

**İNCE KUM ZEMİNLERDE MERMER TOZU VE  
ÇİMENTO İLE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ**

**Abdoullah KEBE**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNCE KUM ZEMİNLERDE MERMER TOZU VE ÇİMENTO İLE ZEMİN  
İYİLEŞTİRMESİ**

**Abdoullah KEBE**  
000-501-926-021

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ ONAYI

Abdoullah KEBE tarafından hazırlanan “İNCE KUM ZEMİNLERDE MERMER TOZU VE ÇİMENTO İLE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

- Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER İmza  
0000-0003-3735-9554  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Talha GEZGİN İmza  
0000-0002-9725-6015  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Doç. Dr. Eyübhan AVCI İmza  
0000-0001-7206-0158  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**

.././.....

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**28/07/2023**

**Abdoullah KEBE**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı

Öğrencinin Adı-Soyadı

Tarih

Tarih

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Abdoullah KEBE

28/07/2023

28/07/2023

İmza

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım  
yazmalı ve imzalanmalıdır.

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### İNCE KUM ZEMİNLERDE MERMER TOZU VE ÇİMENTO İLE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ

**Abdoullah KEBE**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Son yıllarda zayıf zeminlerin ya da şişen zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla atık malzemelerin kullanılması çok önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, ince kum zemin, farklı oranlarda mermer tozu ve çimento ile karıştırılmış ve bu katkıların zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında mermer tozu %0 - %30 arasında değişen oranlarda eklenmiş olup, aktivatör olarak sabit %3 çimento numunelere katılmıştır. 6 farklı zemin karışımı homojen bir şekilde hazırlanarak Özgül ağırlık, Standart proktor, California taşıma oranı (CBR), Permeabilite, Direkt kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Katkıların etkisiyle, karışımların maksimum kuru birim hacim değerleri 14,79 kN/m<sup>3</sup>'den 18,40 kN/cm<sup>3</sup> 'e artarken, optimum su içeriği %19,3'ten %11,3'e düşmüştür.

CBR deneylerinde taşıma oranları 1, 7 ve 28 gün kür süreleri dikkate alınarak belirlenmiştir. %25 mermer tozu ve %3 çimento oranında, 28 günlük küre bırakılan numunede en yüksek taşıma oranı %288,81 bulunmuştur. Yapılan permeabilite deneyi sonucunda mermer tozu ilavesiyle her oranda geçirgenlik katsayısında düşüş görülmüştür, en düşük değer %3 çimento ile %30 mermer tozu eklediğinde  $0,43 \times 10^{-4}$  cm/sn olarak bulunmuştur. Numuneler %30 ve %80 sıklıklarda hazırlanarak direkt kesme deneyine tabi tutulmuş ve zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısındaki değişimler incelenmiştir. Katkı eklenmesiyle zeminin kohezyonunda ciddi derecede artış olurken, sürtünme açısı çok fazla değişmemiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda mermer tozunun çimento ile birlikte atık malzeme olarak ince kum iyileştirilmesinde kullanılabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** İnce kum, Mermer Tozu, Çimento, Zemin iyileştirilmesi, Deney  
2023, xii + 57 sayfa.

## ABSTRACT

MSc Thesis

### IMPROVEMENT OF FINE SANDS WITH MARBLE DUST AND CEMENT

**Abdoullah KEBE**

Bursa Uludag University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Dr. Yeşim Sema ÜNSEVER

In recent years, it has become very important to use waste materials in order to improve weak or swollen soils. In this study, fine sand soil was mixed with different ratios of marble dust and cement, and the effect of these additive materials on engineering properties of soil were investigated.

Within the scope of the study, different ratios marble powder (between 0% - 30%) and fixed 3% cement (as an activator) was added in soil samples. 6 different soil mixtures were prepared homogeneously and Specific gravity, Standart proctor, California bearing ratio (CBR), Permeability, Direct shear tests were carried out. The maximum dry unit weight of the mixtures, obtained at the Standard Proctor experiment was increased from 14.49 kN/m<sup>3</sup> to 18.03 kN/m<sup>3</sup>, whereas the optimum water content decreased from 19.3% to 11.3% due to the additive materials.

CBR ratios on prepared samples were determined after 1, 7 and 28 days of curing. The highest CBR ratio was obtained as 288.81% for the sample having 25% marble dust and 3% cement that was cured for 28 days. As a result of the permeability test, the permeability coefficient decreased for each ratio of arble dust, the lowest value was obtained as  $0.43 \times 10^{-4}$  cm/sec with the addition of 30% marble powder. The samples were prepared with 30% and 80% relative density and subjected to direct shear tests in order to investigate the changes on cohesion and internal friction angle. Although, the additives increased the cohesion of the soil enormously, the improvement on friction angle of the soil samples were limited. As a result of this experimental studies, it was seen that marble powder with cement can be used as a waste material in order to improve fine sand soil properties.

**Key words:** : Fine sand, Marble dust, Cement, Soil improvement, Experiment  
**2023, xii + 57 pages.**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, çalışmalarım boyunca ve bu çalışmanın tamamlanmasında bana sağlık, güç ve cesaret verdiği için Yüce Allah'a şükrediyorum. Bu Yüksek Lisans eğitim boyunca, tez çalışmasında, tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER hocama vermiş olduğu tüm destekler için içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam kapsamında kullanılacak doğal zemin numunesinin temininde, laboratuvar çalışmalarımda bana destek olan, tüm bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan değerli ZEMAR ZEMİN ARAŞTIRMA şirketindeki çalışma arkadaşlarıma başta Emrah ÇELİK olmak üzere Ümit SALMAN ve Gökkan AKTAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tüm hayatım boyunca benim yanımda olan, beni her zaman destekleyen, beni cesaretlendiren ve moral veren annem, babam ve bütün kardeşlerime sonsuz şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Abdoullah KEBE  
28/07/2023



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	4
2.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	4
2.1.1. Mekanik stabilizasyon.....	4
2.1.2. Kimyasal Stabilizasyon .....	8
2.1.3. Güçlendirme .....	12
2.2 Kimyasal Stabilizasyona Dair Önceki Çalışmalar .....	14
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	23
3.1 Materyal .....	23
3.1.1. Zemin .....	23
3.1.2. Mermer tozu .....	24
3.1.3. Çimento .....	25
3.2 Yöntem .....	26
3.2.1. Özgül ağırlık deneyi .....	27
3.2.2. Standart proktor deneyi .....	28
3.2.3. California taşıma oranı .....	29
3.2.4. Direkt kesme deneyi.....	30
3.2.5. Düşen seviyeli permeabilite deneyi.....	33
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	36
4.1 Özgül ağırlık deney sonuçları .....	36
4.2 Standart proktor deney sonuçları.....	37
4.3 California Taşıma Oranı Deney Sonuçları .....	39
4.4 Direkt kesme deney sonuçları .....	42
4.5 Düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları .....	49
5. SONUÇ .....	50
KAYNAKLAR .....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	57

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir (III) oksit
K <sub>2</sub> O	Potasyum oksit
MgO	Magnezyum oksit
Na <sub>2</sub> O	Sodyum oksit
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
SO <sub>3</sub>	Kürküt trioksit
k	Geçirgenlik katsayısı
c	Kohezyon
φ	İçsel sürtünme açısı
γ <sub>kuru</sub>	Kuru birim hacim ağırlık
ρ <sub>kuru</sub>	Kuru yoğunluk
w	Su içeriği
w <sub>opt</sub>	Optimum su içeriği
γ <sub>w</sub>	Suyun birim hacim ağırlığı
Dr	Rölatif sıkılık
G <sub>s</sub>	Özgül ağırlık
em <sub>aks</sub>	Maksimum boşluk oranı
em <sub>in</sub>	Minimum boşluk oranı
C <sub>u</sub>	Üniformluk Katsayısı
C <sub>r</sub>	Süreklilik Katsayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CBR	Kalifornya Taşıma Oranı
TS	Türk Standartları
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Enstitüsü
MT	Mermer Tozu
Ç	Çimento
K	Kum
M	Kütle

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	4
Şekil 2.2. Vibro kompaksiyon uygulama yöntemi (Bauer Maschinen, 2012)...	6
Şekil 2.3. Dinamik kompaksiyon uygulama yöntemi (Kaljahi ve Yasrobi, 2004).....	7
Şekil 2.4. Patlayıcı Yönteminin Şematik Anlatımı (Tumluer, 2006).....	8
Şekil 2.5. Kireç ile zemin stabilizasyonu uygulaması (Hossain, 2012) .....	10
Şekil 2.6. Çimento ile zemin stabilizasyon uygulaması (Hossain, 2012).....	11
Şekil 2.7. Uçucu kül ile zemin stabilizasyon uygulaması (Hossain, 2012) .....	11
Şekil 2.8. Bitümlü malzemeler ile zemin stabilizasyonu.....	12
Şekil 2.9. Taş kolonlar yöntemi (Taube ve Herridge, 2002).....	13
Şekil 2.10. Platformda Uygulanan Geosentetik (Liu ve diğ., 2009) .....	14
Şekil 3.1. İnce kum, Mermer tozu ve Çimento'ya ait görseller.....	23
Şekil 3.2. İnce kum elek analizi sonucu .....	24
Şekil 3.3. Mermer tozunun granülometre eğrisi.....	25
Şekil 3.4. Çimento'nun granülometre eğrisi.....	26
Şekil 3.5. Özgül ağırlık deneyi için hazırlanan numuneler.....	28
Şekil 3.6. Standart Proktor deneyi ve aletleri .....	29
Şekil 3.7. Küre bırakılan numuneler.....	30
Şekil 3.8. CBR penetrasyon test cihazı .....	30
Şekil 3.9. Direkt kesme cihazı.....	31
Şekil 3.10. Direkt kesme deney için hazırlanmış bir numune .....	33
Şekil 3.11. Düşen seviyeli deney için uygun kalıplar.....	34
Şekil 3.12. Düşen seviyeli permeametre deney düzeneği.....	35
Şekil 4.1. Karışımların özgül ağırlık grafiği.....	37
Şekil 4.2. Karışımların kuru birim hacim ağırlık - su içeriği grafikleri .....	38
Şekil 4.3. Karışımlara ait CBR taşıma oranlarının grafiği .....	41
Şekil 4.4. Karışımlara ait CBR taşıma oranlarının eğrileri .....	41
Şekil 4.5. Karışımlara ait CBR grafikler .....	42
Şekil 4.6. %30 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve normal gerilme grafikleri .....	44
Şekil 4.7. %80 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve normal gerilme grafikleri.....	45
Şekil 4.8. %30 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve yatay deformasyon grafikleri .....	46
Şekil 4.9. %80 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve yatay deformasyon grafikleri .....	47
Şekil 4.10. %30 ve %80 sıklık için karışımlara ait kohezyon grafiği.....	48
Şekil 4.11. %30 ve %80 sıklık için karışımlara ait içsel sürtünme açısı grafiği...	48
Şekil 4.12. Karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği .....	50

## TABLolar DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 3.1. İnce kum zeminin mühendislik özellikleri .....	24
Tablo 3.2. Mermer tozunun kimyasal özellikleri .....	25
Tablo 3.3. Çimentonun kimyasal özellikleri .....	26
Tablo 3.4. Deney numunelerine ait notasyonları .....	27
Tablo 4.1. Karışımların özgül ağırlık değerleri .....	36
Tablo 4.2. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri	38
Tablo 4.3. Karışımların ait CBR değerleri .....	40
Tablo 4.4. Karışımların kohezyon ve sürtünme açısı değerleri .....	49
Tablo 4.5. Karışımların geçirgenlik katsayıları .....	49

## 1. GİRİŞ

"Zemin" kelimesi, temel olarak yer kabuğunun üst tabakası anlamına gelen Latince "solium" kelimesinden çıkarılmıştır. Zeminler sekiz ana kategoride sınıflandırılmaktadır. Bunlar; Alüvyal zemin, kırmızı zemin, laterit zemin, siyah pamuklu zemin, orman zeminleri, kurak veya çöl zeminleri, tuzlu veya alkali zeminler, bataklık zeminler'dir. Her zemin türü, farklı özelliklerin yanı sıra farklı kimyasal bileşime de sahiptir. Coğrafi bölgelere bağlı olarak oluşan zemin değişmektedir.

