

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mert AKYOL**

**ATIK KEMİK TOZU İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ADANA-2022**



ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK KEMİK TOZU İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME

Mert AKYOL

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
Yıl: 2022, Sayfa: 83  
Jüri : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Doç. Dr. Baki BAĞRIAÇIK  
: Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR

Bu tez çalışmasında atık kemikler, kemik tozu formuna getirilmiş ve elde edilen malzemenin zemin stabilitesine etkisi araştırılmıştır. Katkı malzemesinin etkinliği, Çukurova bölgesinde Çakıt nehrinden alınan nehir kumu numuneleri üzerinde değerlendirilmiştir. İlk aşamalarda zemin numunesinin özelliklerini tanımlamak için çalışmalar yapılmıştır. Sonrasında ise %3, 6, 9 ve 12 oranlarında kemik tozu katkısı ile deneylere devam edilmiştir. Sadece nehir kumu ve farklı oranlarda katkı içeriğine sahip nehir kumu numuneleri için standart proktor deneyleri gerçekleştirilmiş ve optimum su içerikleri elde edilmiştir. Yapılan kesme kutusu ve CBR deneylerinde de bu değerler kullanılmıştır. Ayrıca katkı malzemelerinin numunelere eklenme yöntemi konusunda karşılaştırma niteliğinde bir çalışma yapılmış ve değerleri sunulmuştur.

Sonuç olarak kemik tozu katkısının numuneler üzerinde hem kayma mukavemeti hem de CBR değerlerine bakıldığında olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. Ayrıca kemik tozu, kimyasal yapısından kaynaklı olarak puzolanik özellik gösterecektir. Bunun neticesinde zaman içerisinde taşıma kapasitesinin daha da artacağı tahmin edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin iyileştirme, Atık materyal, Kemik, Kemik tozu, Kemik külü

## ABSTRACT

### MSc THESIS

# SOIL IMPROVEMENT WITH WASTE BONE POWDER

Mert AKYOL

ÇUKUROVA UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Supervisor : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
Year: 2022, Pages: 83  
Jury : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Assoc. Prof. Dr. Baki BAĞRIAÇIK  
: Asst. Prof. Dr. Ömer Faruk ÇAPAR

In this thesis study, waste bones were brought into the form of bone powder and the effect of the obtained material on soil stability was investigated. The effectiveness of the additive was evaluated on river sand samples taken from Çakıt river in Çukurova region. In the first stages, studies were carried out to define the properties of the soil sample. Afterwards, the experiments were continued with the addition of bone powder at 3, 6, 9 and 12%. Standard proctor tests were carried out only for river sand and river sand samples with different additive contents and optimum water contents were obtained. These values were also used in the shear box and CBR experiments. In addition, a comparative study was conducted on the method of adding additives to the samples and their values were presented.

As a result, it is seen that the bone powder additive has a positive effect on the samples when both shear strength and CBR values are examined. In addition, bone powder will show pozzolanic properties due to its chemical structure. As a result, it is estimated that the carrying capacity will increase over time.

**Keywords:** Soil improvement, Waste material, Bone, Bone powder, Bone ash

## GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Çevre kirliliği günden güne artmakta ve sonuçları da her geçen gün daha fazla önem arz etmektedir. Üretim ve hizmet sektörlerinin çoğunda olduğu gibi inşaat alanında yapılan çalışmalar da bu kirliliğe neden olmaktadır.

Bu durumun farkında olan pek çok araştırmacı çözüm üretmek adına yıllar içerisinde, atık materyallerin inşaat sektöründe kullanımı için çalışmalar yapmışlardır. Çeşitli atıkların hem beton hem de zemin iyileştirme alanlarında kullanılabilirliği araştırılmış ve elde edilen sonuçlar ile bazı malzemelerin kullanılabilirliği öngörülmüştür. Günümüzde hala bu tip çalışmalar devam etmekte ve yeni malzemelerin etkinliği araştırılmaktadır.

Günümüzde zemin iyileştirme çalışmaları geleneksel ve standart uygulamalar ile yapılmaktadır. Ancak daha önce de bahsedildiği üzere çevre kirliliği, küresel ısınma vb. doğal tehditlerin ortaya çıkması ile geri dönüştürülebilir veya atık olarak sınıflandırılan malzemelerin kullanımı zaruri hale gelmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında atık materyal olarak sınıflandırılan kemik tozunun zemin iyileştirmede alternatif bir katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Katkı maddesi olarak kemik tozu kullanılmış, bu sayede nehir kumu numunelerinin mühendislik özellikleri iyileştirilmiştir.

Çalışmanın ana malzemesi olan kemiğin kimyasal yapısı, kemiğin işlenmesi ve kemik tozu haline getirilmesi süreçleri materyal bölümünde detaylı şekilde anlatılmıştır. Bu aşamadaki en büyük zorluk ise kemiğin kimyasal yapısını bozmadan organik halde kemik tozunu elde etmek olmuştur. Çünkü kemiğin, yapısında barındırdığı lifler sayesinde elde ettiği elastoplastik yapı sayesinde hem kırılması hem de öğütülmesi zor bir malzeme olduğu tecrübe edilmiştir.

Hem nehir kumunun hem de kemik tozunun mühendislik özelliklerini belirlemek için çeşitli endeks deneyleri yapılmıştır. Bu aşamada malzemelerin dane dağılımları, optimum su muhtevaları gibi değerler elde edilmiştir. Deneylerden

elde edilen sonuçlara bulgular ve tartışma kısmında, deney verilerine ise ekler kısmında yer verilmiştir.

Mühendislik özellikleri belirlenirken nehir kumu ve kemik tozu içeren 5 farklı karışım içeriğinde deneyler yapılmıştır. Deneyler neticesinde elde edilen veriler kesme kutusu ve CBR deneyleri gerçekleştirilirken kullanılmıştır.

Çalışmanın içeriğinde standart deneyler haricinde karışım yöntemlerinin karşılaştırıldığı bir bölüm yer almaktadır. Bu bölümde Metot A ve Metot B olmak üzere 2 ayrı yöntem yer verilmiştir. Deneylerin sonuçlarına da önemli derecede etkisi olan bu yöntemlerin detaylı anlatımı da tez çalışması içerisinde yer almaktadır. Özetle Metot A belirli miktarda numune üzerine direkt olarak kemik tozu katkısı eklenerek numune oluşturma yöntemidir. Diğer yandan Metot B ile oluşturulan numunelerde ise önce kullanılacak nehir kumu numunesi miktarı belirlenmiştir. Sonrasında kemik tozu katkı oranı hesaplanmış ve eklenecek katkı miktarı kadar nehir kumu başlangıçta belirlenen numunedan çıkarılmıştır. Yapılan bu işlemin dikkate değer etkileri olmuş ve sonuçlara etkisi detaylı şekilde sunulmuştur.

Kesme kutusu deneylerinin başlangıcında katkısız halde nehir kumu numuneleri için deneyler yapılmıştır. Sonrasında Metot A ve Metot B yöntemleri kullanılarak farklı oranlarda kemik tozu katkısı ile numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda her iki yöntemde de kayma mukavemeti değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Deneylere ilk başlandığında Metot A kullanılmıştır. Ancak yapılan deneylerde elde edilen artışların sadece kemik tozu katkısından kaynaklanmadığı, aynı zamanda sıklık değerinin değişiminden kaynaklı olabileceği düşünülmüştür. Sonuç olarak Metot B ile numuneler tekrar hazırlanmış ve deneyler tekrar yapılmıştır. Artış devam etse de Metot A'da olduğu kadar yüksek bir artış görülmemiştir.

CBR deneylerinin yapım aşamasında ise kesme kutusuna benzer şekilde referans değer olarak nehir kumu numunesi üzerinde, ayrıca optimum su içeriğinde

deney yapılmıştır. İlerleyen aşamalarda farklı oranlarda kemik tozu katkısı ile yine optimum su içeriklerinde deneyler yapılmış ve elde edilen verilere göre taşıma gücü değerlerinde artış meydana gelmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında optimum kemik tozu katkı oranı %6 olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında organik bir katkı malzemesi olan kemik tozunun direkt olarak dolgu, temel veya alt temel gibi alanlarda kullanımı önerilmemiştir. Ancak kimyasal yapısı ve deneylerden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında ek olarak kimyasal bir katalizör etkisi ile dolgu, alt temel ve temel gibi alanlarda kullanım potansiyeli olduğu ve standart malzemelere alternatif olabileceği düşünülmektedir.



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca, değerli vaktini ve görüşlerini benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile çalışmalarına yön veren değerli danışman hocam Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım araştırma süresince, her aşamada bana yardımcı olan, teknik bilgi ve tecrübelerini paylaşan Araştırma Görevlisi Mustafa TOLUN'a teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her aşamasında yanımda olan, kararlarım saygı duyan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme teşekkür ederim.

<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>SAYFA</b>
ÖZ .....	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET .....	III
TEŞEKKÜR.....	VII
İÇİNDEKİLER .....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVI
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Zemin İyileştirme.....	1
1.2. Atık Materyallerin Zemin İyileştirmesinde Kullanımı .....	4
1.3. Çalışmanın Amacı.....	5
1.4. Çalışmanın Önemi .....	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	7
3. MATERYAL VE METOT .....	17
3.1. Materyal .....	17
3.1.1. Kemik .....	17
3.1.2. Kemik Tozu.....	18
3.1.3. Nehir Kumu.....	22
3.2. Metot.....	23
3.2.1. Elek Analizi.....	23
3.2.2. Özgül Ağırlık (Piknometre) Deneyi.....	24
3.2.3. Kompaksiyon Deneyi.....	25
3.2.4. Rölatif Sıkılık Deneyi.....	27
3.2.5. Kesme Kutusu Deneyi.....	28
3.2.6. CBR Deneyi .....	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37

4.1. Elek Analizi Deney Sonuçları.....	37
4.2. Piknometre Deney Sonuçları .....	38
4.3. Kompaksiyon Deney Sonuçları .....	38
4.4. Rölatif Sıklık Deney Sonuçları .....	41
4.5. Kesme Kutusu Deney Sonuçları .....	41
4.6. CBR Deney Sonuçları.....	58
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	65
5.1. Sonuçlar .....	65
5.1.1. Elek Analizi Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar.....	65
5.1.2. Özgül Ağırlık (Piknometre) Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar.....	65
5.1.3. Standart Proktor Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar.....	66
5.1.4. Rölatif Sıklık Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar .....	67
5.1.5. Kesme Kutusu Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar .....	67
5.1.5.1. Metot A.....	67
5.1.5.2. Metot B.....	68
5.1.5.3. Genel .....	68
5.1.6. CBR Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar .....	68
5.2. Öneriler .....	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	75
EKLER.....	76

## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

Çizelge 3.1. Kemiğe ait kimyasal kompozisyon .....	18
Çizelge 3.2. Elek analizi deney verileri .....	23
Çizelge 3.3. Rölatif Sıklık Deney Verileri .....	28
Çizelge 3.4. Katkısız kum zemin numuneler için gevşek ve sıkı halde kayma mukavemeti parametreleri .....	32
Çizelge 4.1. Elek analizi deney sonuçları .....	38
Çizelge 4.2. Rölatif Sıklık Deney Sonuçları .....	41
Çizelge 4.3. Katkılı kum zemin numuneler için gevşek ve sıkı halde kayma mukavemeti parametreleri .....	56



## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

Şekil 3.1.	Kemiklerin ilikten ayrılma ve kurutulma aşamaları.....	19
Şekil 3.2.	Bilyalı değirmen yardımı ile kemik tozunun elde edilme aşamaları.....	21
Şekil 3.3.	Deneylerde kullanılan nehir kumu .....	22
Şekil 3.4.	Elek analizi çalışmalarında kullanılan ASTM elekleri.....	24
Şekil 3.5.	Piknometre deney aşamaları.....	25
Şekil 3.6.	Nehir kumu için standart proktor deneyi uygulama adımları.....	26
Şekil 3.7.	Kesme kutusu sembolik deney düzeneği.....	28
Şekil 3.8.	Kesme kutusu deney öncesi aşamaları .....	29
Şekil 3.9.	Kesme kutusu deney aşamaları .....	30
Şekil 3.10.	Gevşek ve sıkı hallerde katkısız kesme kutusu deneyi.....	32
Şekil 3.11.	CBR değerine göre zeminlerin sınıflandırılması ve kullanımı .....	33
Şekil 3.12.	Kırmataş için standart değerler.....	33
Şekil 3.13.	Zeminlerin yaklaşık CBR değerleri .....	34
Şekil 3.14.	Katkısız nehir kumu numunesi için CBR deneyi .....	35
Şekil 3.15.	CBR deney aşamaları .....	36
Şekil 4.1.	Deneylerde kullanılan nehir kumunun dane dağılım eğrisi.....	37
Şekil 4.2.	Nehir kumu kompaksiyon eğrisi .....	39
Şekil 4.3.	Kemik tozu kompaksiyon eğrisi.....	40
Şekil 4.4.	Farklı yüzdelerde KT katkıları için kompaksiyon eğrileri .....	40
Şekil 4.5.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A.....	42
Şekil 4.6.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A.....	42
Şekil 4.7.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A.....	43

Şekil 4.8.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %12 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A.....	43
Şekil 4.9.	Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A.....	44
Şekil 4.10.	Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A.....	45
Şekil 4.11.	Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A.....	45
Şekil 4.12.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	46
Şekil 4.13.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	47
Şekil 4.14.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	47
Şekil 4.15.	Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %12 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	48
Şekil 4.16.	Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	49
Şekil 4.17.	Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	49
Şekil 4.18.	Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	50
Şekil 4.19.	Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %12 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B.....	50
Şekil 4.20.	Gevşek ve sıkı hallerde katkısız (%0 Katkılı) kesme kutusu deneyi .....	52
Şekil 4.21.	Gevşek halde %3 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi.....	52
Şekil 4.22.	Gevşek halde %6 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi.....	53
Şekil 4.23.	Gevşek halde %9 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi.....	53

Şekil 4.24.	Gevşek halde %12 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi.....	54
Şekil 4.25.	Sıkı halde %3 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi .....	54
Şekil 4.26.	Sıkı halde %6 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi .....	55
Şekil 4.27.	Sıkı halde %9 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi .....	55
Şekil 4.28.	Sıkı halde %12 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi .....	56
Şekil 4.29.	Gevşek halde KT katkı miktarına bağlı olarak içsel sürtünme açısının değişimi.....	57
Şekil 4.30.	Sıkı halde KT katkı miktarına bağlı olarak içsel sürtünme açısının değişimi .....	58
Şekil 4.31.	Katkısız nehir kumu numunesi için CBR deneyi .....	59
Şekil 4.32.	Katkı miktarı %3 kemik tozu ile CBR deneyi.....	60
Şekil 4.33.	Katkı miktarı %6 kemik tozu ile CBR deneyi.....	60
Şekil 4.34.	Katkı miktarı %9 kemik tozu ile CBR deneyi.....	61
Şekil 4.35.	Katkı miktarı %12 kemik tozu ile CBR deneyi.....	61
Şekil 4.36.	Farklı katkı içerikleri için CBR deney verileri ve karşılaştırmaları ...	62
Şekil 4.37.	Katkı miktarına bağlı olarak CBR değerlerinde oluşan değişim .....	63



## SİMGELER VE KISALTMALAR

%	: Yüzde
$\gamma$	: Birim Hacim Ağırlık
$\phi$	: İçsel Sürtünme Açısı
$\tau$	: Kayma Gerilmesi
$\sigma$	: Normal Gerilme
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
ASTM	: American Society For Testing And Materials
c	: Kohezyon
Ca	: Kalsiyum
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
Cc	: Eğrilik katsayısı
Cl	: Klor
cm	: Santimetre
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
CO <sub>3</sub>	: Karbonat
Cu	: Üniformluk katsayısı
D <sub>10</sub>	: %10 geçen karşılık gelen dane çapı
D <sub>30</sub>	: %30 geçen karşılık gelen dane çapı
D <sub>60</sub>	: %60 geçen karşılık gelen dane çapı
dk	: Dakika
e	: Boşluk Oranı
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-Işını
F	: Flor
gr	: Gram
H <sub>2</sub> O	: Su
K	: Potasyum

kN	: Kilonewton
kPa	: Kilopascal
KT	: Kemik Tozu
m <sup>3</sup>	: Metreküp
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
Na	: Sodyum
P	: Fosfor
pH	: Potansiyel Hidrojen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SP	: Temiz Üniform Kum
TS	: Türk Standartları
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
V	: Hacim
W	: Ağırlık
XRF	: X-Işını Floresans Spektrometresi

## 1. GİRİŞ

Zemin, yerkürenin dış kabuğunu oluşturan, taneli, boşluklu doğal bir malzemedir. Genel olarak su, boşluk, katı tanecikler ve minerallerin karışımından oluşan malzemeye ‘zemin’ denir. Kayaçların fiziksel ve kimyasal olaylarla parçalanarak ufalanması sonucu oluşan katı daneler ile daneler arasını dolduran sıvı ve/veya gazın oluşturduğu bir malzeme olarak tanımlanabilir. Katı-sıvı-gaz fazının bir arada bulunması, katı danelerin farklı boyut, şekil, fiziksel ve kimyasal yapıda olabilmesi zemin davranışının anlaşılmasını diğer malzemelerden farklı ve zor kılar.

Zeminler, iri ve ince daneli olmak üzere genel olarak iki gruba ayrılırlar. İçeriğine bakıldığında ise büyükten küçüğe doğru, çakıl-kum-silt-kil olarak incelenebilirler. Kum, çakıl gibi iri daneli zeminler kohezyonsuz, silt ve kil gibi ince daneli zeminler ise kohezyonlu zeminlerdir.

Zemin bir taşıyıcı olarak ele alındığında ise üzerine yapılacak yapı için uygun özelliklere sahip olması beklenir ancak bu her zaman mümkün olmayabilir. Ülkemizde de mühendislik özellikleri, üzerine gelmesi planlanan yapı için uygun olmayan zeminlerle sıkça karşılaşmaktadır. Diğer yandan mevcut yapıların yer aldığı zemin kaynaklı sorunlar ortaya çıkabilmekte ve bu yapıların yer aldığı zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilmektedir.

Bu durumda farklı çözümler ele alınabilir. Yapı yerini değiştirmek, projeyi değiştirmek veya zemin özelliklerini iyileştirmek gibi çözümler bunlardan bazılarıdır. Yapı inşa edilecek yerdeki zemin özelliklerinin iyileştirilmesi ekonomik ve kullanışlı çözümler arasındadır. Ülkemizde de yaygın bir biçimde uygulanmaktadır.

### 1.1. Zemin İyileştirme

Zemin iyileştirilmesi dendiğinde çoğunlukla akla gelen zeminin kayma direncinin artırılması, geçirimsizliğin azaltılmasıdır. İri ve ince daneli zeminlerde,

sıklık ve kıvam gibi parametrelerin zemin üzerine inşa edilecek yapı için uygun hale getirilmesidir. Zemin iyileştirilmesinde temel prensip, zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulmasıdır. Benzer tanımlar geçmişte de yapılmıştır.

İyileştirme zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapısının mekanik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ile dış kuvvetlere dayanıklı hale getirilmesidir. Yer, yapıların oturtulduğu düzlemdir ve inşaat yatırımı sağlam bir zemin üzerine yapılmak istenir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması işlemidir (Sarız ve Nuhoğlu, 1992).

Elverişsiz zemini, üst yapı yüklerini destekleyebilecek duruma getirebilmek amacıyla uygulanan yöntemlerle, zayıf zeminin taşıma kapasitesinin artırılması, toplam oturmanın azaltılıp konsolidasyon oturmasının hızlandırılması, zeminin permeabilitesinin azaltılması, zeminin sıvılaşma potansiyelinin azaltılması, dolgu ve şevlerin stabilitesinin sağlanması hedeflenmektedir (Burke ve Sehn, 2003).

Zeminlerin özelliklerini istenilen bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak iyileştirebilmek için literatürde çeşitli yöntemler mevcuttur. Zemine uygulanacak olan uygun iyileştirme yönteminin seçimi o zeminin tipine göre belirlenir. İri daneli zeminler için belirlenen uygun iyileştirme yöntemi ince taneli zeminler için uygun olmayabilir. Bu sebeple zemin iyileştirme yöntemi seçiminden önce zemin tipi, çalışacak arazi ve bulunduğu yer hakkında bilgiler alınır, sonrasında arazide incelemeler yapılır. Araziyi incelemek için iki yönteme başvurulur.

İlk yöntem arazi deneylerini içermektedir, ikincisi ise laboratuvar çalışmalarıdır. Her ikisinde de yapılan çalışmalarda zeminin cinsi, formasyonu ve özellikleri belirlenir. İyileştirme yöntemine karar verilmesine gelindiğinde, yapılacak olan çalışmanın özellikleri ve üzerine inşa edileceği temel sistemi hakkında detaylı bilgiye sahip olunmalı ve buna göre seçim yapılmalıdır.

Yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi, zemine katkı maddeleri ilave ederek zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmektir. Temeli binlerce yıl önceye dayanan bu yöntem, günümüzde hala uygulanmakta olup, çeşitli malzemelerin kullanımı ve yöntemin yıllar içerisinde geliştirilmesi ile güncelliğini korumaktadır.

Geçmişten günümüze zeminlerin iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. Zeminlerin güçlendirilmesinin tarihi 5000 yıl önceye kadar uzanmakta olup, antik Mezopotamya, Mısır, Yunanistan ve Romalılar kireç ilavesi ile yol zemini iyileştirmişlerdir (McDowell, 1959).

Söz konusu yöntemde katkı maddeleri olarak ise; kireç, çimento, bitüm, uçucu kül, reçine vb. malzemeler kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında katkı maddesi kullanmak her zaman ekonomik olmamaktadır. Aynı zamanda kullanılan endüstriyel katkı maddelerinin üretiminde pek çok yan ürünün ortaya çıktığı ve bunların çevre kirliliğini önemli ölçüde artırdığı bilinmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile atık olarak ortaya çıkan ürünler de çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Üstelik sadece endüstriyel değil, organik atıklar da kullanılabilir. İlerleyen zamanlarda etkili ve ekonomik atık malzemelerin inşaat sektöründe ve zeminleri iyileştirmede kullanılabilmesi ile hem ekonomide iyileşmeyi sağlayacak hem de söz konusu atık ürünlerin doğaya ve çevreye zarar vermesinin önüne geçilecektir.

