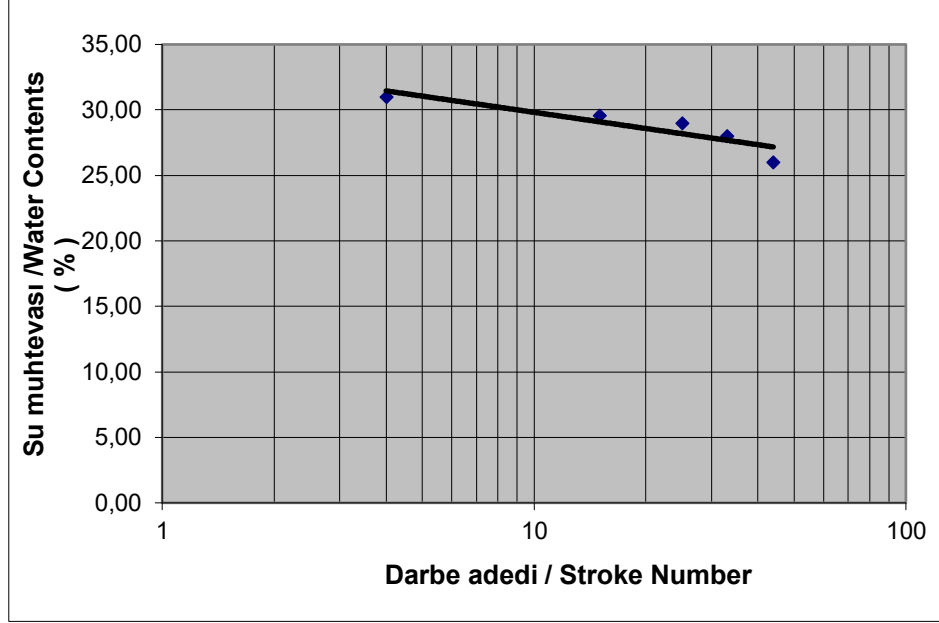
	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	31	32	33	34	35
Darbe adedi/Stroke Number	37	31	25	19	15
Y.num.+kap-WetSim.+cup	45,23	42,59	42,91	46,19	44,81
K.num.+kap-DrySim.+cup	42,11	39,78	40,17	41,71	40,48
Kap ağırlığı/Cup Weight	29,44	28,61	29,84	25,90	26,75
Su miktarı/water Quantity	3,12	2,81	2,74	4,48	4,33
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	12,67	11,17	10,33	15,81	13,73
Su Muh./Water Contents	24,63	25,16	26,52	28,34	31,54



Şekil 4.9: %20 Kum %1 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği

Tablo 4.10: %20 Kum %3 çimento katkılı zeminin likit limit tablosu

	1	2	3	4	5
Kap No/Cup Number:	36	37	38	39	40
Darbe adedi/Stroke Number	44	33	23	15	4
Y.num.+kap-WetSim.+cup	43,26	46,37	43,11	42,80	45,62
K.num.+kap-DrySim.+cup	40,34	42,37	40,21	39,11	41,09
Kap ağırlığı/Cup Weight	28,64	26,90	29,70	26,45	27,16
Su miktarı/water Quantity	2,92	4,00	2,90	3,69	4,53
K.Nu Ağ./Dry SampleWeight	11,70	15,47	10,51	12,66	13,93
Su Muh./Watet Contents	25,96	27,86	28,59	29,15	31,52



Şekil 4.10: %20 Kum %3 çimento katkılı zeminin kilin likit limit grafiği

Tablo 4.11: Zeminlerin kıvam limitleri, plastisite indisleri ve zemin sınıfları tablosu

	LİKİT LİMİT	PLASTİK LİMİT	PLASTİSİTE İNDİSİ	ZEMİN SINIFLARI
100KK	32	17	15	CL
5K1Ç	32	18	14	CL
5K3Ç	31	17	14	CL
10K1Ç	31	17	14	CL
10K3Ç	29	15	14	CL
15K1Ç	30	16	14	CL
15K3Ç	29	15	14	CL
20K1Ç	28	15	13	CL
20K3Ç	29	16	13	CL

Deney sonuçlarında numunelerin zemin sınıfı CL olarak belirlenmiştir. Katkılar kil zemine göre ve katkı oranı arttıkça plastisite indislerini düşürmüştür. Katkıların plastisite indislerini düşürmesi, zeminin şişme potansiyelini azaltarak işlenebilirliğini ve mühendislik performansını artırabilir.

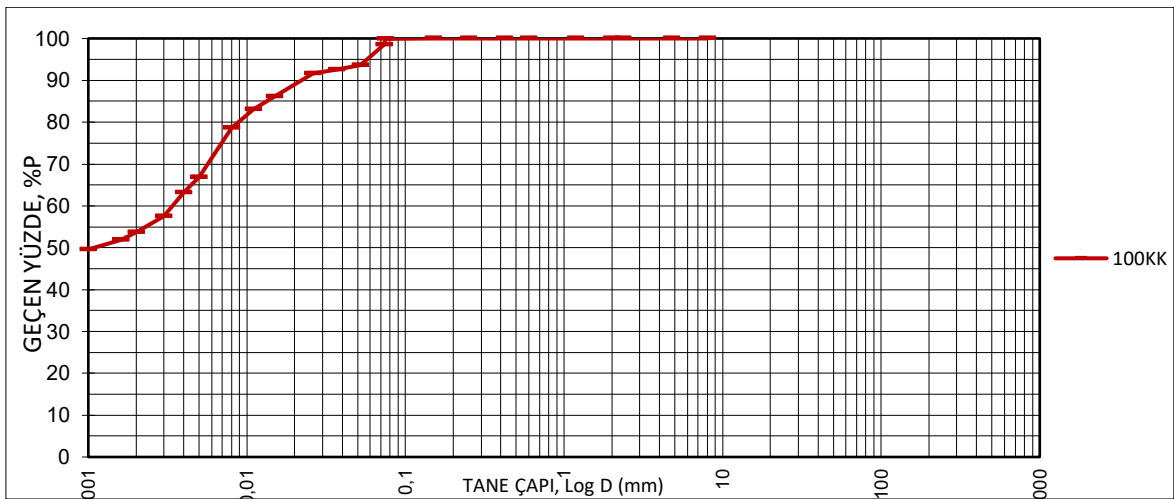
4.2 Hidrometre Deney Sonucu

Bu çalışmada, zemindeki ince tanelerin boyut dağılımını belirlemek amacıyla hidrometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Hidrometre deneyi görselleri şekil 4.3'te, elde edilen sonuçlara ait tane dağılım eğrisi Şekil 4.4'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde, zemin örneğinin

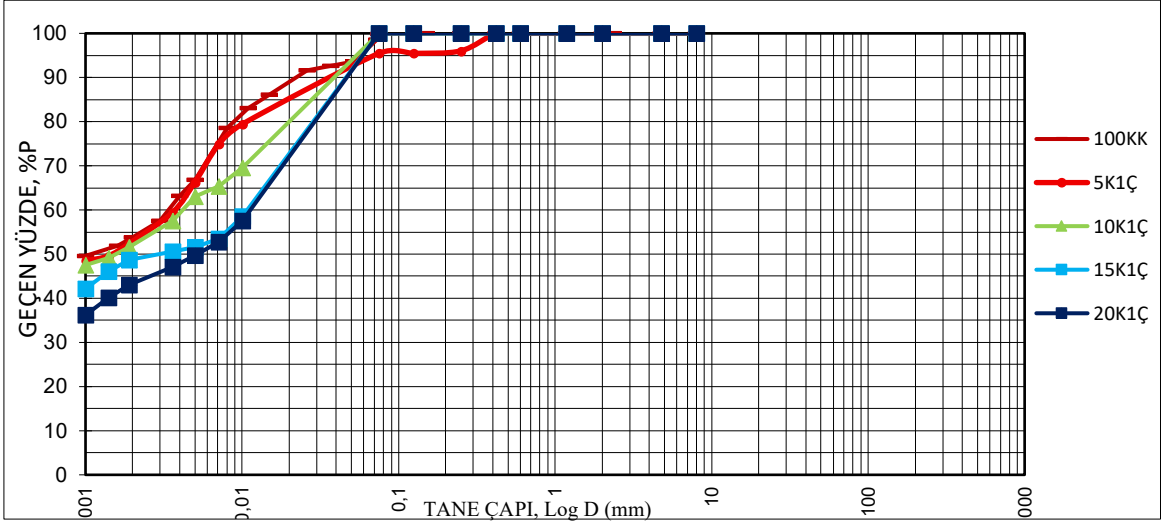
yaklaşık %54'unun 0,002 mm'den küçük taneciklerden oluştuğu görülmektedir. Bu boyuttaki tanecikler kil olarak değerlendirilirken, kalan %46'lık kısmın silt boyutunda olduğu anlaşılmaktadır. Bu dağılım, zeminin kil yönünden zengin, ancak aynı zamanda önemli miktarda silt içeren bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Eğrinin düzgün ve sürekli eğimli oluşu, tanecik boyutlarının homojen şekilde dağılmış olduğunu ve zeminin düşük derecelenmiş bir yapıda olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür bir zemin, mühendislik uygulamalarında geçirimsizlik ve konsolidasyon davranışları açısından analiz edilmelidir. Kilin hidrometre deney görselleri Şekil 4.11'de, kilin granülometre eğrisi Şekil 4.12'de, %1 çimento içeren karışımlara ait granülometre eğrisi Şekil 4.13'de, %3 çimento içeren karışımlara ait granülometre eğrisi Şekil 4.14'de, Tüm karışımlara ait granülometre eğrisi Şekil 4.15'te verilmiştir.



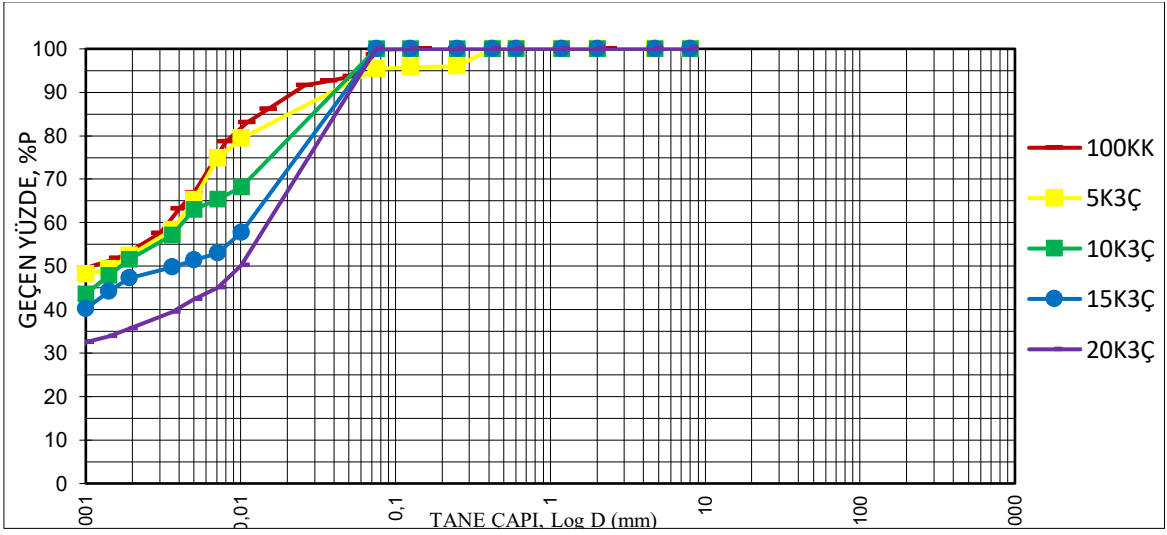
Şekil 4.11: Hidrometre deneyi görselleri



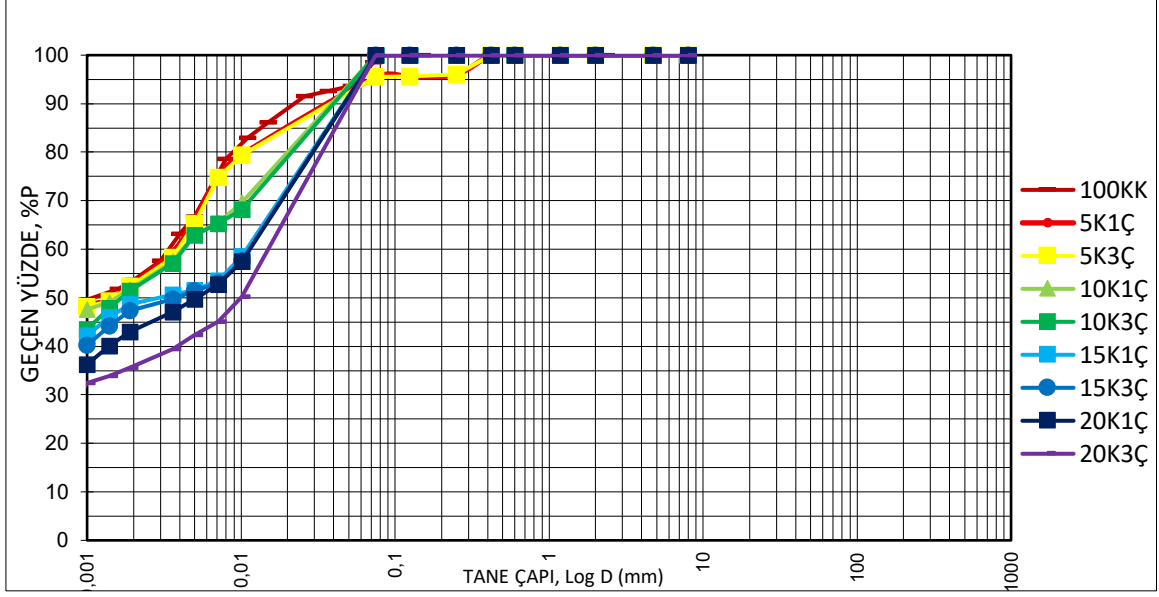
Şekil 4.12: Kilin granülometri eğrisi



Şekil 4.13: %1 çimento içeren karışımlara ait granülometri eğrisi



Şekil 4.14: %3 çimento içeren karışımlara ait granülometri eğrisi



Şekil 4.15: Tüm karışımlara ait granülometri eğrisi

4.3 Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

Numunelerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla her deney grubu için yaklaşık 10 gram kadar temsil numune alınmıştır. Numuneler homojen hale getirilmiş, ardından etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta sabit ağırlığa ulaşana kadar kurutulmuştur.

Deneyde kullanılan piknometreye ait dört farklı tartım yapılmıştır. İlk olarak tamamen kuru ve boş hâlde tartılan piknometre ağırlığı $M_1 = 67.66$ g olarak kaydedilmiştir. Daha sonra kurutulmuş ve soğutulmuş zemin numunesi piknometreye eklenmiş, bu yeni durumda toplam ağırlık $M_2 = 77.66$ g olarak ölçülmüştür. Üçüncü adımda, piknometre yaklaşık 1/4'ü su ile doldurularak içindeki hava vakumla alınmış, ardından tamamen su ile doldurulmuş ve bu durumda $M_3 = 330.8$ g değeri kaydedilmiştir. Son olarak sadece su ile doldurulmuş piknometre $M_4 = 324.8$ g olarak tartılmıştır.

Bu dört tartım değeri kullanılarak zemin numunesinin özgül ağırlığı (G_S), denklem 4.1'deki formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$G_S = \frac{\rho_L(M_2 - M_1)}{\rho_W(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (4.1)$$

Burada:

M_1 : Boş kuru piknometre ağırlığı (67.66 g)

M_2 : Kuru zemin + piknometre ağırlığı (77.66 g)

M₃: Numune + su + piknometre ağırlığı (330.8 g)

M₄: Tamamen su ile dolu piknometre ağırlığı (324.8 g)

ρ_L: Numune yoğunluğu (genellikle sadeleştirilir, 1 alınabilir)

ρ_w: Suyun yoğunluğu (1 g/cm³)

Deney, hazırlanan sekiz farklı zemin karışımı için ayrı ayrı uygulanmış; her bir karışımdan alınan numuneler üzerinde özgül ağırlık tayini gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, tüm karışımların zemin danelerinin özgül ağırlığının aynı olduğu ve deneysel olarak anlamlı bir fark göstermediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, analizlerde tüm karışımlar için sabit bir özgül ağırlık değeri esas alınmıştır.

Elde edilen özgül ağırlık değeri, deney yapılan zeminlerin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde ve diğer geoteknik hesaplamaların yapılmasında temel veri olarak kullanılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda, hazırlanan zemin karışımlarının özgül ağırlığı 2.56 olarak belirlenmiştir. Literatürde saf kaolin kilinin özgül ağırlığı genellikle 2.60–2.63 aralığında raporlanmakta olup, kum ve çimento katkısı ile hazırlanan karışımlarda bu değerlerin bir miktar azalabileceği belirtilmektedir. Elde edilen sonuç, literatür değerleri ile uyumlu olup, deneysel açıdan kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Kullanılan malzemelere ait özgül ağırlık değerleri Tablo 4.12’te verilmiştir.

Tablo 4.12: Kullanılan malzemelerin özgül ağırlık tablosu

	Özgül ağırlık (gr / cm ³)
100KK	2.62
K	2.66
Ç	3.13
Karışımlar	2.56

4.4 Standart Proktor Deney Sonuçları

Standart proktor deneyi, hazırlanan zemin karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlığını ve buna karşılık gelen optimum su muhtevasını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi, 2.5 kg ağırlığında bir tokmakla, üç aşama halinde ve her katta 25 vuruş uygulanarak yapılmış, böylece zemine belirli bir mekanik enerji verilmiştir.

Her bir deney grubunda temel olarak 5000 gr kaolin kili kullanılmış; bu miktara, belirlenen oranlara göre kum (%5, %10, %15, %20) ve çimento (%1 ve %3) ilave edilmiştir. Örneğin, %10 kum ve %1 çimento içeren karışımda 5000 g kile ek olarak 500 g kum ve 55 g çimento karıştırılmıştır. Böylelikle her karışımda toplam kuru zemin miktarı sabit tutulmuş, değişen yalnızca katkı içeriği olmuştur.

Her karışım için ayrı ayrı en az beş adet sıkıştırma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, her bir karışım farklı bir başlangıç su muhtevasıyla hazırlanmış ve deneysel tasarıma uygun olarak beş farklı nem oranında sıkıştırma uygulanmıştır. Su muhtevası aralıkları, zeminin ilk davranışına bağlı olarak her karışım için ayrı ayrı belirlenmiş olup, genel olarak %12 ile %24 arasında değişen değerler tercih edilmiştir.

Her bir deneyde, belirlenen su muhtevasına sahip zemin örnekleri standart proktor yöntemiyle sıkıştırılmış; elde edilen kuru birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler üzerinden her karışım için maksimum kuru birim hacim ağırlık ve buna karşılık gelen optimum su muhtevası belirlenmiştir.

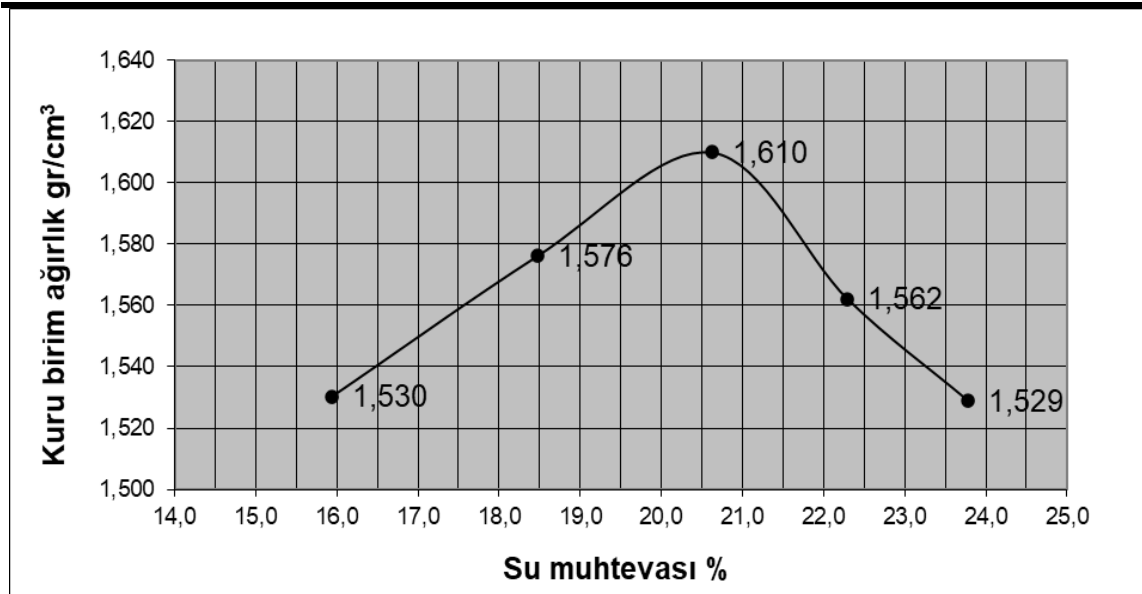
4.4.1 Karışımların deney sonuçları

Deney sonuçlarının daha rahat değerlendirilebilmesi için her bir numune için ayrı ayrı proktor sonucu tabloları ve kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafikleri verilmiştir. Saf kile ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.13'te, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.16'da, %5 kum %1 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.14'te, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.17'de, %5 kum %3 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.15'te, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.18'de, %10 kum %1 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.16'da, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.19'de, %10 kum %3 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.17'de, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.20'de, %15 kum %1 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.18'de, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.21'de, %15 kum %3 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.19'da, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.22'de, %20 kum %1 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.20'de, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.23'te, %20 kum %3 çimentolu karışıma ait proktor sonucu tablosu Tablo 4.21'de, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil

4.24'te verilmiştir. Aynı zamanda karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri Tablo 4.22'de, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası %1 çimento için toplu grafik Şekil 4.25'te, %3 çimento için toplu grafik Şekil 4.26'da, tüm numunelerin değişimi için oluşturulan grafik Şekil 4.27'de verilmiştir.