Mühendisler için ise zemin, üzerine binaların ve diğer yapıların inşa edilebileceği kayaların parçalanmasıyla oluşan malzemedir. İnşaat için mevcut olan zeminler amaçlanan yapı için uygun olmadığında, zemin iyileştirmesi gerekmektedir. Zemin stabilizasyonu, yol, havaalanı inşaatı ve diğer büyük inşaat projeleri için çok önemli bir yöntemdir. Zemin stabilizasyonu, zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirir ve daha sağlam hale getirir. Genel olarak, stabilizasyon; sıkıştırma, ön konsolidasyon, drenaj ve benzeri birçok işlem içermektedir (Prabakar ve diğ., 2004). Stabilizasyon, zeminin belirli özelliklerini iyileştirmek için zeminin bir ya da daha fazla katkı maddesi ile kullanılması veya karıştırılması işlemidir. Genelde, zemin stabilizasyonu aşağıdaki amaçlar için yapılmaktadır:

- ✓ zeminin yoğunluğunu arttırmak,
- ✓ zeminin sıvılaşmasını azaltmak,
- ✓ zeminin şev stabilitesini arttırmak,
- ✓ şişen zeminlerde şişmeyi azaltmak,
- ✓ zeminin kesme mukavemetini arttırmak,
- ✓ temel zeminlerinin taşıma kapasitesini arttırmak,
- ✓ toprak yapılarında zeminin permeabilitesi ve sıkıştırılabilirliğini azaltmak.

Yüksek kaliteli malzemelerin artan maliyeti nedeniyle mühendisler, yerel zeminlerin fiziksel özelliklerini farklı yöntem ve tekniklerle iyileştirmeye çalışmaktadırlar. İyileştirme kelimesi, kesme dayanımını arttırmak, oturmayı azaltmak, çözülme ve donma gibi zorlu ortam koşullarına dayanmak ve zayıf zeminlerle ilgili tüm sorunları azaltmak

veya ortadan kaldırmak anlamına gelmektedir. Zemin stabilizasyonu hem kumlu hem de killi zeminlere mekanik ve kimyasal yöntemlerle uygulanmaktadır.

Türkiye'de 2018 yılında, T.C Ticaret Bakanlığı'nın yayınladığı verilere göre Türkiye'de 5,1 milyar m<sup>3</sup> mermer taşı üretim miktarı olup, 13,9 milyar ton mermer rezervi bulunmaktadır (Doğal Taşlar Sektör Raporu, 2018). Bu tahmine göre, Türkiye'nin dünya olası mermer rezervlerinin yaklaşık %33'üne sahip olduğu sonucuna varılmaktadır. Mermer bloklarının kesilmesi işlemi sırasında mermerin tozu, su ile karışarak atık mermer çamuru haline gelmekte ve yaklaşık %25 oranında mermer tozu oluşmaktadır. Mermer tozu, doğal kaynakların daha verimli kullanılması ve çevrenin atık birikintilerinden korunması için tek olarak veya katkılar halinde kullanılabilir. İnşaat sektöründe mermer talebin artması, atık mermer tozu oluşumunu gündeme getirmektedir. Atık mermer tozu, güçlendirme veya hammadde olarak farklı uygulama ve amaçlarla kullanılmaktadır. En yaygın kullanım alanları ve uygulamaları; inşaat malzemesi, seramik, beyaz çimento, mozaik gibi birçok uygulamada ve ayrıca kil bazlı malzemeler ve polimer modifiyeli harçların üretiminde kullanılmaktadır. İri atık mermer ise, dolgu maddesi ve asfalt kaplama uygulamalarında agrega olarak kullanılmaktadır. Atık mermerin bir diğer kullanım alanı da klinker üretiminde kullanılmasıdır. Dünyada özellikle gelişmiş ülkelerde değerlendirilmeyen atık maddelerin depolanması ve işlenmesi çevre kirliliğinin artmasına neden olmuştur. Mermer atıklarının kullanım oranlarının artırılması çevre sorunlarına çözüm olacak ve inşaat maliyetlerini azaltacaktır.

Bu yüksek lisans çalışmasında, mermer tozu ve aktivatör olarak çimentonun ince kum zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Karışımlarda, farklı oranlarda mermer tozunun etkisi deneysel çalışmalar yapılarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında deneylerde kullanılmış olan ince kum, 0,60 mm ve 0,074 mm dane boyu arasındadır. Çalışma sırasında ince kuma en fazla %30 mermer tozu karıştırılmıştır. Bu malzemelere, aktivatör olarak sabit %3 çimento ilave edilmiştir. İnce kum zeminlerde mermer tozu ve çimentonun, zeminin mühendislik özelliklerini ne kadar etkilediği ve ne kadar iyileştirdiğini değerlendirmek için karışımlara; Özgül ağırlık, Standart Proktor, California taşıma oranı (CBR), Düşen seviyeli permeabilite ve Direkt kesme deneyleri yapılmıştır. CBR deneylerinde, karışımlar için kür süreleri 1, 7, 28 gün olarak alınmıştır.

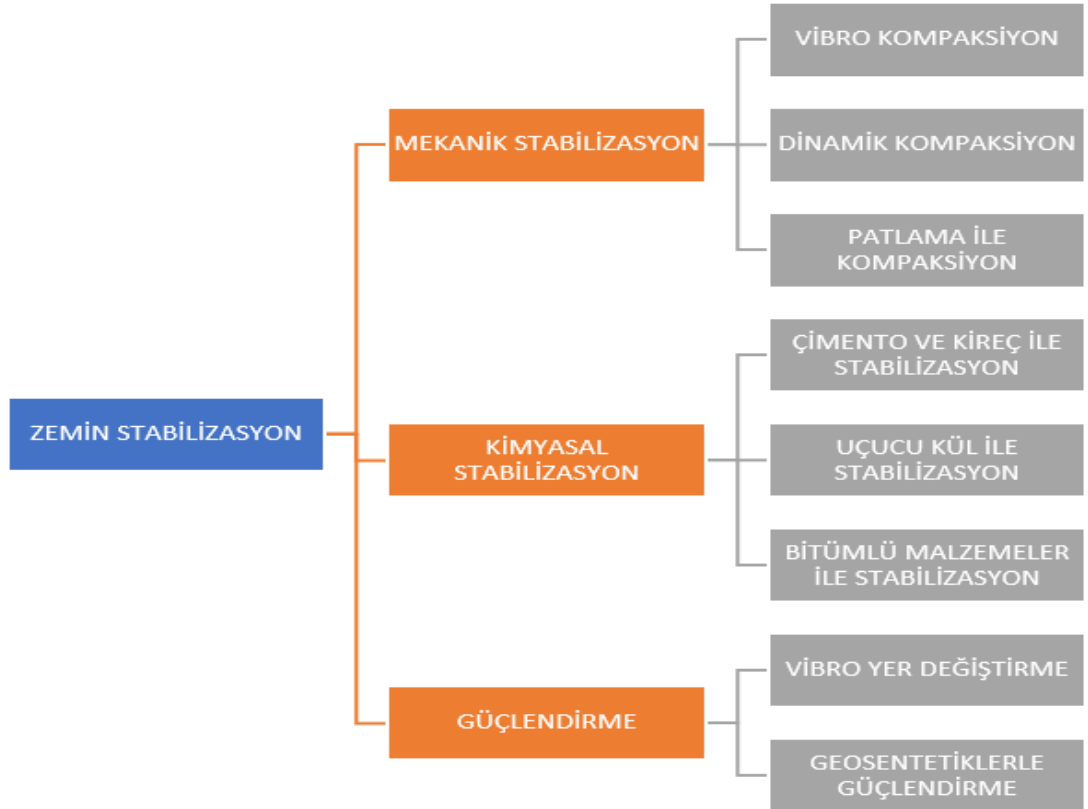
Direkt kesme deneyinde ise %30 ve %80 sıklıkta numuneler hazırlanarak, deneyler yapılmıştır.

Bu tez çalışması, 5 bölümden oluşmaktadır. Tezin 1. Bölümünde çalışmanın amacı ve temel araştırması verilmiştir. 2. Bölümde ise zemin iyileştirilme yöntemleri ve konuya ait önceki çalışmalar anlatılmıştır. 3. Bölümde, kullanılan zemin malzemesi, katkı malzemesi ve deneylerin talimatlarından bahsedilmiştir. 4. Bölümde ise deneylerden elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirmesine yer verilmiştir. Son bölümde, elde edilen sonuçları toparlayarak katkı malzemesinin zeminin farklı parametrelerini ne kadar iyileştirdiği özetlenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Bu bölüm zemin iyileştirme yöntemlerini, ve her biri için ana uygulama tekniklerinin tanımlarını içermektedir. Zemin iyileştirmenin temel amacı zeminin temel taşıma gücünün arttırarak inşaata uygun hale getirmektir. Zemini stabilize etmek için birçok yöntem kullanılmaktadır. En çok mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyon, güçlendirme vb. yöntemler uygulanmaktadır (Şekil 2.1). Zemin iyileştirme yönteminin seçimi, birkaç faktöre göre yapılmaktadır. Dikkate alınması gereken faktörlerden biri zeminin geoteknik özellikleridir. Zemin özelliklerini belirlemek için zeminlerin derinlemesine zemin etüdünün yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.1. Zemin iyileştirme yöntemleri

#### 2.1.1. Mekanik stabilizasyon

Mekanik zemin iyileştirme, zeminin fiziksel özelliklerini değiştirmek için farklı zemin ekleme veya çıkarılmasıyla zeminin dane boyutu dağılımının ve plastisitesinin değiştirilmesidir. Bu yöntem, zemin karışımının bileşenlerinin teknik özelliklerinin birleştirilmesinden oluşur. Zeminin daha büyük taneleri arasındaki boşluğu daha ince



zemin taneleri ile doldurarak, farklı tanecik boyutlarına sahip zeminlerin bir araya getirilmesi ve ardından sıkıştırılması yardımıyla boşluk oranını azaltmak amaçlanmaktadır (Gary, 2007). Sıkıştırma işlemi, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) gibi zemin mukavemeti parametrelerini iyileştirerek boşluk oranının azaltılmasını sağlamaktadır. Böylece, üste yakın tabakalar için yüzeysel sıkışma tekniklerini içeren; statik, titreşimli veya darbeli silindirler kullanılırken, daha derindeki tabakalar için ise derin sıkıştırma teknikleri yani dinamik kompaksiyon ya da vibro kompaksiyon uygulanabilmektedir. Mekanik stabilizasyon için 3 faktör dikkate alınmalıdır, bunlar:

- Uygun dane boyut dağılımı
- Uygun bağlayıcı zemin
- Dikkatli bir şekilde zemin karışımını kontrol etmek'tir.

Karışımlarda doğru yoğunluklar elde etmek için numunelerin optimum su muhtevasına göre sıkıştırılması gerekmektedir.