Bu alanda yapılan çalışmaların en önemli katkısı çevre kirliliğinin önüne geçmesi olacaktır. Hem günümüz şartlarını iyileştirmek hem de gelecek nesillere yaşanılabilir bir dünya bırakmak adına bu tip çalışmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında inşaat sektöründe yapılan uygulama esaslarından birisinin de düşük maliyetli malzeme kullanımı olduğu göz ardı edilmemelidir. Atık materyal kategorisinde bulunan bu tip malzemelerin kullanım alanlarının sınırlı olması ve bol miktarda bulunması fiyatlarını düşürmektedir. Bu sebeple uygun fiyatlarla tedarik edilebilen bu malzemeler, çevre kirliliğini engellemenin

yanı sıra inşaat sektöründeki önemli iş kalemlerinin maliyetlerini azaltarak ekonomiye de katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

## 1.2. Atık Materyallerin Zemin İyileştirmesinde Kullanımı

Dünyanın birçok ülkesinde çevre sorunlarına yönelik çözüm için araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır ve günümüzde hala bu çalışmalar devam etmektedir. Son zamanlarda gerçekleşen endüstriyel genişlemenin neticesinde hızla artan tüketim, ham madde kaynaklarının çok hızlı bir şekilde tükenmesine sebep olmaktadır. Kapsamlı bir şekilde incelendiğinde endüstriyel, tıbbi, organik, evsel, zararlı ve zararsız atıklar, çevre kirliliği açısından tehlikeli sonuçlara yol açmadan önlem alınması gereken konuların başında gelmektedir.

Kullanılma süresi dolan ve yaşadığımız ortamdan uzaklaştırılması gereken her türlü katı malzemeye katı atık denir. Katı atıklar evde, okulda, hastanede, endüstride, bahçelerde ve daha birçok yerde oluşabilir. Ülkemizde çöp bileşenleri; %68 organik atık, %13 değerlendirilebilir katı atık, %19 diğer atıklardır (Cömert, 2005).

Ülkemizde organik atıklar büyük bir tehdit unsuru olmakla birlikte, kullanıldığı takdirde aynı ölçüde faydalı olabilir. Yapılan araştırmalar ile çeşitli atıkların yol tabakalarında ve zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılabilir olduğu deneylerle ortaya konmuştur ve bu yan ürünlerin inşaat sektöründe kullanımının artması ile önemli ölçüde fayda sağlanacaktır.

Taşıma gücü zayıf zeminlerin fiziksel özelliklerini iyileştirmek ve taşıma gücünü arttırmak için başta uçucu kül olmak üzere çeşitli endüstriyel atıklar kullanılmaktadır. Uçucu küller, hurda lastikler sıkıştırıldıkları zaman düşük birim hacim ağırlıklara sahip olmaktadır. Bu nedenle, belirtilen atıkların yollarda hafif dolgu malzemesi olarak kullanımıyla oturma ve taşıma gücü problemleri çözümlenebilmektedir (Çağlar, 2007).

Neticede atık yan ürünlerin kullanımı hem çevre kirliliğinin önlenmesinde hem de ekonomik katkıları ile günümüzde pek çok sektörde kullanılmakta ve

kullanım alanı günden güne genişlemektedir. İnşaat sektöründe de daha önce kullanılmış atık malzemelerin olması ise daha etkili ve ekonomik yeni atık malzemelerin kullanılması için gelecek vadetmektedir.

### 1.3. Çalışmanın Amacı

Zemin iyileştirmesi yöntemlerinden zemine katkı maddesi ekleme ile saha zeminin taşıma gücü ve kayma mukavemeti üzerindeki etkileri incelenen bu çalışmada, zemine atık kemik tozu katkısı ilavesi sonrasında gerçekleşen iyileşme miktarlarını elde edebilmek için katkı ilavesi öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen çeşitli deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Yapılan analizler neticesinde iyileşme oranları, katkı ilavesi oranlarına bağlı olarak optimize edilmiş ve sonuçlara bakılarak optimum katkı ilavesi miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

### 1.4. Çalışmanın Önemi

Günümüzde dünya nüfusu hızla artmaktadır. Artan nüfus ihtiyacını karşılama gereksinimi ise teknolojiye hızlı ve büyük bir gelişmeye sebep olmuştur. Teknolojik gelişmelerle beraber üretim miktarı hem artmış hem de hız kazanmıştır. Bu üretim esnasında ise “atık” adı verilen kullanım dışı malzeme miktarı da üretim hızı ve gücüne bağlı olarak artmıştır. Atık materyallerin oluşturduğu çevre sorunları da gün geçtikçe farklı boyutlarıyla hızla büyüyerek karşımıza çıkmaktadır. Özellikle evsel atıkların dışında kalan sanayi atıkları da büyük ölçüde çevre kirliliklerine yol açabilmekte ve doğal yaşamı olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu tür sorunların çözümünde genellikle atık malzemenin farklı kullanım alanlarında değerlendirilmesi yoluna gidilmektedir.

Atıkların yan ürün ve katkı malzemesi olarak inşaat sektöründe kullanılması da bu çözümlerden sadece biridir. Bu yöntem inşaat sektöründe, doğal malzemenin kullanımının azaltılması nedeniyle doğanın korunmasına yardımcı olacaktır. Kullanılabilir atıkların değerlendirilmesi ile depolama ve diğer nedenlerden oluşan çevre kirliliğinin azaltılmasının yanı sıra atık malzemelerin

mühendislik uygulamalarında ekonomik çözüm olanağı sağlaması ve hammadde olarak kullanılması, çevresel ve ekonomik açıdan önemli ölçüde fayda sağlayacaktır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasının amacı, üzerine gelecek yapı yükünü taşımada yetersiz olan zeminlerin özelliklerinin, katkı maddesi kullanımı ile yapı için uygun hale getirilmesini sağlamaktır. Bunu yaparken kullanılacak katkı malzemesi organik bir atık malzeme olan kemik tozudur. Daha önce de katkı maddesi kullanımı ile optimum zemin stabilizasyonu ve uygulamaları üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu bölümde atık katkı malzemeleri ile zemin stabilizasyonu konusunda geçmişten günümüze yapılmış olan bir dizi araştırmaya ve sonuçlarına yer verilmiştir.

Kumar ve kumar (2020) yaptıkları çalışmada toprakla birlikte toz halinde işlenmiş e-atığı kullanmaya ve geoteknik özelliklerdeki gelişmeyi karşılaştırmaya odaklanmışlardır. Kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemek için testler yapılmış, ayrıca 3, 6, 9 ve 12 gibi farklı yüzdelerde e-atık ile toprak kombinasyonları denenmiştir. E-atık ilavesi yüzdesi ile numunenin likit limitinin arttığı görülmüştür. Toprak numunesinin ideal kuru yoğunluğu ve serbest basınç dayanımı, toprak ağırlığına göre %6 e-atık ilavesiyle bulunmuştur. Optimum nem içeriği ağırlıkça %6 oranında e-atık ile kademeli olarak artmıştır. Test sonuçları, toprak numuneleri boyunca %6 e-atık ilavesiyle kesme dayanımı testinde maksimum bir değer ve %60 değer artışı göstermiştir. Sınırlandırılmamış basınç dayanımı, e-atık içermeyen geleneksel toprak örnekleriyle karşılaştırıldığında yaklaşık %56 artış göstermiştir. Sonuçlar e-atıkların farklı oranlarda kullanılmasının toprağı stabilize ettiğini ve aynı zamanda atığın etkili bir şekilde işlendiğini göstermiştir.

Canakci ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada atık alüminyum içecek kutularını kullanarak yağsız kilin mukavemet ve şişme özellikleri üzerindeki etkisini bir incelemişlerdir. Atık içecek kutuları 5 mm'lik şeritler halinde kesilmiş ve kullanımdan önce %2, 4, 6, 8 ve 10'luk toprakla karıştırılmış. Hazırlanan numuneler üzerinde sıkıştırma, serbest şişme ve CBR olmak üzere üç test gerçekleştirilmiş. Etkili alüminyum yüzdesi olarak kabul edilen kuru kütleyle %6

alüminyum eklemenin, en iyi CBR iyileştirmesini elde etmek için kullanılabileceği belirtilmiştir. Test sonuçları, atık alüminyum içecek kutularının kilin sıkıştırma özelliklerini, şişme ve mukavemet özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Afrakoti ve ark. (2020) çimento kumunun özelliklerini iyileştirmek için katkı malzemesi olarak kömür atığı kullanmışlardır. Yaptıkları testlerde, % 0, 5, 10, 15 ve 20 kömür atığı ile birlikte % 3 ve 6 çimento içeren Babolsar kumu üzerinde standart Proctor, serbest basınç dayanımı, indirekt çekme dayanımı, ultrasonik darbe hızı, pH ve SEM gibi farklı testler yapılmıştır. Örnekler 14, 28 ve 60 gün süreyle kürlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, 28 ve 60. günlerde optimum miktarda (%5) kömür atığı ve % 6 çimento katkısı içeren numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştiğini göstermiştir. Ancak, % 3 çimento içeren numuneler için, çimentonun kömür atığı ile değiştirilmesi, mekanik özellikleri sürekli olarak azaltmıştır.

Amini ve Ghasemi (2019) yaptıkları çalışmada magnezyum cürufu ve çimentonun toprağın kimyasal, mekanik ve mikroyapı parametreleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hem magnezyum cürufu hem de çimento içeriğinin artmasıyla pH değerinde bir artış kaydedilmiş, bu da puzolanik ve hidrasyon reaksiyonlarının daha iyi uygulanması için toprak koşullarında bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Ayrıca, her iki maddenin de eklenmesi, toprak parçacıklarının granülasyonuna yol açmış ve bunun yanında maksimum kuru yoğunluk ve optimum nem içeriğinde bir artış kaydedilmiştir. Numuneler üzerinde tek eksenli basınç dayanımı testi, 7, 28 ve 56 günlük olmak üzere üç kürlenme periyodunda yapılmıştır. Tüm kür periyotlarında optimum çimento ve magnezyum cüruf yüzdeleri sırasıyla %6 ve 20 olarak kaydedilmiştir. Bu bileşim ile toprakta 14.3 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarının sonuçlarına göre bağımsız bir stabilizatör olarak kullanılabilen veya mühendislik, ekonomik ve çevresel nedenlerle diğer stabilizatörlerle birleştirilebilen magnezyum cürufunun kullanılmasının olumlu etkilerini gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Chang ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada kazeini geoteknik mühendisliğinde ve süt ürünleri atık yönetimi amacıyla toprak güçlendirme için yeni bir bağlayıcı olarak tanıtmışlardır. Sığır kazeini, toprakla uygun şekilde karıştırılması için çözelti halinde temin edilmiştir. Farklı miktarlarda kazein içeren kazein-toprak karışımları, hem kurutulmuş hem de yeniden ıslatılmış koşullarda serbest basınç dayanımlarını değerlendirmek için hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlar, 24 saatlik yeniden ıslatmadan sonra bile kazein katkısının neden olduğu önemli toprak güçlenmesini göstermiştir, bu da suya dayanıklılık hususunda kazein-toprak karışımlarının uygulama potansiyeline işaret etmiştir. Araştırmacılar ek olarak, toprak iyileştirme için kullanılan diğer biyopolimer bağlayıcıların suya dayanıklılığının, kazein gibi hidrofobik biyopolimerlerin dahil edilmesiyle artırılabilirliğini ve bu nedenle, daha etkili bir çevre dostu toprak bağlayıcı geliştirmek için bir temel olarak hizmet edebileceğini belirtmişlerdir.

Oprčkal ve ark. (2020) yaptıkları araştırmanın amacı, kırmızı çamur ve kağıt külünün potansiyel kullanımını ve bu ikisinin kombinasyonunu, Slovenya'daki en kirli alanlardan birinde, kirlenmiş toprağın ıslahı için katkı maddeleri olarak eleştirel bir şekilde değerlendirmektir. Elde edilen sonuçlara göre büyük miktarlarda kırmızı çamur, kağıt külü ve her iki katkı maddesinin kombinasyonunun, kirlenmiş topraktan inert yapı ürünleri ve geoteknik kompozitlerin üretiminde potansiyel kullanımının mümkün olduğu kanıtlanmıştır. İncelenen iyileştirme prosedürünün, alüminyum, kağıt ve inşaat sektörleri arasında endüstriyel bir ortak çalışma planı oluşturmak için temel sağlayabileceği söylenmiştir. Böyle bir ortak çalışmanın, düzenli depolama yükünün hafifletilmesi, emisyonların azaltılması, doğal malzemelerin korunması, toprak kirlenmesine bağlı sağlık risklerinin azaltılması ve nihayetinde daha kendi kendine yeten bir toplumla ilgili çevresel etkilerin hafifletilmesine öncülük edebileceği belirtilmiştir.

Wu ve ark. (2019) araştırmalarında geliştirilmiş sementasyon verimliliğine sahip optimum cüruf esaslı bir kompozit üretmek için çelik cürufunun bileşim ayarlaması ve aktivasyonunu incelemişlerdir. Kompoziti standartlaştırmak için

çimento klinkerinin kontrol modülü eklenmiştir. Sonrasında kompozit, dolgu inşaatında Hefei genleşen toprağı iyileştirmek için kullanılmış. Serbest şişme oranı, CBR, sınırlandırılmamış basınç dayanımı, mikro yapı ve mineral evrimi gibi temel fiziksel özellikler, değiştirilmiş genleşen toprakların mühendislik performansını ve mekanizmasını anlamak için değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bileşimin ayarlanması ve aktivasyonundan sonra cürufun sementasyonunun önemli ölçüde iyileştiğini göstermiştir. Ayrıca işlenmiş toprak için, kompozit birleştirme oranı %5'ten fazla olduğunda birinci sınıf yol veya otoyol için Çin standardının gerekliliğini karşılayabileceği söylenmiştir. Bileşen ayarlaması ve aktivasyonunun, cürufun sementasyonunu zenginleştirdiği ve bunun da şişme potansiyelinin baskılanmasına ve daha iyi mukavemet değerlerine sebep olduğu görülmüştür. Araştırmacılar elde edilen bulguların, özellikle genleşen toprak modifikasyonlarında çelik cürufunun yeniden kullanım verimliliğini artırdığını söylemişlerdir.

Atahu ver ark. (2019) genleşen toprağın kahve kabuğu külü ile işlenmesini araştırmışlardır. Kahve kabuğu, kahve üretiminin bir yan ürünüdür ve kahve kabuğu külü, bu yan ürün yakıldıktan sonra ortaya çıkan küldür. Değişen kahve kabuğu külü yüzdeleri (%5, 10, 15 ve 20) ile stabilize edilmiş genleşen toprağın (özellikle siyah pamuk toprağın) taşıma kapasitesi ve sıkıştırılabilirlik özellikleri araştırılmıştır. Daha sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağıtıcı X-ışını (EDX), kahve kabuğu külünün, incelenen toprağın yüzey morfolojisi ve kimyasal bileşimi üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanılmış. Sonuçlar, kahve kabuğu külü ile muamele edilen toprağın genel olarak mukavemet açısından geliştiğini göstermiştir. %20 kahve kabuğu külü ilavesi, toprağın taşıma kapasitesini üç kat artırmıştır. Ayrıca %10 ve 15 kahve kabuğu külü ile işlenmiş toprak örneklerinin morfolojik çalışmaları, toprak ile kahve kabuğu külü arasındaki reaksiyon sonucunda hidratlı partiküllerin ve çimentolu bileşiklerin oluşumunu göstermiştir. Bu durum, kahve kabuğu külünün bir stabilizasyon malzemesi olarak potansiyel kullanımını göstermiştir. Daha sonra, kahve kabuğuyla ilgili bertaraf ve çevresel endişeleri ele alabileceği söylenmiştir.

Onyelowe (2019) yaptığı araştırmada yumuşak toprakların stabilizasyonunda kullanılan malzemelerin doğrudan yanma veya ezme yoluyla türetildiği seçilmiş katı atık malzemeleri özetlemeye çalışmıştır. Katı atıklardan elde edilen materyallerin, yumuşak zemin mühendisliği ve katı atık türevlerinin temel malzemesi olarak kullanılan yumuşak killi topraklar üzerindeki etkisinin sonuçları gözden geçirilmiştir. Katı atıktan amorf kül ve toz elde etme yöntemlerini ve bu malzemelerin yumuşak toprakların mekanik ve mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanıldığı prosedürü ana hatlarıyla açıklamıştır. Yumuşak toprakları, sorunlu toprakları veya genleşen toprakları bir stabilizasyon sürecinde temel malzemesi olarak kullanılabilir hale getirmeyi amaçlamıştır. Bu prosedürün, yalnızca zemin malzemesi olarak kullanılacak toprak için belirli minimum standartları karşılayacak şekilde toprağın özelliklerini iyileştirmekle kalmadığını, aynı zamanda atmosfere CO<sub>2</sub> emisyonunu neredeyse sıfıra veya sıfıra düşüreceğini söylemiştir. Ayrıca katı atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi için bir yol olduğunu belirtmiştir.

Sudla ve ark. (2018) mühendislik dolgu uygulamalarında, marjinal lateritik toprağı stabilize etmek için yedek bir malzeme olarak atık yan ürün olan ezilmiş cürufu kullanma olasılığını değerlendirmişlerdir. Çeşitli ezilmiş cüruf değiştirme içeriklerinde lateritik toprak-ezilmiş cüruf karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Yapılan laboratuvar değerlendirmeleri partikül boyutu dağılımı, özgül ağırlık, su emilimi, LA aşınması, Atterberg limiti, CBR ve şişme testlerini içermiştir. Ezilmiş cüruf değişiminin, marjinal lateritik toprağın ince içeriğini azalttığı ve aşınma direncini artırdığı, bunun da sıvı limiti, plastisite indeksini, LA aşınmasını ve partikül kırılmasında bir azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Ezilmiş cüruf değişim içeriğindeki artışlarla, artan ıslatılmış CBR ve azalmış şişme değerleri ile karışımların fiziksel özelliklerinde belirgin bir gelişme bulunmuş. Sonuçta minimum %10 ezilmiş cüruf değiştirme içeriğine sahip karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin, mühendislik dolgu malzemesi için ulusal yerel yol otoritesi gereksinimlerini karşıladığı belirlenmiştir.

Zainuddin ve ark. (2019) yaptıkları araştırmada deniz kilinin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için parçalanmış karo malzemesinden elde edilen granit tozunun kullanılması olasılığını belirlemeyi amaçlamışlardır. Parçalanmış karo malzeme yüzdelерinin deniz kilinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel teknikler kullanılmıştır. Bunlar arasında Atterberg limitleri, parçacak boyutu dağılımı, sıkıştırma, sınırlandırılmamış basınç dayanımı ve pH bulunmaktadır. Ek olarak, granit ve deniz killерinin %5, 10, 15 ve 20 gibi farklı oranlarda bileşimlerini ve bunların kombinasyonlarını incelemek için taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınımı gibi mikroyapısal analiz testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre endeks özelliklerinde önemli gelişmeler gözlenirken, mukavemet açısından yavaş bir stabilizasyon hızı gözlemlenmiştir. Mikroyapısal analizin sonuçları, düşük oranda sementasyon veya bağlama mineralleri gözlemlendiğinden, parçalanmış karo malzemenin büyük ölçüde bir dolgu maddesi görevi gördüğünü doğrulamış. Bu çalışmanın sonucunun, parçalanmış karo malzemenin düşük karbonlu ve yeşil toprak katkı maddesi olarak kullanılmasına izin vereceği söylenmiştir. Yumuşak toprakları stabilize etmek için farklı boyutlarda parçalanmış karo malzemenin etkisinin araştırılmasını önermişlerdir.

Selvakumar ve Soundara (2019) çalışmalarında geoföam granül sütunu oluşturmak için atık genleşmiş polistiren tanecikleri yeniden kullanmış ve geoföam granül sütunu dahil olan ve olmayan durumlarda, genleşen toprağın şişme davranışını ölçmek için çaba harcamışlardır. CBR kalıbını barındırabilen büyük ölçekli tek boyutlu bir konsolidasyon aparatına yerleştirilmiş 100 mm'lik tekdüze kalınlığa sahip statik olarak sıkıştırılmış zemin numunesinde birkaç şişme testi gerçekleştirilmiştir. Geoföam granül sütununun değişen çapları, oluşan geoföam granül sütunu yoğunluğu ve toprak numunelerinin iki yerleştirme koşulu ile genleşen toprağa geoföam granül sütunu eklenmesi durumlarında malzemenin performansını belirlemek için girişimlerde bulunulmuştur. Geoföam granül sütununun dahil edilmesiyle şişme yüzdesi, şişme basıncı değerlerinin azaldığı ve

daha düşük geofom granül sütunu yoğunluğu için önemli bir azalma fark edildiğini gösteren test sonuçları analiz edilmiştir. Ayrıca, genişleyen toprağın şişmesindeki geofom granül sütunu etkisinin, toprak-geofom granül sütunu etkileşimi yardımıyla açıklandığını eklemiştir.

Kianimehr ve ark. (2019) yaptıkları deneysel çalışma ile killi zeminlerin kesme dayanımlarını, basınç dayanımlarını ve deformasyon özelliklerini iyileştirmek için geri dönüştürülmüş beton agregaların kullanımının uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Geri dönüştürülmüş beton agrega ve killi toprağın dikkatle hazırlanmış orantılı karışımları üzerinde bir dizi sıkıştırma, tek eksenli sıkıştırma ve doğrudan kesme testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları ve gözlemler, geri dönüştürülmüş beton agreganın killi topraklara eklenmesinin, daha düşük kuru yoğunluk ve nemli kütleme ile artan daha yüksek sınırlanmamış basınç dayanımı ile sonuçlandığını göstermiştir. Geri dönüştürülmüş beton agrega ile karıştırılan killi toprakların, ana killi toprağa kıyasla gelişmiş kesme mukavemetlerine sahip oldukları görülmüştür. Yaptıkları deneylerin sonuçlarına göre geri dönüştürülmüş beton agreganın killi topraklarla karıştırılması halinde, özellikle yol kaplamalarının alt tabanı gibi inşaat amaçları için uygun olan daha güçlü, daha sert ve daha az sıkıştırılabilir karışımlar elde edileceği belirtilmiştir.