Tablo 4.13: Saf kil zeminin proktor deney sonuçları

Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp + tabanı + sıkıştırılmış zemin ağı. (W2) gr.	5833	5921	5992	5962	5945
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1680	1768	1839	1809	1792
Yaş birim ağırlık $gn=(W2-W1)/V$ gr./cm ³	1.774	1.867	1.942	1.910	1.892
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	89.5	94.8	88.5	86.6	89.6
Kap ağırlığı + Yaş numune ağı. gr	506.3	519.5	342.3	470.1	466.0
Kap ağırlığı + Kuru numune ağı. gr	449.0	453.3	298.9	400.2	393.7
Su muhtevası (m)	15.9	18.5	20.6	22.3	23.8
Kuru birim ağırlık $gd=gn/100+m$ gr/cm ³	1.530	1.576	1.610	1.562	1.529

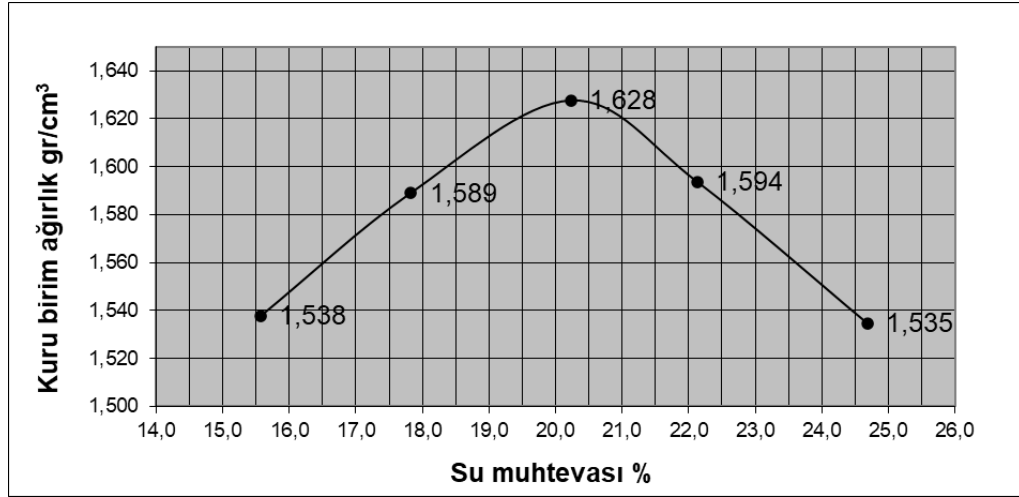


Şekil 4.16: Saf kil zeminin kuru birim ağırlık-su muhtevası grafiği

Tablo 4.14: %5 kum %1 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

Deney No	1	2	3	4	5
----------	---	---	---	---	---

Kalıp + tabanı + sıkıştırılmış zemin ağı. (W2)gr	5836	5926	6006	5996	5965
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1)gr	1683	1773	1853	1843	1812
Yaş birim ağırlık $g_n=(W2-W1)/ 1) //cm^3$	1.777	1.872	1.957	1.946	1.914
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	98.3	93.3	118.7	92.2	100.5
Kap ağırlığı + Yaş numune ağı. gr	360.3	352.4	462.2	396.3	378.3
Kap ağırlığı + Kuru numune ağı. gr	325.0	313.2	404.4	341.2	323.3
Su muhtevası (m)	15.6	17.8	20.2	22.1	24.7
Kuru birim ağırlık $g_d=g_n/100+m) gr/cm^3$	1.538	1.589	1.628	1.594	1.535

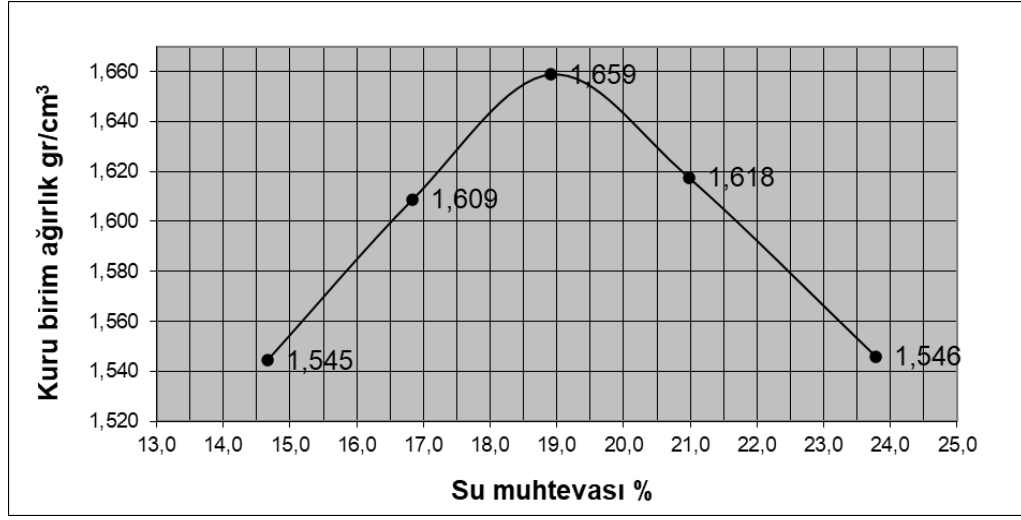


Şekil 4.17: %5 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği

Tablo 4.15: %5 kum %3 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp + tabanı + sıkıştırılmış zemin ağı. (W2)gr	5830	5933	6021	6006	5965
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1677	1780	1868	1853	1812
Yaş birim ağırlık $g_n=(W2-W1) / V gr/cm^3$	1.771	1.880	1.973	1.957	1.914
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	89.5	94.8	87.5	86.6	89.6
Kap ağırlığı +Yaş numune ağı. gr	506.3	519.5	340.9	470.1	466.0
Kap ağırlığı +Kuru numune ağı. gr	453.0	458.3	300.6	403.6	393.7

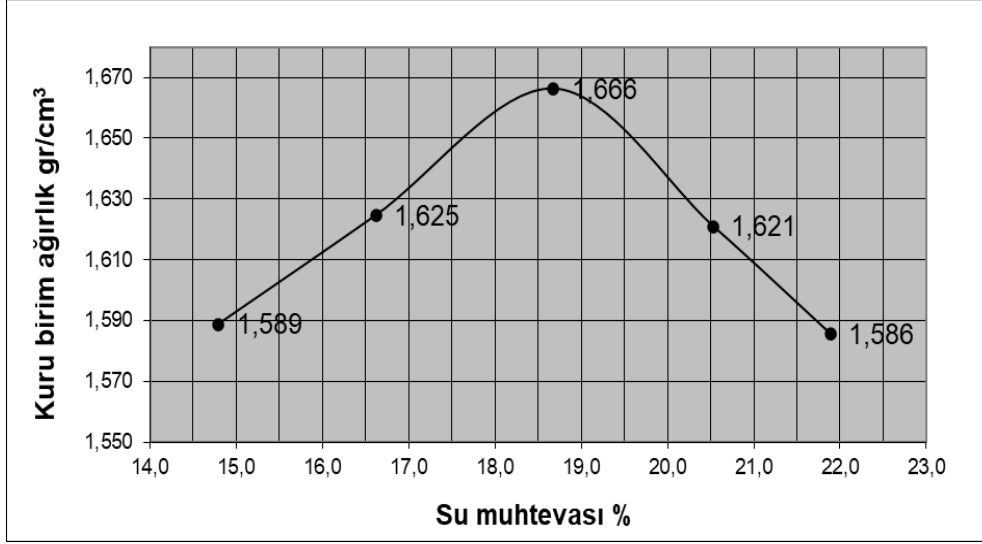
Su muhtevası (m)	14.7	16.8	18.9	21.0	23.8
Kuru birim ağırlık $gd=gn/100+m)$ gr/cm ³	1.545	1.609	1.659	1.618	1.546



Şekil 4.18: %5 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği

Tablo 4.16: %10 kum %1 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

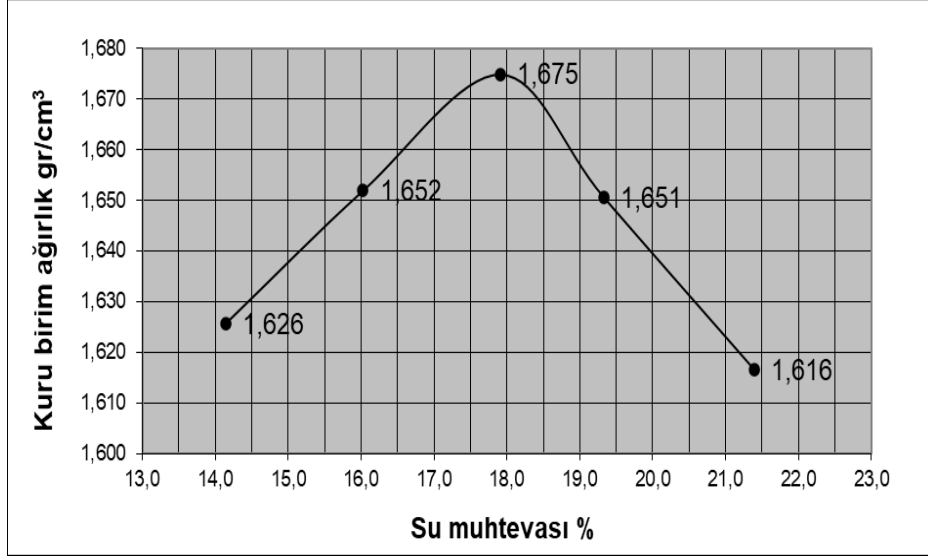
Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp +tabanı +sıkıştırılmış zemin ağı. (W2) gr	5880	5947	6025,5	6003	5983
Kalıp ve tabanın ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1727	1794	1872.5	1850	1830
Yaş birim ağırlık $gn=(W2-W1) / V$ gr/cm ³	1.824	1.895	1.977	1.954	1.933
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	88,6	86.5	91.2	86.4	90.3
Kap ağırlığı +Yaş numune ağı. gr	496.0	533.5	450.2	480.3	447.2
Kap ağırlığı +Kuru numune ağı. gr	443.5	469.8	393.7	413.2	383.1
Su muhtevası (m)	14.8	16.6	18.7	20.5	21.9
Kuru birim ağırlık $gd=gn/100+m)$ gr/cm ³	1.589	1.625	1.666	1.621	1.586



Şekil 4.19: %10 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği

Tablo 4.17: %10 kum %3 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

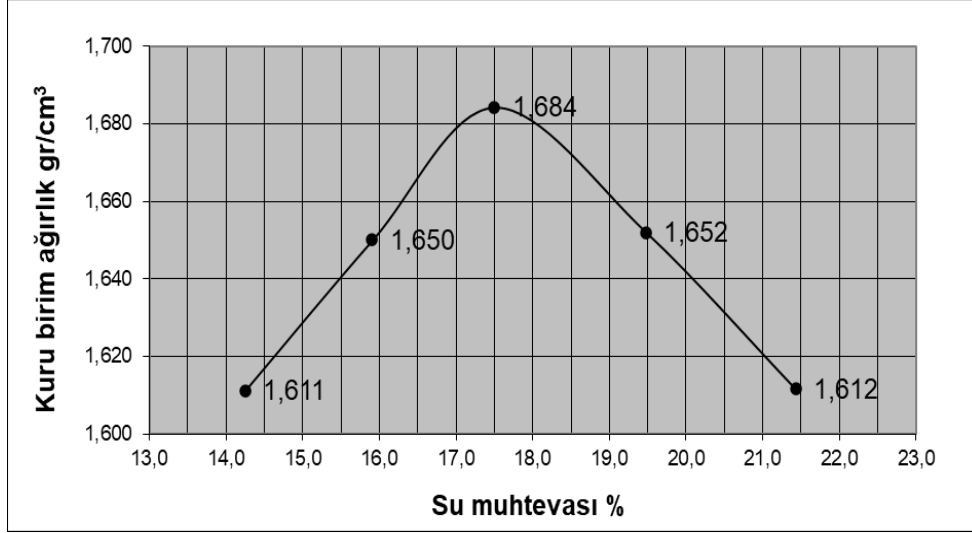
Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp +tabanı +sıkıştırılmış zemin ağı. (W2) gr	5910	5968	6023	6018	6011
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1757	1815	1870	1865	1858
Yaş birim ağırlık $g_n = (W2 - W1) / V$ gr/cm ³	1.856	1.917	1.975	1.970	1.962
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	91.5	84.8	89.0	92.2	95.3
Kap ağırlığı +Yaş numune ağı. gr	420.8	456.9	380.7	420.7	450.6
Kap ağırlığı +Kuru numune ağı. gr	380.0	405.5	336.4	367.5	388.0
Su muhtevası (m)	14.1	16.0	17.9	19.3	21.4
Kuru birim ağırlık $g_d = g_n / (100 + m)$ gr/cm ³	1.626	1.652	1.675	1.651	1.616



Şekil 4.20: %10 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası

Tablo 4.18: %15 kum %1 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

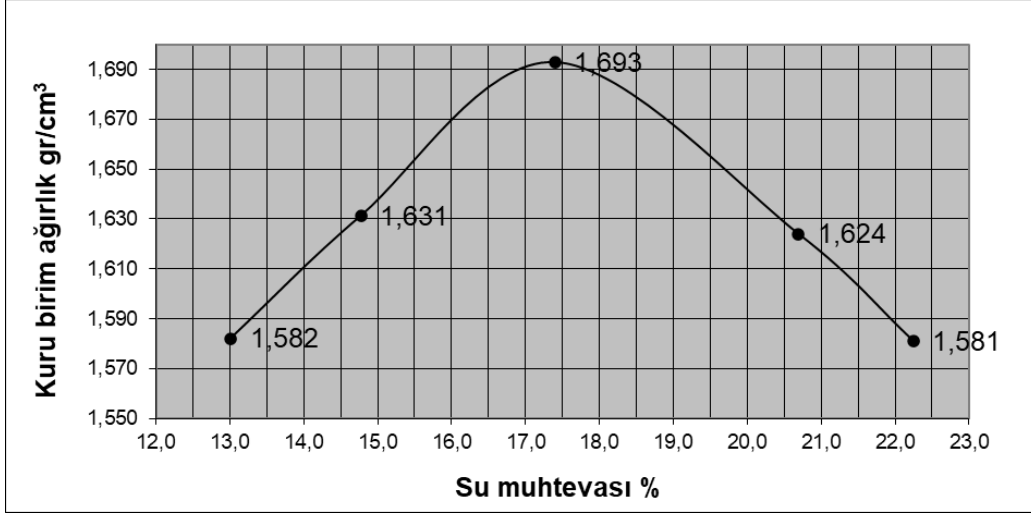
Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp +tabanı +sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2) gr	5896	5964	6027	6022	6006
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1743	1811	1874	1869	1853
Yaş birim ağırlık $g_n = (W2-W1) / V$ gr/cm ³	1.841	1.913	1.979	1.974	1.957
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	118.4	86.0	86.5	94.1	87.1
Kap ağırlığı +Yaş numune ağırlığı gr	529.8	449.6	466.5	460.3	399.9
Kap ağırlığı +Kuru numune ağırlığı gr	478.5	399.7	409.9	400.6	344.7
Su muhtevası (m)	14.2	15.9	17.5	19.5	21.4
Kuru birim ağırlık $g_d = g_n / (100 + m)$ gr/cm ³	1.611	1.650	1.684	1.652	1.612



Şekil 4.21: %15 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği

Tablo 4.19: %15 kum %3 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

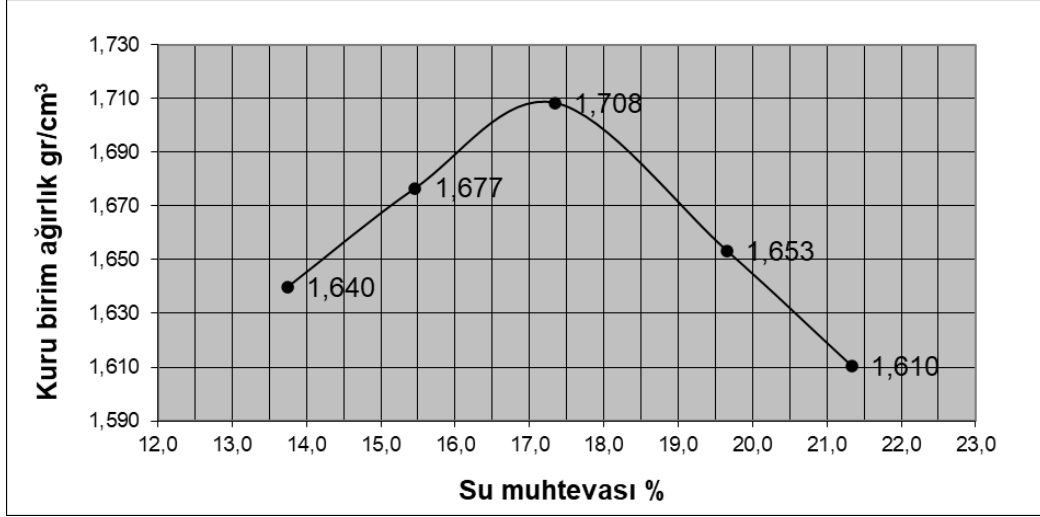
Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp +tabanı +sıkıştırılmış zemin ağı. (W2) gr	5846	5926	6035	6009	5983
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1693	1773	1882	1856	1830
Yaş birim ağırlık $g_n = (W2-W1) / V$ gr/cm ³	1.788	1.872	1.988	1.960	1.933
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	86.0	117.9	87.2	85.9	86.6
Kap ağırlığı +Yaş numune ağı. gr	421.2	477.5	479.2	469.1	500.3
Kap ağırlığı +Kuru numune ağı. gr	382.6	431.2	421.1	403.4	425.0
Su muhtevası (m)	13.0	14.8	17.4	20.7	22.3
Kuru birim ağırlık $g_d = g_n / (100+m)$ gr/cm ³	1.582	1.631	1.693	1.624	1.581



Şekil 4.22: %15 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği

Tablo 4.20: %20 kum %1 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

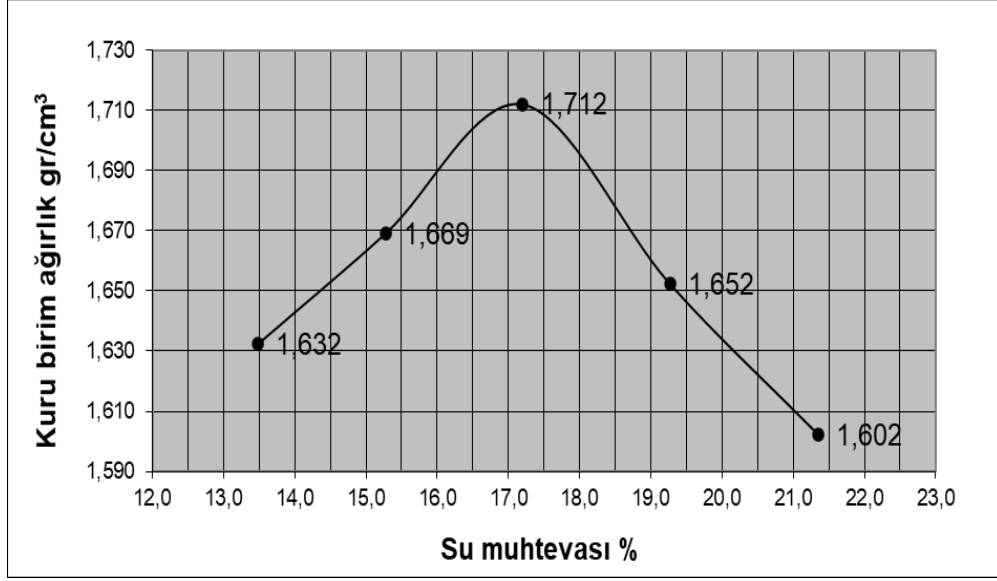
Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp +tabanı +sıkıştırılmış zemin ağı. (W2) gr	5919	5986	6051	6026	6003
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1766	1833	1898	1873	1850
Yaş birim ağırlık $g_n = (W2-W1) / V$ gr/cm ³	1.865	1.936	2.004	1.978	1.954
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	98.1	98.6	91.2	95.3	92.0
Kap ağırlığı +Yaş numune ağı. gr	339.8	593.0	471.6	553.8	464.0
Kap ağırlığı +Kuru numune ağı. gr	310.6	526.8	415.4	478.5	398.6
Su muhtevası (m)	13.7	15.5	17.3	19.7	21.3
Kuru birim ağırlık $g_d = g_n / (100+m)$ gr/cm ³	1.640	1.677	1.708	1.653	1.610



Şekil 4.23: %20 kum %1 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık – su muhtevası grafiği