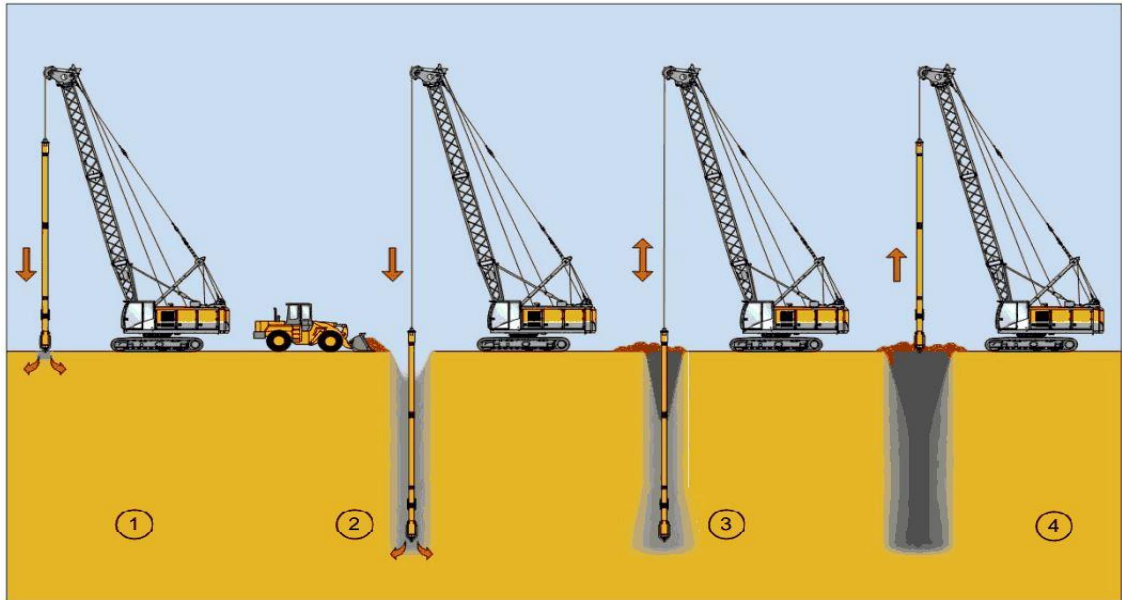
#### ➤ **Vibro Kompaksiyon**

Vibro kompaksiyon derin ve kohezyonsuz zeminlerde, zemine kum veya çakıl yerleştirilen bir sondanın enerji titreşimleri ile zemini sıkıştırarak istenilen zemin özelliklerine ulaşılmasını sağlayan bir zemin stabilizasyon yöntemidir (Şekil 2.2). Zemin mekaniği alanında, Vibro-kompaksiyon gibi derin bir titreşim işlemi, zemin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu özellikler şöyle sıranabilir (Besancon, 1982):

- Zemin yoğunluğu
- İçsel sürtünme açısı
- Elastisite modülü

Zemin parametrelerinin iyileştirilmesi ile taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırmak ve yapısal yükler altındaki oturmaları azaltmak mümkündür. Bununla birlikte, yöntemin etkisi, sahadaki zeminin özelliklerine bağlıdır. Vibro-kompaksiyon sonuçları, karşılaşılan her zemin için aynı değildir. Granüler zeminler, kohezyonlu zeminlerden çok farklı sonuçlar göstermektedirler.

Bu yöntemde, bir vince bağlı bir vibratör genellikle su olan bir jet sıvısı kullanılarak yere indirilir. Titreşimin enerjisi, boşlukları azaltarak tanelerin yeniden düzenlenmesini sağlayarak zemin parçacıkları arasındaki taneler arası kuvvetleri azaltır. Daha sonra yüzeyde gözlemlenen azalmayı dengelemek için granüler bir dolgu malzemesi eklenir. Eklenen dolgu malzemesi sıkıştırılır ve vibratör çalışması zemine ulaşana kadar kademeli olarak yükselir. Vibratörler tam donanımlıdır ve yerleşik bir veri toplama sistemi ile donatılmıştır. Sistem verileri daha sonra kaydedilebilir ve kabin içi monitörde görüntülenebilir. Bu ölçümler, projenin tanımlanmış kriterlerine göre sıkıştırmayı gerçekleştirmek için operatörün sapmaları gerçek zamanlı olarak düzeltmesini sağlamaktır. Vibro kompaksiyon dünyada yaygın kullanılan bir yöntemdir. Uygulama maliyeti diğer yöntemlerle yakındır fakat uygulama süresi kısadır.



**Şekil 2.2.** Vibro kompaksiyon uygulama yöntemi (Bauer Maschinen, 2012)

### ➤ **Dinamik kompaksiyon**

Dinamik kompaksiyon zeminlerin mekanik özelliklerinin derin seviyelere kadar iyileştirmesine yönelik bir ıslah yöntemidir. Bu yöntem ilk olarak 20. yüzyılda Almanya'da bir otopan inşasında yapılmıştır (Loos, 1936). Dinamik kompaksiyon ile zemin stabilizasyonu stabil olmayan, sıkışabilir (konsolide olabilen) zeminlerin ıslah edilmesini oldukça kolay ve ekonomik hale getirmektedir.

Dinamik kompaksiyon, zemin üzerinde ağ şeklindeki noktalara büyük bir ağırlığı tekrarlı düşürmek suretiyle gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.3). Genellikle çelik veya donatılı betondan yapılan ağırlık 5,5 ila 27,5 ton arasındadır. Bazı yerlerde 200 tona çıkan ağırlıklar ile uygulanmaktadır. Genelde düşürme yüksekliği 10 ila 30 m arasındadır. Bazen bu yükseklik 40 m' ye çıkabilir. Ağırlıklar ağ üzerindeki bir noktaya genellikle 3 ile 8 arasında değişen sayılarda düşürülür. Bu işlem bir veya daha fazla geçişte tüm alana uygulanır ve her pasdan sonra oluşan çukurlar dozer ile düzeltilir veya içleri granüler malzeme ile doldurulur. Dinamik kompaksiyon yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir çünkü maliyeti ve uygulama süresi açısından diğer yöntemlere göre daha uygundur.

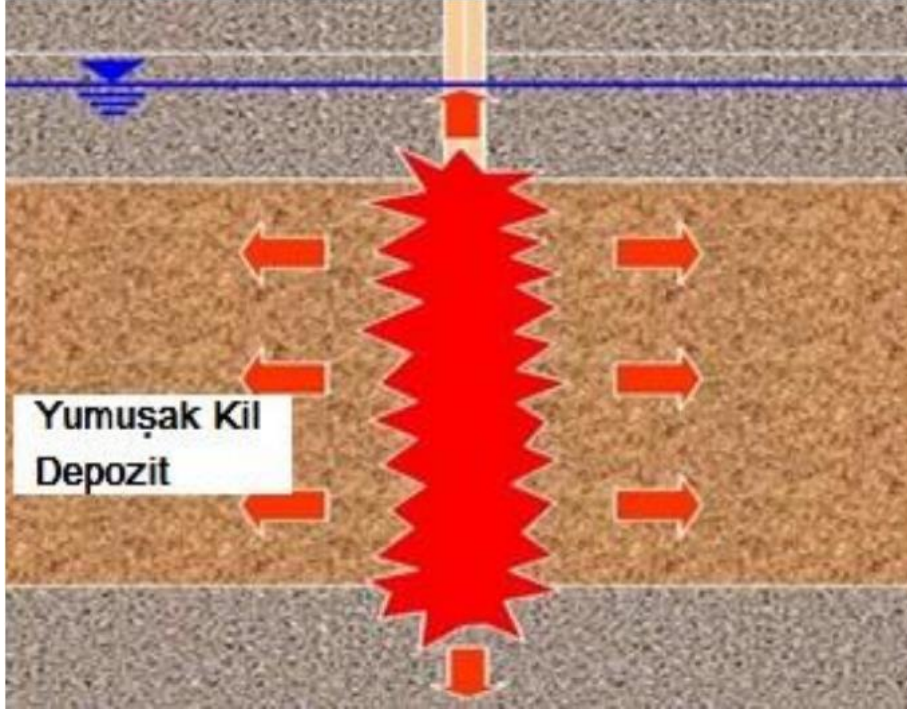


**Şekil 2.3.** Dinamik kompaksiyon uygulama yöntemi (Kaljahi ve Yasrobi, 2004)

#### ➤ **Patlatma ile Kompaksiyon**

Patlayıcıların patlama etkisi dolayısı ile ortaya çıkan şok dalgaları ve titreşimlerin zeminin sıkılaşması ve sıvılaşmasına yol açtığı bir yöntemdir (Şekil 2.4). Patlama yöntemi ile zayıf zeminlerin hem oturmaları hem de granüler zeminlerin taşıma kapasitesi artabilmektedir.

Granüler zeminlerde patlama ile taşıma gücünün artırılması için zeminin tam doymun olması gerekmektedir. Zeminde ne kadar hava varsa taşıma gücünün iyileştirilmesi o kadar zor olmaktadır. Patlatma yöntemi üzerine daha önceki çalışmalara göre, yönteminin en büyük avantajlarından biri ekonomik olması ve diğer yöntemlerde mümkün olmayan derinliklerde kullanılabilir olmasıdır (Tumluer, 2006). Patlama ile kompaksiyonda 40 metre derinliğe kadar uygun sonuçlar elde edilebilmektedir. Patlama yönteminin uygulaması kısadır fakat bu yöntem çok tercih edilmemektedir çünkü teorik bilgiden çok tecrübeye dayalı uygulanmaktadır, yanlış kullanımı güvenlik açısından risk teşkil etmektedir ve doğaya çok zarar verebilmektedir.



**Şekil 2.4.** Patlayıcı Yönteminin Şematik Anlatımı (Tumluer, 2006)

### **2.1.2. Kimyasal Stabilizasyon**

Kimyasal katkıları, genellikle mekanik stabilizasyon yöntemleri uygun olmadığında veya zeminin farklı bir zeminle değiştirilmesinin mümkün olmadığı veya çok maliyetli olduğu durumlarda zeminleri iyileştirmek için kullanılmaktadır. Tüm kimyasal stabilizasyon projelerinin %90'ından fazlasında Portland çimentosu, kireç, uçucu kül ve bitümlü malzemeler ile zeminin kimyasal stabilizasyonu sağlanmaktadır (Garber ve Hoel, 2000).

Kimyasal stabilizasyon için katkı maddesi seçerken birkaç faktörün dikkat alınması gerekmektedir, bunlar:

- Stabilize zemin sınıfı,
- Stabilize tabakanın kullanılacağı amaç,
- İstenilen zemin kalitesi iyileştirme türü,
- Stabilize tabakanın gerekli mukavemeti ve dayanıklılığı,
- Maliyet ve çevre koşulları'dır.

Bu kimyasal katkıları, suya maruz kalınca, hem kısa hem de uzun süreli kimyasal değişikliklere maruz kalırlar ve bu da şişmenin azaltılması, kayma mukavemetinin iyileştirilmesi ve ıslanma ve kuruma etkisine karşı direnç açısından zemin matrisinin genel olarak iyileştirilmesiyle sonuçlanmaktadır.

Kimyasal zemin stabilizasyon yöntemleri, mekanik zemin stabilizasyon kadar yaygın değildir. Mekanik iyileştirme yöntemleri uygulanırken çok beceri gerekmez fakat kimyasal iyileştirme çok gelişmiş teknolojiler ve teknik bilgiler gerektirmektedir. Kimyasal katkı maddeleri ve zemin partikülleri arasındaki reaksiyon, zemin tanelerini güçlü bir ağ üzerinden bağlayabilir, bu sebeple mekanik iyileştirme yöntemleri ile kıyaslayınca kimyasal iyileştirmede daha yüksek mukavemet, dayanıklılık ve zemin kalitesi elde edilebilmektedir (ASTM, 1992).

#### ➤ **Kireç ile zemin stabilizasyonu**

Kireç ile zemin stabilizasyonu, zeminin yoğunluğu, taşıma gücü vb. özelliklerini iyileştirmek için kireç ilave edilmesi işlemidir. Kireç-zemin stabilizasyonunu etkileyen çeşitli faktörler; zemin tipi, kireç tipi, kullanılan kireç oranı, sıkıştırma, kür süresi ve katkı maddeleridir.