Rimal ve ark. (2019) çimento fırın tozunu katkı maddesi olarak kullanmanın, çimento endüstrisindeki katı atık sorununu azaltacağından ve sürdürülebilir bir çözüm olarak etkin bir şekilde kullanılabilmesi ihtimalinden bahsetmişlerdir. Çimento fırın tozunun zemin iyileştirmedeki etkinliğini göstermek için, çalışmalarında iki doğal toprağı çeşitli kütleme sürelerinde ve çeşitli oranlarda çimento fırın tozu ile iyileştirmişlerdir. Doğal toprakları çeşitli oranlarda çimento fırın tozu ile işleyerek serbest basınç dayanımının değişimini göstermek için kapsamlı laboratuvar testleri yapılmıştır. Çimento fırın tozu içeren ve içermeyen doğal topraklar için numuneler hazırlanmıştır. Benzer şekilde, testler kuru ve ıslak koşullarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların davranışından ve eğiliminden, çimento fırın tozunun toprak mukavemetini önemli ölçüde artırdığı

için etkili bir katkı maddesi olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, Katmandu vadisindeki iki toprak örneği için maksimum %10 çimento fırın tozu ilavesi ile sınırlıdır. Bu nedenle, kapsamlı bir anlayış için, gelecekteki araştırmalarda daha fazla numune ve %10'dan fazla çimento fırın tozu ilavesi kullanımı tavsiye edilmiştir.

Obiano ve ark. (2020), sürdürülebilir inşaat için atık kemik külü ile stabilize edilmiş lateritik toprakların dayanımını tahmin etmek için çok değişkenli modeller geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Lateritik toprağı stabilize etmek için farklı oranlarda kemik külü kullanılmıştır. Elde edilen lateritik tuğla örnekleri farklı sıcaklık ve yaşlarda kürlenmiştir. Numuneler, basınç dayanımlarını elde etmek için test edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda diğer belirleyiciler arasında kemik külü içeriğinin lateritik tuğlaların basınç dayanımı üzerinde en önemli olumlu etkilere sahip olduğu bulunmuştur. Oluşturulan modellerin kullanılabilirliği, kullanılan değişkenlerin aralığı ile sınırlıdır, ancak daha evrensel bir uygulama için, daha geniş değişken aralıkları araştırılabilir diye eklemişlerdir. Bu modelin ise Nijerya'da sürdürülebilir konut inşası için stabilize lateritik zeminin basınç dayanımının tahmini için pratik uygulamaya sahip olduğu ifade edilmiştir.

Obiano ve ark. (2020), kireç ve kemik külü ilavesiyle lateritik toprağın mukavemetini artırarak sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak etkin bir şekilde kullanılmasını amaçlamışlardır. Farklı oranlarda sönmüş kireç (%3, 9 ve 15) ve kemik külü (%5,10,15 ve 20) kullanılmıştır. Lateritik tuğla örneklerini iyileştirmek için oda kurutma, güneşte kurutma ve fırında kurutma yöntemleri denenmiştir. Tuğla numunelerin basınç dayanımlarını elde etmek için deneyler yapılmış. Yapılan çalışmalar sonucunda %9 sulu kireç ve %5 kemik külünün optimum bileşimi ile 28 gün sonunda toprağın basınç dayanımının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca oda kurutma yöntemi kullanılarak kürlenmiş numuneler de en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Yapılan deneyler ve sonuçlarında elde edilen verilere göre tuğla yapımında lateritik toprağın stabilizasyonu için kireç yerine kemik külü kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

Ikeagwuani ve ark. (2019) yaptıkları bu çalışmada siyah pamuklu toprağın nasıl stabilize edilebileceği, ayrıca kolay ve ucuz bir malzeme olan talaş kullanılarak uygun bir alt zemin malzemesi olarak kullanılabilirliği konularını araştırmışlardır. Talaş 800 °C bir fırında kül haline getirilmiş ve ardından %4, 8, 12, 16 ve 20 gibi değişen oranlarda siyah pamuklu toprak ile karıştırılmıştır. Deneme karışımları sonuçlarına göre %16 talaş külü kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş, böylece %16'lık optimum talaş külü içeriği ile işlenen siyah pamuklu toprak, %2, 4, 6, 8 ve 10 kireç katkısı ile tekrar stabilize edilmiştir. Elde edilen son verilere göre %16 talaş külü ile işlenen siyah pamuklu toprak %4 kireç ile stabilize edildiğinde likit limit, diferansiyel serbest şişme, plastisite indeksi değerlerinde optimum azalma göstermiş, bunun yanı sıra CBR ve özgül ağırlıkta optimum artış elde edilmiştir. Araştırma sonucunda siyah pamuklu toprağın alt zemin malzemesi olarak kullanılmak üzere uygun şekilde stabilize edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Tran ve ark. (2018) mısırın bir yan ürünü olarak kabul edilen mısır ipliği lifleri ile takviye edilmiş toprağın mekanik özelliklerini anlamak amacıyla araştırma yapmışlardır. Mısır ipliği lifleri ile güçlendirilmiş toprağın mekanik özellikleri, basınç testi, serbest basınç testi ve yarıma gerilimi testi gibi bir dizi deney yapılarak incelenmiştir. Katkı maddesi miktarının yanı sıra lif uzunluklarının zeminin mekanik özelliklerine olan etkisi de dikkate alınmıştır. Sonuçlar, toprağa mısır ipliği liflerinin eklenmesinin, basınç dayanımı, yarıma gerilme mukavemeti, süneklik ve sertlik dahil olmak üzere mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Tipik olarak, maksimum serbest basınç mukavemetindeki en yüksek artış, %1 fiber içeriği ile 10 veya 30 mm fiber uzunluğu kullanıldığında yaklaşık %38 olmuştur. Yarıma gerilme mukavemetindeki en fazla artış ise %2 lif içeriği ve 50 mm lif uzunluğu ile %210,5 olmuştur. Araştırmacılar mısır ipliği liflerinin toprak stabilizasyonunda iyi performans gösterdiğini, toprağı modifiye etmek için iyi bir lif malzemesi gibi görüldüğünü ve gelecekte dikkate alınması gerektiği sonucuna varılabileceğini belirtmişlerdir.

Oluwatuyi ve ark. (2018) yaptıkları çalışma ile bir otoyol inşaat malzemesi olarak 1:1 oranında öğütülmüş yumurta kabuğu, çimento ve her ikisinin karışımı ile stabilize edilmiş lateritik toprağın potansiyel kullanımı için laboratuvar deneylerinin sonuçlarını gözlemlemişlerdir. Stabilize edici bağlayıcılar, numune ağırlığının %0, 2, 4, 6 ve 8'i gibi değişen yüzdelerde toprağa ilave edilmiş ve ardından iyileştirici etkisini belirlemek amacıyla çeşitli laboratuvar testlerine tabi tutulmuş. Deney sonuçları hem ıslatılmamış hem de ıslatılmış CBR değerlerinin daha yüksek stabilize edici bağlayıcı içeriği ile arttığını göstermiştir. CBR değerleri gibi serbest basınç dayanımı değerleri de daha yüksek stabilize edici bağlayıcı içeriği ile artmıştır. Araştırmacılar deney sonuçlarına göre 1:1 oranında stabilize lateritik toprağın öğütülmüş yumurta kabuğu ve çimento karışımının toprak ağırlığına göre %8'i, karayolu inşaatı için potansiyel bir alt temel malzemesi olarak kullanılabilir sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca mikroyapısal analiz, stabilize edilmiş numunelerin mukavemet değerlerinde artış ve Atterberg limitlerinde düşüşü de doğrulamıştır. Yumurta kabuğu tozu ve çimento ile stabilize edilmiş lateritik toprak karışımının, otoyol inşaatı için alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Bilondi ve ark. (2018) killi toprakların mekanik davranışını iyileştirmek için geri dönüştürülmüş cam tozuna dayalı bir geopolimer kullanmanın uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Toprak ve geri dönüştürülmüş cam tozunun kimyasal elementleri XRF ile belirlenmiş. Numunelerin mekanik davranışını anlamak için serbest basınç dayanımı testi kullanılmış. Geri dönüştürülmüş cam tozu içeriği, kütleme süresi, sıcaklık vb. farklı parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, bir geopolimer kullanılarak stabilize edilen numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerinin, stabilize edilmemiş örneklere kıyasla arttığını ortaya koymuştur. Yapılan bu araştırma, geri dönüştürülmüş cam tozuna dayalı çimento kullanmanın killi toprak stabilizasyonu üzerindeki önemli olumlu etkisini göstermektedir. Araştırmacılar geri dönüştürülmüş cam tozu geopolimerlerinin çevre dostu bir toprak stabilizatörü olduğu kanısına varmışlardır.

### 3. MATERYAL VE METOT

Çalışmanın bu bölümünde, üzerinde deney yapılacak olan zemin numunesi ve katkı maddesi olarak kullanılacak olan kemik tozu hakkında bilgiler verilmiştir. Sonrasında, laboratuvar ortamında zemin numunesinin endeks özellikleri belirlenmiş, çeşitli deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Kemik

Kemik, yapısında hücre çeşitliliği ve kan damarlarını barındıran canlı bir dokudur. Kemikler, canlıların vücuduna yapısal destek sağlayan organlardır. Bunun yanında iç organları korumak ve kaslar yardımı ile vücut hareketini sağlamak gibi görevleri vardır. Yapısal olarak, mineralize olmuş bağ dokusu olarak tanımlanabilir.

Kemikler genel olarak kemik doku, kemik iliği ve bunları çevreleyen bir bağ dokuya sahip olan, damarlar ve sinirlerle çevrelenmiş organlardır. Organların korunmasını, kas sisteminin desteklenmesini ve vücudun hareketini sağlayan iskelet sisteminin parçası olan kemik, kemik iliği vasıtası ile kanın oluşumunu sağlar ve kemik iliğini koruma görevini üstlenir. Bunların yanı sıra kemik dokusu vücutta bulunan kalsiyumun neredeyse tamamını depolar ve günlük kalsiyum ihtiyacı buradan karşılanır. Belirtildiği üzere kalsiyumun kemikten salınması; kas hareketleri, kan pıhtılaşması vb. olaylarda kullanıldığından, yaşam için vazgeçilmez bir rol oynar.

Canlıların temel yapı taşı oluşturulan kemikler sahip oldukları karmaşık mikro yapıları ile seramik organik kompozitler olarak adlandırılmaktadır. Kemik her ne kadar  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $(\text{CO}_3)^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  içerse de ana yapısı  $\text{Ca}^{2+}$  ve P'den oluşmaktadır. Çizelge 3.1'de kemiğe ait kimyasal kompozisyon yer almaktadır (Muralithran ve Ramesh, 2000).

Çizelge 3.1. Kemiğe ait kimyasal kompozisyon (Muralithran ve Ramesh, 2000)

<b>Kompozisyon</b>	<b>% (Ağırlıkça)</b>
Kalsiyum Ca <sup>2+</sup>	34.8
Fosfor P	15.2
Ca/P	1.71
Sodyum Na <sup>+</sup>	0.9
Magnezyum Mg <sup>2+</sup>	0.72
Potasyum K <sup>+</sup>	0.03
Karbonat (CO <sub>3</sub> ) <sup>2-</sup>	7.4
Flor F <sup>-</sup>	0.03
Klor Cl <sup>-</sup>	0.13
Pirofosfat (P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) <sup>4-</sup>	0.07
<b>Toplam inorganik mineraller</b>	<b>65.0</b>
<b>Toplam organikler</b>	<b>25.0</b>
<b>Su H<sub>2</sub>O</b>	<b>10.0</b>

### 3.1.2. Kemik Tozu

Deneylerde kullanılmak üzere sığır kemiği üzerinde bir dizi işlem yapılmıştır. Öncelikle atık bir materyal olan kemik ücretsiz bir şekilde kasaptan temin edilmiştir. Elde edilen bu kemiklerin içerisindeki ilikler boşaltılmış ve sonrasında 2 hafta boyunca açık havada kurutulmuştur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kemiklerin ilikten ayrılma ve kurutulma aşamaları

Sonrasında kemiklerin uygun dane boyutuna ulaşması için bir çimento fabrikasında öğütme işlemi yapılmıştır. Ancak dane boyutları yeteri kadar küçültülememiş ve dane boyutları açısından bir standart değere ulaşamamıştır. Bu sebeple Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında bilyalı değirmen yardımı ile dane boyutları daha da küçültülmeye çalışılmıştır. Yaklaşık 5 kg numune, her kullanımda 500 gr numune ve 10 kg bilya ile 4 saat boyunca bilyalı değirmende öğütülmüştür. Bu öğütme işlemi sonucunda kemik tozu 0,425 mm (No:100) elekten geçecek hale getirilmiştir (Şekil 3.2).





Şekil 3.2. Bilyalı değirmen yardımı ile kemik tozunun elde edilme aşamaları

Kullanılacak zemin numunesi de göz önüne alındığında bu dane boyutu, kemik tozunun katkı olarak kullanıldığı zemin numunesi içerisinde homojen olarak dağılması için yeterli olmuştur. Öğütme işleminin ardından kurutulmasına rağmen hala nemli olan kemik tozu etüvde 300 °C'ta tekrar kurutulmuştur. Bu aşamadan sonra elde edilen kemik tozu deneylerde kullanılmak üzere uygun hale gelmiştir.

### 3.1.3. Nehir Kumu

Araştırmada, Çukurova Üniversitesi Zemin Mekaniği laboratuvarından temin edilen, Çukurova bölgesinde akıt nehrinden elde edilen kum zemin numuneleri kullanılmıştır (şekil 3.3). Numune ASTM standartlarına göre 2 mm çaplı (No:10) ve 0,075 mm çaplı (No:200) elek aralıklarında elenmiştir. Eleme işleminin ardından oda sıcaklığında muhafaza edilen numune etüvde kurutulmuştur. Deneylerde kullanılmak üzere laboratuvar ortamında oda sıcaklığında havalandırılmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir. ukurova Üniversitesi Zemin Mekaniği laboratuvarında deney kumunun endeks özellikleri belirlenmiştir. TS 1500'e göre zemin sınıfı temiz üniform kum (SP), Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre ise kötü derecelenmiş kum olarak belirlenmiştir. Ayrıca katkı maddesinin etkisini görmek ve referans değer elde etmek amacıyla kayma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesine dair deneyler yapılmıştır.



şekil 3.3. Deneylerde kullanılan nehir kumu

### 3.2. Metot

#### 3.2.1. Elek Analizi

Çalışmada kullanılacak olan nehir kumunun dane dağılım eğrisini ve zemin sınıfını belirlemek amacıyla ASTM standartlarına uygun elekler kullanılarak, Türk Standartları TS 1900-1'e uygun olarak eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. No:10 ve No:200 elek aralığında eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Zemin sınıflandırması İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırmasına (TS 1500) ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. Elek analizi deney verileri

<b>Granülometri Parametreleri</b>	<b>Birim</b>	<b>Değer</b>
Efektif Dane Çapı, <b>D<sub>10</sub></b>	mm	-
<b>D<sub>30</sub></b>	mm	-
<b>D<sub>60</sub></b>	mm	-
Üniformluk Katsayısı, <b>Cu</b>	-	-
Eğrilik Katsayısı, <b>Cc</b>	-	-
Zemin Sınıfı	-	-
Özgül ağırlık, <b>γ<sub>s</sub></b>	kN/m <sup>3</sup>	-



Şekil 3.4. Elek analizi çalışmalarında kullanılan ASTM elekleri

### 3.2.2. Özgül Ağırlık (Piknometre) Deneyi

Çalışmanın bu aşamasında nehir kumunun özgül ağırlığını belirlemek için, piknometre deneyi TS 1900-1'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin yapım aşamasında 500 ml hacminde piknometre kabı kullanılmış ve kullanılan numune miktarları hassas terazi yardımı ile ayarlanmıştır. Sonrasında vakum yardımı ile numune içerisinden havanın alınması sağlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda özgül ağırlık ( $\gamma_s$ ) değeri bulunmuştur.



Şekil 3.5. Piknometre deney aşamaları

### 3.2.3. Kompaksiyon Deneyi

Bu kısımda nehir kumu ve katkı maddesi olarak kullanılan kemik tozunun, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinin bulunması için, numuneler üzerinde ASTM D698 standardına uygun olarak laboratuvar ortamında standart proktor deneyleri yapılmıştır.

Deney süresince, nehir kumu ve kemik tozu üzerinde benzer işlemler uygulanmıştır. Numuneler uygun bir kap içerisine alınmış ve üzerlerine belirli miktarlarda su eklenmiştir. Sonrasında su homojen dağılacak şekilde karıştırılmıştır. Bu aşamadan sonra numuneler, kompaksiyon kabı içerisine 3 tabaka olacak şekilde sıkıştırılarak koyulmuştur. Sıkıştırma işlemi her tabakada 25 vuruş yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Nehir kumu için standart proktor deneyi uygulama adımları

Bu işlemler numunelere her su eklendiğinde, farklı su içerikleri için tekrarlanmıştır. Yapılan her deney sonunda etüvde kurutmak üzere deney numunelerinden örnekler alınmış ve böylece numunelerin içerisindeki asıl su içerikleri belirlenmiştir. Yapılan bu deneyler sonucunda kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği çizilmiştir. Bu grafikten ise maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri elde edilmiştir.

### 3.2.4. Rölatif Sıklık Deneyi

Çalışmanın bu aşamasında, gevşek ve sıkı durumda kum numuneler hazırlanmış ve kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemek amacıyla bu numuneler üzerinde rölatif sıklık deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deney esnasında gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{min}$ ), değeri elde edilirken kum numune kap içerisine deformasyona maruz kalmadan koyulmuştur. Sonrasında zemin yüzeyi düzeltilmiş ve numune dolu kap tartılarak ağırlığı belirlenmiştir. Sıkı durumdaki kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{mak}$ ), değeri için ise kum numune kap içerisine 3 tabaka halinde serilerek yerleştirilmiştir. Her tabaka için şişleme işlemi ve 25 vuruş yapılarak numune gerekli ölçüde sıkıştırılmıştır. Son tabaka da serilip sıkıştırıldıktan sonra numune yüzeyi düzeltilmiş ve numune tartılmıştır. Deneyler tekrarlanarak ortalama bir değer elde edilmiş ve hesaplamalar için kullanılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda gevşek ve sıkı durumlar için kuru birim hacim ağırlık ve boşluk oranı değerleri aşağıdaki formüller yardımı ile elde edilmiştir.

$$(\gamma_k)_{mak, min} = \frac{W_{sıkı, gevşek}}{V_{kap}} \quad (3.1)$$

$$(e)_{sıkı, gevşek} = \frac{\gamma_s}{(\gamma_k)_{mak, min}} - 1 \quad (3.2)$$

Bu formüllerde;

$(\gamma_k)_{mak}$  ve  $(\gamma_k)_{min}$ , sırasıyla maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıklarını,

$(e)_{sıkı}$  ve  $(e)_{gevşek}$ , sırasıyla sıkı ve gevşek durumlar için boşluk oranlarını,

$(W)_{sıkı}$  ve  $(W)_{gevşek}$ , sırasıyla sıkı ve gevşek durumlar için ağırlıkları,

$V_{kap}$ , kullanılan kabın hacmini ve

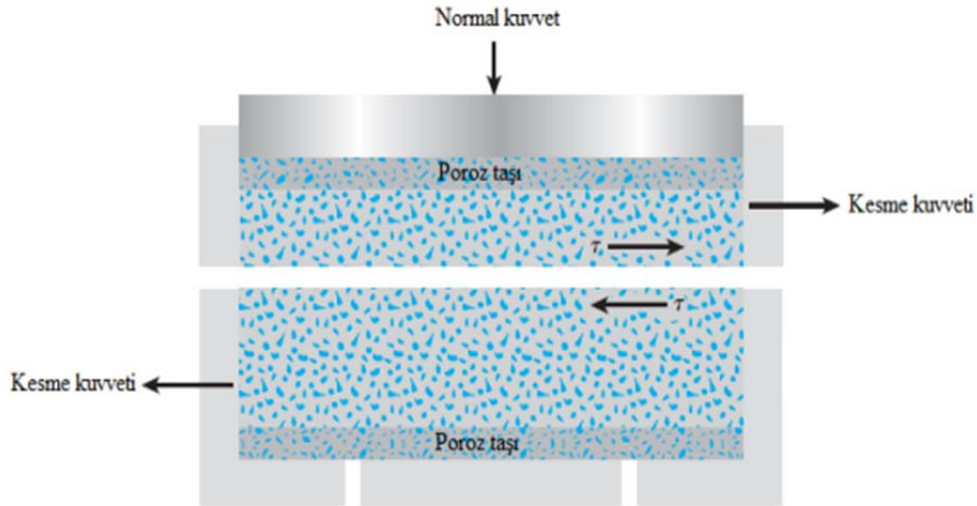
$(\gamma_s)$ , dane birim hacim ağırlık değerini temsil etmektedir. Formüller yardımı ile hesaplanacak değerler ise Çizelge 3.3'te yer almaktadır.