Tablo 4.21: %20 kum %3 çimento katkılı zeminin proktor deney sonuçları

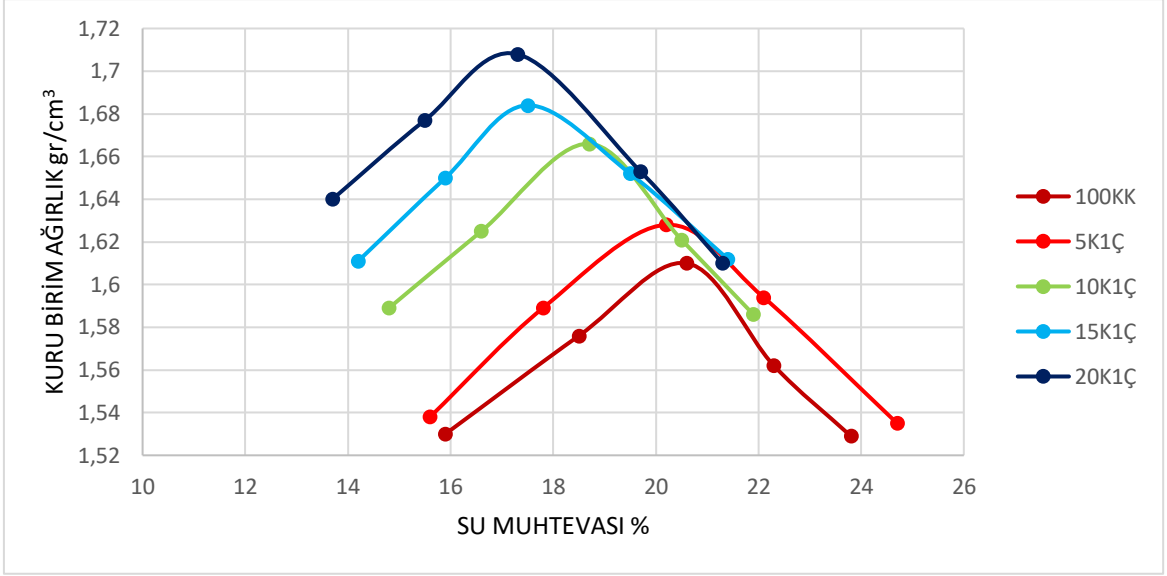
Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp +tabanı +sıkıştırılmış zemin ağı. (W2) gr	5907	5975	6053	6019	5994
Kalıp ve tabanının ağırlığı (W1) gr	4153	4153	4153	4153	4153
Sıkıştırılmış zemin ağırlığı (W2-W1) gr	1754	1822	1900	1866	1841
Yaş birim ağırlık $g_n = (W2-W1) / V$ gr/cm ³	1.852	1.924	2.007	1.971	1.944
Su muhtevası kabı No	1	2	3	4	5
Kap ağırlığı gr	87.1	94.3	113.4	94.2	91.2
Kap ağırlığı +Yaş numune ağı. gr	416.2	418.0	505.2	541.1	440.2
Kap ağırlığı +Kuru numune ağı. gr	377.1	375.1	447.7	468.9	378.8
Su muhtevası (m)	13.5	15.3	17.2	19.3	21.3
Kuru birim ağırlık $g_d = g_n / (100 + m)$ gr/cm ³	1.632	1.669	1.712	1.652	1.602



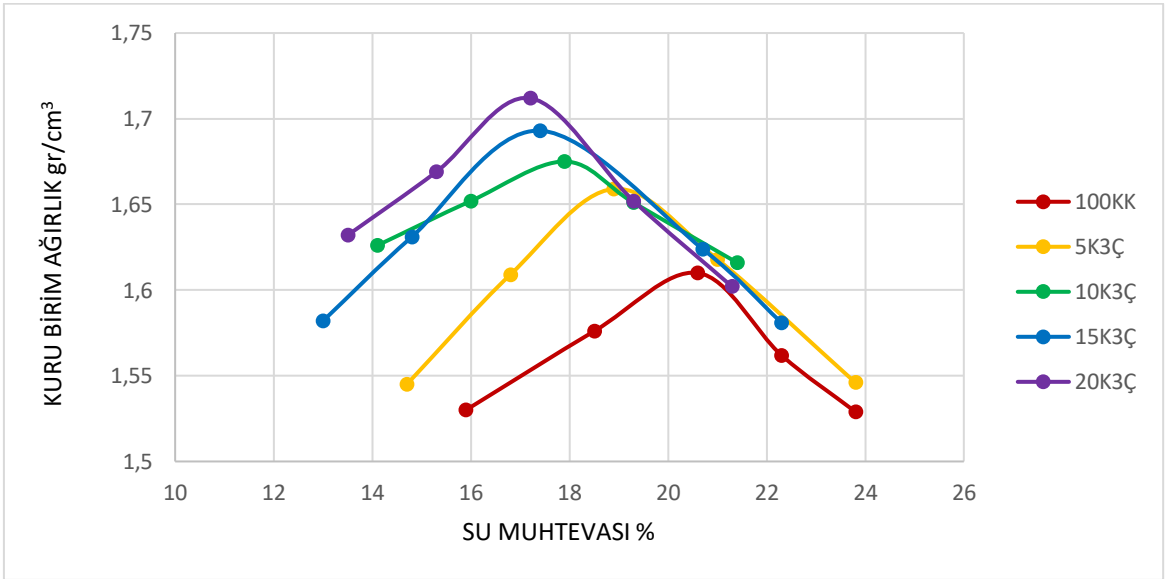
Şekil 4.24: %20 kum %3 çimento katkılı zeminin kuru birim ağırlık– su muhtevası grafiği

Tablo 4.22: Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık tablosu

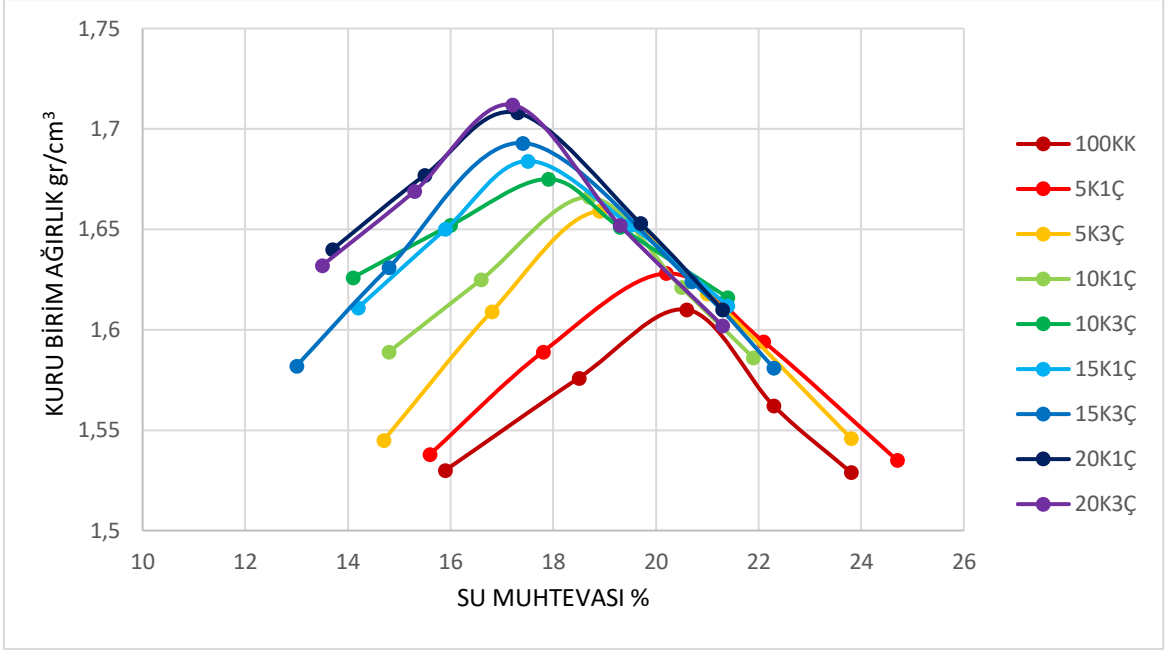
	Optimum su muhtevası (%)	Kuru birim hacim ağırlık (gr/cm ³)
100KK	20.6	1.610
5K1Ç	20.2	1.628
5K3Ç	18.9	1.659
10K1Ç	18.7	1.666
10K3Ç	17.9	1.675
15K1Ç	17.5	1.684
15K3Ç	17.4	1.693
20K1Ç	17.3	1.708
20K3Ç	17.2	1.712



Şekil 4.25: %1 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının kuru birim ağırlık-su muhtevası ilişkisi



Şekil 4.26: %3 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının kuru birim ağırlık-su muhtevası ilişkisi



Şekil 4.27: Tüm karışımlarının kuru birim ağırlık–su muhtevası ilişkisi

4.5 Düşen Seviyeli Permeabilite Deney Sonuçları

Karışımların geçirgenlik katsayısını bulmak amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Zemin numuneleri homojen bir şekilde karıştırılarak proktor deneyinden elde edilen optimum su içerikleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinden yapılan deneyler ASTM 5084 standardına göre yapılmıştır. Elde edilen karışımların geçirgenlik katsayıları Tablo 4.23’de verilmiştir. İnce kum ilavesi yüzdesindeki artışa bağlı olarak, permeabilite katsayısındaki düşüş grafiksel olarak Şekil 4.28’ de, tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı tablosu Tablo 4.24’te, %1 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının permeabilite katsayısı grafiği Şekil 4.29’da, %3 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının permeabilite katsayısı grafiği Şekil 4.30’da, tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği Şekil 4.31’de gösterilmiştir.

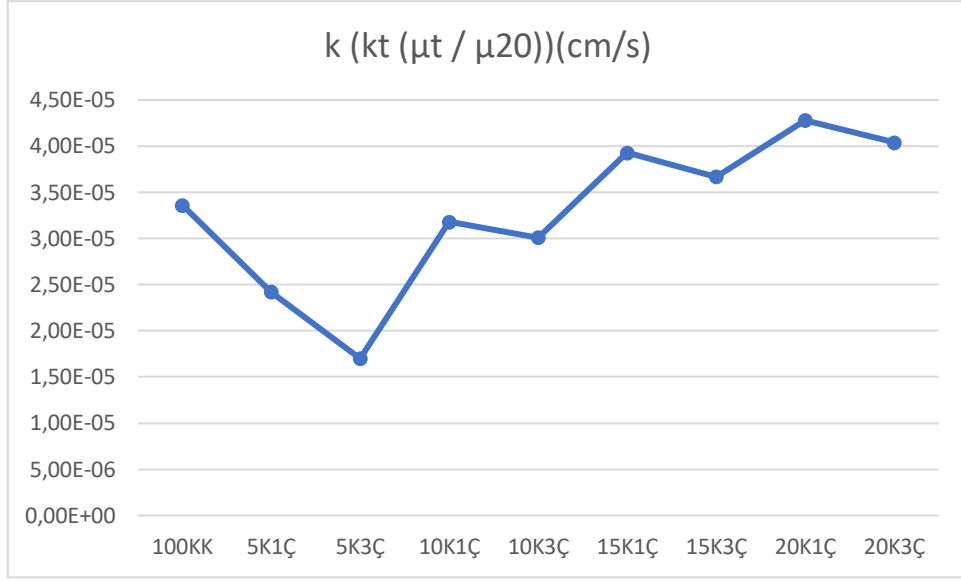
Tablo 4.23: Karışımların geçirgenlik katsayıları

	$k (k_t (\mu_t / \mu_{20}))(\text{cm/s})$
100KK	3.36E-05
5K1Ç	2.42E-05
5K3Ç	1.70E-05
10K1Ç	3.18E-05
10K3Ç	3.01E-05
15K1Ç	3.93E-05
15K3Ç	3.67E-05
20K1Ç	4.28E-05
20K3Ç	4.04E-05

Yapılan permeabilite deneyleri sonucunda, kaolin kiline farklı oranlarda ince kum ve çimento ilavesiyle hazırlanan karışımların geçirgenlik katsayıları belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, %5 ve %10 oranında kum içeren karışımlarda, katkı miktarına bağlı olarak geçirgenlik değeri (k), doğal haldeki saf kaolin kil numunesine (3.36×10^{-5} cm/s) kıyasla azalmış ve bu karışımlar daha düşük geçirgenliğe sahip olmuştur. Özellikle %5 kum + %3 çimento içeren karışımda en düşük geçirgenlik değeri (1.70×10^{-5} cm/s) elde edilmiştir. Bu durum, düşük oranlı kum ve çimento katkısının zemin matrisini daha sıkı bir yapıya kavuşturduğunu ve geçirgenliği azalttığını göstermektedir.

Buna karşın, %15 ve %20 oranlarında kum içeren karışımlarda geçirgenlik değerleri, saf kaolin kile göre artış göstermiştir. %20 kum + %1 çimento karışımında en yüksek geçirgenlik değeri olan 4.28×10^{-5} cm/s ölçülmüştür. Bu artış, yüksek oranlı kum katkısının zemin dokusunu gevşettiğini ve poroziteyi artırarak suyun zeminden geçişini kolaylaştırdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, belirli bir orana kadar yapılan kum ve çimento katkısı zeminin geçirimsizlik özelliğini iyileştirirken, katkı oranının artması durumunda bu etkinin tersine döndüğü ve geçirgenliğin arttığı tespit edilmiştir.

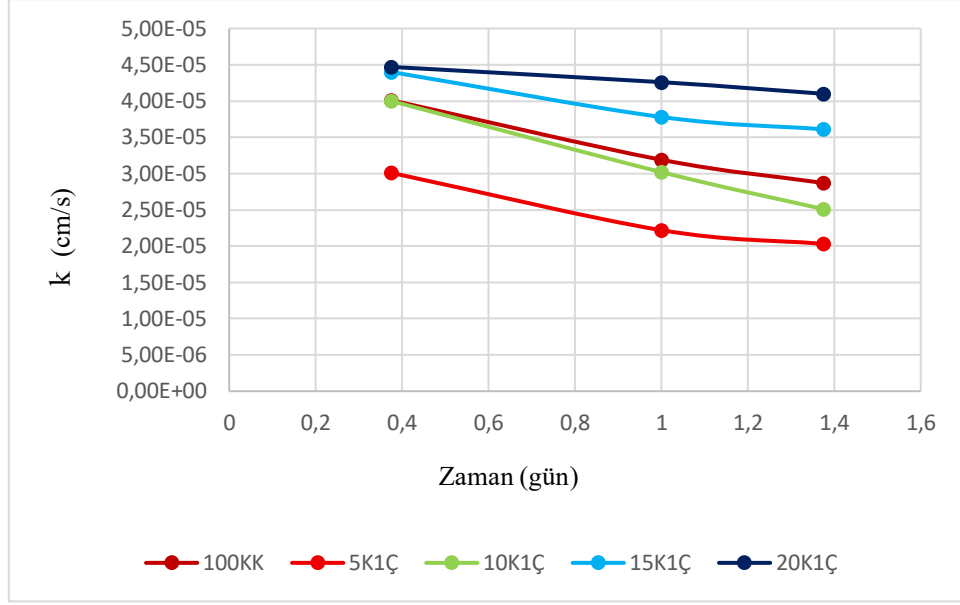


Şekil 4.28: Karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği

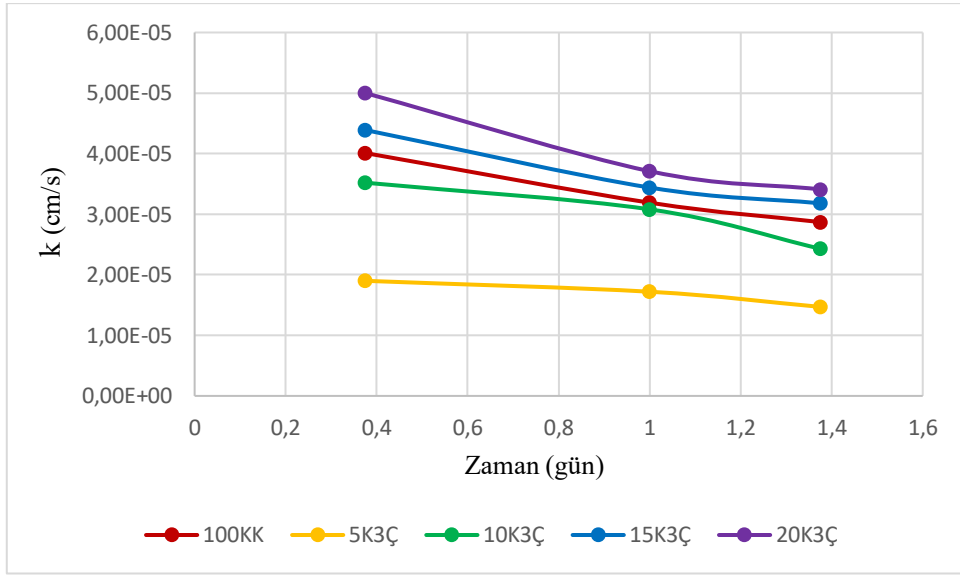
Tüm karışımlara ait geçirgenlik (permeabilite) katsayısı değerleri zamana bağlı olarak tablo halinde sunulmuştur. Elde edilen bu veriler ışığında, tüm karışımlar için ortak grafikler hazırlanarak karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Bu sayede, katkı oranlarının geçirgenlik üzerindeki etkisi daha sistematik ve görsel olarak daha anlaşılır biçimde analiz edilebilmektedir. Tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı tablosu Tablo 4.15'te, %1 çimentoyla oluşturulmuş karışımların permeabilite katsayısı grafiği Şekil 4.18'de, %3 çimentoyla oluşturulmuş karışımların permeabilite katsayısı grafiği Şekil 4.19'da tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği Şekil 4.20'de sunulmuştur.

Tablo 4.24: Tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı tablosu

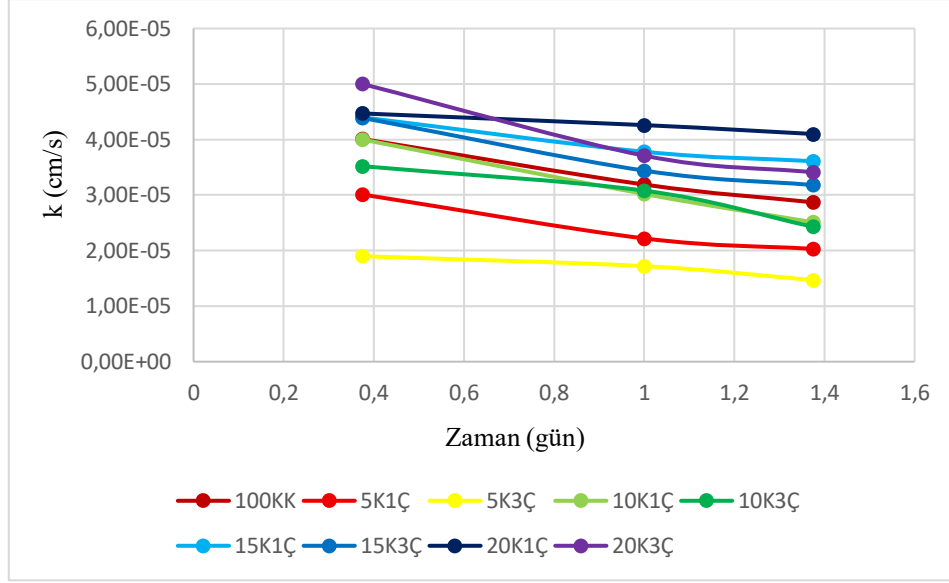
Zaman (gün)	k		
	0.375	1	1.375
100KK	4.01E-05	3.19E-05	2.87E-05
5K1Ç	3.01E-05	2.22E-05	2.03E-05
5K3Ç	1.90E-05	1.72E-05	1.47E-05
10K1Ç	4,00E-05	3,02E-05	2,51E-05
10K3Ç	3.52E-05	3.08E-05	2.43E-05
15K1Ç	4.40E-05	3.78E-05	3.61E-05
15K3Ç	4.39E-05	3.44E-05	3.18E-05
20K1Ç	4.47E-05	4.26E-05	4.10E-05
20K3Ç	5.00E-05	3.71E-05	3.41E-05



Şekil 4.29: %1 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının karışımların permeabilite katsayısı grafiği



Şekil 4.30: %3 çimento ile stabilize edilmiş kumlu kil karışımlarının karışımların permeabilite katsayısı grafiği



Şekil 4.31: Tüm karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği

4.6 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Denei Sonuçları

Bu denei, hazırlanan zemin karışımlarının serbest basınç dayanımını belirlemek ve ince kum ile çimento katkısının zemin mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım, kendi optimum su içeriğinde hazırlanarak standart proktor deneyiyle sıkıştırılmıştır. Kalıp içindeki sıkıştırılmış numuneden 38 mm çapında, 76 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kriko yardımıyla çıkarılmıştır. Her bir karışım için ayrı proktor deneyi yapılarak, her kalıptan bir numune alınmıştır. Her bir karışım için ayrı ayrı üçer adet silindirik örnek elde edilmiştir.