Kireç-zemin stabilizasyonunda yer alan ilke, eklendiğinde kireç ve zemin arasında iyon değişimi oluşturmaktır. Killi zemine kireçle muamele edildiğinde, aralarında katyon değişimi gerçekleşir, bu da plastik limiti arttırır ve plastisite indeksini düşürür, böylece nihai olarak zeminin iyileştirilmesine neden olur. Eğer kilin içinde çakıl varsa, kireç killi



çakıl için bağlayıcı bir malzeme gibi davranmaktadır. Kireçle stabilize edilmiş karışım, kaldırım için alt temel ve temel tabakası oluşturmak için kullanışlıdır (Şekil 2.5). Kireçle iyileştirilmiş zemin, çok sıcak bölgeler için daha uygundur ve soğuk bölgeler için çok uygun olmayabilir.



**Şekil 2.5.** Kireç ile zemin stabilizasyonu uygulaması (Hossain, 2012)

#### ➤ **Çimento ile zemin stabilizasyonu**

Zemin stabilizasyonunun en yaygın yöntemlerinden biri çimento ile zemin stabilizasyonudur. Bu zemin stabilizasyonu yönteminde, zeminin mukavemetini ve direncini artırmak için çimento zeminle karıştırılır (Şekil 2.6). Zemine karıştırılan çimento yüzdesi, ana zeminin mühendislik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Zeminin plastisitesi ne kadar yüksek olursa genelde o kadar fazla çimento eklenmektedir.

Çimento ile zemin stabilizasyonu yaygın bir yöntem olmasına rağmen, en çok asfalt yollarda kullanılmaktadır. Çimento ile zemin stabilizasyonu, zeminin tüm partikülerini birbirine bağlayarak, zeminin mukavemetini artırır. Bu katkı maddesinin miktarının doğru seçilmiş olup olmadığından emin olmak için zemin mekaniği laboratuvarında bütün karışımlara deney yapılması gerekmektedir. Yeterli miktarda kullanılmazsa stabilize zemin uygun mukavemete ulaşmayacaktır. Ayrıca çok fazla katkı maddesi eklenirse iyileştirilmiş zemin çatlayabilir.



**Şekil 2.6.** Çimento ile zemin stabilizasyon uygulaması (Hossain, 2012)

➤ **Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu**

Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu temelde kireç veya çimento ile zemin stabilizasyonuna benzer ancak kullanılan katkı maddesine göre farklılık gösterir. Uçucu kül, kömürle çalışan elektrik santrallerinde kullanılan bir yan üründür. Geleneksel olarak, uçucu kül havuzlarda depolanır, aynı zamanda zemini iyileştirmek için bağlayıcı madde olarak da kullanılabilir. Uçucu kül, tipik olarak, asfalt yolların alt temel zemin stabilizasyonu için çimento ve kirece benzer şekilde kullanılmaktadır (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7.** Uçucu kül ile zemin stabilizasyon uygulaması (Hossain, 2012)

### ➤ Bitümlü malzemeler ile zemin stabilizasyonu

Bitümlü malzemeler ile zemin stabilizasyon yöntemi, stabil bir taban veya aşınma yüzeyi elde etmek için uygun miktarda bitümlü malzemenin zemine veya agrega malzemesine ilave edilerek karıştırılması yöntemidir. Zemindeki bitümlü malzemeler zeminin kohezyonunu ve taşıma gücünü artırarak suyun hareketine karşı dayanıklı hale getirmektedir.

Zeminin bitümlü stabilizasyonu genellikle asfalt çimentosu, katbek asfalt veya asfalt emülsiyonları kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 2.8). Stabilizasyon için kullanılacak bitüm tipleri genellikle stabilize edilecek zemin tipine, yapım yöntemine ve hava koşullarına bağlıdır. Asfaltlar daha çok üstyapı yapımında bitümlü malzeme olarak kullanılmaktadır. Bitümlü malzemeler zemine eklendiğinde zemin kohezyonunu iyileştirir ve su emmeyi azaltır. Genel olarak, en uygun sonuçlar, zemine kolayca karışabilen en akışmaz kıvamlı asfalt kullanıldığında elde edilir.



Şekil 2.8. Bitümlü malzemeler ile zemin stabilizasyonu

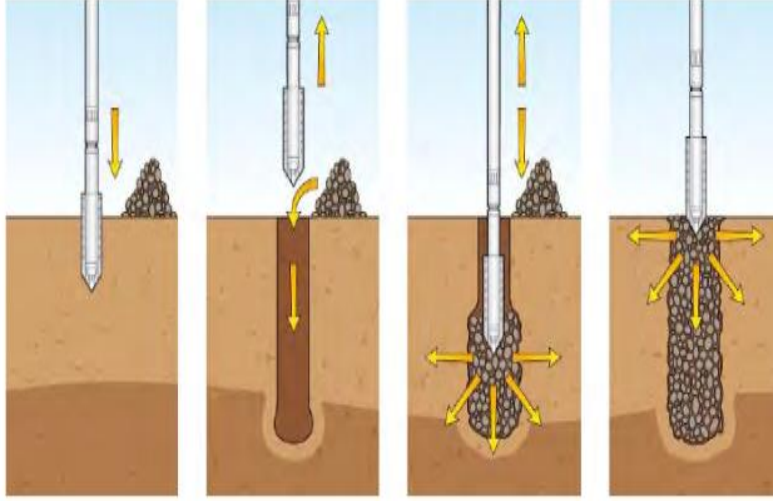
### 2.1.3. Güçlendirme

#### ➤ Vibro yer değiştirme (Taş kolonlar)

Taş kolonlar yöntemi diğer zemin iyileştirme yöntemlerinde olduğu gibi oturmayı azaltmak, taşıma gücünü arttırmak için uygulanmaktadır. Taş kolonlar özellikle şev



stabilitesini ve zemin içinde kesme mukavemetini arttırarak sıvılaşmayı önlemektedir. Bu yöntem, yumuşak ve orta katı killi zeminlerde uygulanmaktadır. Genel olarak, tabaka kalınlığının 10 m' den az olduğu koşullarda tercih edilmektedir. Uygulama çapları 0,60 ve 1,00 metre arasında olmaktadır. Malzeme olarak taş kolon oluşturmada 20 – 75 mm arası kırma taş malzeme yaygın olarak kullanılır, bunun yanı sıra doğal kaba çakıl agrega veya kum-çakıl karışımları da kullanılmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Taş kolonlar yöntemi (Taube ve Herridge, 2002)

#### ➤ Geosentetik ile zemin stabilizasyonu

Son yıllarda geosentetikler ile zemin stabilizasyonu en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Geosentetikler yumuşak killer üzerine oturan dolguların takviyesinde ve zemin iyileştirmesinde kullanılmaktadır (Demiröz ve Karaduman, 2009). Geosentetikler zeminin geçirgenliğini azaltmak ve taşıma gücünü arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Zeminde donatı olarak kullanılan geosentetikler en çok petrolden yapılan polyester, polietilen ve polipropilen gibi geçirimli dokumalardır. Geosentetikler, özellikle yollarda, toprak dolgularda, istinat yapılarında, temel altlarında kullanılmaktadır (Şekil 2.10). Geosentetikler, zeminde ayırma, filtrasyon, drenaj, güçlendirme, su yalıtımı ve erozyon önleme gibi fonksiyonlar için kullanılmaktadır.



**Şekil 2.10.** Platformda Uygulanan Geosentetik ( Liu ve diğ., 2009)

## 2.2 Kimyasal Stabilizasyona Dair Önceki Çalışmalar

Dünyada zeminlerin iyileştirilmesi için çeşitli katkı malzemeleri kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan uçucu kül, kireç, çimento, vs. gibi katkı malzemeleridir. Mermer tozu ise zemin stabilizasyonu alanında kullanılmaya yakın zamanda başlanmıştır. Genelde mermer tozu; kağıt, boya, plastik (PVC boru, profil, lambri, kablo vb.), gıda (ciklet, yem), seramik gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Zemin stabilizasyonunda mermer tozu ile ilgili son zamanlarda özellikle kil zeminler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları şu şekilde özetlenebilir:

Zorluer ve Usta (2003) yaptıkları bir çalışmada iki farklı meşelik kil zemininin iyileştirilmesi amacıyla atık mermer tozunu katkı maddesi olarak kullanılmışlardır. Karışımlarda, Meşelik kilinin ağırlığına göre %0, %1, %3, %5 ve %7 oranlarında mermer tozu kullanılmıştır. İki numune de ince taneli ve düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma esnasında çeşitli karışımlar üzerinde şişme deneyleri yapılmıştır. Her numuneye bir ön yükleme (7 kPa) yapıp, suya boğulduktan hemen sonra farklı zaman aralıklarında (1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 ve 1440 dk) şişme değişimi ölçülmüştür. Sonuç olarak, 24 saat sonundaki şişme yüzdesi değerleri, mermer tozu ilavesi oranına bağlı olarak değişmiştir. Mermer tozu yüzdesi artmasıyla şişme yüzdesinde azalma görülmüştür. En düşük şişme yüzdesi, %5 mermer tozunda bulunmuştur, % 7 mermer tozu olan karışımda ise, şişme yüzdesi tekrar yükselmiştir. Bu

artışın, artan mermer tozu katkısının numunede daha sıkı bir yapı oluşturmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Justo ve Krishnamurthy (2008), mermer tozu stabilizatörü ile muamele edilmiş zeminlerin özellikleri üzerine laboratuvar çalışmaları yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda, % 6 stabilizatör ilavesi ile plastisite indeks değerlerinde yaklaşık %35-40 oranında azalmalar gözlemlendiği ve 7 günlük kür sonrası, %2 stabilizatör ile bile tüm zeminlerde stabilize toprakların ıslak CBR değerinde önemli artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anitha ve diğ. (2009), mermer tozunun farklı tipteki zeminler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Mermer tozu yüzdesi, değişen zeminlerde plastisite indeksinde önemli azalma sağlamış ve optimum su muhtevasının mermer tozu ilavesi ile azaldığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise arttığı gözlemlenmiştir.

Aksoy ve Gör (2011) yaptıkları çalışmada kumlu bir zeminin mermer tozu ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Kumlu zemine ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 mermer tozu ilave edip optimum su muhtevalarında dört farklı karışım hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde Standart Proktor ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Standart Proktor deneyi sonuçlarına göre, numunelerin mermer tozu oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıkları artmıştır. Optimum su muhtevalarına bakıldığında ise, %10 mermer tozu oranında düşüş yaşansa da diğer oranlarda optimum su muhtevalarının doğal kumdan daha yüksek olduğu görülmüştür. Kesme kutusu deneylerinden elde edilen değerlere bakıldığında, %5 mermer tozu kullanılan karışımın sürtünme açısı değeri en yüksek çıkmıştır, kohezyonda ise en yüksek değer %20 mermer tozu oranında elde edilmiştir.

Arora ve diğ. (2014), Udaipur bölgesinde mermer tozu kullanarak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Zemin örneğinde mermer tozu yüzdesinin artmasıyla plastisite indeksi ve likit limitin azaldığı, büzülme limitinin ise arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği ise mermer tozu yüzdesindeki artışla birlikte azalmıştır.

Bhavsar ve Patel (2014), mermer tozunu farklı oranlarda (%30' dan %50' ye kadar) karıştırarak killi zeminlerin şişme özelliklerini incelemiş ve siyah pamuklu zeminin şişme potansiyelini ve büzülme özelliklerini azaltmadaki etkinliğini bildirmiştir. Koyu renkli pamuklu toprakta mermer tozu dozajının etkisi kaydedilmiştir. Artan mermer tozu dozajı ile plastisite indisi %28,35' ten %16,67' ye düşmüş, likit limit ise %8,06'dan %18,39'a yükselmiştir. Ek olarak, şişme potansiyeli %66,6' dan %20,0' ye düşmüştür.