Çizelge 3.3. Rölatif Sıklık Deney Verileri

Rölatif Sıklık Parametreleri	Birim	Değer
Dane Birim Hacim Ağırlığı, $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	-
Gevşek Halde Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{\min}$	kN/m <sup>3</sup>	-
Sıkı Halde Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{\max}$	kN/m <sup>3</sup>	-
Gevşek Halde Boşluk Oranı, $e_{\text{gevşek}}$	-	-
Sıkı Halde Boşluk Oranı, $e_{\text{sıkı}}$	-	-

### 3.2.5. Kesme Kutusu Deneyi

Kesme kutusu deneyi, laboratuvar deneyleri arasında eskiden beri sıkça kullanılan bir yöntemdir. Araştırma için yapılan deneylerde, deney numuneleri üst üste monte edilebilen 6cm x 6cm boyutlarında kare kesitli iki parçadan oluşan rijit sistemin içine yerleştirilmiştir. Sistemin üst parçası sabit dururken alt parçası yanal kuvvet etkisi altında hareket etmeye zorlanmıştır. Böylece numune orta düzlemi boyunca kaymaya zorlanır. Gevşek ve sıkı durumda yapılan kesme kutusu deneylerinde,  $\sigma_1 = 27$  kPa,  $\sigma_1 = 54$  kPa ve  $\sigma_1 = 109$  kPa değerlerindeki normal gerilmeler altında deneyler tamamlanmıştır. Bu işlemler belirtilen 3 farklı yük etkisi altında tekrarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda iki farklı sıklık için kırılma zarfları ve neticesinde kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Kesme kutusu sembolik deney düzeneği (Das, 2010)



Şekil 3.8. Kesme kutusu deney öncesi aşamaları

Şekil 3.8’de kesme kutusu deneyleri yapılırken izlenen yol ve uygulama adımları verilmiştir. İlk aşamada numune kemik tozu katkısı ile homojen bir şekilde karıştırılmış ve kesme kutusu düzeneği kullanıma hazırlanmıştır. İkinci aşamada hazırlanan numune, düzeneğin içerisine deneyin yapılacağı sıklığa bağlı olarak uygun koşullarda yerleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise düzeneğin içerisine konulmuş numunenin yüzeyi düzeltilmektedir. Son aşamada da düzenek kesme kutusu cihazının içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Kesme kutusu deney aşamaları

En son bölümde kesme kutusu deney düzeneğini cihaza yerleştirilmişti. Bu işlemden sonraki ilk aşama düzeneği sabit tutan kenar vidalarını çıkarmaktır. Daha sonra uygulanacak yüke bağlı olarak plakalar yerleştirilir ve su terazisi yardımı ile sistemin dengede olması sağlanır. Deney başladıktan hemen sonra yük etkisinin yanındaki vida yardımı ile yük sisteme verilir ve deneye başlanmış olur. Bu aşamadan sonra cihaz ekranından yük ve deformasyon değerleri takip edilebilir. Son aşamada ise göçmüş bir numune örneği görülmektedir (Şekil 3.9).

Kesme kutusu deneyleri çalışma süresi boyunca belirtildiği üzere yapılmıştır. Ancak deneylerin yapımı esnasında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus olduğu fark edilmiştir. Bu husus, katkı malzemesinin zemin numunesi içerisine hangi yöntem kullanılarak ekleneceğidir. Literatürde bulunan, çeşitli katkı malzemelerinin kullanımlarında genel olarak iki ayrı yöntemin kullanıldığı görülmüştür. Bu yöntemler daha kolay anlaşılması için Metod A ve Metod B olarak tanımlanmıştır.

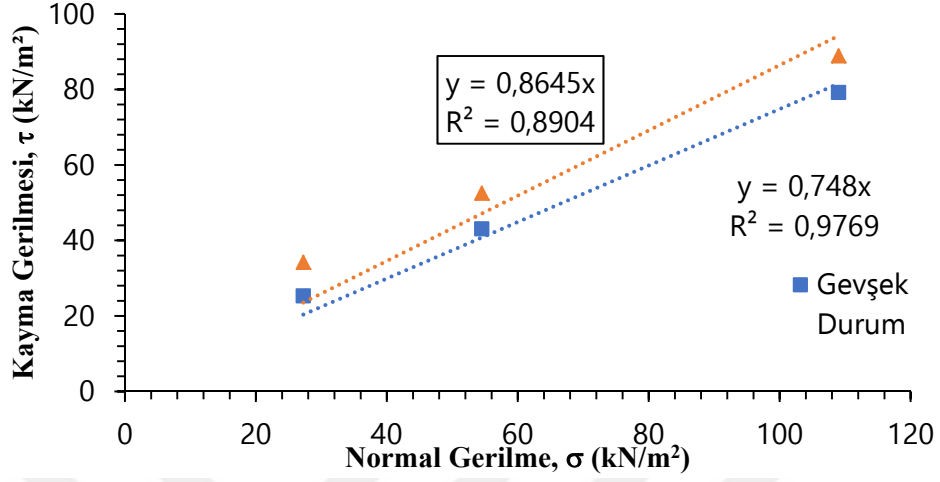
**Metod A:** Kullanılacak zemin numunesi ve katkı malzemesi kullanım yüzdeleri belirlendikten sonra, zemin numunesi üzerine katkı malzemesini belirlenen yüzdelerde eklemek suretiyle uygulamanın yapılmasıdır. Bu yöntemi daha iyi anlamak amacıyla bir örnek verilebilir.

Örnek: 200 gr zemin numunesi içerisine %10 katkı malzemesi eklenmiş ve deney 220 gr numune ile gerçekleştirilmiştir. İçerik olarak 200 gr zemin numunesine ve 20 gr katkı malzemesine sahiptir.

**Metod B:** Metod A'dan farklı olarak bu yöntemde ise önce belirlenen yüzdelerdeki katkı maddelerinin miktarları hesaplanmıştır. Sonrasında hesaplanan değerlere bağlı olarak gevşek ve sıkı durum için ağırlıkları belirli olan zemin numunelerinden bu miktarlar çıkarılmıştır.

Örnek: 200 gr zemin numunesi içerisine %10 katkı malzemesinin eklenmesi planlanmış ve eklenmesi planlanan katkı malzemesi miktarı kadar zemin numunesi sistemden çıkarılmıştır. Sonuç olarak deney 200 gr numune ile gerçekleştirilmiştir. İçerik olarak 180 gr zemin numunesine ve 20 gr katkı malzemesine sahiptir.

Bu iki yöntem de bu tip çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Saha uygulamalarında hangi yöntemin daha ekonomik, etkili ya da uygun olacağı tartışılabilir. Bu sebeple laboratuvar ortamında iki yöntem de kullanılmış ve katkı malzemesinin etkisi dışında kullanım yönteminin etkisi de bu tez çalışması içerisinde ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Son olarak, yapılan deneylerin sonuçlarında, elde edilen veriler grafikler yardımı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Gevşek ve sıkı hallerde katkısız kesme kutusu deneyi

Çizelge 3.4. Katkısız kum zemin numuneler için gevşek ve sıkı halde kayma mukavemeti parametreleri

Katkısız Kum Zeminler İçin Kayma Mukavemeti Parametreleri				
Sıkılık	Gevşek Hal		Sıkı Hal	
Katkı (%)	$\phi$	c	$\phi$	c
0	36,80°	0	40,84°	0

### 3.2.6. CBR Deneyi

CBR deneyi genellikle yol dolgusu, temel ve taban malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin dayanımını değerlendirmek için yapılan bir deneydir. Belirli bir su içeriğine ve yoğunluğa sahip zeminin taşıma gücünü tayin etmek amacıyla yapılır. Şekil 3.11'de CBR değerleri belirlenen zeminlerin sınıflandırma sistemi ve bu sınıflandırma sistemine göre de kullanım alanları gösterilmiştir.

CBR Değeri	Zemin Tanımı	Kullanımı	Sınıflandırma	
			USCS	AASHTO
0-3	Çok kötü	Alt yapı	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Kötü-orta	Alt yapı	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Orta	Alt temel	OL, CL, ML, SC, SM,	A4, A5, A6, A7
20-50	İyi	Temel-Alt temel	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
50 <	Çok iyi	Temel	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Şekil 3.11. CBR değerine göre zeminlerin sınıflandırılması ve kullanımı (Bowles, 1992)

Deney sonucunda bir taşıma gücü oranı elde edilir. Bu oran kesit alanı 1935 mm<sup>2</sup> olan pistonun belirli bir hızla numune içerisine batırılmasına karşı gösterdiği direncin ölçülmesi ile hesaplanır. Deneylerde kullanılan numunelerin belirli bir penetrasyon için gösterdiği direncin, aynı penetrasyon derinliği için standart bir kırma taş numunesinin gösterdiği dirence oranı olarak tanımlanır. Bu standart kırma taş numunesine ait yük-penetrasyon değerleri Şekil 3.12'de verilmiştir.

Penetrasyon miktarı(mm)	Standart Yük miktarı(kN)
1,25	0,84
2,00	11,50
2,50	13,24
4,00	17,60
5,00	20,00

Şekil 3.12. Kırmataş için standart değerler (Gündüz, 2015)

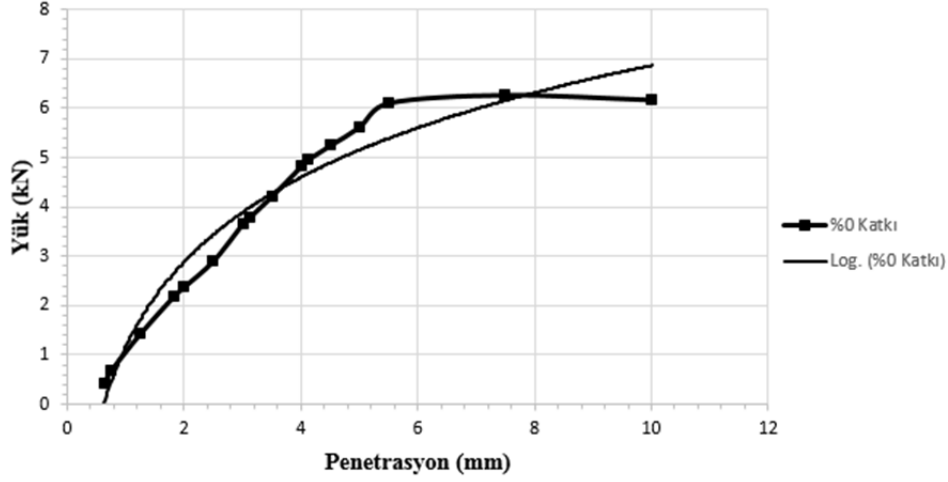
Diğer bir deyişle CBR değerleri 2.54 mm ve 5.08 mm'lik penetrasyona karşılık gelen gerilmenin standart gerilmeye oranı olarak hesaplanır. Deneyler

sonucunda elde edilen bu değer zemini temsil eden sabit bir değer değil, zeminin su içeriğine ve yoğunluğuna bağlı olarak değişebilen bir değerdir. Ancak genel anlamda farklı zemin tiplerine ait ortalama CBR değerleri bulunmaktadır ve bunlar Şekil 3.13'te tablo halinde görülmektedir.

Genel zemin tipi	USCS Zemin Tipi	CBR Taşıma Oranı, (%)
İri Taneli Zeminler	GW	40-80
	GP	30-60
	GM	20-60
	GC	20-40
	SW	20-40
	SP	10-40
	SM	10-40
	SC	5-20
İnce Taneli Zeminler	ML	15 veya daha az
	CL	15 veya daha az
	OL	5 veya daha az
	MH	10 veya daha az
	CH	15 veya daha az
	OH	5 veya daha az

Şekil 3.13. Zeminlerin yaklaşık CBR değerleri (Holtz ve ark., 2010)

Araştırmanın bu bölümünde farklı oranlarda (% 0,3,6,9,12) kum katkı ile nehir kumu üzerinde CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler yapılırken standart proktor deneyi sonucunda elde edilen optimum su muhtevası değerlerinde numuneler hazırlanmış ve bu numuneler CBR kalıpları içerisine koyulduktan sonra standart proktor enerjisi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Sonrasında numuneler üzerinde CBR deneyleri gerçekleştirilmiş ve CBR değerleri tespit edilmiştir. Yapılan ilk deney katkı içermeyen nehir kumu numunesi üzerinde yapılmış ve bu deneyden elde edilen veriler referans değerler olarak kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Katkısız nehir kumu numunesi için CBR deneyi

**Deneyin Yapılışı :** Deneylere başlamadan önce numuneler 4 No'lu elekten geçecek şekilde elenmiş ve etüvde kurutulmuştur. CBR deneyinde kullanılacak numuneler standart proktor sıkılığında hazırlanmıştır. Numunelerin su içeriği belirlenirken, zemin numunelerinden yaklaşık 5-6 kg kullanılarak üzerine su eklenmiş ve kompaksiyon deneyi ile belirlenmiş olan optimum su muhtevasında numuneler elde edilmiştir. Deney sonrası numunelerin su muhtevasını belirlemek için bir miktar numune alınarak etüve koyulmuştur. Deneylere başlamadan önce CBR kabı tartılarak ağırlığı belirlenmiştir. Son olarak uygun sıkıştırma yöntemi seçilerek deneylere başlanmıştır.

Deneyin yapım aşamasında, hazırlanan zemin numuneleri seçilen sıkıştırma yöntemine göre her tabakaya eşit miktarda zemin numunesi gelecek şekilde sıkıştırılır. Sıkıştırma işleminden sonra moldun üstteki ek parçası çıkarılır ve numunenin üst yüzeyi örselenmeden tıraşlanır. Mold ile zemin numunesi tartılarak ağırlığı belirlenir. Deneyin yapılma aşamasında numune üzerine, etki edecek katman yükünü modellemek için ağırlıklar konur ve numuneler CBR aletine yerleştirilir. Cihaz üzerinde yükleme ve penetrasyon saatleri sıfırlanır ve cihaz okuma yapmaya hazır hale getirilir. Yükleme yapılırken piston 1.27 mm/dk

hızla hareket eder ve cihaz ekranı üzerinden okumalar yapılır. Deney yapıldıktan sonra su muhtevasını belirlemek amacıyla numune alınır ve etüve yerleştirilir (Şekil 3.15).

Yukarıda aşamaları belirtildiği şekilde laboratuvar ortamında CBR deneyleri yapılmıştır. Deneyler yapıldıktan sonra 2.54 ve 5.08 mm penetrasyona karşılık gelen CBR değeri belirlenmiştir. Bu değerlere göre grafikler çizilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

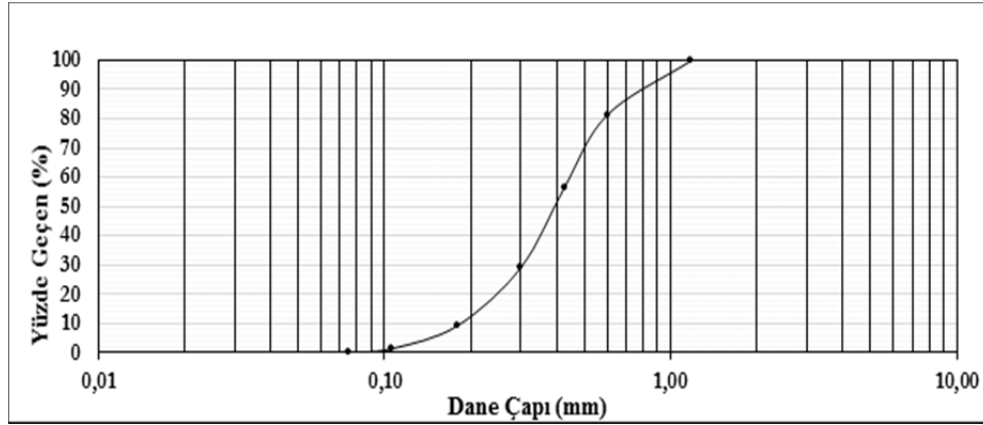


Şekil 3.15. CBR deney aşamaları

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

##### 4.1. Elek Analizi Deney Sonuçları

Araştırma süresince kullanılan, nehir kumu numunelerine ait dane dağılım eğrisini elde etmek amacıyla, elek analizi deneyi gerçekleştirilmiştir. Elek analizi deneysel çalışması TS1900-1'e uygun olarak yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler yardımı ile numunenin endeks özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen endeks özellikleri sonrası zemin sınıflandırması yapıldığında numunenin TS1500'e göre SP sınıfında ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre, kötü derecelenmiş kum (SP) sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak nehir kumu için elde edilen dane dağılım eğrisi ve diğer parametreler Şekil 4.1'de ve Çizelge 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan nehir kumunun dane dağılım eğrisi

Çizelge 4.1. Elek analizi deney sonuçları

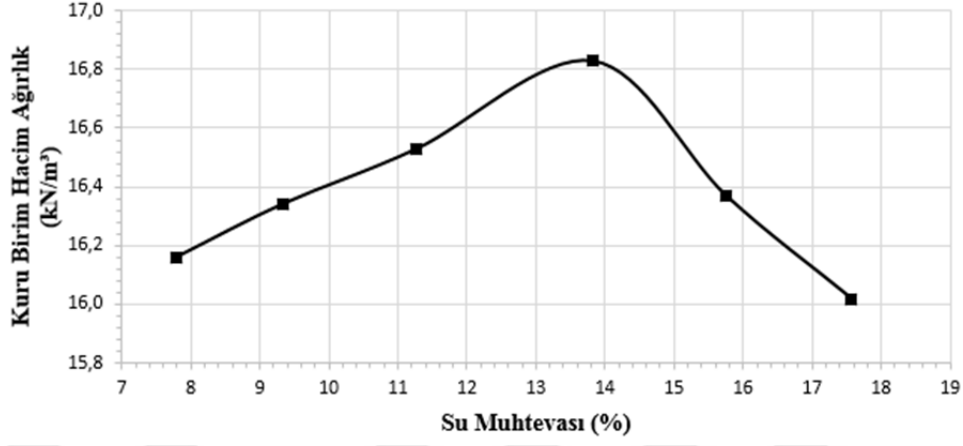
<b>Granülometri Parametreleri</b>	<b>Birim</b>	<b>Değer</b>
Efektif Dane Çapı, <b>D<sub>10</sub></b>	mm	0,188
<b>D<sub>30</sub></b>	mm	0,303
<b>D<sub>60</sub></b>	mm	0,442
Üniformluk Katsayısı, <b>C<sub>u</sub></b>	-	2,359
Eğrilik Katsayısı, <b>C<sub>c</sub></b>	-	1,105
Zemin Sınıfı	-	SP
Özgül ağırlık, <b>γ<sub>s</sub></b>	kN/m <sup>3</sup>	27,11

#### 4.2. Pıknometre Deney Sonuçları

Deneylerde kullanılmak üzere seçilen nehir kumunun özgül ağırlığını belirlemek amacıyla pıknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda özgül ağırlık ( $\gamma_s$ ) değeri, ortalama 27,11 kN/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.

#### 4.3. Kompaksiyon Deney Sonuçları

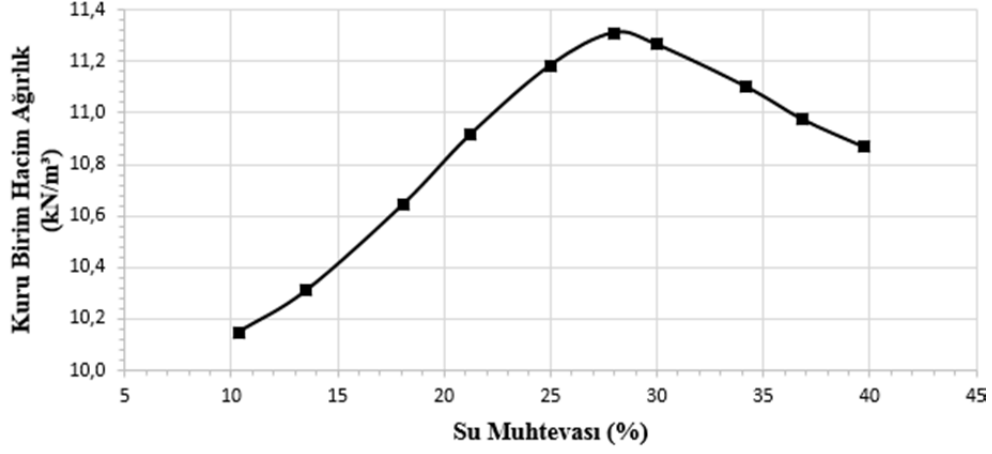
Bu aşamada sadece nehir kumu, sadece kemik tozu ve farklı katkı yüzdelerinde numuneler için gerçekleştirilen standart proktor deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.2. Nehir kumu kompaksiyon eğrisi

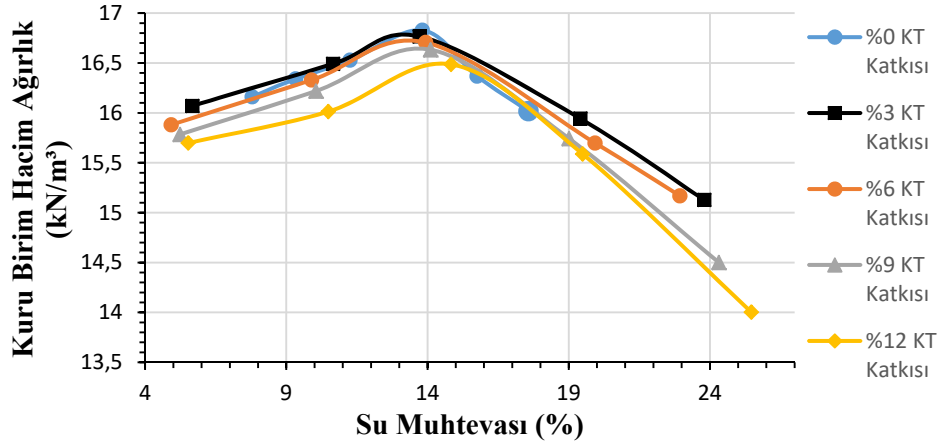
Sadece nehir kumu numunesi üzerinde yapılan bu deney grafiğinden maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri, 16,83 kN/m<sup>3</sup> ve optimum su muhtevası değeri %13,8 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2).