Numuneler kür süreci boyunca nem kaybını önlemek amacıyla streç film ile sarılarak normal şartlarda 20 ± 2 derece 3, 7 ve 14 gün süreyle bekletilmiştir. Bu yöntem, laboratuvar ortamında kür havuzuna alternatif olarak tercih edilmiş olup, numunelerin dış ortamla nem alışverişini sınırlandırarak çimento hidrasyonunun sağlıklı bir şekilde tamamlanmasına olanak sağlamaktadır. Nitekim literatürde de streç film veya benzeri su geçirmez malzemelerle sarılarak kür edilen çimento katkılı zemin numunelerinin erken yaş dayanım gelişimi üzerinde olumlu etkiler sağladığı belirtilmektedir (Kılıç, 2008; Şengör, 2011).

Hazırlanan 9 farklı karışım, belirlenen kür sürelerinin sonunda tek eksenli basınç dayanımı testine tabi tutulmuş; numuneler kırılana kadar test edilerek dayanım değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, kür süresine ve katkı oranlarına bağlı olarak zemin dayanımındaki değişimleri değerlendirmede kullanılmıştır.

Şekil 4.32’de numunelerin hazırlanma aşamaları, Şekil 4.33’te proktor deneyinin yapılması, Şekil 4.34’te tek eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan numuneler, Şekil 4.35’te ise tek eksenli basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi fotoğraflanmıştır.



Şekil 4.32: Proktor için tek eksenli basınç numunelerinin hazırlanması



Şekil 4.33: Proktor deneyinin yapılması



Şekil 4.34: Tek eksenli basınç dayanımı deneyi numuneleri



Şekil 4.35: Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin gerçekleştirilmesi

4.6.1 Kür sürelerinin tek eksenli basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Kür süresi, çimento katkılı zeminlerin dayanım kazanımı üzerinde doğrudan etkili bir parametredir. Bu çalışmada, farklı oranlarda kum ve çimento içeren karışımlar üzerinde yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyleri ile 3, 7 ve 14 günlük kür sürelerinin etkisi değerlendirilmiştir.

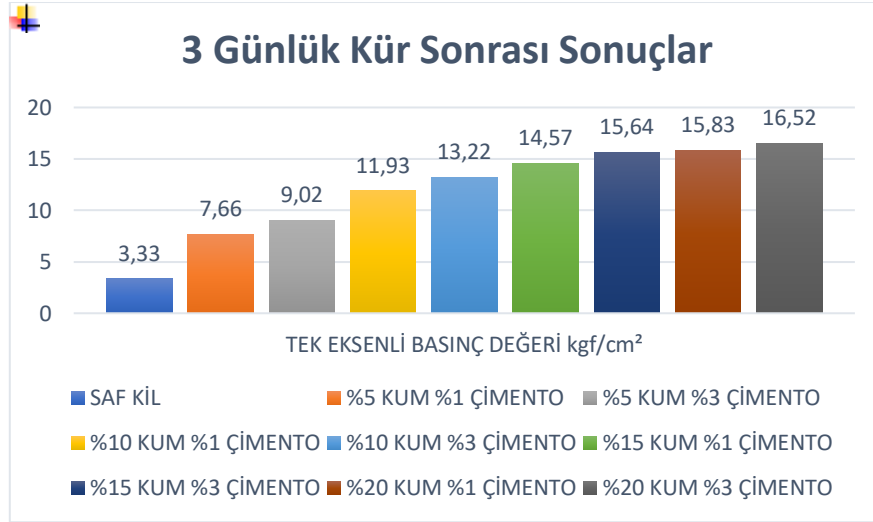
4.6.1.1 Üç günlük kür sonundaki tek eksenli basınç mukavemeti değerleri

Elde edilen 3 günlük sonuçlar, çimento miktarındaki artışın tek eksenli basınç dayanımı üzerinde belirgin bir iyileştirici etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, kum oranındaki artışın dayanım üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle %5 kum + %3 çimento ile %10 kum + %1 çimento içeren karışımlar, bu kür süresi sonunda en yüksek dayanım değerlerine ulaşmıştır. Öbür taraftan, çimento oranı sabit tutulduğunda %15 ve %20 oranlarında kum içeren karışımlarda dayanım değerlerinde artış hızında yavaşlama meydana gelmiştir. Bu durum, yüksek kum içeriğinin çimento ile yeterince etkileşime giremeyen fazla miktarda iri taneli bir yapı oluşturması ve bunun da yapının bütünlüğünü zayıflatmasıyla açıklanabilir.

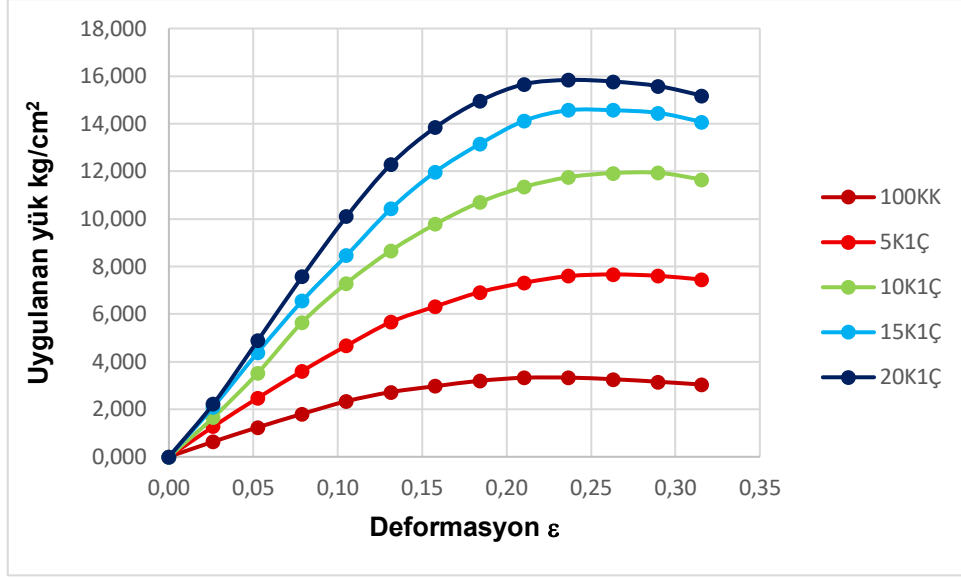
Kısa süreli kür uygulamalarında, çimentonun hidrasyon süreci henüz tam olarak tamamlanmadığından, dayanım gelişimi sınırlı kalmaktadır. Ancak, düşük oranlı katkılarla elde edilen dayanım kazanımı yine de anlamlı düzeydedir. Numunelerin streç filmle sarılarak kür edilmesi, nem kaybını engellemiş ve hidrasyon sürecinin daha kontrollü ilerlemesini sağlamıştır. Bu durum, erken yaşta gelişen basınç dayanımı değerlerinin daha sağlıklı değerlendirilmesine imkân tanımıştır. Tablo 4.25'te üç günlük basınç dayanımı sonuçları, Şekil 4.36'da ise üç günlük tek eksenli basınç grafiği, %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 4.37'de, %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 4.38'de, tüm karışımlara ait gerilme şekil değiştirme grafiği Şekil 4.39'da verilmiştir.

Tablo 4.25: Üç günlük tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

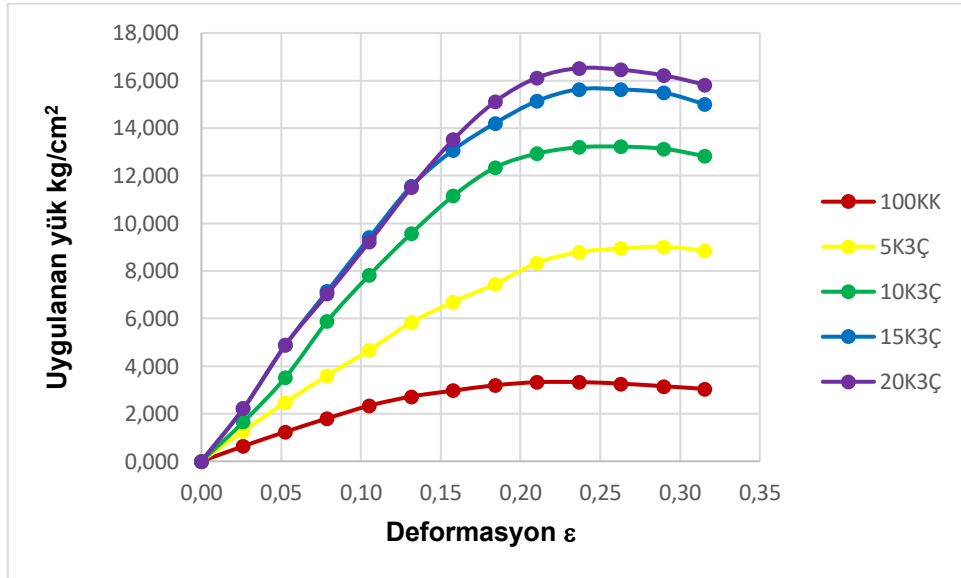
TEK EKSENLİ BASINÇ DEĞERİ kgf/cm ²	
SAF KİL	3.33
%5 KUM %1 ÇİMENTO	7.66
%5 KUM %3 ÇİMENTO	9.02
%10 KUM %1 ÇİMENTO	11.93
%10 KUM %3 ÇİMENTO	13.22
%15 KUM %1 ÇİMENTO	14.57
%15 KUM %3 ÇİMENTO	15.64
%20 KUM %1 ÇİMENTO	15.83
%20 KUM %3 ÇİMENTO	16.52



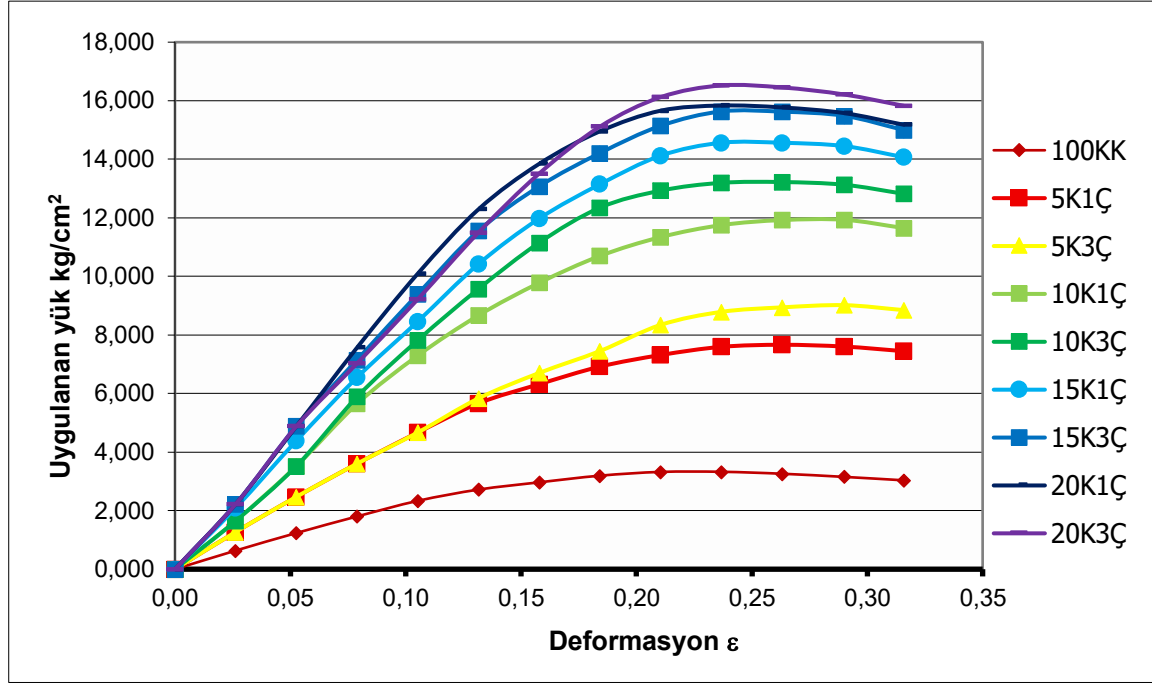
Şekil 4.36: Üç günlük tek eksenli basınç dayanımı grafiği



Şekil 4.37: %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.38: %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.39: Tüm karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

4.6.1.2 Yedi günlük kür sonundaki tek eksenli basınç mukavemeti değerleri

Yedi günlük kür süresi sonunda yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyleri, kum katkısının zemin mukavemeti üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. Saf kaolin kil numunesi 4.23 kgf/cm²'lik dayanım sergilerken, zemine kum ilavesiyle bu değerlerde belirgin artışlar elde edilmiştir.

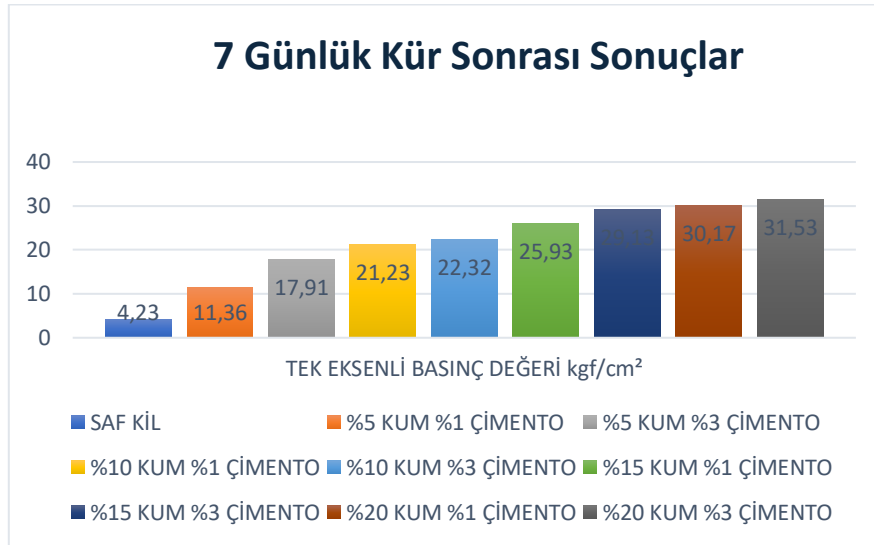
%5 kum katkısı içeren karışımlar, çimento oranına bağlı olarak 11.36–17.91 kgf/cm² aralığında dayanım göstermiştir. Kum oranının %10'a çıkarılmasıyla dayanım 21.23–22.32 kgf/cm² seviyelerine ulaşmış, %15 kum katkılı karışımlarda bu değer 25.93–29.13 kgf/cm²'ye yükselmiştir. En yüksek dayanım ise %20 kum katkısı ile hazırlanan karışımlarda gözlemlenmiş; bu grupta elde edilen değerler 30.17–31.53 kgf/cm² olarak ölçülmüştür.

Elde edilen bu bulgular, uygun oranlardaki kum ilavesinin zeminin iç yapısını desteklediğini ve daha sıkı bir tane dizilimi oluşturarak dayanımı artırdığını göstermektedir. Kum oranının artmasıyla, çimentonun bağlayıcı etkisiyle birlikte kum taneleri arasında daha güçlü bir yapı oluşmuş; bu da tek eksenli basınç dayanımında doğrudan artışa neden olmuştur. Özellikle %15 ve %20 kum içeren numunelerde bu etki daha belirgin hale gelmiş ve dayanım değerleri gözle görülür şekilde yükselmiştir. Yedi günlük tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.26'da, basınç dayanımı grafiği ise Şekil 4.40'ta, %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme

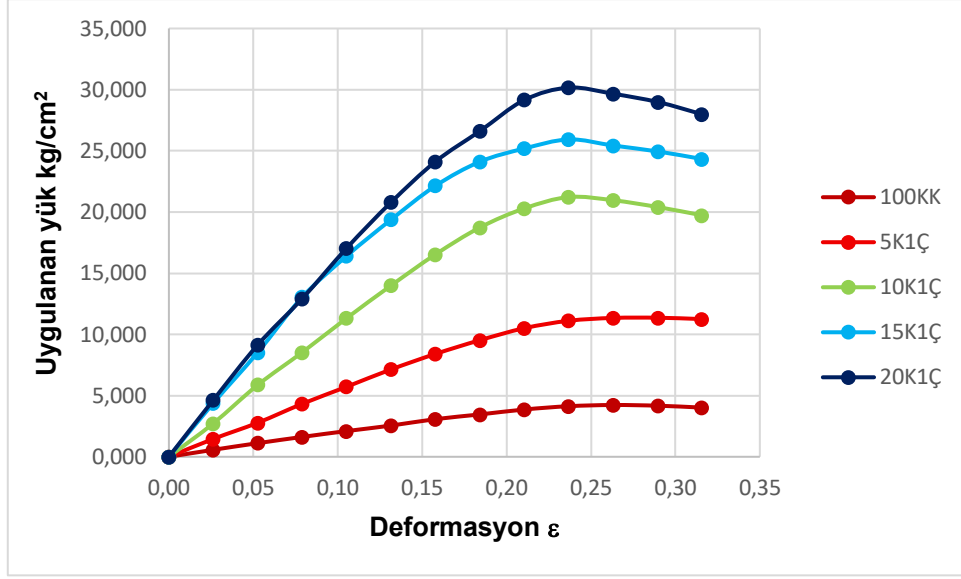
– şekil değiştirme grafiği Şekil 4.41’de, %3 imento içeren karışımlara ait gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 4.42’de, tüm karışımlara ait gerilme şekil değiştirme grafiği Şekil 4.43’te verilmiştir.

Tablo 4.26: Yedi günlük tek eksenli basıncı dayanımı sonuçları

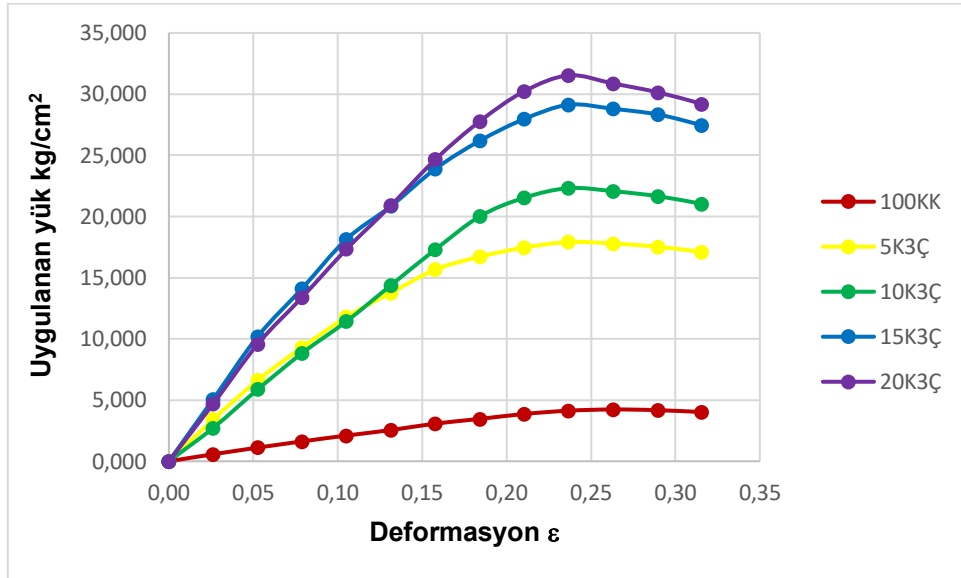
TEK EKSENLİ BASINÇ DEğERİ kgf/cm ²	
SAF KİL	4.23
%5 KUM %1 ÇİMENTO	11.36
%5 KUM %3 ÇİMENTO	17.91
%10 KUM %1 ÇİMENTO	21.23
%10 KUM %3 ÇİMENTO	22.32
%15 KUM %1 ÇİMENTO	25.93
%15 KUM %3 ÇİMENTO	29.13
%20 KUM %1 ÇİMENTO	30.17
%20 KUM %3 ÇİMENTO	31.53



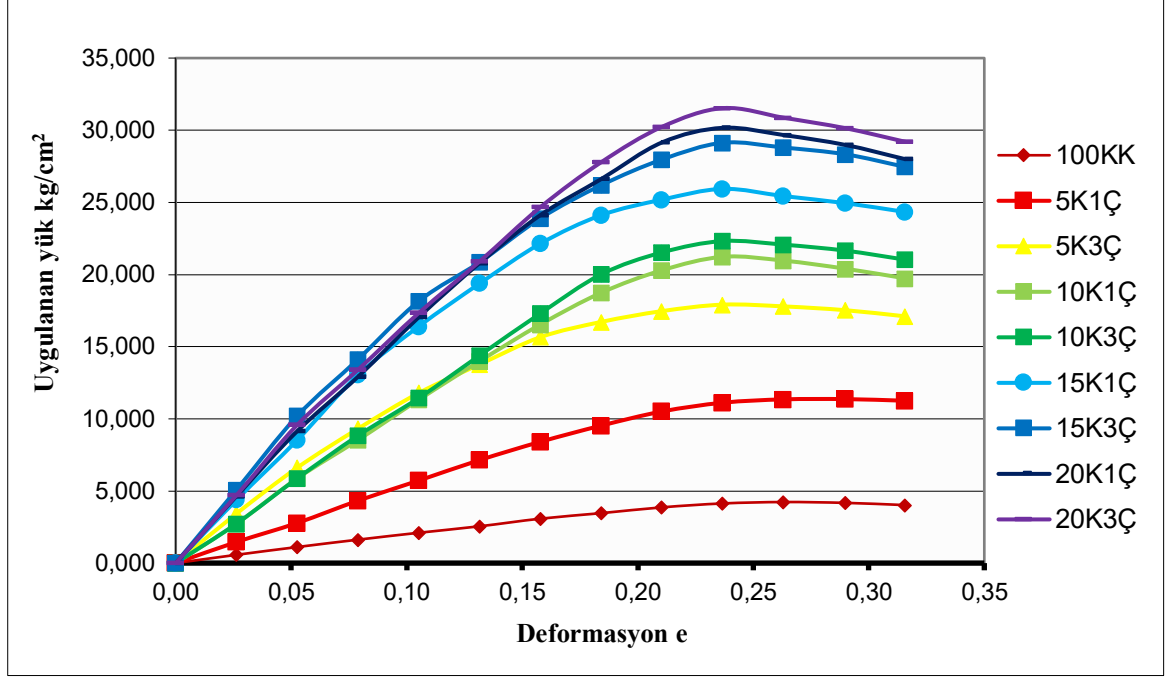
Şekil 4.40: Yedi günlük tek eksenli basıncı dayanımı grafiği



Şekil 4.41: %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.42: %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.43: Tüm karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

4.6.1.3 On dört günlük kür sonundaki tek eksenli basınç mukavemeti değerleri

14 günlük kür süresi sonunda yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyleri, katkı oranlarının zemin mukavemeti üzerinde olumlu ve sürekli bir artış sağladığını ortaya koymuştur. Saf kaolin kil numunesinde 4.67 kgf/cm² olarak ölçülen basınç dayanımı, katkı oranlarının artmasıyla birlikte belirgin şekilde yükselmiştir.