Akinwumi ve Booth (2015), lateritik zeminin jeoteknik özelliklerini değiştirmek için ince mermer tozu ilavesiyle deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmanın amacı, tropikal ve subtropikal ülkelerde yaygın olarak bulunan lateritik zeminin plastisite, dayanıklılık ve geçirgenliği üzerinde ince atık mermer ilavesinin etkilerini araştırmaktır. Bu ülkelerde bulunan lateritik zeminlerin bazılarının mühendislik özellikleri, yol yapım malzemesi olarak kullanılması için standart gereklilikleri karşılamamaktadır. Mermer tozu, zemin numunesine kuru ağırlıkça sırasıyla %0, %2, %6 ve %10 oranlarında eklenmiştir. Zemin numunesi üzerinde gradasyon testleri yapılmıştır. Doğal zemine mermer tozu ilavesiyle (%2, %6 ve %10) zemin karışımları hazırlanmış, sırasıyla özgül ağırlık, Atterberg limitleri, kompaksiyon, CBR, serbest basınç ve geçirgenlik deneylerine tabi tutulmuştur. İyileştirilmiş numunelerin özgül ağırlığı, mermer tozu oranı arttıkça artmıştır. %10 mermer tozu eklendikten sonra, karışımın özgül ağırlığı doğal numune ile kıyaslayınca %4,4 artmıştır, plastisite indisi ise %49,4 oranında azalmıştır. Proktor deney sonucuna göre, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde artış görülmüştür, optimum su muhtevası ise mermer tozu oranı arttıkça azalmıştır. Mermer tozu ilavesiyle karışım numuneleri için hem kuru hem de ıslak CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kuru CBR sonucunda, mermer tozu içerikleri arttıkça CBR değerlerinde artış görülmüştür. %10 mermer tozu ilavesiyle, elde edilen sonuçlara bakıldığında doğal zemininkiyle karşılaştırıldığında CBR değerinde %205,6 artış olmuştur. Islak CBR değeri ise %10 mermer tozu ilavesiyle %360 artmıştır. Geçirgenlik katsayısı, %10 mermer tozu ilavesi ile %44,4 oranında azalmıştır.

Saygılı (2015) çalışmasında kullandığı kaolinit ve bentonit kilini, Türkiye'nin kuzeybatısındaki Çanakkale'de bulunan bir maden firmasından temin etmiştir. Atık

mermer tozu, Muğla, Yatağan'da bulunan bir mermer işletme fabrikasından toplanmıştır. Toplama işleminden sonra atık mermer tozu numuneleri öğütülmüş ve 100 numaralı elekten (0,149mm açıklık) geçen numuneler deneylerde kullanılmıştır. Mermer tozunun killi zeminler üzerindeki etkisini, zemin ağırlığının %0-30' u arasında değişen mermer tozu ekleyerek araştırmıştır. Numuneler, standart proktor sıkıştırma enerji seviyesi dahilinde optimum su içeriğinde sıkıştırılmıştır. Direkt kesme testleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı değişimleri, ödometre deneyleri ile ise şişme potansiyeli belirlenmiştir. Sıkıştırma işleminden sonra numuneler sarılmış ve deney tarihine kadar 21°C'de nem odasında kürlenmiştir. 7 ve 28 gün kürlenmiş numuneler, serbest basınç ve direkt kesme deneylerine tabi tutulmuştur. 28 ve 90 gün kürlenmiş numunelere, ödometre hücresinde serbest şişme deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak, karışımların optimum su içerikleri %16,5 ile %15,5 arasında değişmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ise 17,1 ile 18,0 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmekte olup, artan mermer tozu katkı yüzdesi ile artmıştır. Atık mermer tozu ilavesi ile kil numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri de artmıştır. Serbest basınç dayanımı değerleri 110 kPa (%5 ilave) 'dan 220 kPa (%30 ilave) 'a yükselmiştir. Artan atık mermer tozu yüzdesi, test edilen kil numunelerin şişme potansiyelini azaltmıştır. 7 ve 28 gün kürlenmiş numuneler direkt kesme deneyine tabi tutulmuş ve matristeki atık mermer tozu oranı arttıkça içsel sürtünme açıları artmıştır.

Rahman ve Nahar (2015) çalışmalarında yüzeysel temellerin taşıma gücü, baraj şevlerinin stabilitesi ve istinat duvarları üzerindeki yanal toprak basıncı gibi birçok geoteknik mühendislik probleminde önemli bir husus olan zeminin kayma mukavemeti davranışını incelemişlerdir. Mermer tozu, seçilen farklı iki kumlu zemin numunesinin kayma mukavemeti davranışını belirlemek için her iki numune üzerinde mermer tozunu değişen oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8, %10, %12, %14, %16 ve %18) kullanarak direkt kesme deneyleri yapmışlardır. Tüm numuneler üzerinde, kuru koşullarda, mermer tozu katmadan ve mermer tozu katarak direkt kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numune-1 ve Numune-2 için, mermer tozu yüzdesinin artmasıyla içsel sürtünme açısının azaldığı ve kohezyonun arttığı bulunmuştur. Çalışmada, kesme mukavemeti ile mermer tozu yüzdesi arasındaki ilişki gösterilmiştir ve her iki numune için de belirli bir değere kadar artan mermer tozu ile kesme mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Numune-1'in %15 mermer

tozu karıştırıldıktan sonra kayma mukavemeti düşerken, Numune-2'nin %14 mermer tozu karıştırıldıktan sonra kayma mukavemeti düşmüştür.

Bansal ve Sidhu (2016), kil zemine ilave edilen mermer tozunu %0 ila %30 arasında değiştirerek, zemin üzerindeki etkisini incelemiştir. Katkıların etkisiyle zeminde Likit limit %31,70'den %25'e düşüş gösterirken, plastik limit %17,69' dan %19,26' ya yükselmiştir. Ayrıca zeminin optimum su içeriğinin %18'den %14,10'a düştüğü ve maksimum kuru yoğunluğunun 1,738' den 1,884 gm/cc' ye yükseldiği kaydedilmiştir. CBR Değeri ise %2,46 'dan %6,07' ye yükselmiştir.

Babu ve Sharmila (2017) çalışmasında, endüstriyel mermer atıklar kullanarak yüksek plastisiteli zeminin stabilizasyonuna ilişkin deneysel çalışmalar yapmışlardır. Mukavemet özelliklerini belirlemek için zemin numunesine değişen oranlarda (%3, 6, 9, 12, 15) ve değişen kür sürelerinde (3, 7, 14 gün) mermer tozu ilave edip CBR ve tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Zeminin CBR değeri %9' a kadar mermer tozu ilavesiyle artmıştır, sonrasında ise azalmıştır. CBR değeri %9 mermer tozu ilavesinde %5,19' dan %8,83' e artış göstermiştir. 3 günlük, 7 günlük ve 14 günlük kürlenme süresi için %9 mermer tozu ilavesine karşılık gelen maksimum CBR değerleri sırasıyla %10,91, %13,50 ve %14,55 olarak elde edilmiştir. Tek eksenli basınç deneyinde ise, zeminin serbest basınç mukavemeti değeri 99,1 kN/m<sup>2</sup>' den 135 kN/m<sup>2</sup>' ye artış göstermiştir. 3 günlük, 7 günlük ve 14 günlük kür süreleri için maksimum değerler 197,1 kN/m<sup>2</sup>, 262 kN/m<sup>2</sup> ve 197,1 kN/m<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

Jha ve diğ. (2019), kullanılan malzemeleri karakterize etmek ve mermer tozunun kötü derecelenmiş kumun (SP) fiziksel davranışını iyileştirme potansiyelini anlamak için çeşitli deneysel çalışmalar yapmışlardır. Farklı oranlarda kuma eklenen %20 mermer tozu ile özgül ağırlık değerinde sürekli artış görülmüştür. Mermer tozu ilavesiyle özgül ağırlıktaki artış, mermer tozunun özgül ağırlık değerinin (yani 2,74) kumdan (yani 2,63) daha yüksek olmasına bağlanmıştır. Proktor deneyinden elde edilen sonuçlara bakıldığında, mermer tozu eklendiğinde saf kuma göre daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık ve daha düşük optimum su içeriği değerleri görülmüştür. Kum matrisi

içindeki boşluk oranı başlangıçta daha düşük mermer içeriği ile artarken, daha yüksek mermer tozu içeriği ile önemli ölçüde azalma gözlenmiştir.

Solanki ve Sharma (2020), kumul kumunun mühendislik özelliklerini iyileştirmek için mermer tozu ile deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu araştırma çalışmasında, kumul kumunun özelliklerini iyileştirilmek için atık mermer tozu ile %5 ila %30 oranında çeşitli karışımlar hazırlanarak, numuneler üzerinde Proctor, CBR, Atterberg limitleri gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Kumul kumunun %11 optimum su içeriğine karşılık gelen maksimum kuru yoğunluk değerinin  $1,79 \text{ g/cm}^3$  olduğu bulunmuştur. %30 mermer tozu eklenmesiyle, %11,20 su içeriğine karşılık gelen maksimum kuru yoğunluk değeri  $1,81 \text{ g/cm}^3$  olmuş, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde %1,21 artış görülmüştür. Maksimum kuru birim hacim ağırlıktaki artış yüzdesi, kumul kumunun özelliklerindeki iyileşmeyi göstermiştir. Kumul kumunun CBR değeri %13,18 olarak bulunmuştur. Elde edilen maksimum CBR değeri, %30 mermer tozu içeren karışımda %14,76 bulunmuştur. CBR değerindeki artış yüzdesi %10,70 olmuştur.

Sivrikaya ve diğ. (2020) kalsit mermer tozu ve dolomitik mermer tozunun kohezyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. %5, 10, 20, 30 ve 50 oranlarında atık kalsit mermer tozu ve dolomitik mermer tozu ile işlem görmüş ve işlem görmemiş numuneler üzerinde Atterberg limitleri, lineer büzülme, genleşme indeksi ve tek eksenli konsolidasyon testleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyi sonuçları, atık mermer tozlarının plastisite indeksini yüksek plastisiteli kil (CH) ve yüksek plastisiteli silt (MH) numunelerinde sırasıyla %49' dan %26' ya ve %21' den %9' a düşürerek zemin stabilizasyonunda etkili olduğunu göstermişlerdir.

Jain ve diğ. (2020) şişen zeminin jeoteknik özelliklerini iyileştirmek için mermer tozunun etkisini araştırmışlardır. Zemin için mermer tozu içeriğini ayarlamak üzere %80' e varan çok çeşitli mermer tozu içerikleri kullanılarak kapsamlı zemin mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk sonuçlar mermer tozunun zemin plastisitesini arttırmak ve şişme davranışını kontrol etmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Sonuçlar, mermer tozunun erken kür dönemlerinde zeminin dayanımını hızlandırdığını ve zeminin

dayanım davranışındaki optimum iyileşmenin %20 mermer tozu içeriği ile elde edildiğini göstermiştir.

Eltwati ve diğ. (2020), çalışmasında killi zemini iyileştirmek için katkı maddesi olarak mermer tozu kullanmıştır. Çalışma kapsamında, doğal zemine ağırlıkça %4, %8, %12, %16 ve %20 oranında mermer tozu eklenmiştir. İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zeminlerin performansını değerlendirmek için CBR, kompaksiyon ve direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Mermer tozunun çeşitli karışımlar için optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk üzerindeki etkisi incelendiğinde; maksimum kuru yoğunluk için en büyük değer 1,86 gr/cm<sup>3</sup> ile %8 mermer tozu ilave edildiğinde bulunmuştur. Doğal zemin ile karşılaştırıldığında, %8 mermer tozu içeriği ile karıştırılan zeminin maksimum kuru yoğunluğu, doğal zeminin maksimum kuru birim yoğunluğuna kıyasla %16 yükselmiştir. Mermer tozu içeriği arttıkça optimum su içeriğinde ise düşüş yaşanmıştır. California taşıma oranı deneyi, 5 farklı mermer tozu oranına sahip zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mermer tozu yüzdeleri arttıkça, karışımların CBR oranları yükselmiştir. Elde edilen maksimum CBR değeri %16,5 olup, %8 mermer tozu eklenmesiyle bulunmuştur. Kaydedilen en düşük değer ise %3,65 taşıma oranı ile doğal zeminde bulunmuştur. Direkt kesme deneyinde, doğal zemin, 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa'lık normal gerilmeler altında sırasıyla 18,33 kPa, 39,23 kPa ve 75,36 kPa ile en yüksek kesme dayanımına ulaşmıştır. Öte yandan, %8 oranında mermer tozu ile karıştırılan zeminde, bu değerler 49,12 kPa, 116,61 kPa ve 216,83 kPa bulunmuştur.