Aynı işlemlerin %100 kemik tozundan oluşan numuneler üzerinde yapılması sonucu Şekil 4.3'te gösterilen grafik elde edilmiştir. Grafiğe göre %100 kemik tozundan oluşan numune için maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri, 11,31 kN/m<sup>3</sup> ve optimum su muhtevası değeri %28 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Kemik tozu kompaksiyon eğrisi

Son olarak %0,3,6,9,12 oranlarında kemik tozu içeriğine sahip kum numuneler üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Farklı yüzdelerde KT katkıları için kompaksiyon eğrileri

#### 4.4. Rölatif Sıklık Deney Sonuçları

Nehir kumunun gevşek ve sıkı hallerdeki kuru birim hacim ağırlıklarını bulmak için rölatif sıklık deneyleri yapılmıştır. Uygulama esnasında iç çapı 10,50 cm ve yüksekliği 11,55 cm olan silindir kap kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen parametreler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rölatif Sıklık Deney Sonuçları

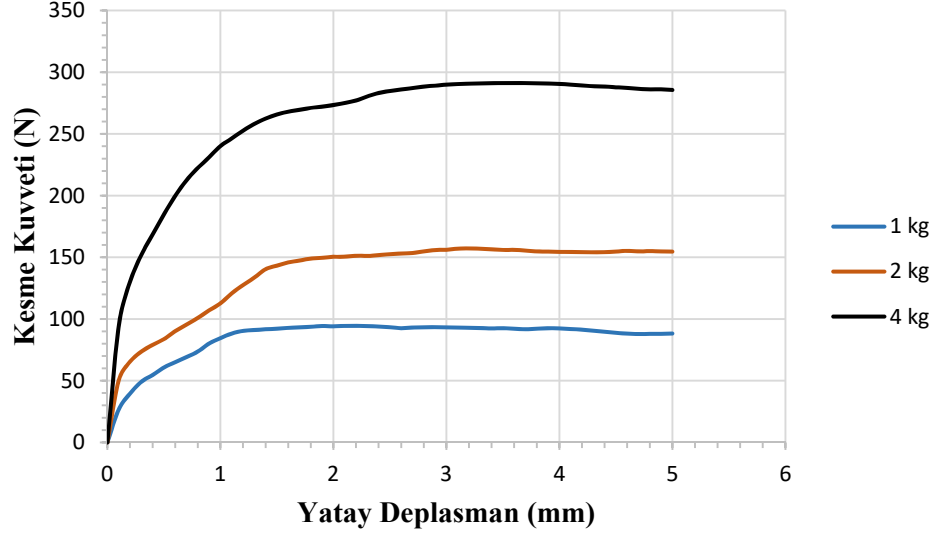
Rölatif Sıklık Parametreleri	Birim	Değer
Dane Birim Hacim Ağırlığı, $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	27,11
Gevşek Halde Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{\min}$	kN/m <sup>3</sup>	15,16
Sıkı Halde Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{\max}$	kN/m <sup>3</sup>	17,00
Gevşek Halde Boşluk Oranı, $e_{\text{gevşek}}$	-	0,79
Sıkı Halde Boşluk Oranı, $e_{\text{sıkı}}$	-	0,60

#### 4.5. Kesme Kutusu Deney Sonuçları

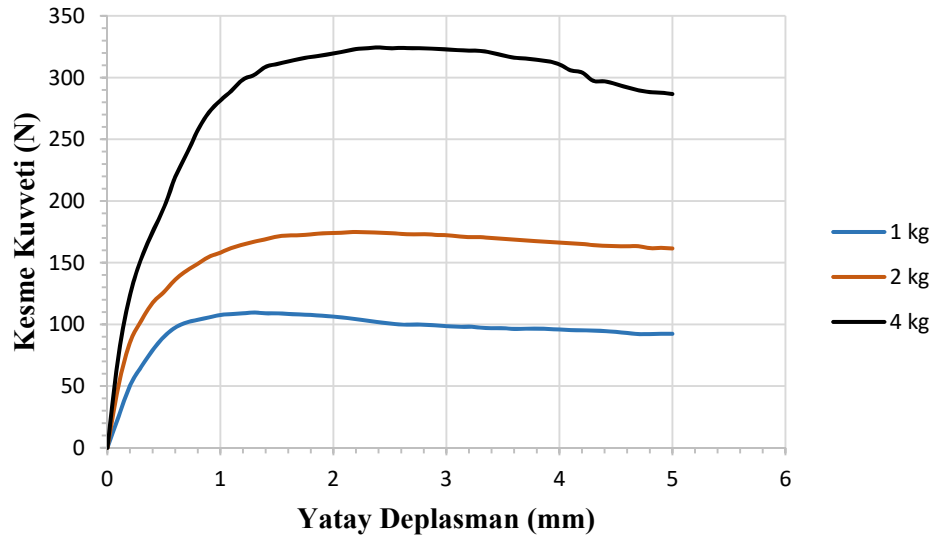
Bu çalışma kapsamında, endeks özellikleri belirlenen kum numune içerisine atık bir malzeme olan kemik tozu belirli oranlarda eklenmiştir. Eklendikten sonra ise kesme kutusu deneyleri yapılmış ve sonuçları grafikler halinde görsel olarak aktarılmıştır. Kesme kutusu deneyleri yapılırken daha önce de bahsedildiği üzere Metod A ve Metod B olmak üzere 2 ayrı yöntem kullanılmıştır.

Bunlardan Metod A, kum numune üzerine direkt olarak belirlenen oranda katkı malzemesini eklemek suretiyle yapılmaktadır. Metod B kullanıldığında ise önce eklenecek katkı maddesi miktarı belirlenmiştir. Daha sonra hesaplanan bu miktar kum numune içerisinden kum cinsinden çıkarılmış ve yerine kemik tozu yerleştirilmiştir.

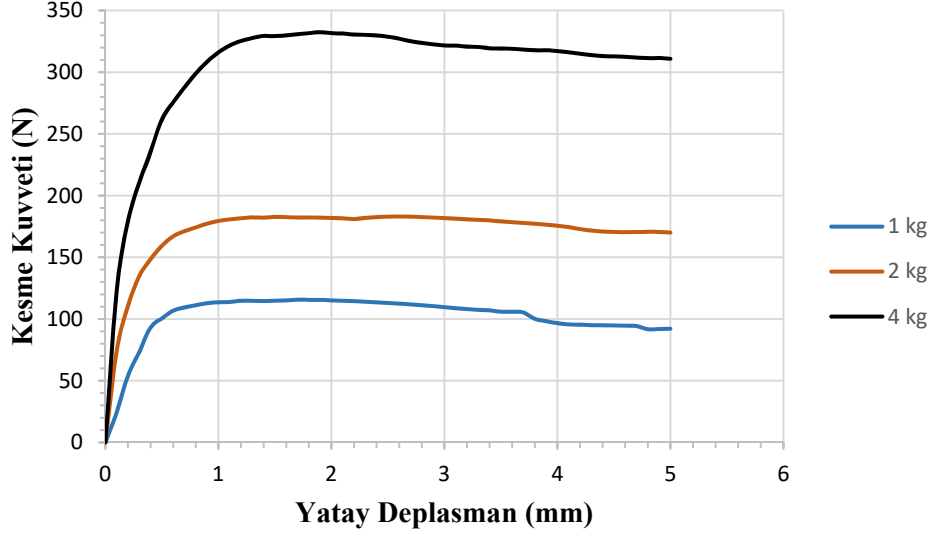
Bu 2 yöntemin incelenmesindeki temel sebep, Metod A kullanıldığında elde edilen mukavemet artışının katkı malzemesinden mi yoksa birim hacimde yer alan dane miktarındaki artıştan mı kaynaklandığının bilinmemesidir. Yöntemler çalışma boyunca ayrı ayrı kullanılmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.



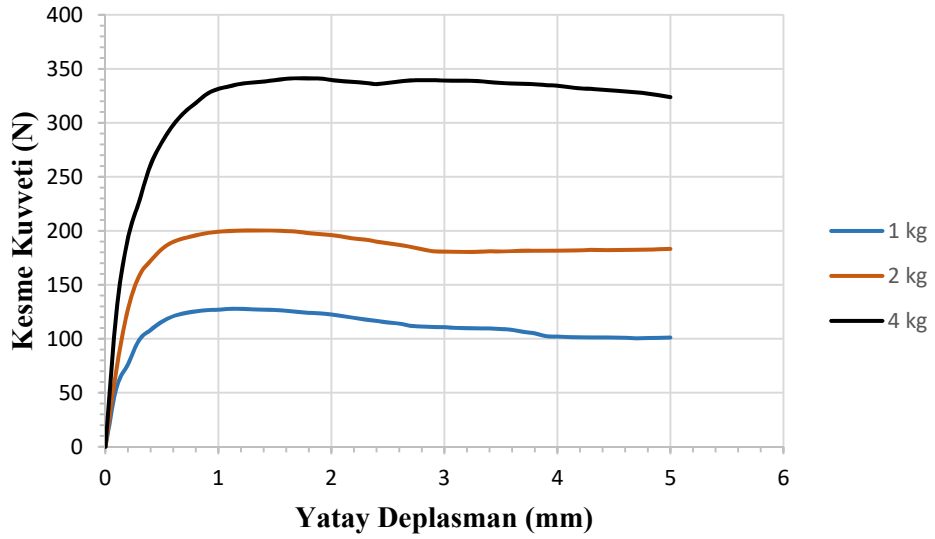
Şekil 4.5. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A



Şekil 4.6. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A

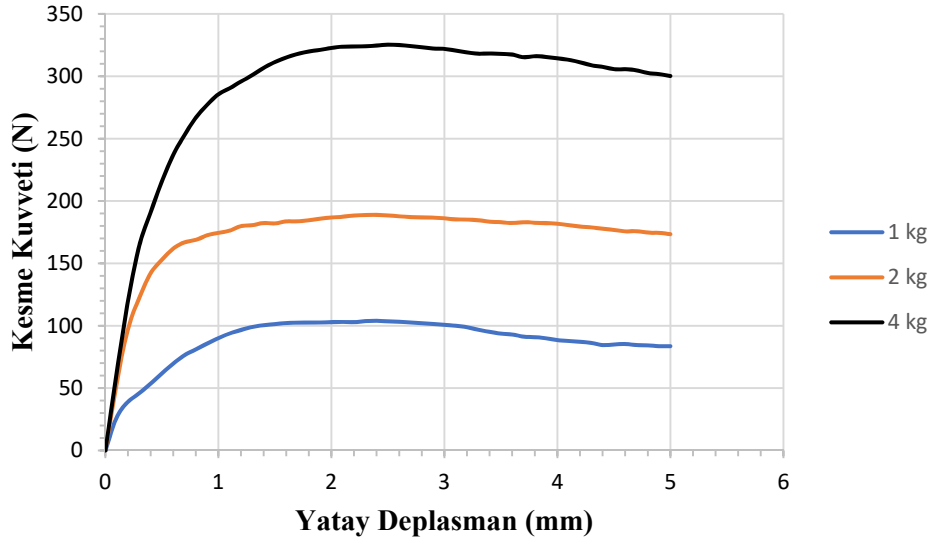


Şekil 4.7. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A

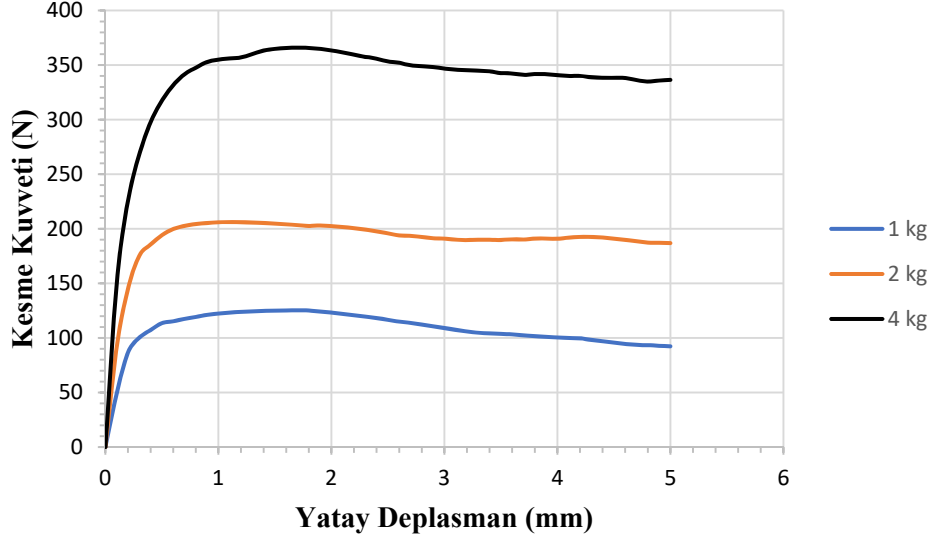


Şekil 4.8. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %12 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A

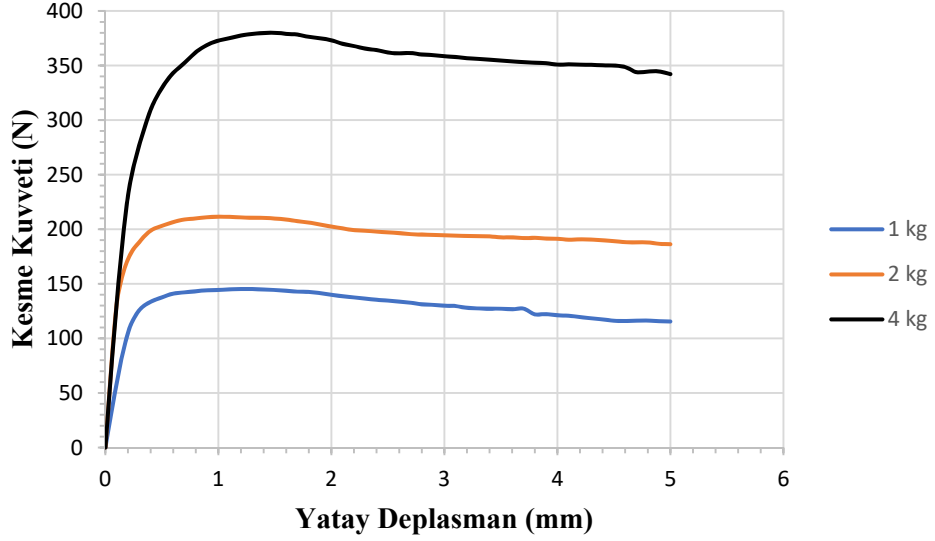
Gevşek halde Metot A ile 3 farklı normal kuvvet etkisi altında deneyler yapılmıştır. Deneylere ait grafiklere bakıldığında kesme kuvvetinde oluşan artışla beraber yatay deplasmanlar artmıştır. İlk aşamada kritik noktaya kadar kesme kuvvetinde kayda değer bir artış görülmüştür. Buna karşılık olarak yatay deplasman değerleri yavaş bir şekilde artmıştır. Kritik eşik geçildiğinde ise durum tersine dönmüştür. Kritik eşik sonrası kesme kuvveti değerleri yavaşça azalmaya başlamış, buna karşılık olarak yatay deplasman değerleri artış göstermiştir.



Şekil 4.9. Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A

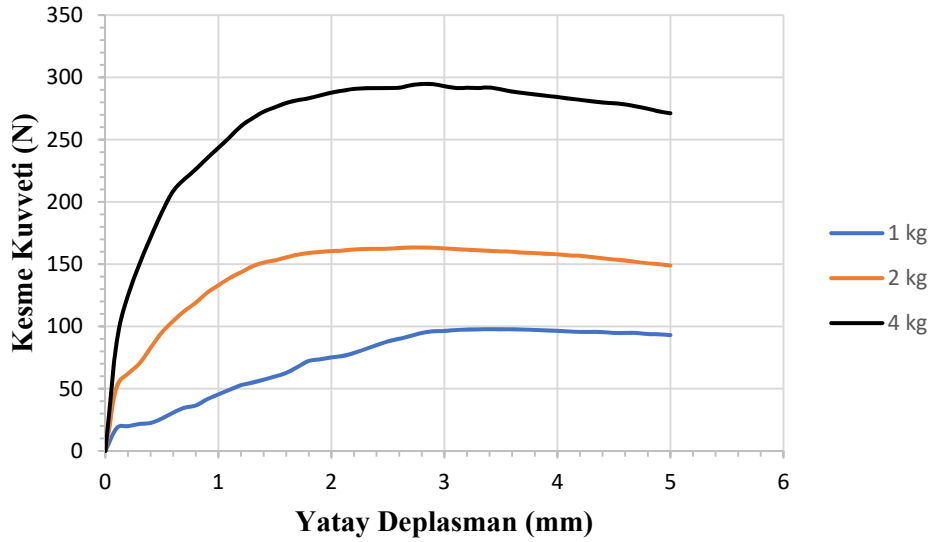


Şekil 4.10. Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A

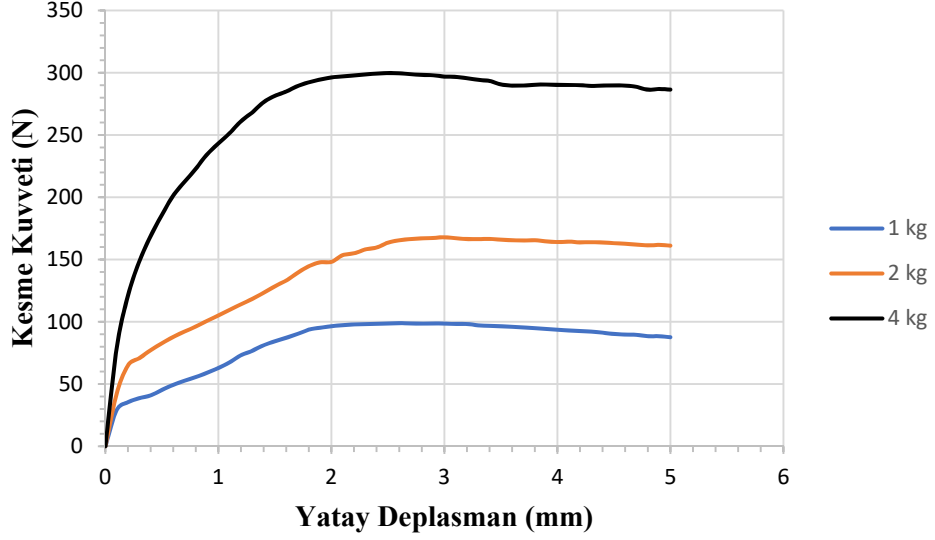


Şekil 4.11. Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot A

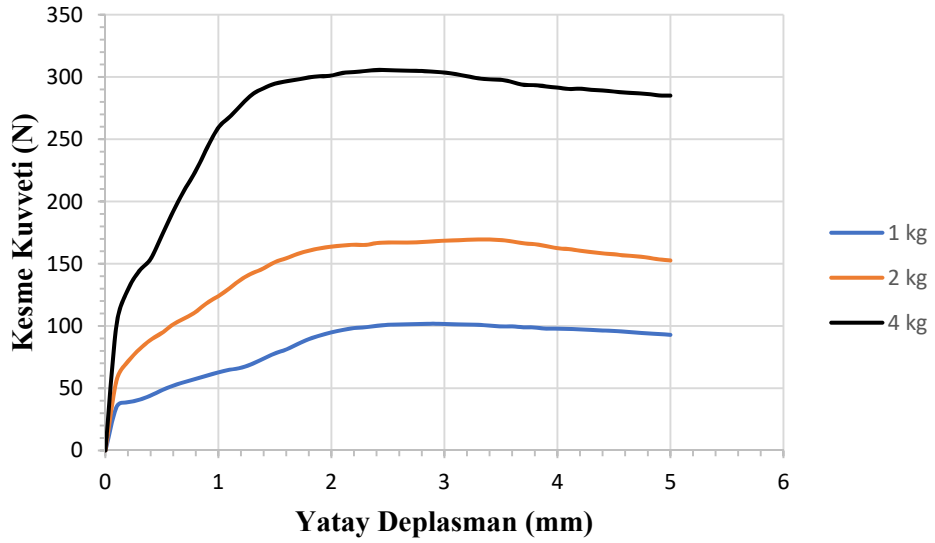
Sıkı halde Metot A ile 3 farklı normal kuvvet etkisi altında deneyler yapılmıştır. Bu bölüme özel olarak Metot A ile %12 kemik tozu katkısında deney yapılamamıştır. Deneylere ait grafiklere bakıldığında gevşek duruma benzer şekilde kesme kuvvetinde oluşan artışla beraber yatay deplasmanlar artmıştır. Farklı olarak kesme kuvvetlerinde oluşan artış gevşek duruma göre daha fazladır. İlk aşamada kritik noktaya kadar kesme kuvvetinde artış görülmüştür. Buna karşılık olarak yatay deplasman değerleri yavaş bir şekilde artmıştır. Kritik nokta sonrası kesme kuvveti değerleri gevşek duruma göre daha hızlı bir şekilde azalmaya başlamıştır. Bu durum grafiklerde de görülebilmektedir. Buna karşılık yatay deplasman değerleri gevşek hale benzer şekilde artmaya devam etmiştir.