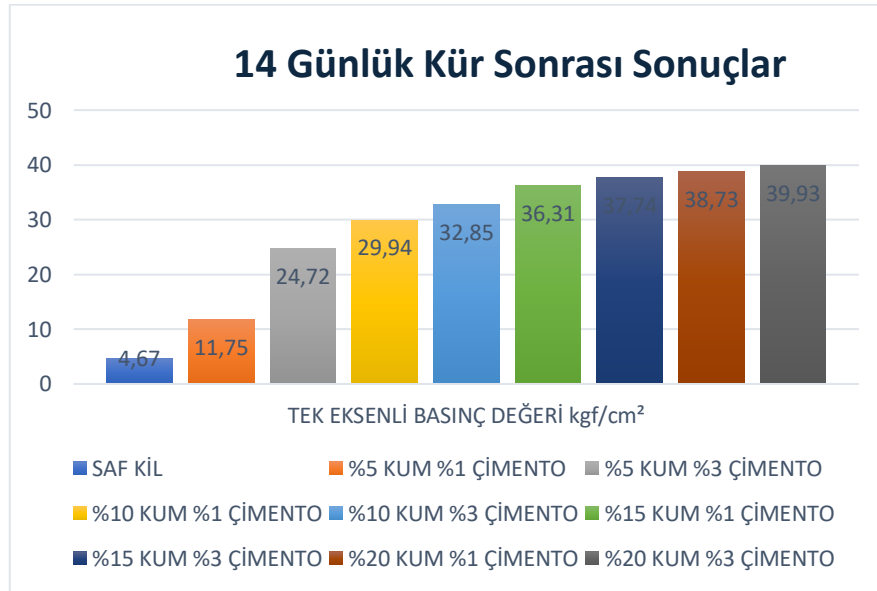
Kum oranı arttıkça, özellikle çimento katkısı ile, tane yapısının daha sıkı hale geldiği ve bağlayıcılık etkisinin daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. %5 kum katkılı numunelerde dayanım değerleri 11.75–24.72 kgf/cm² aralığında değişirken, %10 kum katkısı ile bu değer 29.94–32.85 kgf/cm²'ye yükselmiştir. %15 ve %20 kum oranlarında ise dayanımda belirgin bir artış gözlenmiş; %20 kum + %3 çimento katkılı numune en yüksek dayanım değeri olan 39.93 kgf/cm²'ye ulaşmıştır.

Bu veriler, artan kum oranının zemin yapısındaki boşlukları daha iyi doldurduğunu, çimentonun bağlayıcı etkisiyle birlikte parçacıklar arasında güçlü bir yapı oluştuğunu göstermektedir. Özellikle yüksek oranlı kum katkısı, dayanım değerlerinde süreklilik gösteren bir artış eğilimi yaratmıştır. On dört günlük tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.27'de, tek eksenli basınç dayanımı grafiği Şekil 4.44'te, %1 çimento içeren karışımlara ait serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 4.45'te, %3 çimento içeren karışımlara

ait serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 4.46’da, tüm karışımlara ait serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 4.47’de, %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 4.48’de, %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 4.49’da, tüm karışımlara ait gerilme şekil değiştirme grafiği Şekil 4.50’de verilmiştir.

Tablo 4.27: On dört günlük tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

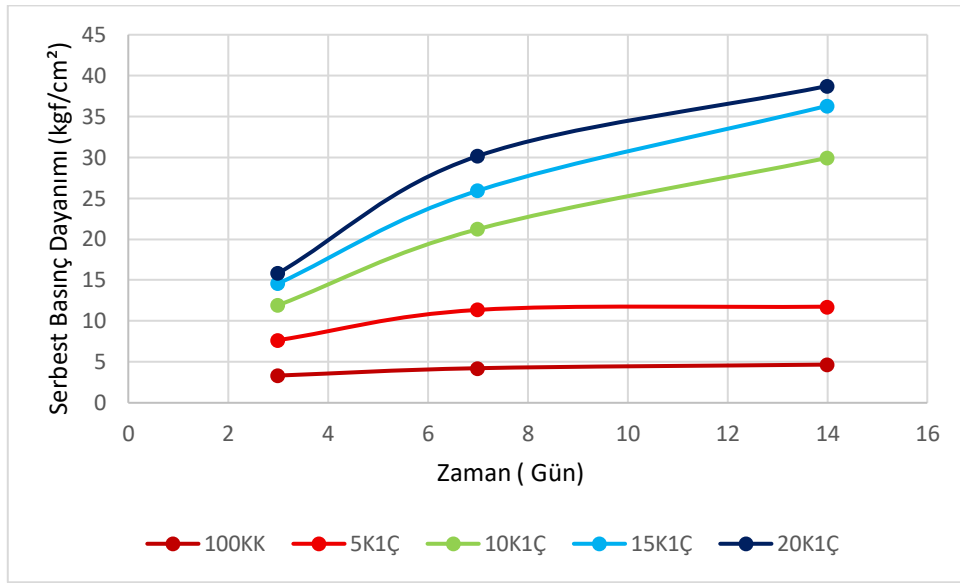
TEK EKSENLİ BASINÇ DEĞERİ kgf/cm ²	
SAF KİL	4.67
%5 KUM %1 ÇİMENTO	11.75
%5 KUM %3 ÇİMENTO	24.72
%10 KUM %1 ÇİMENTO	29.94
%10 KUM %3 ÇİMENTO	32.85
%15 KUM %1 ÇİMENTO	36.31
%15 KUM %3 ÇİMENTO	37.74
%20 KUM %1 ÇİMENTO	38.73
%20 KUM %3 ÇİMENTO	39.93



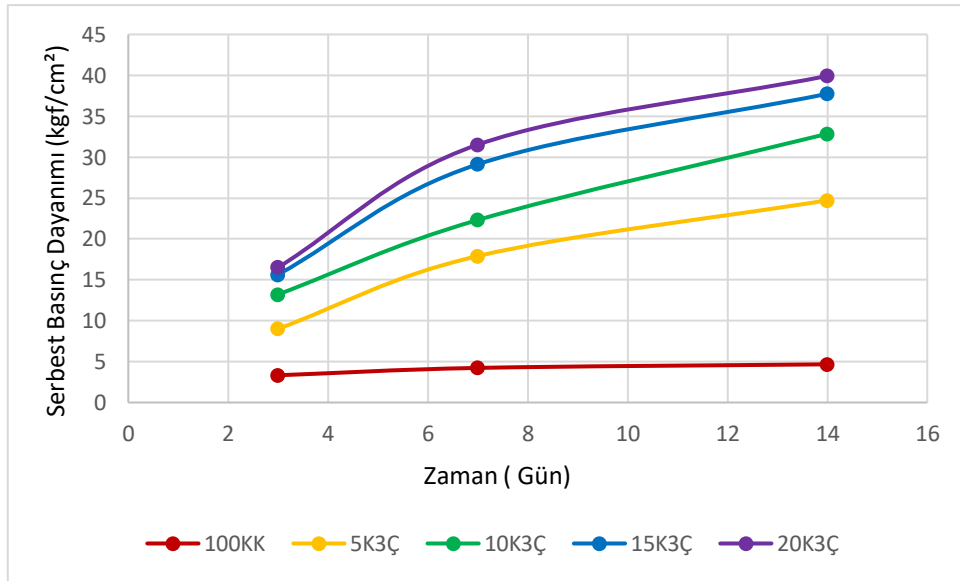
Şekil 4.44: On dört günlük tek eksenli basınç dayanımı grafiği

Tüm karışımlara ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri tablo halinde sunulmuş, ardından bu verilerden yararlanılarak karşılaştırmalı grafikler oluşturulmuştur. Böylece katkı oranlarının dayanım üzerindeki etkisi daha sistematik biçimde değerlendirilebilmiştir. %1 çimento içeren karışımların dayanım grafiği Şekil 4.28’de, %3 çimentolu karışımların

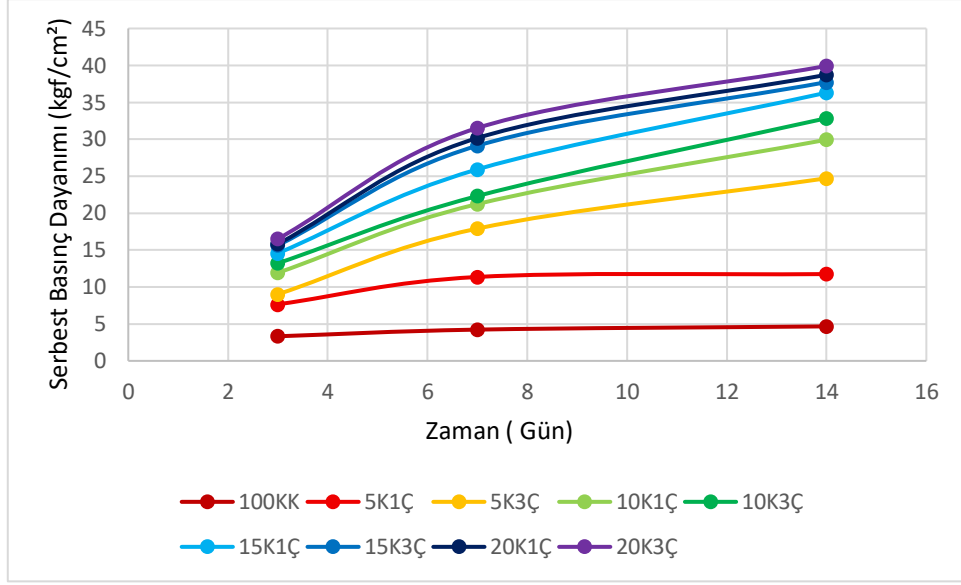
dayanım grafiği Şekil 4.29'da tüm karışımlara ait ortak dayanım grafiği ise Şekil 4.30'da yer almaktadır.



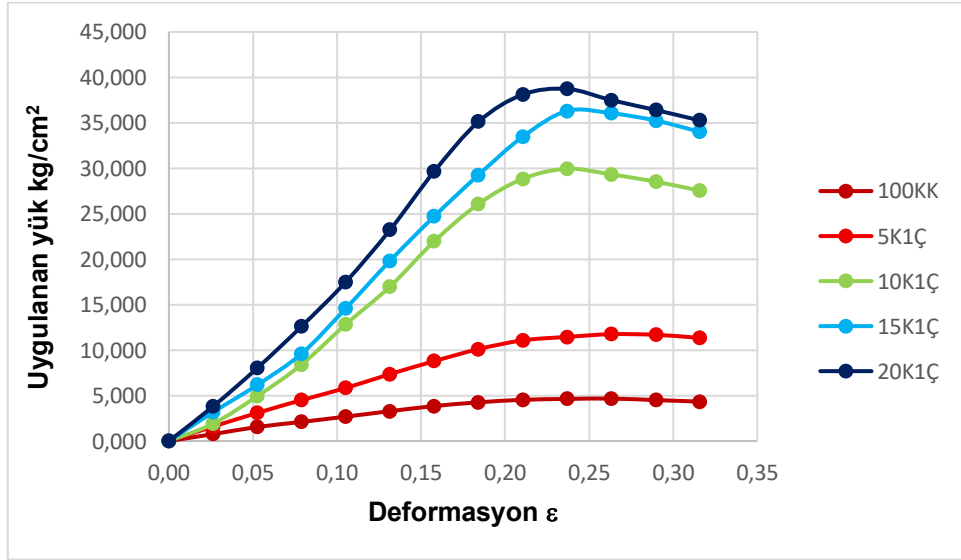
Şekil 4.45: %1 ĉimento iĉeren karışımlara ait serbest basınĉ dayanımı grafiği



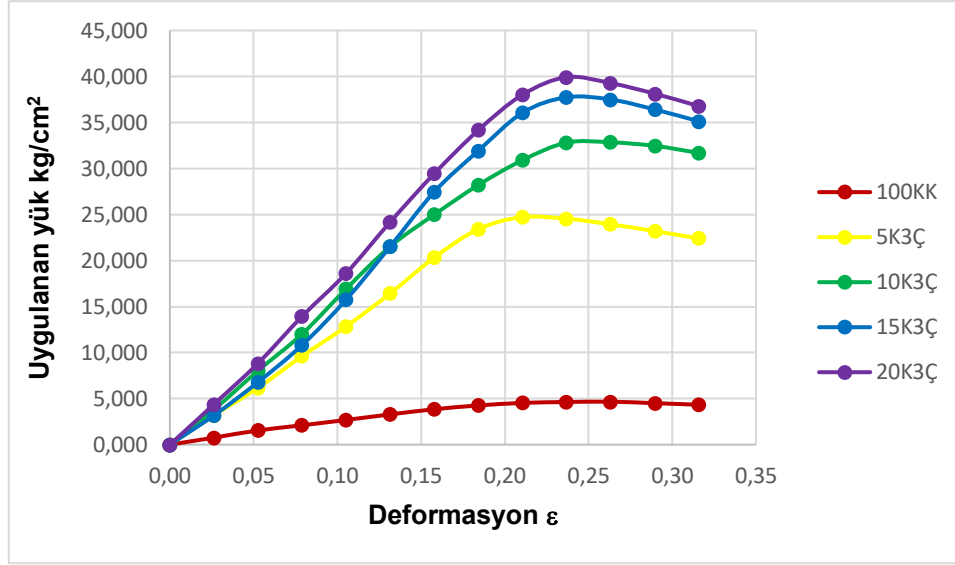
Şekil 4.46: %3 ĉimento iĉeren karışımlara ait serbest basınĉ dayanımı grafiği



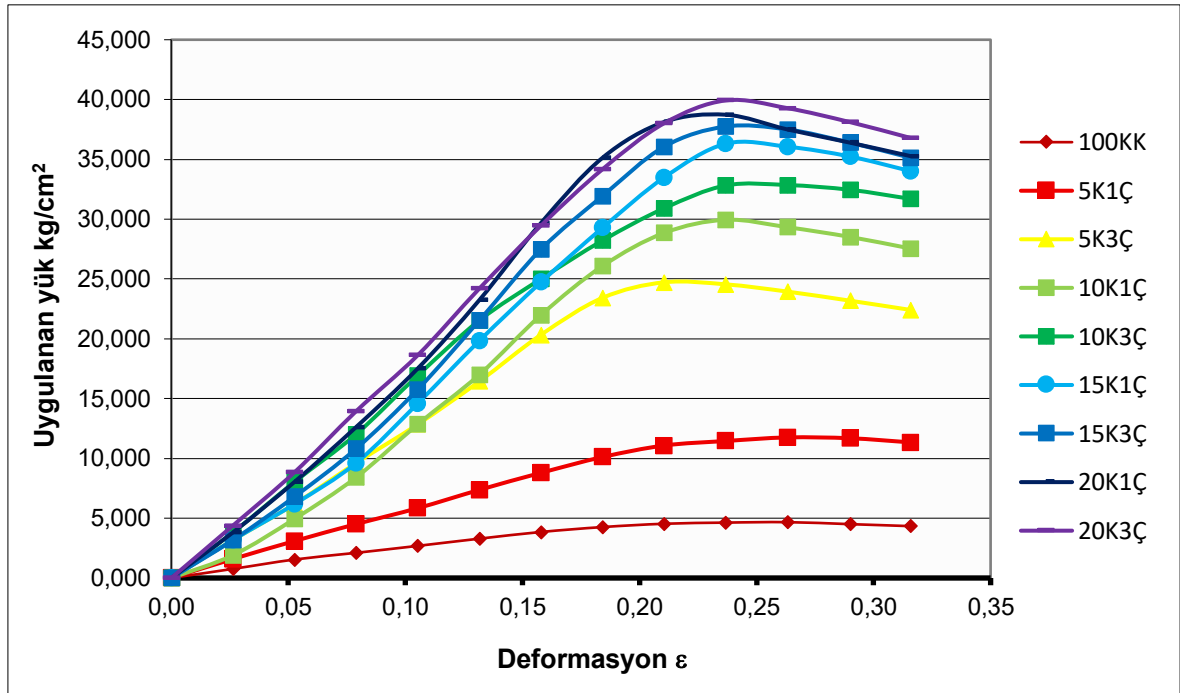
Şekil 4.47: Tüm karışımlara ait serbest basınç dayanımı grafiği



Şekil 4.48: %1 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.49: %3 çimento içeren karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.50: Tüm karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

4.7 Konsolidasyon Deney Sonuçları

Bu deney, hazırlanan zemin karışımlarının yük altındaki oturma ve şişme davranışlarını incelemek; ince kum ve çimento katkısının bu özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım, kendi optimum su içeriğinde hazırlanarak standart proktor yöntemiyle sıkıştırılmış ve konsolidasyon halkalarına

yerleştirilmiştir. Numunelerin üst ve alt yüzeylerine gözenekli poroz taşları ve süzgeç kağıtları yerleştirilerek çift taraflı drenaj sağlanmıştır.

Deneyler, biri saf kil olmak üzere toplam dokuz farklı zemin karışımı üzerinde yürütülmüştür. Her bir deneyde yükleme süreci, 0.5 kg başlangıç yükü ile başlatılmış; bu yük sırasıyla 1, 2, 4 ve 9 kg olacak şekilde arttırılmıştır. Her bir yük kademesi 24 saat süreyle uygulanmış ve belirli aralıklarla gösterge değerleri kaydedilmiştir. Maksimum yüklemenin ardından, yükleme adımlarına ters sırayla yük boşaltmalarına geçilmiş ve yine 24 saatlik aralıklarla 9 kg'dan başlanarak 0.5 kg'a kadar düşürülmüştür. Boşaltma sürecinde de her kademede oturma değerleri izlenmiş ve tabloya işlenmiştir. Serbest şişme okuması ve şişme basıncı ölçülerek, katkı oranlarının zeminin şişme potansiyeli üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Toplam dokuz farklı karışım üzerinde yapılan deneyler sonucunda, şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerleri belirlenmiş; katkı oranlarına bağlı olarak zeminlerin yük altında ve yük kaldırıldığında davranışları incelenmiştir. Konsolidasyon deneyine ait numune hazırlama aşamaları Şekil 4.51'de, konsolidasyonda kullanılan ekipmanlar Şekil 4.52'de gösterilmiştir. Tablo 4.28'de ise katkı oranlarına bağlı şişme basıncı ve şişme yüzdesi tablosu verilmiştir. Şişme yüzdesi formülü denklem 4.2'de, şişme basıncı formülü denklem 4.3'te, alan formülü denklem 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.51: Konsolidasyon deneyine ait numune yerleştirme ve düzenek hazırlama aşamaları



Şekil 4.52: Konsolidasyonda kullanılan ekipmanlar: yükleme ünitesi ve hassas ölçüm sistemi

Tablo 4.28: Katkı oranlarına bağlı şişme davranışları

Notasyon	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kg/cm ²)	Serbest şişme okuması (cm)	Şişme basıncı ağırlığı (kg)
100KK	0,81	0,0357	0.16200.	0.700
5K1Ç	0,8	0,0331	0.0160	0.650
5K3Ç	0,79	0,0323	0.0158	0.635
10K1Ç	0,76	0,0313	0.0152	0.615
10K3Ç	0,75	0,0306	0.0149	0.600
15K1Ç	0,72	0,0293	0.0144	0.575
15K3Ç	0,71	0,0288	0.0142	0.565
20K1Ç	0,7	0,028	0.0139	0.550
20K3Ç	0,69	0,0272	0.0137	0.535

Şişme yüzdesi formülü:

$$\%S = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (4.2)$$

Δh = Şişme sonucu oluşan ilk yükseklik artışı (cm)

h_0 = Numunenin ilk yüksekliği (cm)

Şişme yüzdesi deney değerinin bulunması örneği:

Hesap %5 kum %1 çimento karışımı için ilk yük deformasyonu değeriyle yapılmıştır.

İlk serbest şişme okuması: 0.0160 cm

$$\begin{aligned}\text{Şişme yüzdesi} &= \frac{0.0160}{2} \times 100 \\ &= \% 0.8\end{aligned}$$

Şişme basıncı formülü:

$$\text{Şişme basıncı} = \frac{\text{yük (kg)}}{\text{numune alanı (cm}^2\text{)}} \quad (4.3)$$

Alan:

$$A = \pi \times r^2 \quad (4.4)$$

Şişme basıncı deney değerinin bulunması örneği:

Hesap %5 kum %1 çimento karışımı için yapılmıştır.