Abdelkader ve diğ. (2021) şişen zeminlerin iyileştirilmesinde atık mermer tozunun etkisini gözlemlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kil zemin örneği, Mısır'ın Qena şehri El Salheya köyünden alınmıştır. Mermer tozu, zeminin kuru ağırlığına göre farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20 ve %25) şişen zemin ile karıştırılmıştır. Sonuç olarak, likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi mermer tozu yüzdelerinin artmasıyla azalmıştır. Mermer tozu ilavesinin %0' dan %25' e çıkarılmasıyla sırasıyla likit limit %42,12' den %29,5' e, plastik limit %25' ten %18,8' e ve plastisite indeksi %17,12' den %10,7' ye düşmüştür. Ayrıca mermer tozu ilave yüzdesi %15'e ulaşana kadar Atterberg limitleri için azalma oranının daha fazla olduğu görülmüştür. Mermer tozu oranı artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri yükselmiştir. Mermer tozu %0'



dan %25' e çıkarıldığında maksimum kuru birim hacim ağırlık  $18,42 \text{ kN/m}^3$  ten  $20,2 \text{ kN/m}^3$  e çıkmıştır. Mermer tozu yüzdesindeki artışla birlikte zeminin optimum su içeriğinin azalmaya devam ettiği tespit edilmiştir. Mermer tozu %0' dan %25' e çıkarıldığında optimum su içeriği sırasıyla %13,1' den %11,2' ye düşmüştür. 7 günlük kürlenme süresi boyunca optimum su içeriklerinde çeşitli oranlarda mermer tozuyla karıştırılmış zemin numunesi üzerinde serbest basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Mermer tozu yüzdesindeki artışla birlikte zemin serbest basıncının artmaya devam ettiği görülmüştür. Mermer tozu %25' e kadar arttırıldığında serbest basınç dayanımı  $417 \text{ kPa}$ ' dan  $600 \text{ kPa}$ ' a yükselmiştir. Islak CBR deneyleri, 7 günlük kürlenme süresi boyunca maksimum kuru yoğunlukta ve optimum su içeriğinde farklı mermer tozu yüzdeleri ile gerçekleştirilmiştir. Mermer tozu oranı arttırılarak sunulan deney sonuçları, zeminin ıslak CBR değerinin artan mermer tozu ilavesi ile artmaya devam ettiğini göstermiştir. Mermer tozu %25' e kadar arttırıldığında ıslak CBR değeri %6,19' dan %12,9' a yükselmiştir. Doğal zemin ile kıyaslayınca CBR oranında %108' lik bir artış görülmüştür.

Alam ve diğ. (2021) araştırmalarında atık mermer tozunu kumlu zemini stabilize etmek amacıyla kullanmışlardır. Araştırma kapsamında kumlu zemine %2, %4, %6, %8, %12 ve %15 oranlarında mermer tozu ilavesi ile kum zemin stabilize edilmiş ve karışımlar üzerinde çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. CBR deneyleri ve serbest basınç deneyleri için numuneler 3, 7 ve 14 gün kürlenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında mermer tozu oranı arttıkça ve kür süresi arttıkça CBR değerlerinde ve serbest basınç değerlerinde artış görülmüştür. Çalışma sonunda mermer tozu ilavesi ile kumlu zeminin dayanımının iyileştiği gözlemlenmiştir.

Mahdi ve Nalbantoğlu (2021) yaptıkları çalışmada, gevşek kumu çimento ve farklı oranlarda mermer tozu ile karıştırmışlardır. İlk olarak, bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılarak zemin-bağlayıcı karışımları oluşturulmuş, daha sonra farklı oranlarda mermer tozu ilave edilmiştir. Mermer tozunun karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için karışımların oturma süresi, tane yoğunluğu, serbest basınç dayanımı deneyleri ile gerçekleştirilmiştir. Çeşitli numuneler üzerinde serbest basınç dayanımını belirlemek amacıyla her numune için 7 ve 28 günlük kür süresi dikkate alınmıştır. Serbest basınç dayanımının en yüksek değeri %10 mermer tozu

ilavesiyle elde edilmiştir. %10' dan fazla mermer tozu ilavesinin elde edilen serbest basınç dayanımı değerlerinde düşüşe neden olduğu görülmüştür.

Hamdy (2022) araştırmasında, göçebilir zeminin stabilize edilmesinde atık mermer tozunun kullanılma olasılığını araştırmıştır. Bu araştırmada incelenen mermer tozu katkı oranları ağırlıkça %0, 5, 10, 20 ve 30' dur. Deney sonuçları, %20 mermer tozu ilavesinin maksimum kuru birim hacim ağırlığında %9 artış, optimum su içeriğinde %29 azalma, zemin kohezyonunda %350 artış ve sürtünme açısında %350 artış sağladığını göstermiştir. Ayrıca farklı mermer tozu oranlarındaki zemin karışımlarında kür koşulları incelenmiştir. 15 gün kürlenmiş numunelerin, %20 oranında mermer tozu ilavesi ile, zemin kohezyonu %25, sürtünme açısı ise %22 oranında iyileşmiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

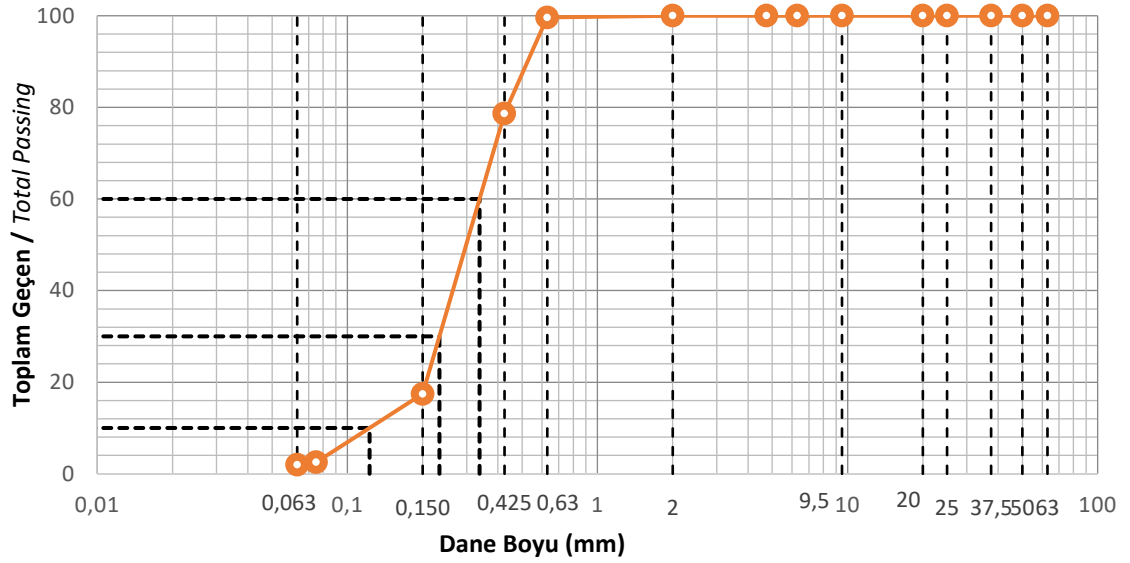
Bu çalışmanın temel amacı mermer tozu ve çimento ile ince kum zeminlerin iyileştirilmesidir. Çalışmada kullanılan üç malzemenin fotoğrafı Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu bölümde çalışma esnasında hazırlanan karışımlar, bu karışımların mühendislik özellikleri belirlemek amacıyla yapılan deneyler, kullanılan deney standartları ve numunelerinin notasyonları bildirilmiştir.



Şekil 3.1. İnce kum, Mermer tozu ve Çimento’ya ait görseller

#### 3.1.1. Zemin

Deneylerde kullanılan kum zemin temin edildikten sonra 105°C etüvde kurutulmuştur. Numune 0,60 mm ve 0,074 mm elekler ile elenmiştir, 0,074 mm üstü bu aralıkta kalan ince kum deneylerde kullanılmıştır. Çeşitli deneylerle zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla Özgül ağırlık (TS 17892-3), Elek analizi (TS 17892-4) ve Standart proktor (TS 1900-1) gibi deneyler standartlara uygun olarak yapılmıştır. İnce kum zeminin granülometri eğrisi Şekil 3.2’ de verilmiştir. Yıkamalı elek analizi metodu ile elde edilen sonuçlara bakıldığında, zemin Birleşmiş Zemin Sınıflandırmasına göre SP (kötü derecelenmiş kum) olarak sınıflandırılmıştır. İnce kum zeminin mühendislik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



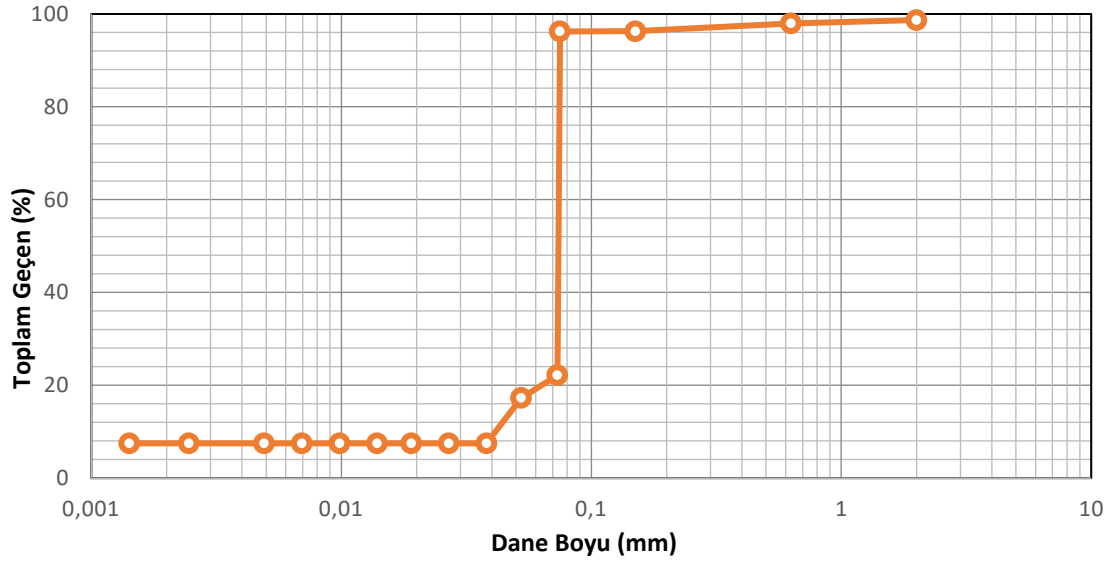
**Şekil 3.2.** İnce kum elek analizi sonucu

**Tablo 3.1.** İnce kum zeminin mühendislik özellikleri

Özgül ağırlık, $G_s$	2,60
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{kuru} (g/cm^3)$	1,438
Optimum su içeriği, $w_{opt} (%)$	19,30
Uniformluk katsayısı, $C_u$	2,753
Süreklilik katsayısı, $C_r$	1,315
Zemin sınıflandırması	SP

### 3.1.2. Mermer tozu

Çalışma kapsamında, kullanılan Mermer Tozu ve Çimento “Arısu Yapı” malzemelerinden temin edilmiştir. İnce ve beyaz renkli olan mermer tozu 2,80 özgül ağırlığa sahiptir. Mermer tozunun kimyasal özelliklerinin bulunması amacıyla kimyasal deneyler yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’ de sunulmuştur. Mermer tozunun granülometri eğrisi Şekil 3.3’te verilmiştir.