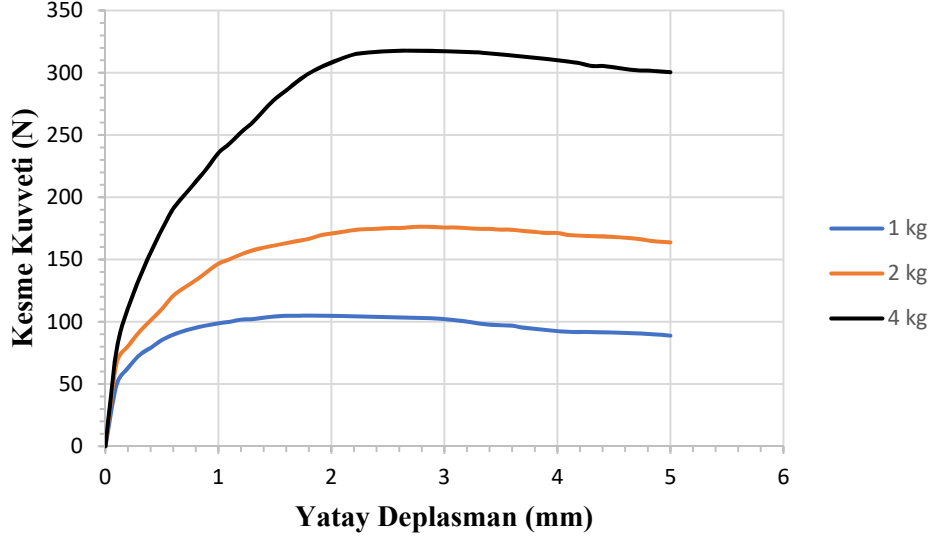
Şekil 4.12. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B



Şekil 4.13. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B

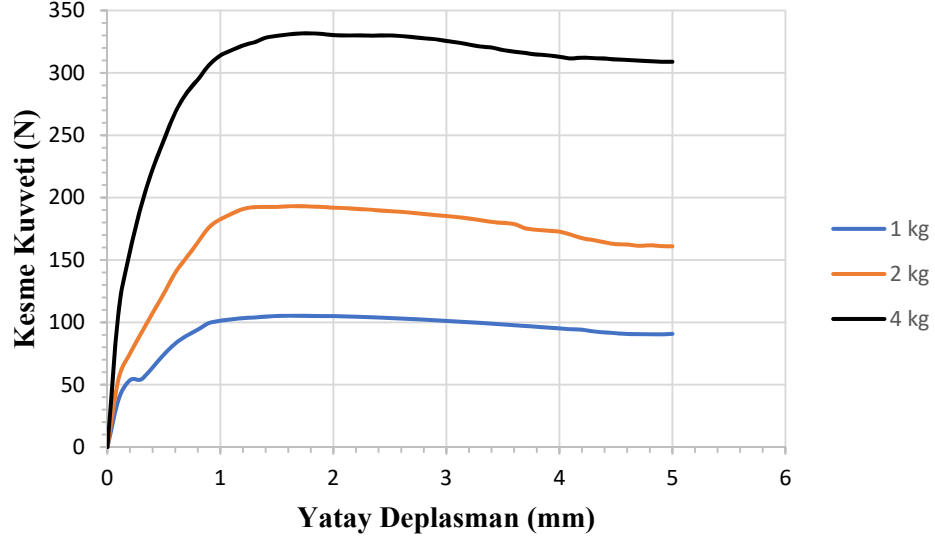


Şekil 4.14. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B

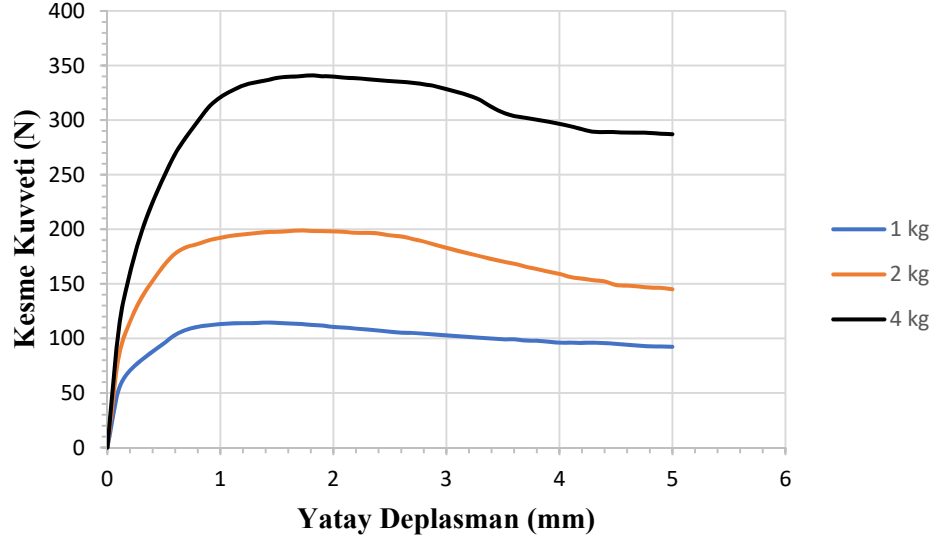


Şekil 4.15. Gevşek Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %12 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B

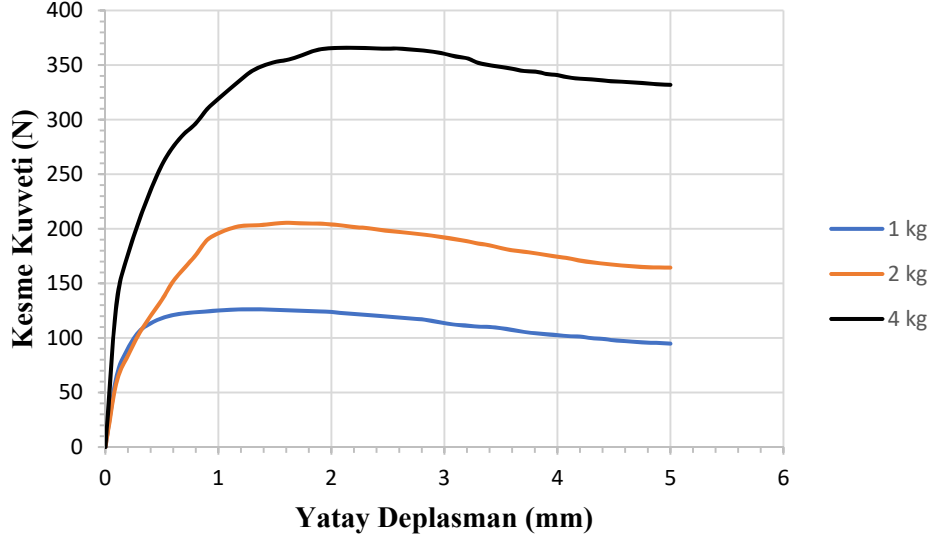
Gevşek halde Metot B ile 3 farklı normal kuvvet etkisi altında deneyler yapılmıştır. Metot A ile karşılaştırıldığında en belirgin farklılık ilk aşamada, kesme kuvveti değerlerindeki artış miktarının Metot A’da olduğundan daha az olmasıdır. Devamında deneylere ait grafiklere bakıldığında gevşek durumda Metot A’ya benzer şekilde kesme kuvvetinde oluşan artışla beraber yatay deplasmanlar artmıştır. İlk aşamada kritik noktaya kadar kesme kuvvetinde artış görülmüştür. Buna karşılık olarak yatay deplasman değerleri yavaş bir şekilde artmıştır. Kritik nokta sonrası kesme kuvveti değerleri yavaş bir şekilde azalmaya başlamıştır. Buna karşılık yatay deplasman değerleri artmaya devam etmiştir.



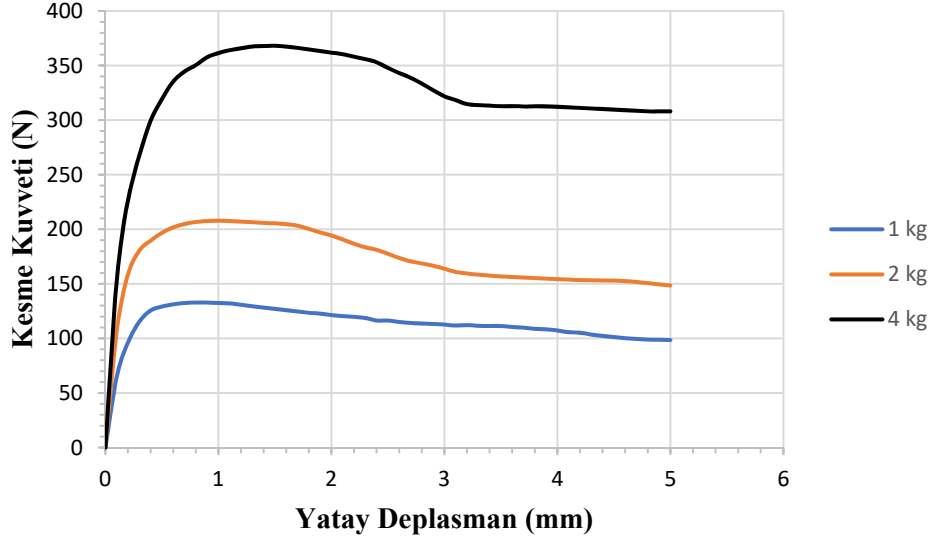
Şekil 4.16. Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B



Şekil 4.17. Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B



Şekil 4.18. Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B



Şekil 4.19. Sıkı Halde Kemik Tozu Katkı İçeriği %12 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Kesme Kutusu Deney Verileri, Metot B

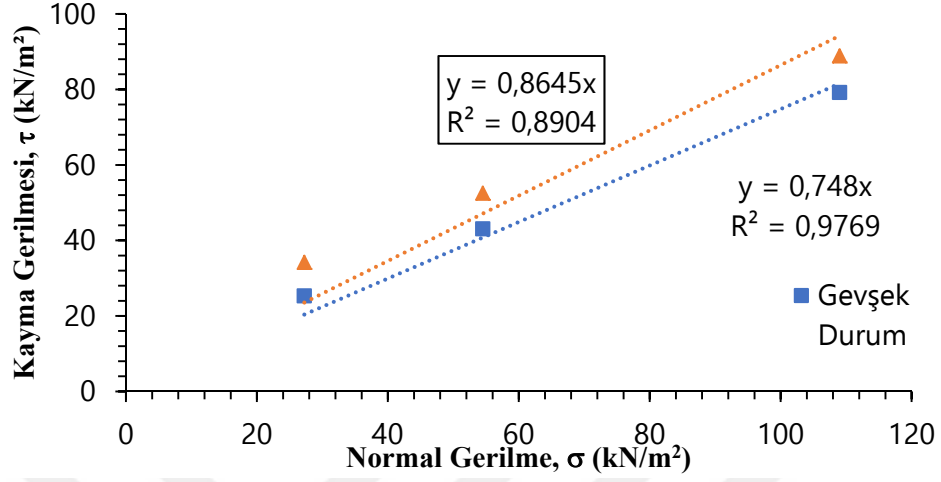
Sıkı halde Metot B ile 3 farklı normal kuvvet etkisi altında deneyler yapılmıştır. Metot A ile karşılaştırıldığında en belirgin farklılık yine ilk aşamada, kesme kuvveti değerlerindeki artış miktarının Metot A'da olduğundan daha az olmasıdır. Devamında deneylere ait grafiklere bakıldığında gevşek durumda Metot A'ya benzer şekilde kesme kuvvetinde oluşan artışla beraber yatay deplasmanlar artmıştır. İlk aşamada kritik noktaya kadar kesme kuvvetinde artış görülmüştür. Buna karşılık olarak yatay deplasman değerleri yavaş bir şekilde artmıştır. Kritik nokta sonrası kesme kuvveti değerleri gevşek halde Metot B'ye göre daha hızlı bir şekilde azalmaya başlamıştır. Buna karşılık yatay deplasman değerleri artmaya devam etmiştir.

Genel olarak bu deney sonuçları değerlendirildiğinde;

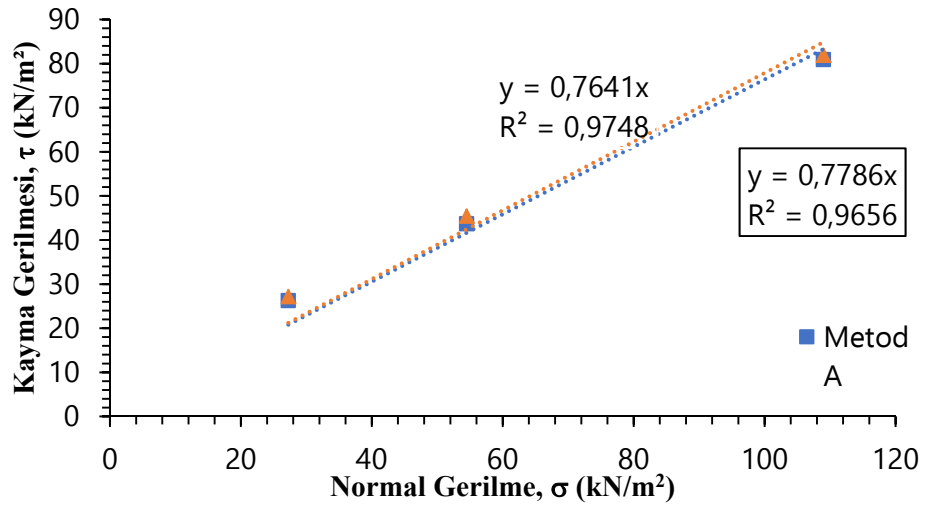
İlk aşamada kesme kuvvetinde kayda değer bir artış ve yatay deplasman değerlerinde az denebilecek bir artış ortaya çıkmıştır. Kritik noktaya kadar devam eden bu davranış sıkı ve gevşek hallerde farklılık göstermiştir. Sıkı durumlarda kesme kuvvetindeki artış miktarlarının gevşek durumdakilere göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Kritik nokta geçildiğinde ise kesme kuvveti değerleri azalmaya başlamış, yatay deplasman değerleri ise artmaya devam etmiştir. Bu bölümde ise sıkı ve gevşek durumları birbirinden ayıran özellik kesme kuvvetinde oluşan azalma miktarları olmuştur. Sıkı hallerde kesme kuvveti değerleri daha dik bir şekilde azalırken gevşek hallerde daha yatay bir seyirde azalma göstermiştir.

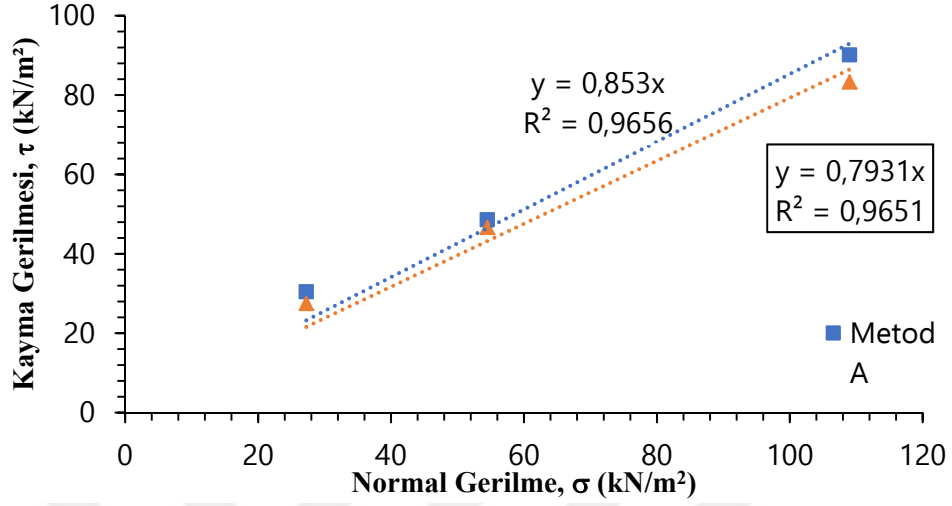
Son olarak Metot A ile Metot B karşılaştırıldığında ise gevşek ve sıkı hallerde ortaya çıkan davranışların bahsedildiği gibi benzer şekilde olduğu görülmektedir. Birbirlerinden farklı olarak Metot A ile yapılan deneylerde ilk aşamada okunan kesme kuvveti değerleri Metot B'ye nazaran daha yüksektir.



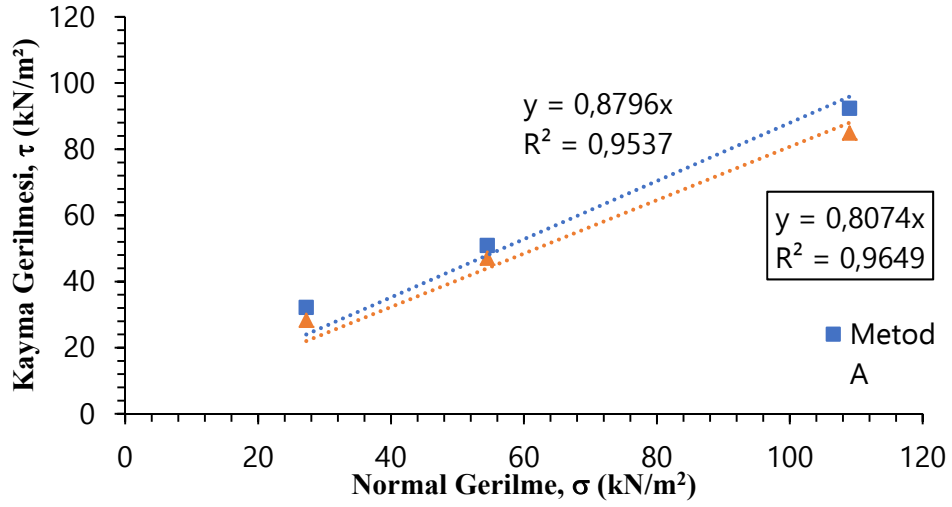
Şekil 4.20. Gevşek ve sıkı hallerde katkısız (%0 Katkılı) kesme kutusu deneyi



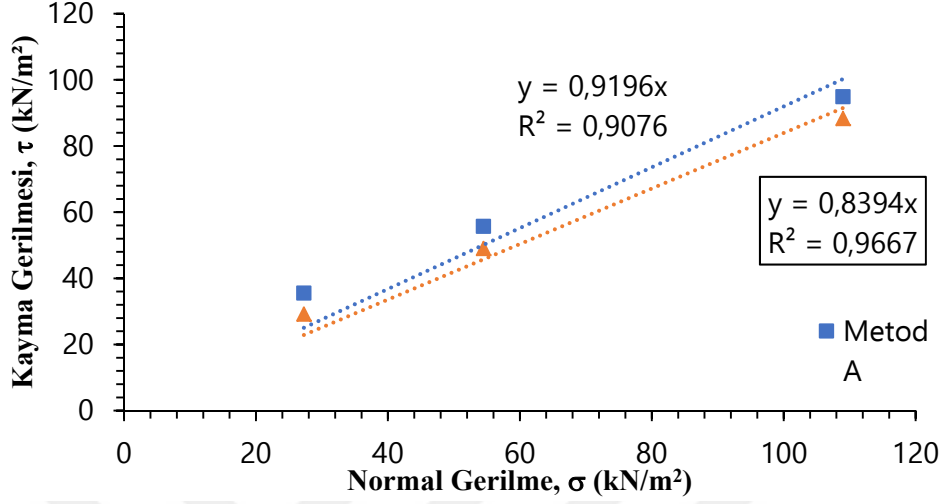
Şekil 4.21. Gevşek halde %3 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi



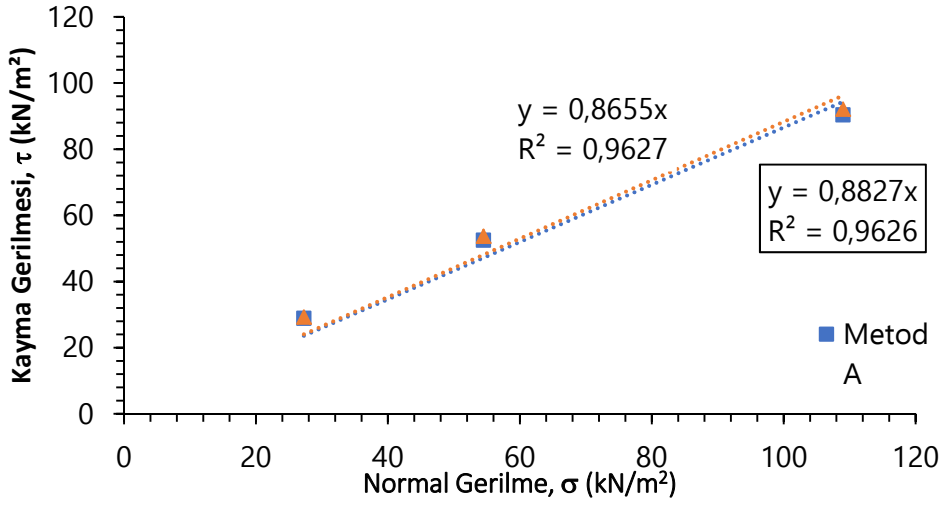
Şekil 4.22. Gevşek halde %6 kemik tozu katkıli kesme kutusu deneyi



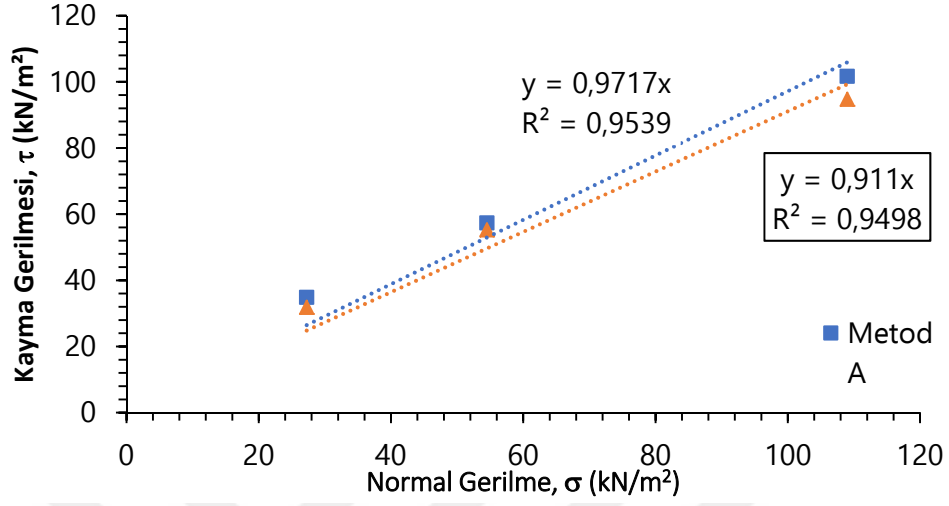
Şekil 4.23. Gevşek halde %9 kemik tozu katkıli kesme kutusu deneyi



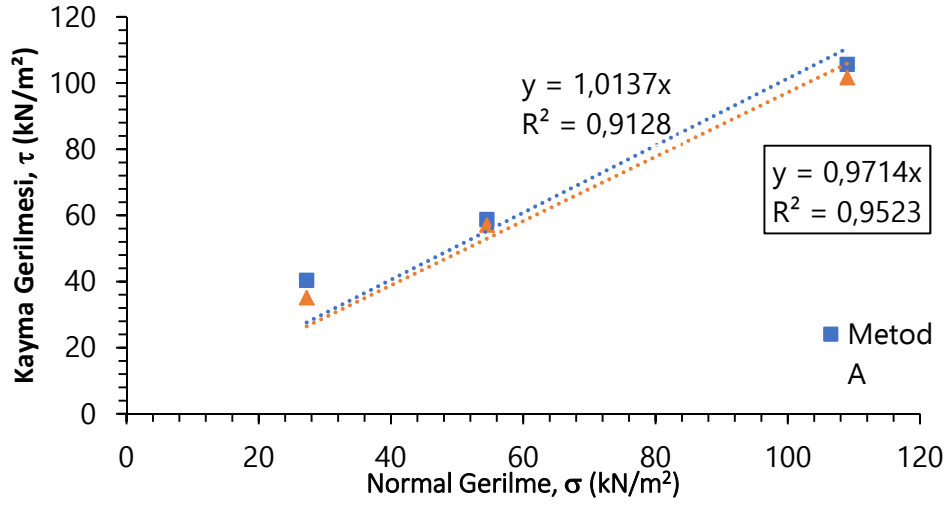
Şekil 4.24. Gevşek halde %12 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi



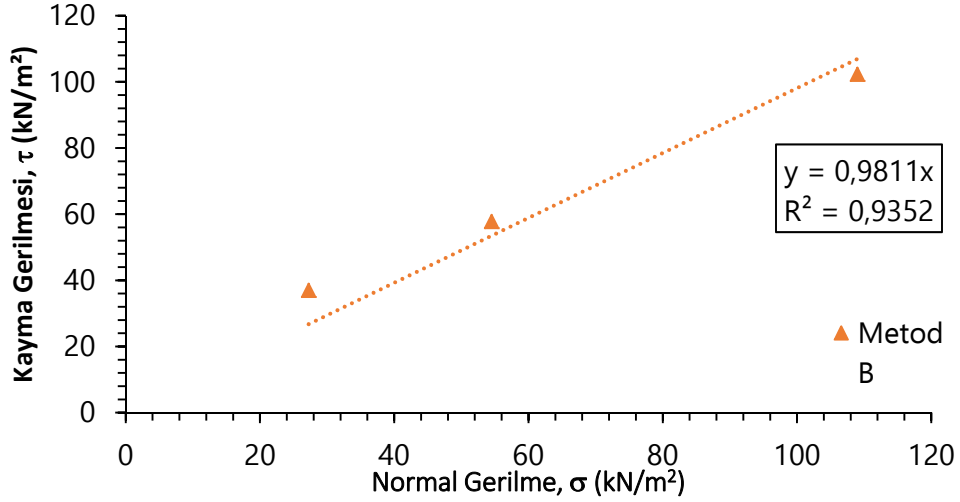
Şekil 4.25. Sıkı halde %3 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi



Şekil 4.26. Sıkı halde %6 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi



Şekil 4.27. Sıkı halde %9 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi



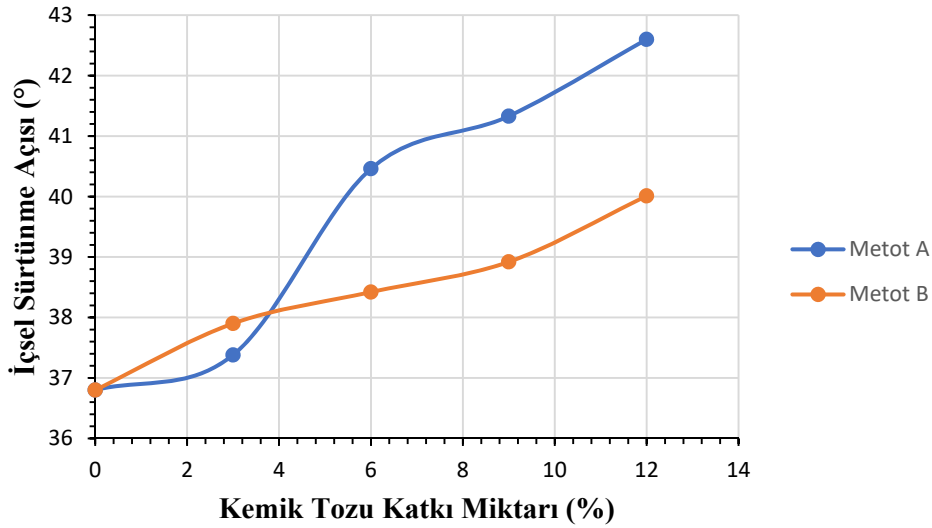
Şekil 4.28. Sıkı halde %12 kemik tozu katkılı kesme kutusu deneyi

Kesme kutusu deneyleri sonucu elde edilen Kayma Gerilmesi - Normal Gerilme grafikleri yukarıda verilmiştir. Gevşek ve sıkı hallerde Metod A ve Metod B yöntemleri kullanılmıştır. Daha kolay anlaşılması ve karşılaştırılabilmesi için Çizelge 4.3'te kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerine yer verilmiştir.

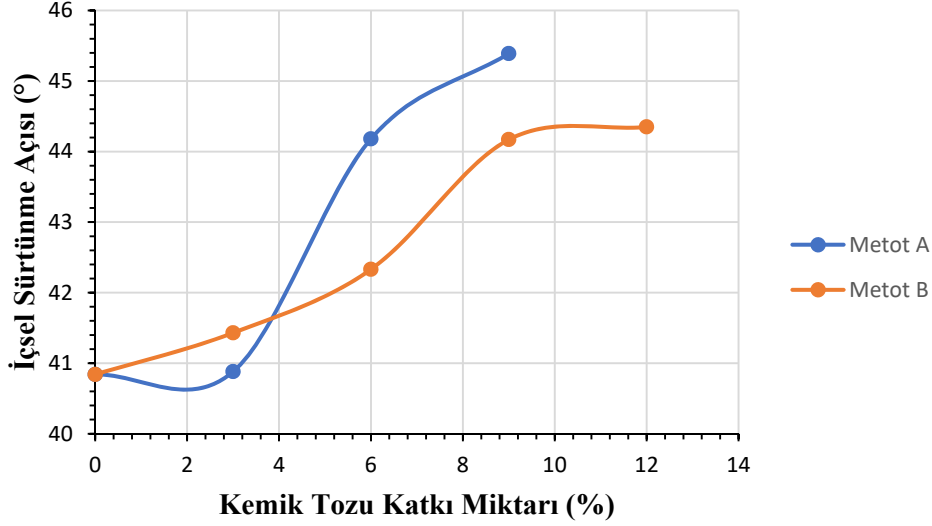
Çizelge 4.3. Katkılı kum zemin numuneler için gevşek ve sıkı halde kayma mukavemeti parametreleri

Sıklık	Gevşek Hal				Sıkı Hal			
	Metod A		Metod B		Metod A		Metod B	
Yöntem								
Katkı (%)	$\phi$	C	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c
0	36,80°	0	36,80°	0	40,84°	0	40,84°	0
3	37,38°	0	37,90°	0	40,88°	0	41,43°	0
6	40,46°	0	38,42°	0	44,18°	0	42,33°	0
9	41,33°	0	38,92°	0	45,39°	0	44,17°	0
12	42,60°	0	40,01°	0	X	X	44,35°	0

Çizelge 4.3'te verilen değerler incelendiğinde her iki yöntemin uygulamasında da içsel sürtünme açısı değerlerinin arttığını görebilmekteyiz. Ancak Metod A yönteminin sonuçlarının Metod B yöntemine göre daha yüksek olduğu da kolaylıkla fark edilmektedir. Bunun sebebinin ise katkı malzemesinin eklenmesi ile, belirlenen sıklık yüzdesinin üzerine çıkılması ve birim hacimdeki dane miktarının artması olarak tahmin edilmektedir. Bu düşüncenin altında yatan sebep ise kesme kutusu deneyinde Metod A kullanılırken %12 kemik tozu katkısının numune haznesine bile yerleştirilememesidir. Bir diğer kesme kutusu deneyinde, %12 katkı oranı, numune eksilti olarak yapılan Metod B yönteminde kolayca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.29. Gevşek halde KT katkı miktarına bağlı olarak içsel sürtünme açısının değişimi



Şekil 4.30. Sıkı halde KT katkı miktarına bağlı olarak içsel sürtünme açısının değişimi

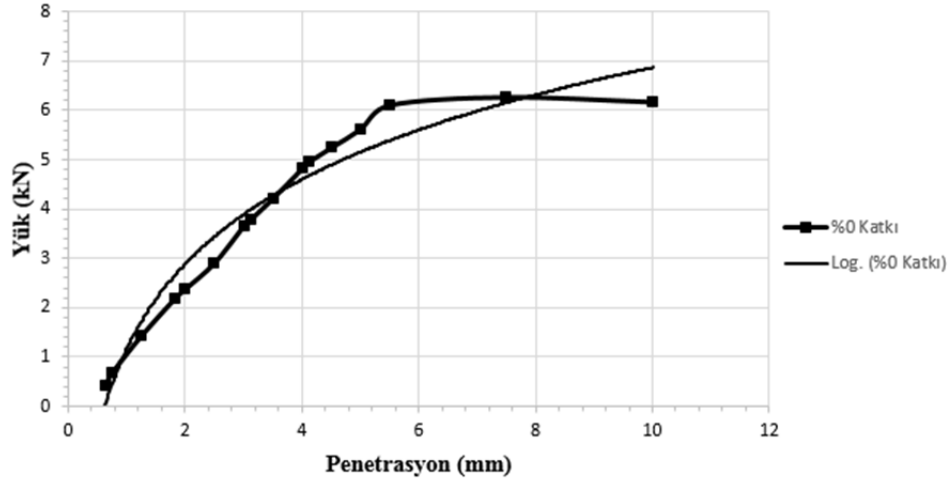
Genel olarak yapılan deneylere bakıldığında kemik tozu katkısının zemin numunesinin kayma mukavemetinde artış sağladığını söyleyebiliriz. Kullanılan Metod A ve Metod B yöntemleri ise ayrı bir başlık altından incelenmelidir. Ayrıca kesme kutusu deneyinin bazı sakıncalı yönlerinin bulunduğu da bilinmelidir. Ancak buna rağmen günümüzde yaygın olarak kullanılan laboratuvar deneylerinden birisidir. Bu bilgileri de göz önünde bulundurup sonuçları değerlendirmemiz gerekmektedir.

Metod A yöntemi kullanıldığında, mukavemet artışındaki temel sebep bilinmediğinden, değerdeki artış fazla olsa bile bu artışın sebebi belirlenemeyecektir. Metod B yöntemi kullanıldığında ise elde edilen mukavemet artışının atık kemik tozu katkısı kaynaklı olduğu ifade edilebilir.

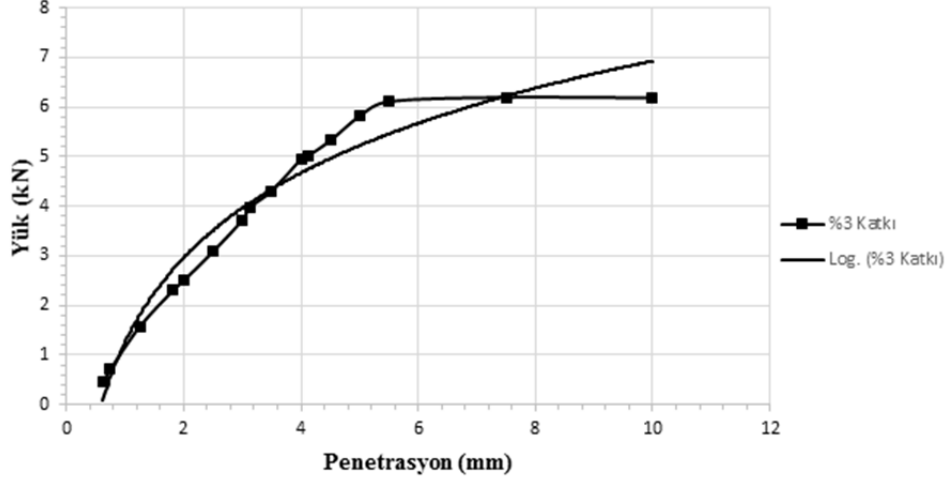
#### 4.6. CBR Deney Sonuçları

Araştırmanın bu bölümünde nehir kumuna eklenecek kemik tozu katkısının, bu zemin numunesi üzerinde oluşturacağı etkiyi gözlemlemek adına CBR deneyleri yapılmıştır. Kesme kutusu deneyine benzer şekilde katkı miktarları

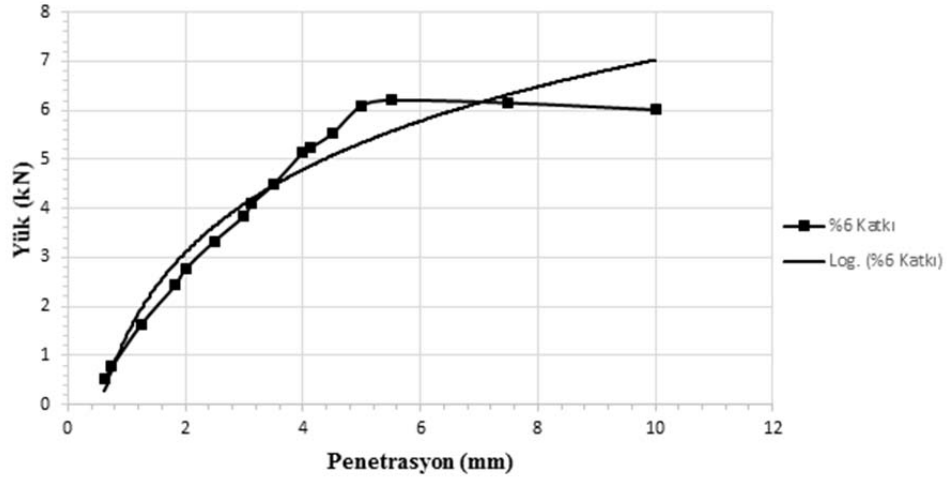
%0, 3, 6, 9, ve 12 olarak seçilmiştir. Önceki çalışmalarda, seçilen her bir katkı yüzdesi için optimum su muhtevası değerleri elde edilmiş ve bu veriler CBR deneyinin yapım aşamasında kullanılmıştır. Numuneler standart proktor sıklığında ve katkı yüzdelere bağlı olarak optimum su içeriklerinde hazırlanmıştır. Sonrasında CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı katkı yüzdeleri için gerçekleştirilen CBR deneylerinin verileri, düzenlenmiş, grafik haline getirilmiş ve sunulmuştur.



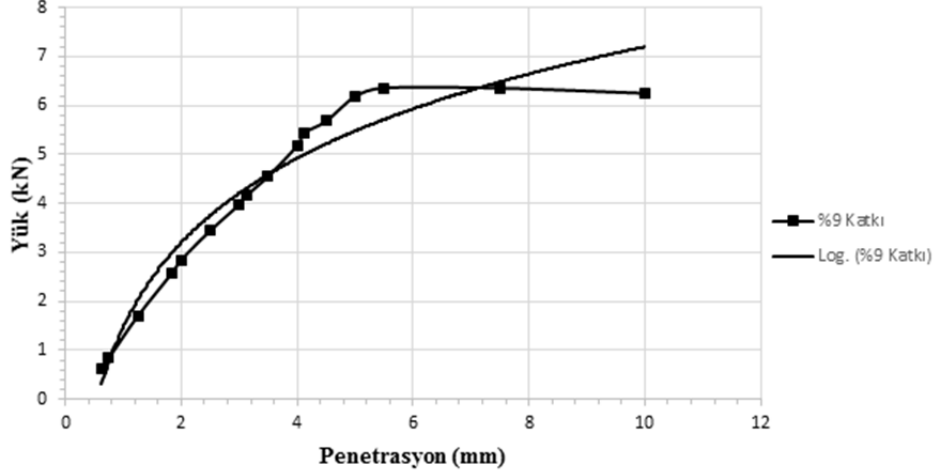
Şekil 4.31. Katkısız nehir kumu numunesi için CBR deneyi



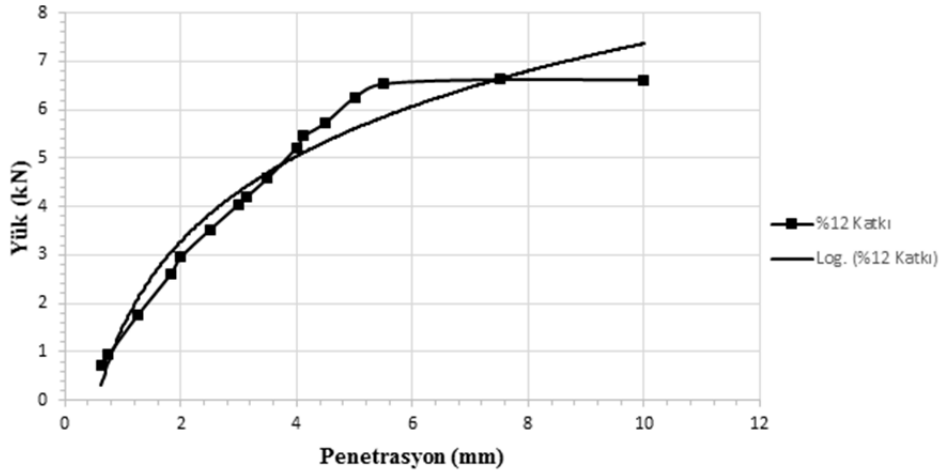
Şekil 4.32. Katkı miktarı %3 kemik tozu ile CBR deneyi



Şekil 4.33. Katkı miktarı %6 kemik tozu ile CBR deneyi



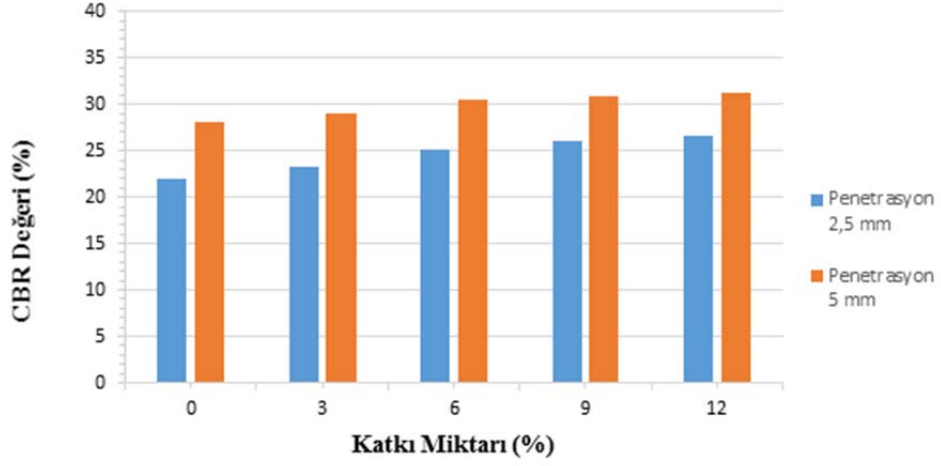
Şekil 4.34. Katkı miktarı %9 kemik tozu ile CBR deneyi



Şekil 4.35. Katkı miktarı %12 kemik tozu ile CBR deneyi

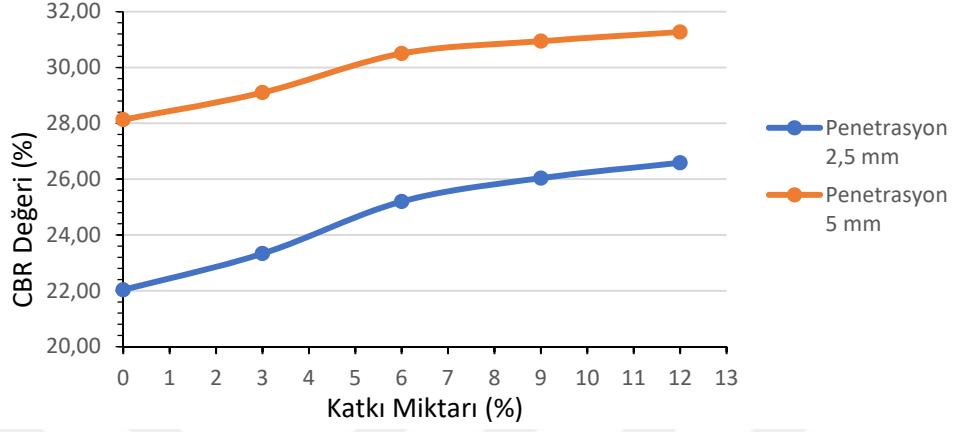
Grafiklerin içeriğinde hem direkt olarak deney verileri hem de logaritmik eğilim çizgileri, verilerin daha anlaşılabilir şekilde karşılaştırılması için verilmiştir. CBR deneylerine ait grafiklere bakıldığında katkısız ve kemik tozu katkılı numunelerin benzer davranışlar sergilediği görülmektedir. Katkı miktarı arttıkça yük artış hızında ufak bir artış olsa da nehir kumunun sergilediği davranış genel

anlamda değişmemiştir. Bu durum göz önüne alındığında karşılaştırma yaparken CBR değerlerinde oluşan değişimler öne çıkarılmıştır.



Şekil 4.36. Farklı katkı içerikleri için CBR deney verileri ve karşılaştırmaları

Yapılan CBR deneyleri sonuçlarına bakıldığında, genel olarak kemik tozu katkısının CBR değerine olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen verilere göre %3 kemik tozu katkısı için %3, %6 kemik tozu katkısı için %8, %9 kemik tozu katkısı için %10 ve %12 kemik tozu katkısı için CBR değerinde %11 artış olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.36).



Şekil 4.37. Katkı miktarına bağlı olarak CBR değerlerinde oluşan değişim

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere CBR değerinde elde edilen en belirgin artış %6 kemik tozu katkısı için %8 olarak elde edilmiştir. Devamında %9 ve %12 katkı oranlarında yine CBR değerinde artış tespit edilmiş olsa da bu artışlar CBR değeri üzerinde önemli bir değişime sebep olmamıştır.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Ülkemizde yaygın olarak ortaya çıkan hayvansal kemik atıklarını atık bir materyal olarak nitelendirmek yerine, faydalı bir yan ürün olarak kullanmanın yolları, yapılan çalışmalar süresince araştırılmıştır. Bu ve benzeri çalışmaların hem çevre kirliliğini azaltma hem de ekonomik kazanç sağlama potansiyeli, yapılan bu çalışmaları değerli kılmaktadır.

Bu bağlamda, nehir kumu numunesi içerisine KT ilave ederek, KT katkısının zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı oranlarda KT katkılı nehir kumu numuneleri üzerinde çeşitli deneyler yapılmış ve sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

#### 5.1.1. Elek Analizi Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar

- Gerçekleştirilen elek analizi deneyinin sonuçları, deneylerde kullanılmak üzere temin edilen nehir kumunun TS1500'e göre SP sınıfında yer aldığını, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'nde (USCS) ise kötü derecelenmiş kum (SP) sınıfında yer aldığını göstermiştir.

#### 5.1.2. Özgül Ağırlık (Piknometre) Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar

- Çalışma esnasında nehir kumu için piknometre deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerlerin ortalamaları alınmıştır. Sonuç olarak nehir kumu numunesi için ortalama dane birim hacim ağırlık değeri  $2,711 \text{ gr/cm}^3$  olarak elde edilmiştir.