Çap: 50 mm / 5 cm

$$A = \pi \times (2.5^2) \approx 19.63$$

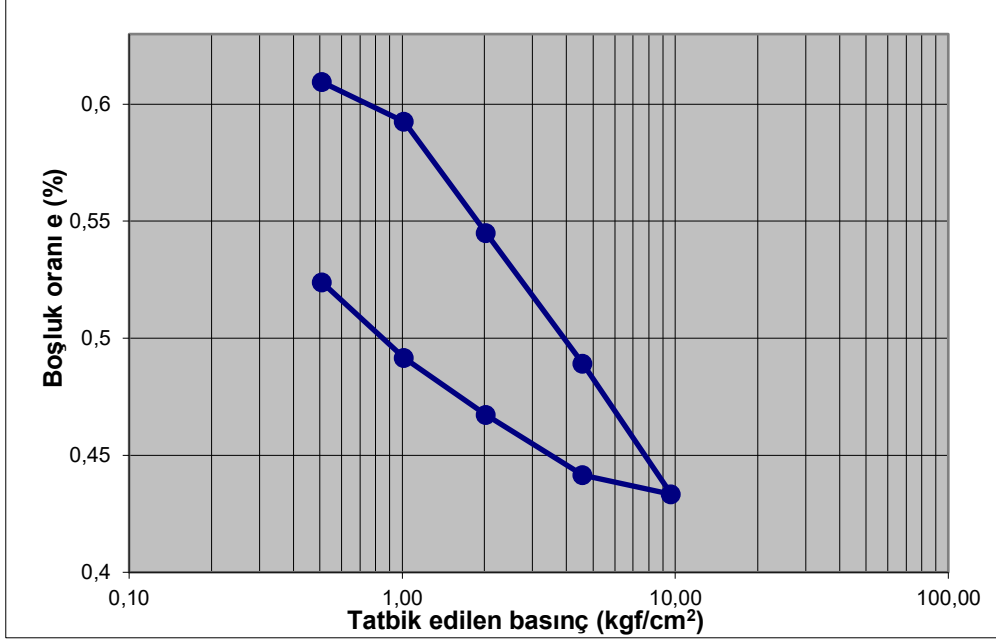
$$\begin{aligned}\text{Şişme basıncı} &= \frac{0.650}{19.63} \\ &= 0.0331 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Yapılan deneylere ait sonuçlar ayrı ayrı tablolanmış ve grafik haline getirilmiştir. Saf kile ait konsolidasyon sonucu Tablo 4.29'da, konsolidasyon grafiği Şekil 4.53'te, %5 Kum %1 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.30'da, konsolidasyon grafiği Şekil 4.54'de, %5 Kum %3 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.31'de, konsolidasyon grafiği Şekil 4.55'te, %10 Kum %1 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.32'de, konsolidasyon grafiği Şekil 4.56'da, %10 Kum %3 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.33'de, konsolidasyon grafiği Şekil 4.57'de, %15 Kum %1 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.34'te, konsolidasyon grafiği Şekil 4.57'de, %15 Kum %3 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.35'te, konsolidasyon grafiği Şekil 4.58'de, %20 Kum %1 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.36'da, konsolidasyon grafiği Şekil 4.59'da, %20 Kum %3 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları Tablo 4.37'de, konsolidasyon grafiği Şekil 4.61'de verilmiştir.

Hacimsel sıkışma yüzdesi formülü denklem 4.5'te verilmiştir. Tüm karışımlara ait konsolidasyon yükleri altında elde edilen hacimsel sıkışma yüzdeleri Tablo 4.38'de sunulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda, %1 ve %3 çimento katkılı karışımlar için ayrı ayrı grafikler oluşturulmuş; ayrıca tüm numuneleri içeren karşılaştırmalı bir grafik hazırlanmıştır. Bu sayede, katkı oranlarının zemin sıkışabilirliği üzerindeki etkisi daha net biçimde değerlendirilmiştir. %1 çimento katkılı karışımların hacimsel sıkışma – konsolidasyon yükü grafiği Şekil 4.62'de, %3 çimento katkılı karışımların hacimsel sıkışma – konsolidasyon yükü grafiği Şekil 4.63'te, tüm karışımlara ait hacimsel sıkışma – konsolidasyon yükü grafik ise Şekil 4.64'te verilmiştir. %1 çimentolu karışımların boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği Şekil 4.65'te, %3 çimentolu karışımların boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği Şekil 4.66'da, tüm karışımlara ait boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği Şekil 4.67'de verilmiştir.

Tablo 4.29: Saf kil konsolidasyon sonuçları

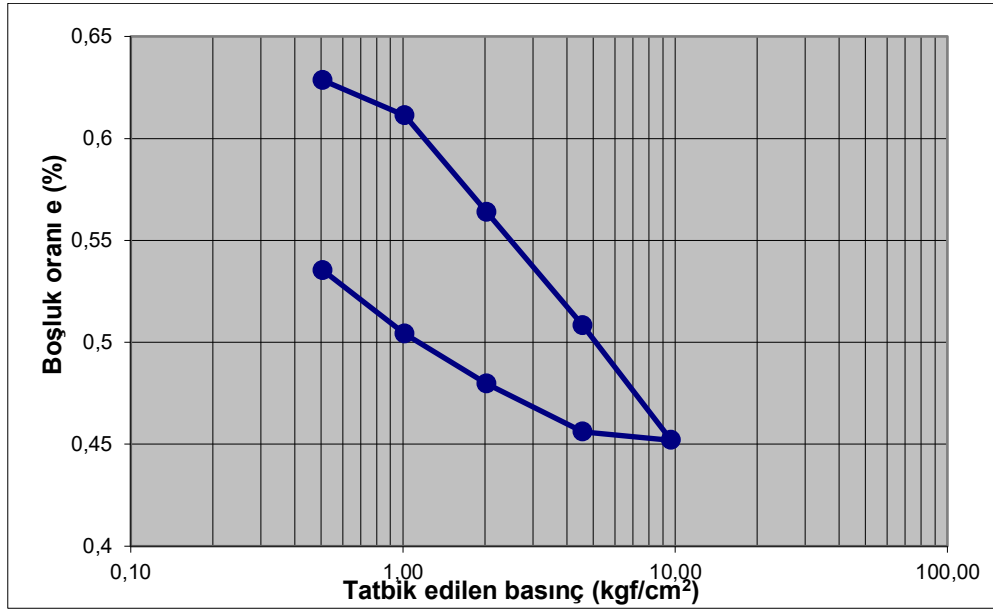
Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınç Artışı kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma MV cm ² /kg	Es 1/MV kg/cm ²
0,0000	0,0000		2,0162	0,0000	0,7784	0,6288					
0,5093	0,024	0,024	1,9922	0,0119	0,7544	0,6094	0,0194	0,5093	0,0381	0,0234	0,0000
1,0186	0,045	0,021	1,9712	0,0223	0,7334	0,5925	0,0170	0,5093	0,0333	0,0207	48,3152
2,0372	0,104	0,059	1,9122	0,0516	0,6744	0,5448	0,0477	1,0186	0,0468	0,0294	34,0313
4,5837	0,173	0,069	1,8432	0,0858	0,6054	0,4891	0,0557	2,5465	0,0219	0,0142	70,5707
9,6766	0,242	0,069	1,7742	0,1200	0,5364	0,4333	0,0557	5,0930	0,0109	0,0074	136,0485
4,5837	0,232	0,0100	1,7842	0,1151	0,5464	0,4414					
2,0372	0,2000	0,032	1,8162	0,0992	0,5784	0,4672					
1,0186	0,1700	0,0300	1,8462	0,0843	0,6084	0,4915					
0,5093	0,1300	0,0400	1,8862	0,0645	0,6484	0,5238					



Şekil 4.53: Saf kil konsolidasyon grafiği

Tablo 4.30: %5 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları

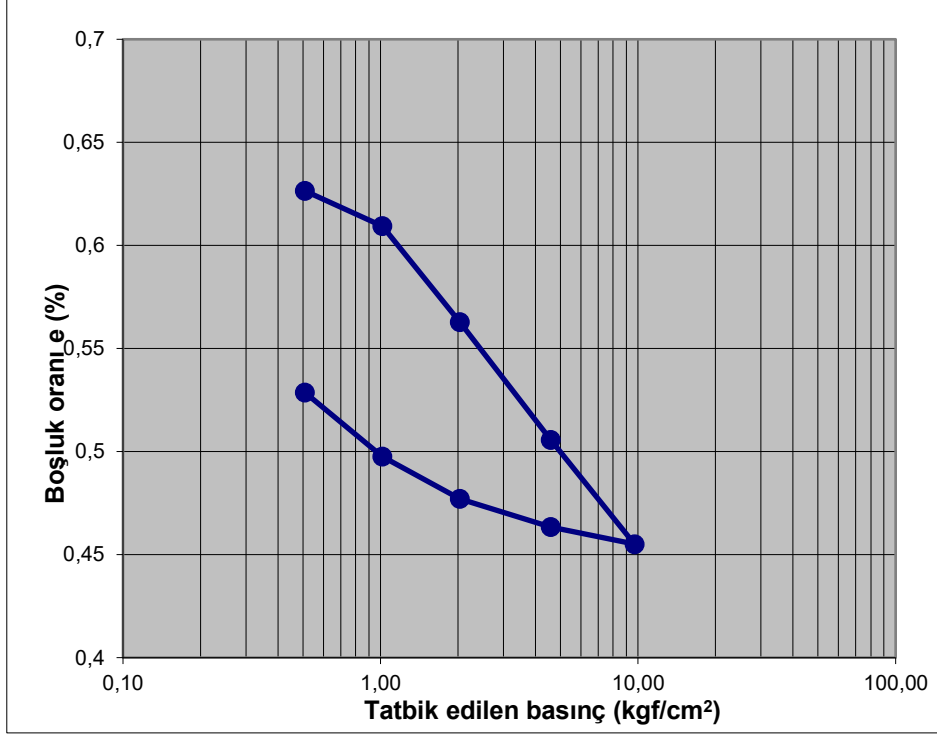
Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınc Artış kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma MV cm ² /kg	Es 1/Mv kg/cm ²
0,0000	0,0000		2,0160	0,0000	0,7921	0,6472	0,0188	0,5093	0,0369	0,0224	0,0000
0,5093	0,0230	0,0230	1,9930	0,0114	0,7691	0,6284	0,0172	0,5093	0,0337	0,0207	48,3346
1,0186	0,0440	0,0210	1,9720	0,0218	0,7481	0,6112	0,0474	1,0186	0,0465	0,0289	34,6321
2,0372	0,1020	0,0580	1,9140	0,0506	0,6901	0,5639	0,0556	2,5465	0,0218	0,0140	71,6760
4,5837	0,1700	0,0680	1,8460	0,0843	0,6221	0,5083	0,0564	5,0930	0,0111	0,0073	136,2552
9,6766	0,2390	0,0690	1,7770	0,1186	0,5531	0,4519					
4,5837	0,2340	0,0050	1,7820	0,1161	0,5581	0,4560					
2,0372	0,2050	0,0290	1,8110	0,1017	0,5871	0,4797					
1,0186	0,1750	0,0300	1,8410	0,0868	0,6171	0,5042					
0,5093	0,1370	0,0380	1,8790	0,0680	0,6551	0,5353					



Şekil 4.54: %5 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği

Tablo 4.31: %5 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları

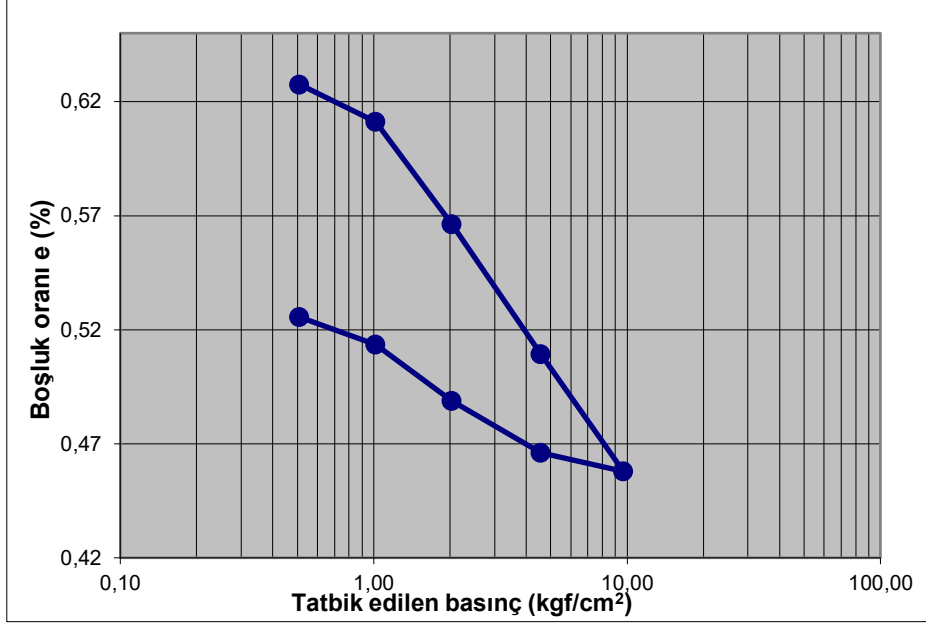
Tatbık Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınç Artışı kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma MV cm ² /kg	Es 1/Mv kg/cm ²
0,0000	0,0000	0,0220	2,0158	0,0000	0,7899	0,6444	0,0179	0,5093	0,0352	0,0214	0,0000
0,5093	0,0220	0,0210	1,9938	0,0109	0,7679	0,6264	0,0171	0,5093	0,0336	0,0207	48,3540
1,0186	0,0430	0,0570	1,9728	0,0213	0,7469	0,6093	0,0465	1,0186	0,0456	0,0284	35,2540
2,0372	0,1000	0,0700	1,9158	0,0496	0,6899	0,5628	0,0571	2,5465	0,0224	0,0143	69,6936
4,5837	0,1700	0,0620	1,8458	0,0843	0,6199	0,5057	0,0506	5,0930	0,0099	0,0066	151,6224
9,6766	0,2320	0,0100	1,7838	0,1151	0,5579	0,4551					
4,5837	0,2220	0,0170	1,7938	0,1101	0,5679	0,4633					
2,0372	0,2050	0,0250	1,8108	0,1017	0,5849	0,4771					
1,0186	0,1800	0,0380	1,8358	0,0893	0,6099	0,4975					
0,5093	0,1420		1,8738	0,0704	0,6479	0,5285					



Şekil 4.55: %5 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği

Tablo 4.32: %10 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları

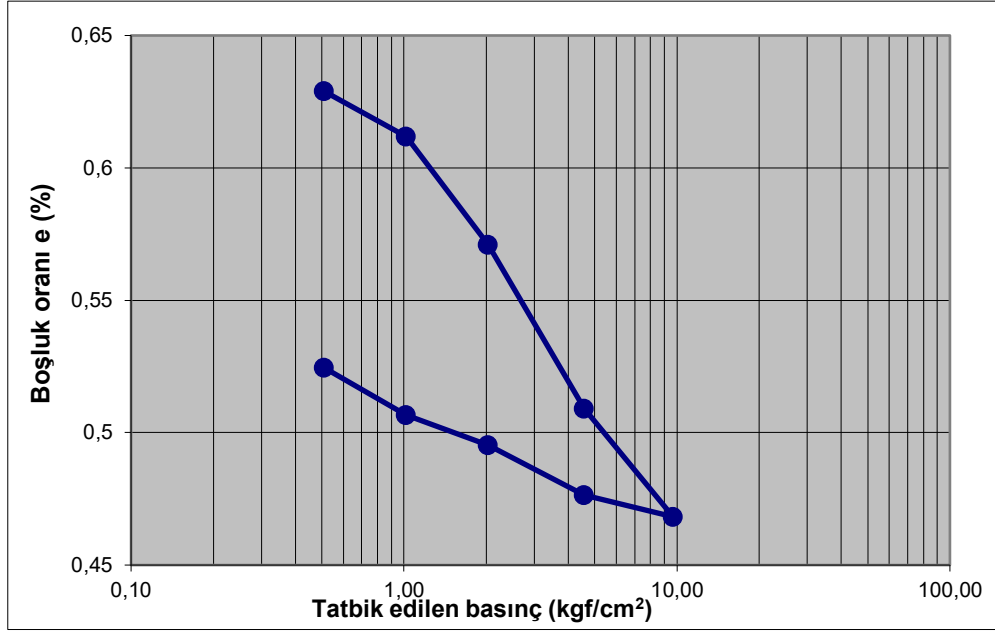
Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/h ₀	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınç Artışı kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma Mv cm ² /kg	Es 1/Mv kg/cm ²
0,0000	0,0000	0,0200	2,0152	0,0000	0,7893	0,6439	0,0163	0,5093	0,0320	0,0195	0,0000
0,5093	0,0200	0,0200	1,9952	0,0099	0,7693	0,6275	0,0163	0,5093	0,0320	0,0197	50,8074
1,0186	0,0400	0,0550	1,9752	0,0198	0,7493	0,6112	0,0449	1,0186	0,0440	0,0273	36,5804
2,0372	0,0950	0,0700	1,9202	0,0471	0,6943	0,5664	0,0571	2,5465	0,0224	0,0143	69,8536
4,5837	0,1650	0,0630	1,8502	0,0819	0,6243	0,5093	0,0514	5,0930	0,0101	0,0067	149,5714
9,6766	0,2280	0,0100	1,7872	0,1131	0,5613	0,4579					
4,5837	0,2180	0,0280	1,7972	0,1082	0,5713	0,4660					
2,0372	0,1900	0,0300	1,8252	0,0943	0,5993	0,4889					
1,0186	0,1600	0,0150	1,8552	0,0794	0,6293	0,5133					
0,5093	0,1450		1,8702	0,0720	0,6443	0,5256					



Şekil 4.56: %10 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği

Tablo 4.33: %10 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları

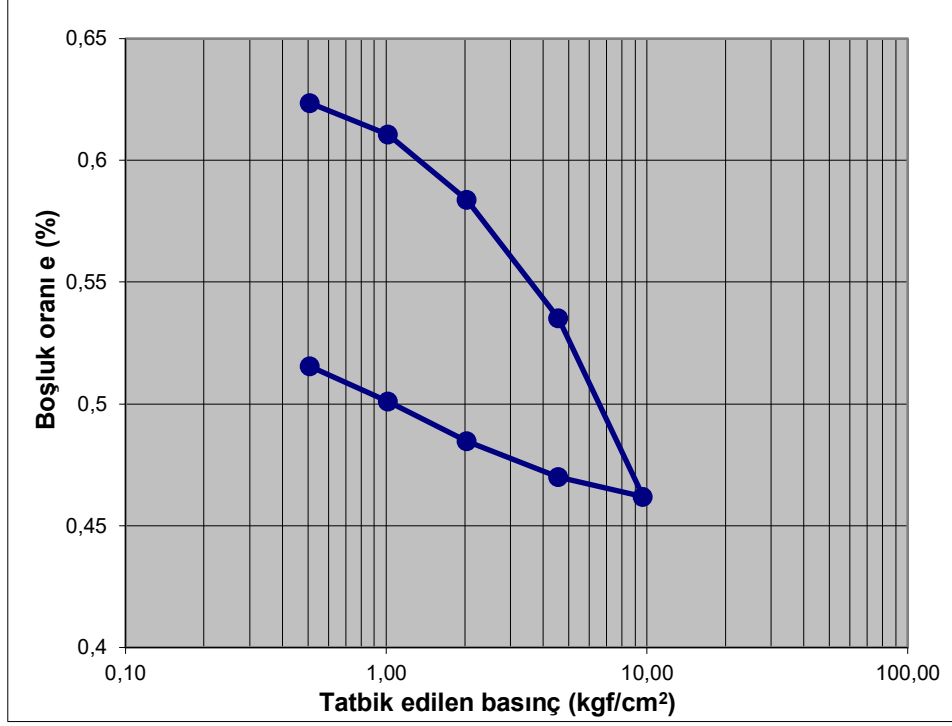
Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınç Artışı kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma MV cm ² /kg	Es 1/Mv kg/cm ²
0.0000	0.0000	0.0180	2,0149	0.0000	0.7890	0.6436	0.0147	0.5093	0.0288	0.0175	0.0000
0.5093	0.0180	0.0210	1,9969	0.0089	0.7710	0.6289	0.0171	0.5093	0.0336	0.0206	48,4292
1,0186	0.0390	0.0500	1,9759	0.0194	0.7500	0.6118	0.0408	1,0186	0.0400	0.0248	40,2527
2,0372	0.0890	0.0760	1,9259	0.0442	0.7000	0.5710	0.0620	2,5465	0.0243	0.0155	64,5298
4,5837	0.1650	0.0500	1,8499	0.0819	0.6240	0.5090	0.0408	5,0930	0.0080	0.0053	188,4294
9,6766	0.2150	0.0100	1,7999	0.1067	0.5740	0.4682					
4,5837	0.2050	0.0230	1,8099	0.1017	0.5840	0.4764					
2,0372	0.1820	0.0140	1,8329	0.0903	0.6070	0.4952					
1,0186	0.1680	0.0220	1,8469	0.0834	0.6210	0.5066					
0.5093	0.1460		1,8689	0.0725	0.6430	0.5245					