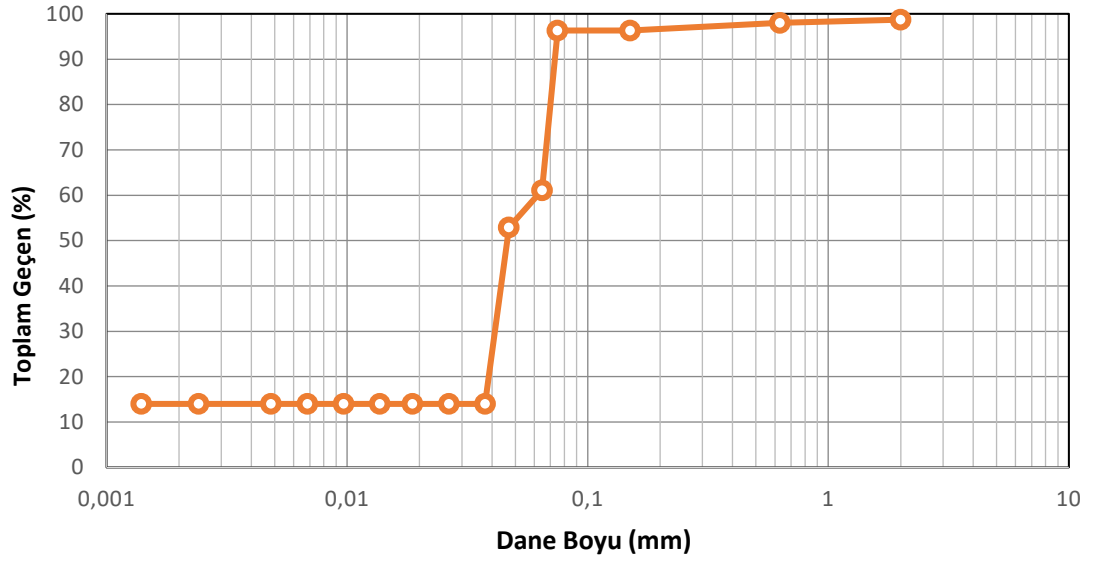
**Şekil 3.3.** Mermer tozunun granülometre eğrisi

**Tablo 3.2.** Mermer tozunun kimyasal özellikleri

Bileşen	Mermer Tozu
$SiO_2$ (%)	0,35
$Al_2O_3$ (%)	0,15
$Fe_2O_3$ (%)	0,06
$CaO$ (%)	54,21
$MgO$ (%)	0,31
$SO_3$ (%)	0,01
$Na_2O$ (%)	0,02
$K_2O$ (%)	0,03
$KK$ (%)	43,30
Rutubet (%)	0,00

### 3.1.3.Çimento

Deneylerde kullanılan Çimento “Arısu Yapı” malzemelerinden temin edilmiştir. Kullanılmış Portland 32,5R çimento 3,13 özgül ağırlığa sahiptir. Çimento’nun kimyasal özellikleri Tablo 3.3’ de verilmiştir. Çimentonun granülometri eğrisi Şekil 3.4’ te verilmiştir.



**Şekil 3.4.** Çimento'nun granülometre eğrisi

**Tablo 3.3.** Çimentonun kimyasal özellikleri

Bileşen	Çimento
$SiO_2$ (%)	24,28
$Al_2O_3$ (%)	5,93
$Fe_2O_3$ (%)	2,74
$CaO$ (%)	53,98
$MgO$ (%)	0,82
$SO_3$ (%)	2,61
$Na_2O$ (%)	0,66
$K_2O$ (%)	0,94
$KK$ (%)	6,34
Rutubet (%)	1,04

### 3.2 Yöntem

Bu çalışmada yapılan tüm deneyleri Türk Standartları (TS) ve Amerikan Test ve Malzeme Enstitüsü (ASTM) 'ye uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Karışımlar üzerinde Özgül ağırlık (TS 17892-3), Standart Proktor (TS 1900-1), California Taşıma Oranı (ASTM D1883), Düşen seviyeli permeabilite (ASTM 5084) ve Direkt Kesme (TS 17892-10)

deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma esnasında karışımların mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla hazırlanan numunelerinin notasyonları Tablo 3.4’ de bildirilmiştir.

**Tablo 3.4.** Deney numunelerine ait notasyonları

Karışımlar	Notasyon
% 100 Kum	100K
Kum+%5 Mermer Tozu + %3 Çimento	5MT3Ç
Kum+% 10 Mermer Tozu + %3 Çimento	10MT3Ç
Kum+% 15 Mermer Tozu + %3 Çimento	15MT3Ç
Kum+% 20 Mermer Tozu + %3 Çimento	20MT3Ç
Kum+% 25 Mermer Tozu + %3 Çimento	25MT3Ç
Kum+% 30 Mermer Tozu + %3 Çimento	30MT3Ç

### 3.2.1. Özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık deneyi ince malzemeler için piknometre metodu ile yapılmaktadır. Bu yöntem, 4,75 mm’lik elekten geçen malzemeler için uygundur. Deney başlamadan önce zemin numunesi 105 °C sıcaklıkta etüvde kurutulur. Önce 50 ml’lik piknometre boş hali ile tartılır, ardından içine huni yardımıyla 50 g numune dökülür (Şekil 3.5 ). Daha sonra, piknometrenin çizgisine kadar su ile doldurulur ve hava kabarcıkları çıksın diye 24 saat beklendikten sonra tartılır. Bu deney, her numune için en az iki defa tekrarlanır ve ortalaması alınarak özgül ağırlık değeri bulunur. Daha sonra, özgül ağırlık değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanır :

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

Eşitlikte,

$G_s$ : Özgül ağırlık

$M_1$  : piknometre ağırlığı

$M_2$  : piknometre + zemin ağırlığı

$M_3$  : piknometre + zemin + su ağırlığı

$M_4$  : piknometre + su ağırlığı’ dır.



**Şekil 3.5.** Özgül ağırlık deneyi için hazırlanan numuneler

### **3.2.2. Standart proktor deneyi**

Standart Proktor deneyi, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Öncelikle zemin numunesi etüvde 105 °C sıcaklıkta kurutulur. Daha sonra kurutulan zeminden yeterli numune alınır ve 4,75 mm'lik elekten geçen numune belli oranda su ile homojen bir şekilde karıştırılır. Standart Proktor kullanım şartlarına uygun çelik kalıp (Şekil 3.6) taban plakası takılmış olarak 1 gram hassasiyetle tartılır. Su ile karıştırılmış zemin, kalıba üç tabaka şeklinde sıkıştırılarak her tabakaya 2,5 kg tokmakla 25 serbest düşüş uygulanır. Sonrasında kalıbın üst yakası çıkarılıp, çelik cetvel ile düzgün bir şekilde üst kenarı kalıbının seviyesine kadar dikkatlice düzlenir. Sıkıştırılmış zemin numunesi kalıbıyla birlikte tartılır. Daha sonra, kalıbindan çıkartılan zemin numunesinin ortasından su içeriği alınır. Bu deney su oranı artırılarak en az beş değer verecek şekilde tekrarlanır. Deneyden elde edilen kuru birim hacim ağırlıklara karşı su içerikleri grafik olarak çizilir ve kompaksiyon eğrisi elde edilir. Bu eğriden, karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığa karşılık gelen optimum su içeriği belirlenir (TS 1900-1).





**Şekil 3.6.** Standart Proktor deneyi ve aletleri

### **3.2.3. California taşıma oranı**

California taşıma oranı zeminin taşıma gücünün belirlenmesi amacıyla, 20 mm'lik elekten geçen zemin numunesi ile yapılmaktadır. Öncelikle proktor deneyindeki gibi elekten geçen zemin numunesi 105 °C sıcaklıkta etüvde kurturulup sonra deneye başlanır. Taşıma gücü oranlarının belirlenmesi için karışımlar proktor deneyinden elde edilen optimum su içeriklerine göre hazırlanır.

Hazırlanan karışımlar, el küreği ile CBR kalıplarına konup 5 tabaka olarak sıkıştırılır. Sıkıştırma işleminden sonra kalıbın üst yakası çıkarılıp, çelik cetvel ile üst kenarı kalıbın seviyesine kadar dikkatlice düzlenir. Sıkıştırılmış zemin numunesi kalıpla birlikte tartılır. Hazırlanan karışımlar plastik streçe sarılıp 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük küre bırakılır (Şekil 3.7). Kür süresi tamamlanan numuneler üzerinde CBR cihazıyla (Şekil 3.8) hem üst hem de alt okuma alınıp taşıma oranları hesaplanır.



Şekil 3.7. Küre bırakılan numuneler



Şekil 3.8. CBR penetrasyon test cihazı

### 3.2.4. Direkt kesme deneyi

Direkt Kesme deneyi, zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısını deneysel olarak tespit etmektedir. Bu deney sabit düşey yük altında kare prizma örneklerin ortadan kesilmesine dayanır (Şekil 3.9). Numune haznesi birbirine üzerine oturan, eni ve boyu 60 mm x 60 mm, yüksekliği 20 mm (bazen 25 veya 30 mm) olan karesel veya çapı 60 mm, yüksekliği 20 mm olan dairesel iki rijit metal parçadan

oluşur. Kesme kutusu deneyi, kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için uygulanabilirse de daha ziyade kumlar için uygun bir deneydir.

Bu deney 3 zemin numunesinde farklı normal gerilmeler (örneğin 50 kPa 100 kPa 200 kPa) altında yapılmaktadır. Zemin örneğinin alt ve üst yüzeylerine kesme hareketine dik konacak şekilde iki metal plaka kullanır. Drenajlı deneylerde bu plakaların delikli tipi altına poroz taş yerleştirilir. Zemin numunelerine sabit düşey yükler uygulandıktan sonra yatay olarak sabit bir deformasyon uygulanır. Gittikçe artan yatay deformasyonlara zemin numunesi önce direnir, ancak nihayetinde numunenin ortasından geçen düzlem boyunca zemin kesilir ( $T_{max}$ ).



**Şekil 3.9.** Direkt kesme cihazı

Bu çalışmada, iki farklı sıklıkta (%30 ve %80) hazırlanan numuneler üzerinde direkt kesme deneyleri yapılacaktır. Numune ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla maksimum ve minimum boşluk oranları TS EN 1097-3'e göre bulunmuştur. Maksimum boşluk oranı, kuru kumun bir huni kullanılarak (V) 2830 cm<sup>3</sup> hacimli bir kalıba dökülmesiyle elde edilir. Kalıbı dolduran kum tartılır. Daha sonra aşağıdaki denklem ile maksimum boşluk oranı belirlenir :

$$e_{maks} = \gamma_s \gamma_w (V/W) - 1 \quad (3.2)$$

$e_{maks}$  : maksimum boşluk oranı

$\gamma_s$ : danelerin birim hacim ağırlığı

$\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı = 9.8 kN/m<sup>3</sup>

W : Kumun ağırlığı

V : kalıbının hacmi' dir.