### 5.1.3. Standart Proktor Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar

- Deneylerde kullanılmak üzere sadece nehir kumu ve farklı oranlarda KT katkılı nehir kumu numuneleri için kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda her numune için ayrı ayrı maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri elde edilmiştir. Sırası ile %0 ve %12 KT katkı içeriğine sahip nehir kumu numuneleri için maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri  $16,83 \text{ kN/m}^3$  ve  $16,49 \text{ kN/m}^3$  olarak elde edilmiş ve azalma eğilimi göstermiştir. Optimum su muhtevası değerleri ise artış eğilimi göstermiştir. KT katkı içeriği %0 için %13,8 ve katkı içeriği %12 için %14,84 olarak elde edilmiştir. Ayrıca %3, 6, ve 9 gibi diğer KT katkı içeriklerine sahip numunelerden elde edilen değerler de bu sonuçları destekler niteliktedir.
- Saf kemik tozu için yapılan kompaksiyon deneylerinin sonuçlarına göre maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri  $11,31 \text{ kN/m}^3$  ve optimum su muhtevası %28 olarak elde edilmiştir.
- KT'nun su emme potansiyeli nehir kumuna göre daha fazla olduğundan optimum su muhtevası değerini artırdığı tahmin edilmektedir. Ayrıca KT'nun göreceli olarak daha ince taneli, hafif olmasının maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde oluşan azalmaya sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Deney verileri ile kanıtlanmasa da, KT üzerinde yapılan sıkıştırma deneylerinde KT'nun şişme potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun da numune karışımlarında meydana gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde oluşan azalmaya etkisi olmuş olabilir.

**5.1.4. Rölatif Sıklık Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar**

- Araştırmanın devamında yapılan rölatif sıklık deney sonuçlarına göre gevşek halde kuru birim hacim ağırlık değeri  $15,16 \text{ kN/m}^3$ , sıkı halde kuru birim hacim ağırlık değeri  $17 \text{ kN/m}^3$  olarak bulunmuştur. Bunlara bağlı olarak gevşek halde boşluk oranı 0,79 ve sıkı halde boşluk oranı 0,6 olarak hesaplanmıştır.

**5.1.5. Kesme Kutusu Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar**

- Kesme kutusu deney sonuçları daha önce ayrıntısıyla bahsedilen Metot A ve Metot B yöntemlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Her iki yöntemde kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş ve içsel sürtünme açısı değerlerinde benzer değişiklikler görülmüştür. Sonuçta KT katkısının kayma mukavemeti üzerinde olumlu bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Katkı miktarındaki artışa bağlı olarak kayma mukavemeti de artmaya devam etmiştir.

**5.1.5.1. Metot A**

Gevşek ve sıkı hal olmak üzere 2 farklı sıklık durumunda kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. KT katkılı nehir kumu numuneleri için rölatif sıklık değeri arttıkça kayma mukavemeti değeri de artmıştır. Deneyler sonucunda gevşek halde katkısız nehir kumu numunesi için  $36,8^\circ$  olarak bulunan içsel sürtünme açısı değeri %12 KT katkısının etkisi ile  $42,6^\circ$  olarak bulunmuştur. Sıkı halde yapılan deneyler sonucunda ise katkısız nehir kumu numunesi için  $40,84^\circ$  olan içsel sürtünme açısı değeri %9 KT katkısı için  $45,39^\circ$  olarak elde edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu yöntemde sıkı halde %12 KT katkısı için deney yapılamamıştır. Sonuçlar olarak bu değerlere bakıldığında gevşek halde içsel sürtünme açısı değerinde %12 KT katkısı için %16, sıkı halde %9 KT katkısı için ise %11 değer artışı meydana gelmiştir.

**5.1.5.2. Metot B**

Bu yöntemde de Metot A ile benzer şekilde gevşek ve sıkı hallerde kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Metot A'dan farklı olarak sıkı halde %12 KT katkısında da deney yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında gevşek halde %12 KT katkısı için içsel sürtünme açısı  $40,01^\circ$  olarak elde edilmiş ve bu sonuç ile içsel sürtünme açısı değerinde %9 artış meydana gelmiştir. Sıkı halde ise %12 KT katkısı ile  $44,35^\circ$  olarak elde edilen içsel sürtünme açısı ile %9 artış elde edilmiştir.

**5.1.5.3. Genel**

Bu sonuçlara bakıldığında her 2 yöntemde de içsel sürtünme açısında oluşan artış bariz bir şekilde görülmektedir. Metot A ile yapılan kesme kutusu deneylerinin sonuçlarına bakıldığında içsel sürtünme açısında oluşan artış Metot B'ye göre daha fazladır. Ancak bu artışın yalnızca KT katkısı ile ortaya çıkmadığı yapılan deneyler neticesinde belirlenmiştir. Metot A ile Metot B karşılaştırıldığında Metot A'da oluşan artışın neredeyse yarı yarıya olacak şekilde KT katkısı ve rölatif sıklık değerinden kaynaklandığı görülmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında Metot A ile yapılan deneylerde elde edilen artışın yalnızca KT katkısı ile gerçekleşmediği ve sonuçların güvenilir olmadığı söylenebilir. Bu sebeple Metot B ile yapılan deneylerin sonuçlarına bakılması daha uygundur.

**5.1.6. CBR Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar**

Deneyisel çalışma içerisinde, farklı oranlarda atık KT katkısı ile bir dizi CBR deneyi yapılmıştır. Nehir kumu numuneleri içerisinde %3, 6, 9 ve 12 oranlarında atık KT eklenerek katkı malzemesinin CBR değerlerine etkisi araştırılmıştır. CBR deney sonuçlarına bakıldığında;

- KT katkı içeriği %3 için CBR değerinde %3,
- KT katkı içeriği %6 için CBR değerinde %8,
- KT katkı içeriği %9 için CBR değerinde %10,
- KT katkı içeriği %12 için CBR değerinde %11 artış meydana gelmiştir.

Bu değerlere bakıldığında %9 ve %12 katkı oranları için CBR değerinde ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Katkı oranına bağlı olarak en verimli etkinin %6 KT katkısında gerçekleştiği görülmüştür.

## 5.2. Öneriler

Araştırma kapsamında çeşitli deneyler yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar için çeşitli öneriler aşağıda verilmiştir.

- Bu tez çalışması kapsamında kompaksiyon işlemleri standart proktor kompaksiyon enerjisi ile yapılmıştır. Sonraki çalışmalarda modifiye proktor kompaksiyon enerjisinin kullanılmasının veri çeşitliliği sağlayabileceği düşünülmektedir.
- KT ile iyileştirilen numunelerin farklı kür sürelerinde mühendislik özelliklerinin araştırılması şiddetle önerilmektedir.
- Kum numune yerine kil numune vb. kullanılarak, KT katkısının farklı zemin tipleri üzerinde oluşturduğu etkilere bakılabilir.
- KT katkısının yanı sıra numune karışımları içerisine katalizör bir materyal eklenebilir, bu sayede KT'nun sahip olduğu bağlayıcılık özelliği artırılabilir.
- SEM analizleri kullanılarak numunelerin deney öncesi ve deney sonrası mikro yapıları hakkında detaylı bilgi edinilebilir.

- Organik bir malzeme olan atık KT katkısının uzun süreli davranışının incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.
- Kuru ve ıslak CBR deneyleri yapılarak KT katkılı zeminlerin dolgu, alt temel ve temel gibi alanlarda kullanılabilirliği araştırılabilir.



## KAYNAKLAR

- Afrakoti, M. T. P., Choobbasti, A.J., Ghadakpour, M., Kutanaei, S. S., 2020. Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil, *Construction and Building Materials*, Volume 239, Article 117848
- Amini, O., Ghasemi, M., 2019. Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil, *Construction and Building Materials*, Volume 223, Pages 409-420
- Atahu, M. K., Saathoff, F., Gebissa, A., 2019. Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 11, Issue 2, Pages 337-348
- Bilondi, M. P., Toufigh, M. M., Toufigh, V., 2018. Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, *Construction and Building Materials*, Volume 170, Pages 302-313
- Bowles, J. E., 1992. *Engineering Properties of Soil and Their Measurements*, Newyork: Mc Graw-Hill Book Company, 93-219
- Burke, G., Sehn, A. L., 2003. The Influence of Ground Improvement on Geotechnical Design, *ASCE/PENNDOT 20th Central PA Geotechnical Conference*
- Canakci, H., Celik, F., Bizne, M. O. A., Bizne, M. O. A., 2016. Stabilization of Clay with Using Waste Beverage Can, *Procedia Engineering*, Volume 161, Pages 595-599
- Chang, I., Im, J., Chung, M. K., Cho, G. C., 2018. Bovine casein as a new soil strengthening binder from diary wastes, *Construction and Building Materials*, Volume 160, Pages 1-9

- Cömert, A. T., 2005. Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyona Etkileri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1-43 S., Sakarya
- Çağlar, G. A., 2007. Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2-127 S., İstanbul
- Das, M. B., 2010. Principles of Geotechnical Engineering, Seventh Edition, Thomson, Canada, Pages 365-390
- Gündüz, Z., 2015. Zemin Mekaniği ders notları, Sakarya
- Holtz, R., Kovacs, W., Sheahan, T., 2010. Geotechnical Engineering (Second.Edition), New Jersey: Prentice Hall, 208
- Ikeagwuani, C. C., Obeta, I. N., Agunwamba, J. C., 2019. Stabilization of black cotton soil subgrade using sawdust ash and lime, Soils and Foundations, Volume 59, Issue 1, Pages 162-175
- Kianimehr, M., Shourijeh, P. T., Binesh, S. M., Mohammadinia, A., Arulrajah, A., 2019. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils, Construction and Building Materials, Volume 227, 10 December 2019, Article 116792
- Kumar, J. K., Kumar, V. P., 2020. Experimental analysis of soil stabilization using e-waste, Materials Today: Proceedings, Volume 22, Part 3, 2020, Pages 456-459
- McDowell, C., 1959. Stabilization of Soils With Lime, Lime/Fly Ash and Other Lime Reactive Materials, Highway Research Board, Bulletin 231, 60-66
- Muralithran, G., Ramesh, S., 2000. The Effects of Sintering Temperature on the Properties of Hydroxyapatite, Ceramics International, Volume 26, Issue 2, Pages 221-230
- Obianyo I.I., Anosike-Francis, E.N., Ihekweme, G.O., Geng, Y., Jin, R., Onwualu, A.P., Soboyejo A.B.O., 2020. Multivariate regression models for predicting the compressive strength of bone ash stabilized lateritic soil for sustainable building, Construction and Building Materials, Volume 263, Article 120677

- Obianyo, I. I., Onwualua, A.P., Soboyejob, A.B.O., 2020. Mechanical behaviour of lateritic soil stabilized with bone ash and hydrated lime for sustainable building applications, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 12, Article e00331
- Oluwatuyi, O. E., Adeola, B. O., Alhassan, E. A., Nnochiri, E. S., Modupe, A. E., Elemile, O. O., Obayanju, T., Akerele, G., 2018. Ameliorating effect of milled eggshell on cement stabilized lateritic soil for highway construction, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 9, Article e00191
- Onyelowe, K. C., 2019. Review on the role of solid waste materials in soft soils reengineering, *Materials Science for Energy Technologies*, Volume 2, Issue 1, Pages 46-51
- Oprčkal, P., Mladenovič, A., Zupančič, N., Ščančar, J., Milačič, R., Zalar Serjun, V., 2020. Remediation of contaminated soil by red mud and paper ash, *Journal of Cleaner Production*, Volume 256, Article 120440
- Rimal, S., Poudel, R. K., Gautam, D., 2019. Experimental study on properties of natural soils treated with cement kiln dust, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 10, Article e00223
- Sariz, K., Nuhoglu, İ., 1992. Endüstriyel Hammaddeler ve Madencilik, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, No: 62, 452 s., Eskişehir
- Selvakumar, S., Soundara, B., 2019. Swelling behaviour of expansive soils with recycled geofom granules column inclusion, *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 47, Issue 1, Pages 1-11
- Sudla, P., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., Liu, M. D., Hoy, M., 2018. Marginal lateritic soil/crushed slag blends as an engineering fill material, *Soils and Foundations*, Volume 58, Issue 3, Pages 786-795
- Tran, K. Q., Satomi, T., Takahashi, H., 2018. Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils, *Transportation Geotechnics*, Volume 16, Pages 76-84

- Wu, J., Liu, Q., Deng, Y., Yu, X., Feng, Q., Yan, C., 2019. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways, *Soils and Foundations*, Volume 59, Issue 4, Pages 955-965
- Zainuddin, N., Yunus, N. Z. M., Al-Bared, M. A. M., Marto, A., Harahap, I. S. H., A Rashid, A. S., 2019. Measuring the engineering properties of marine clay treated with disposed granite waste, *Measurement*, Volume 131, Pages 50-60



## ÖZGEÇMİŞ

Mert AKYOL İlkokul ve ortaokul eğitimlerini Adana'da tamamladı. Lise eğitimini Adana Ticaret Odası Anadolu Lisesi'nde aldı. Üniversite eğitimine 2015 yılında Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladı ve 2019 yılında bu bölümden mezun oldu. 2020 yılında Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.





# **EKLER**



**EK-A:**

**Nehir Kumu İçin Endeks Deneyleri Verileri**

**EK-A.1. PİKNOMETRE Deney Verileri**

<b>PİKNOMETRE</b>		
<b>Numune</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Şiše Hacmi (ml)</b>	500	500
<b>Zemin Kütlesi (gr)</b>	121,70	78,1
<b>Şiše + Su Kütlesi (gr)</b>	631,60	626
<b>Şiše + Su +Zemin Kütlesi (gr)</b>	708,23	675,4
<b>Dane Birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,700</b>	<b>2,721</b>
<b>Ortalama Dane Birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,711</b>	

**EK-A.2. Elek Analizi Deney Verileri**

<b>ELEK ANALİZİ</b>					
<b>Elek No</b>	<b>Elek Açıklığı (mm)</b>	<b>Elek Üzerinde Kalan (gr)</b>	<b>Kümülatif Toplam (gr)</b>	<b>Elek A. Geç. Top. (gr)</b>	<b>Elek A. Geç. (%)</b>
No. 16	1,180	2,00	2,00	2993,60	99,93
No. 30	0,600	557,60	559,60	2436,00	81,32
No. 40	0,425	743,80	1303,40	1692,20	56,49
No. 50	0,300	815,30	2118,70	876,90	29,27
No. 80	0,180	598,00	2716,70	278,90	9,31
No.140	0,106	235,80	2952,50	43,10	1,44
No. 200	0,075	39,10	2991,60	4,00	0,13
Tava	-	4,00	2995,60	0,00	0,00
Toplam		2995,60			

**EK-B:****Standart Proktor Deney Verileri****EK-B.1. Kum İçin Standart Proktor Deney Verileri**

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )						
Kap + Numune Ağırlığı (g)	5711,1	5754	5804,3	5877,9	5858	5847
Sıkıştırılmış Numune Ağırlığı (g)	1676,3	1719,2	1769,5	1843,1	1823,2	1812,2
Yaş Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,78	1,82	1,87	1,95	1,93	1,92
Yaş Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	17,42	17,87	18,39	19,15	18,95	18,83
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16,160	16,341	16,527	16,827	16,367	16,017

Su Muhtevası (%)						
Kap Ağırlığı (g)	192,3	177,4	180,3	181,3	147,8	182,9
Yaş Zemin + Kap Ağırlığı (g)	308,5	314,5	305,8	313,9	305	314,7
Kuru Zemin + Kap Ağırlığı (g)	300,1	302,8	293,1	297,8	283,6	295
Kuru Zemin Ağırlığı (g)	107,8	125,4	112,8	116,5	135,8	112,1
Su Miktarı (g)	8,4	11,7	12,7	16,1	21,4	19,7
Su Muhtevası (w)	0,08	0,09	0,11	0,14	0,16	0,18
Su Muhtevası (%)	7,79	9,33	11,26	13,82	15,76	17,57

**EK-B.2. Kemik Tozu İçin Standart Proktor Deney Verileri**

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )										
Kap + Numune Ağırlığı (g)	511	512	516	519	522	523	523	521	520	518
	2,5	9,6	5,3	3,7	2,4	5,8	1,1	3,5	0	8,8
Sıkıştırılmış Numune Ağırlığı (g)	107	109	113	115	118	120	119	117	116	115
	7,7	4,8	0,5	8,9	7,6	1	6,3	8,7	5,2	4
Yaş Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,14	1,16	1,20	1,23	1,26	1,27	1,27	1,25	1,23	1,22
Yaş Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	11,2	11,3	11,7	12,0	12,3	12,4	12,4	12,2	12,1	11,9
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	10,1	10,3	10,6	10,9	11,1	11,3	11,2	11,1	10,9	10,8

Su Muhtevası (%)										
Kap Ağırlığı (g)	31,3	36,8	35,3	36,5	35,6	34,8	36	36,1	35,7	180,5
Yaş Zemin + Kap Ağırlığı (g)	63,3	64,5	64	66,2	63,1	65	66,8	66,7	65,4	247
Kuru Zemin + Kap Ağırlığı (g)	60,3	61,2	59,6	61	57,6	58,4	59,7	58,9	57,4	228,1
Kuru Zemin Ağırlığı (g)	29	24,4	24,3	24,5	22	23,6	23,7	22,8	21,7	47,6
Su Miktarı (g)	3	3,3	4,4	5,2	5,5	6,6	7,1	7,8	8	18,9
Su Muhtevası (w)	0,10	0,14	0,18	0,21	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,40
Su Muhtevası (%)	10,3	13,5	18,1	21,2	25,0	27,9	29,9	34,2	36,8	39,7
	4	2	1	2	0	7	6	1	7	1

**EK-B.3. Kemik Tozu Katkı İçeriği %3 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin  
Standart Proktor Deney Verileri**

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )					
Kap + Numune Ağırlığı (g)	5668,9	5790,8	5869,5	5866,7	5836,9
Sıkıştırılmış Numune Ağırlığı (g)	1634,1	1756	1834,7	1831,9	1802,1
Yaş Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,73	1,86	1,94	1,94	1,91
Yaş Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16,98	18,25	19,07	19,04	18,73
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16,0700	16,4914	16,7655	15,9420	15,1270
	5	4	2	4	4

Su Muhtevası (%)					
Kap Ağırlığı (g)	31,3	36,8	35,3	36	35,8
Yaş Zemin + Kap Ağırlığı (g)	66,7	69	101,6	68,6	100,3
Kuru Zemin + Kap Ağırlığı (g)	64,8	65,9	93,6	63,3	87,9
Kuru Zemin Ağırlığı (g)	33,5	29,1	58,3	27,3	52,1
Su Miktarı (g)	1,9	3,1	8	5,3	12,4
Su Muhtevası (w)	0,06	0,11	0,14	0,19	0,24
Su Muhtevası (%)	5,67	10,65	13,72	19,41	23,80

**EK-B.4. Kemik Tozu Katkı İçeriği %6 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin  
Standart Proktor Deney Verileri**

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )					
Kap + Numune Ağırlığı (g)	5638,2	5761,7	5866,4	5846,5	5829,3
Sıkıştırılmış Numune Ağırlığı (g)	1603,4	1726,9	1831,6	1811,7	1794,5
Yaş Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,70	1,83	1,94	1,92	1,90
Yaş Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16,66	17,95	19,03	18,83	18,65
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	15,88064	16,32962	16,70559	15,69752	15,16852

Su Muhtevası (%)					
Kap Ağırlığı (g)	31,3	36,8	35,3	35,8	34,8
Yaş Zemin + Kap Ağırlığı (g)	65,4	69	68	73,7	76,6
Kuru Zemin + Kap Ağırlığı (g)	63,8	66,1	64	67,4	68,8
Kuru Zemin Ağırlığı (g)	32,5	29,3	28,7	31,6	34
Su Miktarı (g)	1,6	2,9	4	6,3	7,8
Su Muhtevası (w)	0,05	0,10	0,14	0,20	0,23
Su Muhtevası (%)	4,92	9,90	13,94	19,94	22,94

**EK-B.5. Kemik Tozu Katkı İçeriği %9 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin  
Standart Proktor Deney Verileri**

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )					
Kap + Numune Ağırlığı (g)	5633,2	5752,3	5861,2	5837,7	5769,4
Sıkıştırılmış Numune Ağırlığı (g)	1598,4	1717,5	1826,4	1802,9	1734,6
Yaş Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,69	1,82	1,93	1,91	1,84
Yaş Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16,61	17,85	18,98	18,74	18,03
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	15,7841	16,21872	16,63311	15,74261	14,49986

Su Muhtevası (%)					
Kap Ağırlığı (g)	31,4	36,8	35,3	36,5	35,6
Yaş Zemin + Kap Ağırlığı (g)	71,6	83,9	81,4	84,7	85,7
Kuru Zemin + Kap Ağırlığı (g)	69,6	79,6	75,7	77	75,9
Kuru Zemin Ağırlığı (g)	38,2	42,8	40,4	40,5	40,3
Su Miktarı (g)	2	4,3	5,7	7,7	9,8
Su Muhtevası (w)	0,05	0,10	0,14	0,19	0,24
Su Muhtevası (%)	5,24	10,05	14,11	19,01	24,32

**EK-B.6. Kemik Tozu Katkı İçeriği %12 Olan Nehir Kumu Numunesi İçin Standart Proktor Deney Verileri**

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )					
Kap + Numune Ağırlığı (g)	5628,9	5737,2	5856,6	5827,2	5725,4
Sıkıştırılmış Numune Ağırlığı (g)	1594,1	1702,4	1821,8	1792,4	1690,6
Yaş Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,69	1,80	1,93	1,90	1,79
Yaş Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16,57	17,69	18,93	18,63	17,57
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	15,69807	16,01252	16,48629	15,58788	14,00235

Su Muhtevası (%)					
Kap Ağırlığı (g)	31,3	36,8	35,3	36,5	34,7
Yaş Zemin + Kap Ağırlığı (g)	73,3	77,9	77,1	83,7	81,5
Kuru Zemin + Kap Ağırlığı (g)	71,1	74	71,7	76	72
Kuru Zemin Ağırlığı (g)	39,8	37,2	36,4	39,5	37,3
Su Miktarı (g)	2,2	3,9	5,4	7,7	9,5
Su Muhtevası (w)	0,06	0,10	0,15	0,19	0,25
Su Muhtevası (%)	5,53	10,48	14,84	19,49	25,47