Şekil 4.57: %10 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği

Tablo 4.34: %15 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları

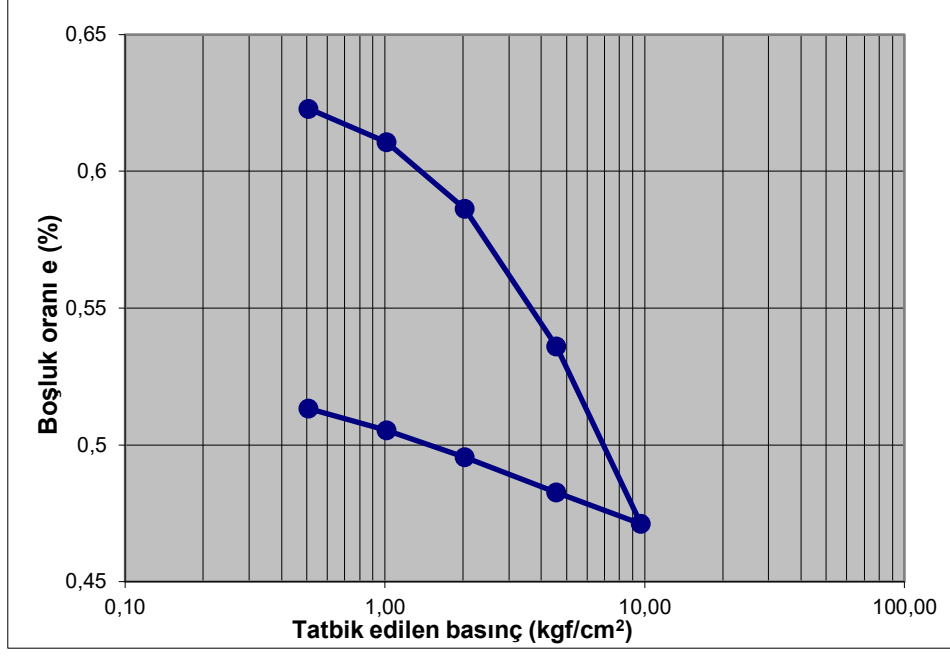
Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınç Artışı kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma MV cm ² /kg	Es 1/MV kg/cm ²
0,0000	0,0000		2,0144	0,0000	0,7835	0,6366	0,0130	0,5093	0,0255	0,0156	0,0000
0,5093	0,0160	0,0160	1,9984	0,0079	0,7675	0,6236	0,0130	0,5093	0,0255	0,0157	63,6111
1,0186	0,0320	0,0330	1,9824	0,0159	0,7515	0,6106	0,0268	1,0186	0,0263	0,0163	61,1896
2,0372	0,0650	0,0600	1,9494	0,0323	0,7185	0,5838	0,0487	2,5465	0,0191	0,0121	82,7352
4,5837	0,1250	0,0900	1,8894	0,0621	0,6585	0,5350	0,0731	5,0930	0,0144	0,0094	106,9183
9,6766	0,2150	0,0100	1,7994	0,1067	0,5685	0,4619					
4,5837	0,2050	0,0180	1,8094	0,1018	0,5785	0,4700					
2,0372	0,1870	0,0200	1,8274	0,0928	0,5965	0,4846					
1,0186	0,1670	0,0180	1,8474	0,0829	0,6165	0,5009					
0,5093	0,1490		1,8654	0,0740	0,6345	0,5155					



Şekil 4.58: %15 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği

Tablo 4.35: %15 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları

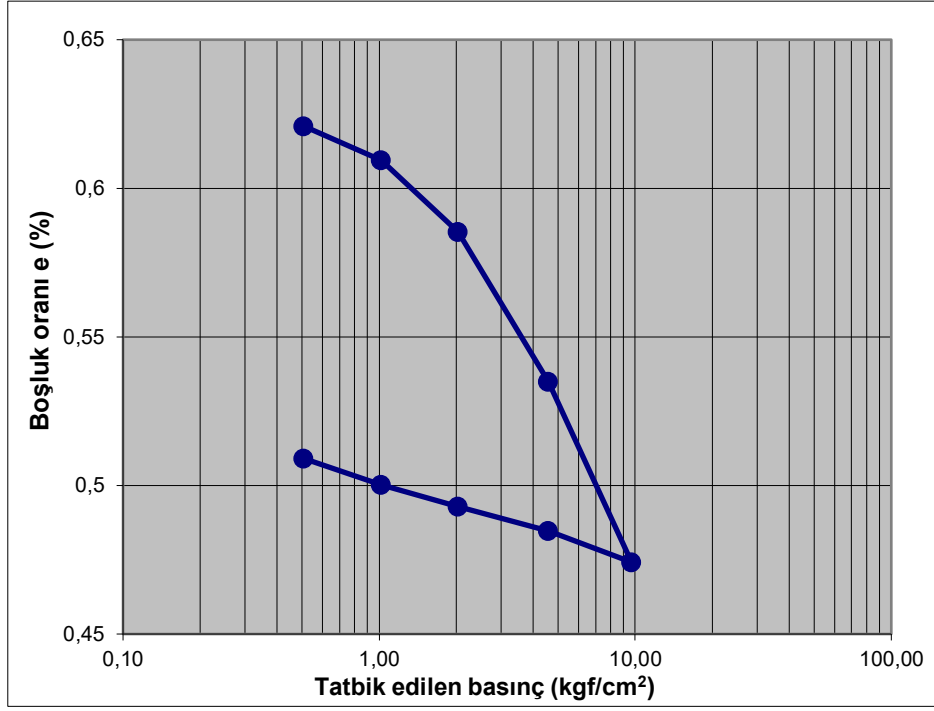
Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Değişimi	Basınç Artışı kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma MV cm ² /kg	Es 1/MV kg/cm ²
0,0000	0,0000		2,0142	0,0000	0,7823	0,6351					
		0,0150					0,0122	0,5093	0,0239	0,0146	0,0000
0,5093	0,0150		1,9992	0,0074	0,7673	0,6229					
		0,0150					0,0122	0,5093	0,0239	0,0147	67,8790
1,0186	0,0300		1,9842	0,0149	0,7523	0,6107					
		0,0300					0,0244	1,0186	0,0239	0,0148	67,3697
2,0372	0,0600		1,9542	0,0298	0,7223	0,5864					
		0,0620					0,0503	2,5465	0,0198	0,0125	80,2634
4,5837	0,1220		1,8922	0,0606	0,6603	0,5361					
		0,0800					0,0649	5,0930	0,0128	0,0083	120,4613
9,6766	0,2020		1,8122	0,1003	0,5803	0,4711					
		0,0140									
4,5837	0,1880		1,8262	0,0933	0,5943	0,4825					
		0,0160									
2,0372	0,1720		1,8422	0,0854	0,6103	0,4955					
		0,0120									
1,0186	0,1600		1,8542	0,0794	0,6223	0,5052					
		0,0100									
0,5093	0,1500		1,8642	0,0745	0,6323	0,5133					



Şekil 4.59: %15 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği

Tablo 4.36: %20 kum %1 çimento konsolidasyon sonuçları

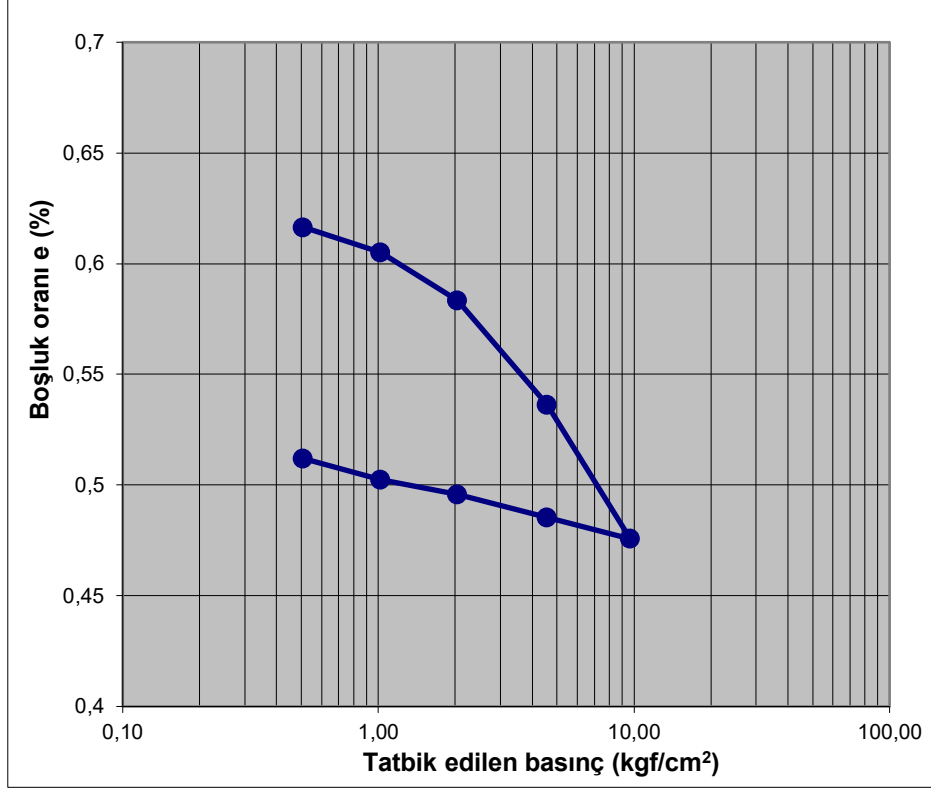
Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınc Artışı kg/cm ²	Sıkışma Katsayısı av cm ² /kg	Hacimsel Sıkışma MV cm ² /kg	Es 1/Mv kg/cm ²
0,0000	0,0000		2,0139	0,0000	0,7801	0,6322	0,0113	0,5093	0,0223	0,0136	0,0000
0,5093	0,0140	0,0140	1,9999	0,0070	0,7661	0,6209	0,0113	0,5093	0,0223	0,0137	72,7530
1,0186	0,0280	0,0300	1,9859	0,0139	0,7521	0,6095	0,0243	1,0186	0,0239	0,0148	67,4274
2,0372	0,0580	0,0620	1,9559	0,0288	0,7221	0,5852	0,0502	2,5465	0,0197	0,0124	80,3333
4,5837	0,1200	0,0750	1,8939	0,0596	0,6601	0,5350	0,0608	5,0930	0,0119	0,0078	128,6075
9,6766	0,1950	0,0130	1,8189	0,0968	0,5851	0,4742					
4,5837	0,1820	0,0100	1,8319	0,0904	0,5981	0,4847					
2,0372	0,1720	0,0090	1,8419	0,0854	0,6081	0,4928					
1,0186	0,1630	0,0110	1,8509	0,0809	0,6171	0,5001					
0,5093	0,1520		1,8619	0,0755	0,6281	0,5090					



Şekil 4.60: %20 kum %1 çimento konsolidasyon grafiği

Tablo 4.37 %20 kum %3 çimento konsolidasyon sonuçları

Tatbik Edilen Basınç kg/cm ²	Oturma cm	Oturma Farkı cm	Numune Yüksekliği cm	Epsilon h/ho	Boşluk Yüksek hb cm	Boşluk Oranı e %	Boşluk Oranı Değişimi	Basınc Artışı kg/cm ²	Sıkışma katsayısı av	Hacimsel Sıkışma Mv cm ² /kg	Es 1/Mv kg/cm ²
0,0000	0,0000		2,0137	0,0000	0,7779	0,6294	0,0129	0,5093	0,0254	0,0156	0,0000
0,5093	0,0160	0,0160	1,9977	0,0079	0,7619	0,6165	0,0113	0,5093	0,0222	0,0138	72,6729
1,0186	0,0300	0,0140	1,9837	0,0149	0,7479	0,6051	0,0218	1,0186	0,0214	0,0134	74,8364
2,0372	0,0570	0,0270	1,9567	0,0283	0,7209	0,5833	0,0469	2,5465	0,0184	0,0116	85,9086
4,5837	0,1150	0,0580	1,8987	0,0571	0,6629	0,5364	0,0607	5,0930	0,0119	0,0078	128,9334
9,6766	0,1900	0,0750	1,8237	0,0944	0,5879	0,4757					
4,5837	0,1780	0,0120	1,8357	0,0884	0,5999	0,4854					
2,0372	0,1650	0,0130	1,8487	0,0819	0,6129	0,4959					
1,0186	0,1570	0,0080	1,8567	0,0780	0,6209	0,5024					
0,5093	0,1450	0,0120	1,8687	0,0720	0,6329	0,5121					



Şekil 4.61: %20 kum %3 çimento konsolidasyon grafiği

Hacimsel sıkışma yüzdesi formülü:

$$\varepsilon(\%) = \left(\frac{\Delta h}{h_o} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

ε (%): Hacimsel sıkışma yüzdesi

Δh : Uygulanan her yük kademesindeki deformasyon (dailgeçten okunan değer, mm)

h_o : Numunenin (ringin) başlangıç yüksekliği (mm)

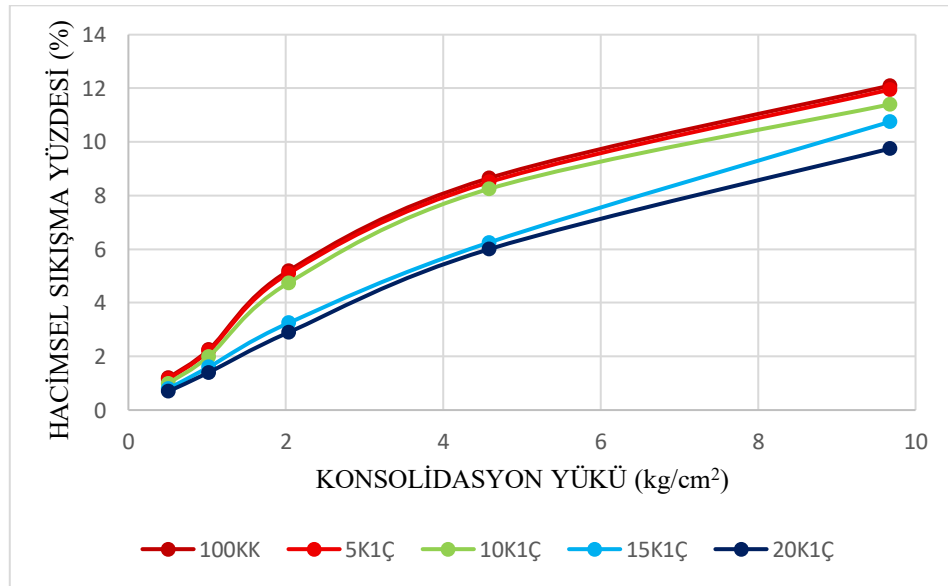
Hacimsel sıkışma yüzdesi deney değerinin bulunması örneği:

Hesap %20 kum %3 çimento karışımı için ilk yük deformasyonu değeriyle yapılmıştır.

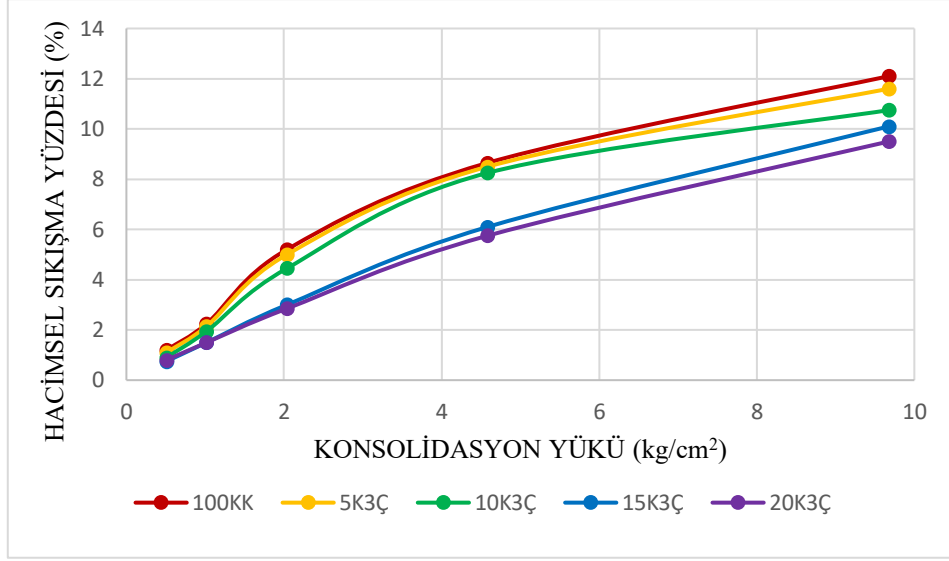
$$\begin{aligned} \varepsilon(\%) &= \left(\frac{0.016}{20} \right) \times 100 \\ &= 0.8 \end{aligned}$$

Tablo 4.38: Tüm karışımların konsolidasyon yükleri altında hacimsel sıkışma değerleri

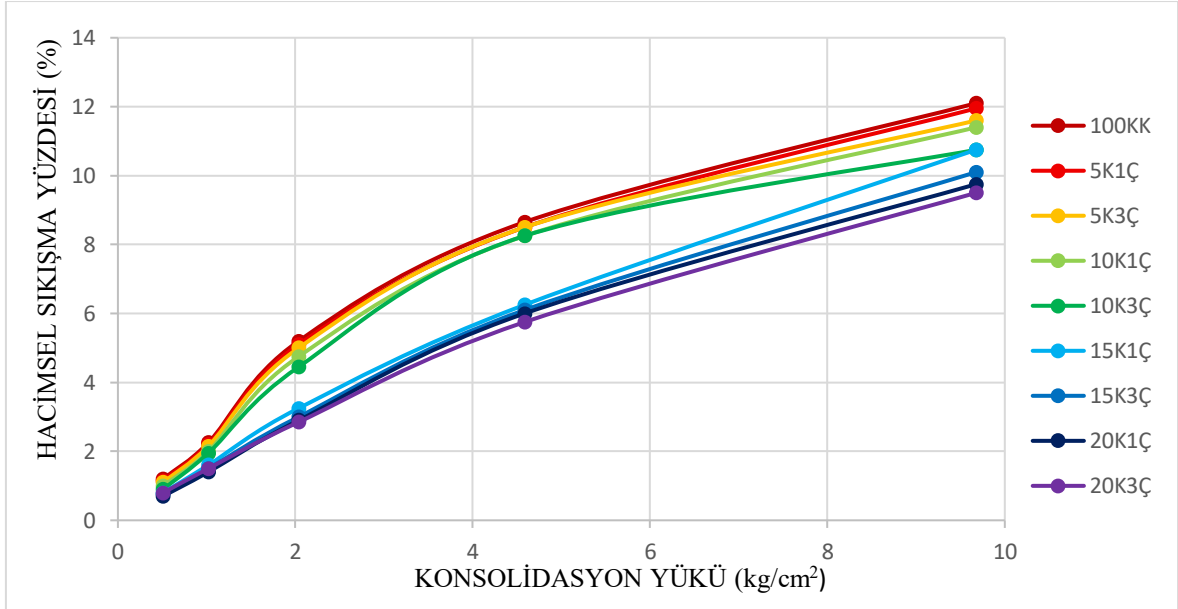
HACİMSEL SIKIŞMA YÜZDELERİ									
YÜK (kg/cm ²)	0.5093	1.0186	2.0372	4.5837	9.6766				
100KK	1.2	2.25	5.2	8.65	12.1	11.6	10	8.5	6.5
5K1Ç	1.15	2.2	5.1	8.5	11.95	11.7	10.25	8.75	6.85
5K3Ç	1.1	2.15	5	8.5	11.6	11.1	10.25	9	7.1
10K1Ç	1	2	4.75	8.25	11.4	10.9	9.5	8	7.25
10K3Ç	0.9	1.95	4.45	8.25	10.75	10.25	9.1	8.4	7.3
15K1Ç	0.8	1.6	3.25	6.25	10.75	10.25	9.35	8.35	7.45
15K3Ç	0.75	1.5	3	6.1	10.1	9.4	8.6	8	7.5
20K1Ç	0.7	1.4	2.9	6	9.75	9.1	8.6	8.15	7.6
20K3Ç	0.8	1.5	2.85	5.75	9.5	8.9	8.25	7.85	7.25



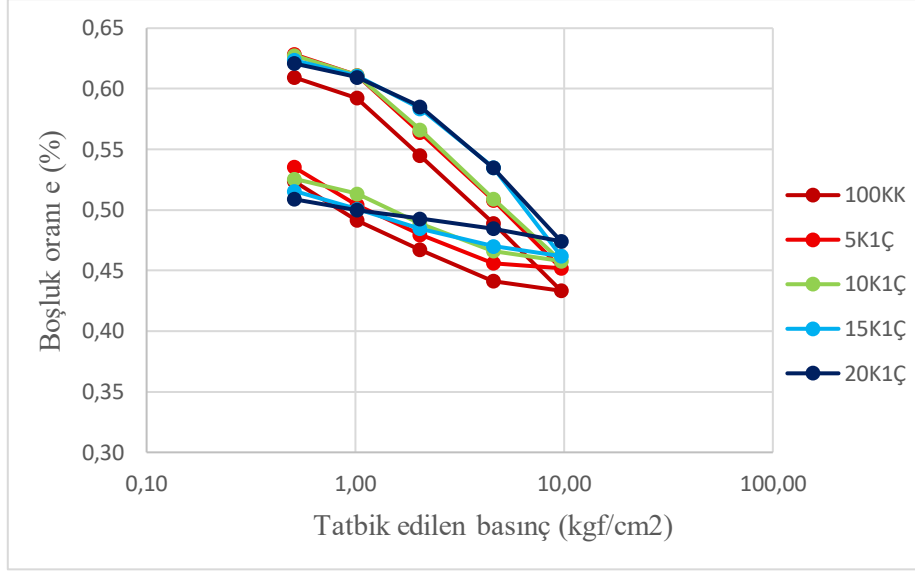
Şekil 4.62: %1 çimentolu karışımların hacimsel sıkışma-konsolidasyon yükü grafiği



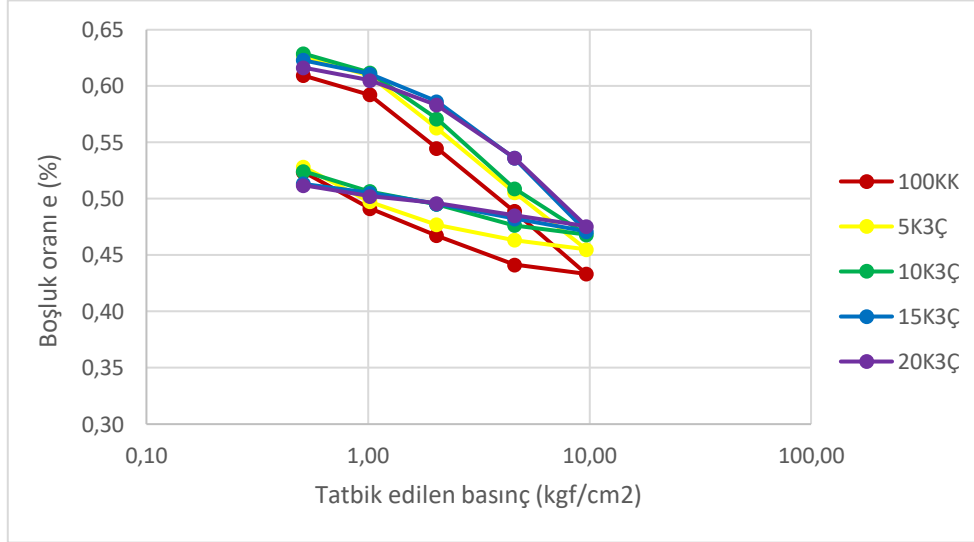
Şekil 4.63: %3 çimentolu karışımların hacimsel sıkışma-konsolidasyon yükü grafiği



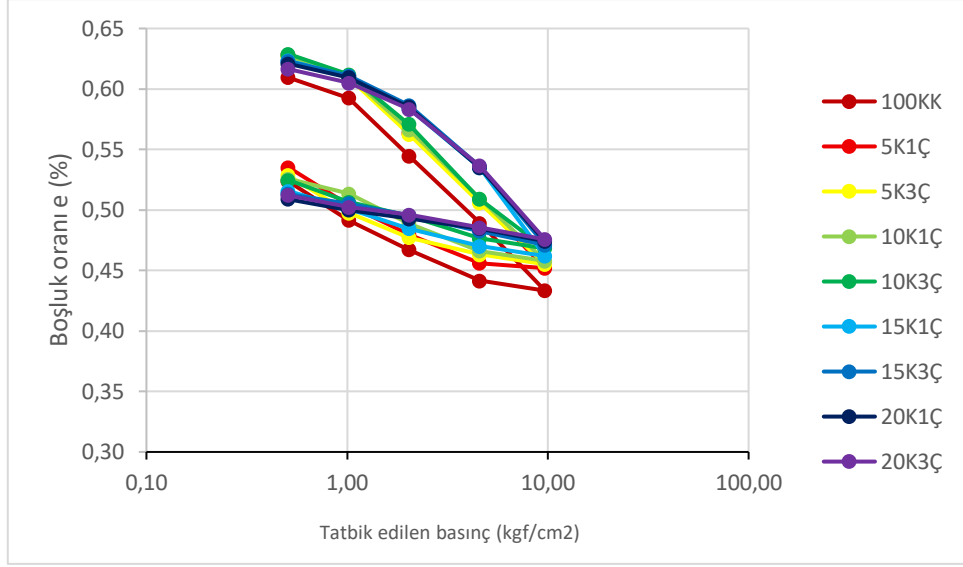
Şekil 4.64: Tüm karışımların hacimsel sıkışma-konsolidasyon yükü grafiği



Şekil 4.65: %1 çimentolu karışımların boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği



Şekil 4.66: %3 çimentolu karışımların boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği



Şekil 4.67: Tüm karışımlara ait boşluk oranı – tatbik edilen basınç grafiği

Grafikte, farklı katkı türü ve oranlarına sahip zemin karışımlarının artan konsolidasyon yükleri altındaki hacimsel sıkışma davranışları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, katkısız zemin numunesinin (100KK) tüm konsolidasyon yüklerinde en fazla hacimsel sıkışmayı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, katkı içermeyen zeminlerin dış yükler altında daha fazla deformasyona uğradığını ve yapısal olarak daha zayıf bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Katkı oranı arttıkça sıkışma miktarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Özellikle %20 katkı oranına sahip olan karışımlar (20K1Ç ve 20K3Ç), yüksek yükler altında dahi daha düşük hacimsel sıkışma değerleri sergilemiş; bu da katkı maddelerinin zeminin dayanımını ve rijitliğini artırdığına işaret etmektedir. Yük arttıkça oluşan deformasyon artışı tüm numunelerde gözlense de, katkı içeren numunelerde bu artış daha kontrollü ve sınırlı düzeyde kalmıştır.

Ayrıca, aynı orandaki farklı katkı türleri karşılaştırıldığında, 3Ç katkısı içeren numunelerin, 1Ç katkılılara kıyasla daha düşük sıkışma değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, katkı türünün de hacimsel deformasyon üzerinde etkili olduğunu ve bazı katkı türlerinin zemine daha fazla stabilite kazandırabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, hem katkı miktarının hem de katkı türünün, zeminlerin konsolidasyon altındaki deformasyon davranışı üzerinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Uygun

katkı seçimi ve doğru oran belirlemesi sayesinde zeminin sıkışabilirliği azaltılabilir ve daha dayanıklı bir yapı elde edilebilir.

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışma, kaolin kili esaslı zeminlerin kum ve çimento katkısıyla iyileştirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan hidrometre, özgül ağırlık, elek analizi, atterberg limitleri, standart proktor, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), konsolidasyon ve permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen bulgularla, zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek adına ince kum ve çimento katkısının etkisi incelenmiştir.

Deney sonuçlarında numunelerin zemin sınıfı CL olarak belirlenmiştir. Katkılar kil zemine göre ve katkı oranı arttıkça plastisite indislerini düşürmüştür. Katkıların plastisite indislerini düşürmesi, zeminin şişme potansiyelini azaltarak işlenebilirliğini ve mühendislik performansını artırabilir.

Proktor deneyleri sonucunda, optimum su muhtevası %17.2 ve %20.6 arasında değişmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ise kum ve çimento miktarının artışıyla birlikte kısmen artış göstermiştir ve 1.610–1.712 g/cm³ aralığında değişmiştir. Bu değerler, kum ve çimentonun zemin taneleri arasında daha yoğun bir yapı oluşturduğunu ve sıkışabilirliği artırdığını göstermektedir.

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde, %5 kum katkısıyla 11.75 kgf/cm² olan dayanım değeri, kum oranının %20'ye çıkarılmasıyla 39.93 kgf/cm²'ye kadar yükselmiştir. Bu durum, kumun zemin içindeki yapıyı güçlendirdiğini, taneler arası sürtünmeyi artırarak daha rijit bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Ancak belirli bir orandan sonra dayanım artışının yavaşladığı ve kumun pozitif katkı etkisinin sınırına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Uygulama açısından değerlendirildiğinde, %15–%20 kum ve %3 çimento oranı optimum sonuçlar vermiştir. Çimentonun bağlayıcı etkisi kum oranındaki artışa bağlı olarak kum taneleri arasında daha bütünlüklü ve dayanıklı bir yapı oluşmasına olanak sağlamıştır.

Konsolidasyon deneylerinde, kaolin esaslı zeminlerin şişme ve konsolidasyon davranışları; farklı oranlarda ilave edilen ince kum ve çimento katkılarıyla laboratuvar ortamında değerlendirilmiştir. Serbest şişme deneyleri sonucunda, saf kaolin zeminin şişme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, zeminin su ile temas ettiğinde hacimsel değişime yatkın bir yapıda olduğunu ortaya koymaktadır.

İnce kum ve çimento katkıları eklendikçe zeminin şişme davranışında belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Katkı oranlarındaki artışla birlikte, zeminin şişme yüzdesinde ve şişme basıncında düzenli bir düşüş eğilimi meydana gelmiştir.

Elde edilen veriler, çimentonun zemin tanecikleri arasında bağlayıcı etkiler oluşturarak gevşek yapının sıkışmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Kum ilavesi ise bu bağlayıcı yapıyı destekleyerek daha yoğun ve kararlı bir yapı oluşmasına katkı sağlamıştır. Böylece, katkı malzemeleri birlikte kullanıldığında zemin suya karşı daha dirençli hale gelmiş ve oturma davranışı önemli ölçüde iyileşmiştir.

Katkı uygulanmış karışımların daha az hacimsel değişim gösterdiği ve zemin iyileştirme açısından daha uygun özellikler kazandığı görülmüştür. Bu gelişmeler, özellikle yapı temellerinin oturma kontrolü ve uzun vadeli stabilitesi açısından olumlu sonuçlar sunmaktadır.

Permeabilite deneyleri, kaolin killi zeminlere uygulanan ince kum ve çimento katkılarının geçirgenlik katsayısı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Saf kaolin zeminde ölçülen geçirgenlik değeri temel alınarak yapılan karşılaştırmalarda, %5 ila %20 arasında değişen kum katkılarının, genel olarak geçirgenlik katsayısında artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle kum oranı arttıkça zemindeki boşluk yapısı genişlemiş, bu da suyun geçişine olanak tanımıştır.

Sonuçlar, kumun zemini daha geçirgen hale getirdiğini, çimentonun ise bu durumu dengelediğini göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, %5 oranında kum ile %3 oranında çimentonun birlikte kullanılmasıyla zemin karışımlarında geçirimsizlik özelliklerinin en üst düzeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu amaçla baraj ve gölet projelerinde, tünel ve metro inşaatlarında, katı atık depolama alanlarında, spor alanlarında tercih edilebilir.

Yapılan deneylerden çıkarılan bir diğer sonuç, geçirgen zemin karışımlarında en yüksek verimliliğin %20 oranında kum ve %1 oranında çimento kullanımıyla elde edildiği belirlenmiştir. Bu amaçla yağmur bahçelerinde, suyun alt tabakalara süzülmesini sağlayarak otopark, yaya ve beton sistemlerinde, yer altı suyu suni besleme projelerinde, doğal arıtma sistemlerinde, tarım alanlarında, yağmur suyunu yeşil çatı sistemlerinde kullanılabilir.

Bu çalışmada ve verilen örneklerde zemin karışımlarında kullanılan farklı kum oranlarının ve çeşitli katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle geçirgenlik, sıkışabilirlik ve dayanım gibi temel zemin parametrelerinin, malzeme bileşenlerindeki değişimlere duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. %5 oranında kum içeren karışımlar, düşük geçirgenlik özellikleri sayesinde, su geçişinin engellenmesinin hedeflendiği zemin uygulamalarında başarılı sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, bu tür karışımların su sızdırmazlığı gereken baraj çekirdek dolguları, temel izolasyonları ve benzeri yapı alanlarında kullanımı uygun görülmektedir. Buna karşılık, suyun kontrollü biçimde geçişinin istendiği uygulamalarda ise %20 oranında kum içeren karışımlar daha iyi mühendislik performansı sunarak, drenaj katmanları ve filtre zonları gibi alanlar için daha elverişli bir çözüm sunmuştur.

Katkı maddelerinin zeminlerin deformasyon davranışına etkisi de dikkat çekici bulunmuştur. Katkı oranı arttıkça, özellikle yüksek yük altında zeminin hacimsel sıkışma eğiliminde azalma gözlenmiş ve bu durum zeminin rijitliğinin ve taşıma kapasitesinin arttığını göstermiştir. Özellikle %20 katkı oranı içeren karışımlar, düşük deformasyon değerleriyle daha kararlı ve dayanıklı bir yapı oluşturmuştur. Bunun yanı sıra, katkı türünün de zemin davranışında farklılıklara yol açtığı belirlenmiştir. Aynı katkı oranıyla hazırlanan numuneler arasında yapılan karşılaştırmalarda, 3Ç katkısı kullanılan karışımların, 1Ç katkılı karışımlara kıyasla daha düşük sıkışma değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, katkı maddesinin türünün, zemin stabilitesini artırma potansiyeli açısından dikkate alınması gereken önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde, kum ve çimento oranının artışıyla birlikte zemin dayanımında belirgin bir yükselme olduğu gözlemlenmiştir. Bu artış, kumun taneler arası sürtünmeyi artırarak yapının daha rijit ve dayanıklı hale gelmesine katkı sağladığını göstermektedir. Ancak bu artışın belirli bir noktadan sonra yavaşladığı ve katkının dayanım üzerindeki etkisinin sınıra ulaştığı da anlaşılmıştır. Uygulama açısından değerlendirildiğinde, %15–20 kum oranı ile %3 katkı maddesi kullanımı, optimum mühendislik performansı sunan kombinasyon olarak öne çıkmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, zemin iyileştirme uygulamalarında hem kum oranının hem de katkı türü ve miktarının dikkatli şekilde belirlenmesi, istenilen mühendislik özelliklerinin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışma, uygun malzeme seçiminin

ve oranlarının optimize edilmesinin, güvenli, uzun ömürlü ve işlevsel yapıların inşasına katkı sağladığını açıkça ortaya koymuştur.

6. KAYNAKLAR

- Albayrak, A. T.** (2000). *Çimentonun öğütülebilirliğinin artırılması üzerine bir inceleme* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Alkroosh, I., Al-Robay, A., Sarker, P., & Alzabeebee, S.** (2021). Effect of sand percentage on the compaction properties and undrained shear strength of low plasticity clay. *ARO-The Scientific Journal of Koya University*, 9(1), 1–7. <https://doi.org/10.14500/aro.10748>
- Alnmr, A., & Ray, R.** (2023). Investigating the impact of varying sand content on the physical characteristics of expansive clay soils from Syria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42, 2675–2691. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02698-w>
- ASTM International.** (2000). *ASTM D 4318-00: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International.** (2016). *ASTM D5084-16a: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International.** (2020). *ASTM C150/C150M – 20: Standard specification for Portland cement*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International.** (2023). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil (ASTM D2166/D2166M-23)*. https://www.astm.org/d2166_d2166m-23.html
- ASTM International.** (2023). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (ASTM D4318-23)*. <https://www.astm.org/d4318-23.html>
- Aytaç, A. H.** (2006). *Portland çimentosu kompozisyonunun akışkanlaştırıcı katkı performansına etkisi* [Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi].
- Batman, A.** (2015). *Öğütülmüş kuvars kumunun kilin mukavemet özelliklerine etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- British Standards Institution.** (1990). *BS 1377-2:1990: Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 2: Classification tests*. London: BSI.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Canbaz, O., Gürsoy, Ö., & Gökce, A.** (2020). Kaolin dağılımının spektral sınıflama yöntemleri ile belirlenmesi: Geminbeli kaolin yatağı (Sivas) ve çevresi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(4), 1085–1094.
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.729104>
- Çabalar, A. F., Demir, S., & Akbulut, N.** (2018). Kil-kum karışımlarının bazı geoteknik özellikleri. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(2), 871–879.
<http://dergipark.gov.tr/dumf>
- Çakmak, A.** (2021). Yapı malzemesinin tarihsel gelişimi ve mimarlığa etkileri. *ATA Planlama ve Tasarım Dergisi*, 5(1), 41–54.
- Çelik, M. H., Güney, Y., Koyuncu, H., & Koçak, Y.** (2003). Su, tuz ve ağır metal etkisindeki Bolu kaolininin; likit limit, plastik limit ve hidrometre analizi yapılarak kaolinin aktivitesine etkisinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 6(1), 411–431.
- Çetinkaya, M.** (2020). *Polipropilen liflerin uçucu kül zemin karışımlarında geoteknik özelliklere etkisi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Çimen, Ö., & Keleş, E.** (2020). Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kireç katkılarının etkisi. *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 80–90.
- Dağar, V.** (2017). *A study on tensile strength of compacted Ankara clay and Kaolin clay* [Yüksek lisans tezi, Middle East Technical University].
- Dehghanian, K., & İnan, H.** (2020). Kumlu kil-çimento karışım oranlarının dayanım özelliklerinin araştırılması. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 1–15.
- Dugan, M.** (2023). Vitruvius'un *De Architectura*'sında felsefe ve mimarlık ilişkisi. *FSM İlmî Araştırmalar İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi*, 22, 387–406.
<https://doi.org/10.16947/fsmia.1408524>
- Erdoğan, T. Y.** (2003). *Beton*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.
- Eskişar, T.** (2020). Çimento, kireç ve uçucu kül ile iyileştirilen kaolin-bentonit karışımı zeminlerin mekanik özellikleri. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 92–105. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.679124>
- Grim, R. E.** (1968). *Clay mineralogy*. McGraw-Hill.
- Gürel, Ş. S., & Dereli, M.** (2023). Kültür mirası mimari yapılarda malzeme bozulmaları: Hoca Hasan Mescidi. *Konya Sanat Dergisi*, 6, 182–194.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karakan, E., & Demir, S.** (2018). Liquid limit determination of various sand clay mixtures by Casagrande and fall cone test methods. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 361–371. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.486389>
- Karshoğlu, A., Mert, A. A., & Onur, M. İ.** (2021). Zemin özelliklerinin belirlenmesinde yeni trendler. *European Journal of Science and Technology*(28), 998–1007.
- Kayabalı, K., & Tüfenkçi, O. O.** (2007). Plastik ve likit limitin tayini için yeni bir yaklaşım. *Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü*.
- Kaothon, P., Lee, S.-H., Choi, Y.-T., & Yune, C.-Y.** (2021). *Effect of low-plastic fine content on the engineering properties of kaolinite-sand mixture*. Journal of the Korean Geotechnical Society, 37(7), 35–42. <https://doi.org/10.7843/kgs.2021.37.7.35>
- Kılıç, G.** (2008). *Çimento ile zemin stabilizasyonu* (Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Neville, A. M.** (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Öser, C.** (2010). *Yumuşak zeminler üzerindeki toprak dolguların limit denge ve performansa dayalı tasarımı* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özer, E.** (2009). *Niğde Yöresi Fesleğen Yayla Kaolin Kilinden Metakaolin Üretilebilirliğinin Araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi].
- Özer, M.** (2008). Örnek hazırlama yönteminin likit limit ve plastik limit değerlerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3), 689–698.
- Selçukhan, O., & Ekinci, A.** (2020). Zemin iyileştirme yöntemleri ve yaygın kullanımına bağlı değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(23), 481–496.
- Soysal, H. M., & Dehghanian, K.** (2021). İnşaat mühendisliğinde zayıf zeminler ve zemin iyileştirme yöntemleri. *MAS Journal of Applied Sciences*, 6(3), 716–742.
- Sridharan, A., & Prakash, K.** (2000). Percussion and cone penetration methods of determining the liquid limit of soils: A comparative study. *Geotechnical Testing Journal*, 23(2), 236–244. <https://doi.org/10.1520/GTJ11230J>
- Sünbül, F., Kurnaz, T. F., Güner, B., Haner, B., Mungan, H., & Sivri, R.** (2021). Zemin mekaniğine multidisipliner yaklaşımlar. IKSAD Publishing House.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şengör, M. Y.** (2011). *The deformation characteristics of deep mixed columns in soft clayey soils: A model study* (Doctoral dissertation, Middle East Technical University).
- Topçuoğlu, Y. A., & Gürocak, Z.** (2022). Katkı türü ve oranının yüksek plastisiteli kilin kompaksiyon parametrelerine etkisi. *DUJE (Dicle University Journal of Engineering)*, 13(2), 359–369.
<https://doi.org/10.24012/dumf.1099931>
- Türk Standardları Enstitüsü.** (2000). *TS 1500: Zeminlerin sınıflandırılması ve deneylerle tanımlanması – Tanımlar, semboller ve sınıflandırma* (1. baskı). Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü.** (2006). *TS 1900-1: İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini*. Ankara: TSE Yayınları.
- Türk Standardları Enstitüsü.** (2006). *TS 1900-2: Zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılması – Bölüm 2: Laboratuvar deneylerine dayalı zeminlerin tanımlanması*. Ankara: TSE Yayınları.
- Türk Standardları Enstitüsü.** (2012). *TS EN 197-1: Çimento – Bölüm 1: Genel çimentolar – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara: TSE Yayınları.
- Türk Standardları Enstitüsü.** (2020). *TS 197-2: İnşaatte kullanılan doğal agregalar – Bölüm 2: Deney metotları*. Ankara: TSE Yayınları.
- Whyte, I.** (1982). Soil plasticity and manual test uncertainties. *Geotechnical Engineering Journal*.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği/Bölümü	-
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği Bölümü	2017
Lise	Bandırma Anadolu Lisesi	2013