Minimum boşluk oranını belirlemenin yöntemlerinden biri, kumun üzerine 14 kPa'lık dikey bir gerilim uygulayan bir ağırlıkla kumu titreştirmektir. Titreşim, 3600 Hz frekansta ve 0,33 mm genlikte 8 dakika boyunca çalıştırılır. Kumun ağırlığından ( $W_1$ ) ve titreşimden sonra kapladığı hacimden ( $V_1$ ) minimum boşluk oranı hesaplanır :

$$e_{min} = \gamma_s \gamma_w (V_1/W_1) - 1 \quad (3.3)$$

$e_{min}$  : minimum boşluk oranı

$\gamma_s$  : danelerin birim hacim ağırlığı

$\gamma_w$  : suyun birim hacim ağırlığı = 9.8 kN/m<sup>3</sup>

$W_1$  : Kumun ağırlığı

$V_1$  : kalıbının hacmi' dir.

Hazırlanan karışımlar, standart silindirik numune kalıplarına doldurulmuştur. Her numune katman katman doldurulmuş ve her katman dikkatlice sıkıştırılmıştır. %80 sıklıkta olan numuneler için katmanlar arasındaki boşluklar minimize edilmiştir. Numuneler, özel bir alet (kompaktör) kullanılarak sıkıştırılmıştır. Kompaktör, numuneye belirli bir basınç uygulayarak numuneyi sıkıştırmıştır. %80 sıklıkta olan numune için daha yüksek bir kompaksiyon basıncı kullanılırken, %30 sıklıkta olan numune için daha düşük bir kompaksiyon basıncı kullanılmıştır. Numunelerin her iki yüzeyi de düzgün ve paralel hale getirilmiştir. Son olarak, numuneler sıkıştırma cihazından çıkarılıp, deney için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.10).





**Şekil 3.10.** Direkt kesme deneyi için %80 sıklıkta hazırlanmış bir numune örneği

### **3.2.5. Düşen seviyeli permeabilite deneyi**

Yüksek potansiyelli alanlardan düşük potansiyelli alanlara kadar olan yeraltı suyu akışının hacmini ölçmek önemlidir. Zemindeki akışı ölçmek için, zeminin geçirgenliği bilinmelidir. İnce taneli ve iri taneli zeminler dahil olmak üzere tanecikli zeminin geçirgenliği laboratuvarında sabit bir geçirgenlik ölçer kullanılarak belirlenir. Düşen seviyeli permeametre deneyi ince taneli zeminler için uygundur, iri taneli zeminler için ise sabit seviyeli permeametre deneyi yapılmaktadır. Deney için, 4,75 mm elekten geçen zemin numunesi kullanılır. Deney numunesi olarak hazırlanan karışımlar optimum su içeriğinde hazırlanır, ve standart proktor sıklığında kalıba yerleştirilir. Numune, kalıp kenarından su sızıntısı olmayacak şekilde hazırlanır (Şekil 3.11). Numune sıkıştırıldıktan sonra, altına ve üstüne gözenekli diskler yerleştirilir (ASTM 5084).

Kalıp yere dikey olarak yerleştirilir. Permeametrenin üst tarafında bulunan cam tüp şeffaf plastik hortum su ile doldurulur (Şekil 3.12). Hortum içinde hava kalmayacak şekilde hazırlanır. Kalıbın üzerinde bulunan su çıkma deliği ile su seviye göstergesinin sıfır noktası arasındaki dikey mesafe ( $H_0$ ) ölçülür. Kalıbın alt ve üst başlıklarından sızıntı olmaması için yuvarlak bir lastik konularak kalıp yerleştirilir. Su kaçırmayacak şekilde somunları sıkılır. Kalıp ile su seviye göstergesinde bulunan tüp, şeffaf plastik hortum ile birleştirilir. Su, numuneden geçerek kalıbın üstünden çıktıktan sonra su seviyesi, su

seviye göstergesinin sıfır noktasına ayarlanır ve zaman (tarih, saat, dakika ve saniye olarak) kaydedilir. Bu deney, aynı zemin numunesi üzerinde en az iki defa tekrarlanır. Geçirgenlik katsayısı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır :

$$k = \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \quad (3.4)$$

Eşitlikte,

k: geçirgenlik katsayısı

a: tüp kesit alanı

A: numune kesit alanı

L: numune boyu

t: deney süresi

H<sub>1</sub>: su yüksekliği

H<sub>2</sub>: deney sonrası yüksekliği'dir



**Şekil 3.11.** Düşen seviyeli deney için uygun kalıplar



**Şekil 3.12.** Düşen seviyeli permeametre deney düzeneği

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan deneylerin sonuçları irdelenmiştir. Şahit numuneye ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25, %30 mermer tozu ve sabit %3 çimento katılıp zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Hazırlanan karışımlar ve doğal zemin, öncelikle özgül ağırlık ve standart proktor deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen optimum su içeriğinde, tüm karışımlar için farklı kür sürelerinde CBR deneyi yapılmıştır.. Ardından, karışımların kohezyon, içsel sürtünme açısı ve geçirgenlik katsayıları bulunması için direkt kesme deneyi ve düşen seviyeli permeabilite deneyi gerçekleştirilmiştir.

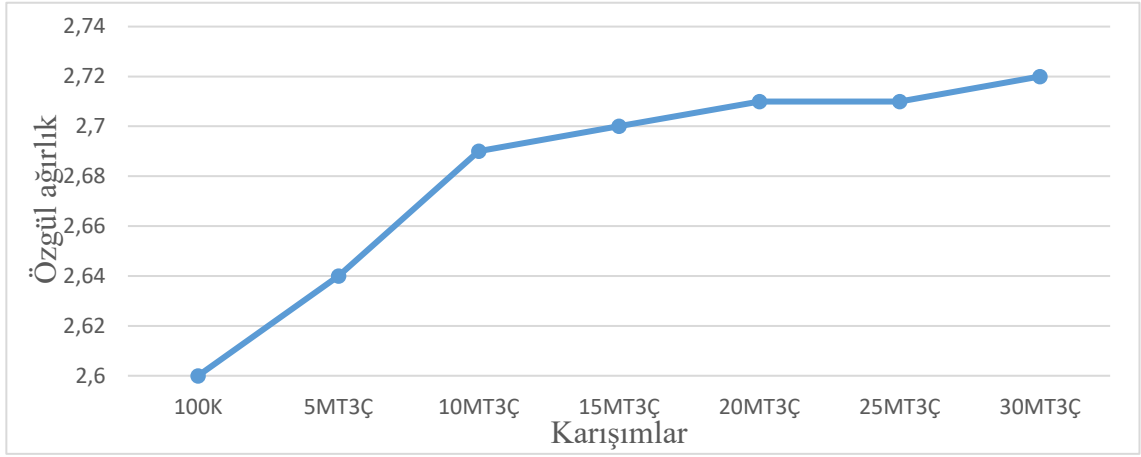
##### 4.1 Özgül ağırlık deney sonuçları

Karışımların özgül ağırlık deneylerinin sonuçları Tablo 4.1' de verilmiştir. Tüm karışımlar için Özgül ağırlık değerleri 2,60-2,72 arasında elde edilmiştir. Mermer tozu oranı yükseldikçe özgül ağırlık değerlerinde artış gözlenmiştir (Şekil 4.1). %10 mermer tozu olan karışımda optimum değere ulaşılmıştır, daha sonra eklenen mermer tozunun karışımların özgül ağırlığına etkisi 0,01 mertebesinde olmuştur. Optimum karışımın özgül ağırlığını doğal numune ile kıyaslayınca %4,61 artış görülmüştür. Mermer tozunun ve çimentonun özgül ağırlık değerlerinin kumdan daha yüksek olmasının bu artışa neden olduğu düşünülmektedir.

**Tablo 4.1.** Karışımların özgül ağırlık değerleri

Karışımlar	100K	5MT3Ç	10MT3Ç	15MT3Ç	20MT3Ç	25MT3Ç	30MT3Ç
Özgül ağırlık	2,60	2,64	2,69	2,70	2,71	2,71	2,72





**Şekil 4.1.** Karışımların özgül ağırlık grafiği

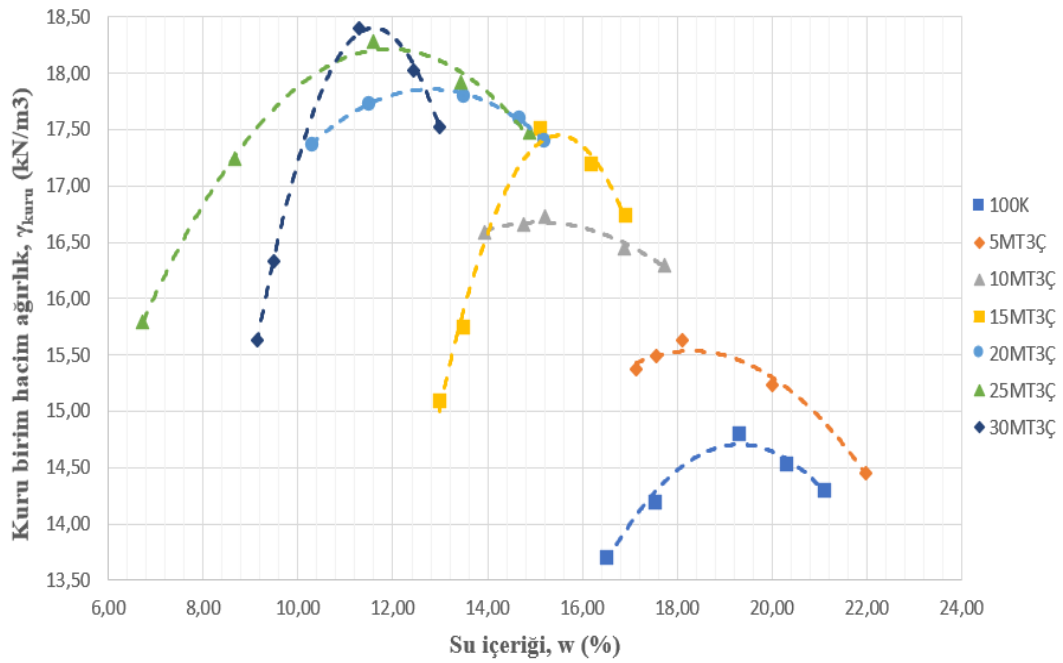
#### 4.2 Standart proktor deney sonuçları

Katkısız ince kum dahil olmak üzere 7 karışım üzerinde standart proktor deneyleri yapılmıştır. Farklı oranlarda mermer tozu ilavesiyle değişen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevaları Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Deneylerin sonuçlarına göre, mermer tozu ve çimento ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlık artmakta, optimum su içeriği ise azalmaktadır. En yüksek optimum su içeriği değeri %19,3 ile 100K no’lu karışımda, en düşük değer ise %11,3 ile 30MT3Ç no’lu karışımda gözlemlenmiştir (Tablo 4.2). Yani, mermer tozu ilavesiyle karışımların optimum su içeriğinde ciddi bir düşüş olmuştur. Mermer tozunun su tutuculuğu olmadığından ve ısınmadan kaynaklı oluşan su kaybından dolayı su içeriklerinde düşme yaşanmıştır. Jha ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada kötü derecelenmiş kum’a mermer tozu ilave etmiş ve benzer şekilde karışımların su içeriklerinde düşme gözlemlenmiştir.

Maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında ise mermer tozu ilavesiyle düzenli bir artış görülmüştür. Elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri  $15,63 \text{ kN/m}^3$  ve  $18,40 \text{ kN/m}^3$  arasında olmuştur. %30 mermer tozu ilavesiyle maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde doğal zemine kıyasla %24,40 artış görülmüştür. Yılmaz ve Erzin (2004) çalışmasında zemin stabilizasyonunda maksimum kuru birim hacim ağırlık için önerilen sınır değer ( $>16 \text{ kN/m}^3$ ), 5MT3Ç no’lu numune hariç diğer tüm karışımlar tarafından sağlanmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlık artışı mermer tozu ve çimento ilavesiyle ilgilidir. Mermer Tozu ve çimentonun ince kum’a ilavesiyle kumda boşluk oranı azalmış dolayısıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık artışı için uygulanan

kompaksiyon çabası da azalmıştır (Sabat, 2012). Waheed ve diğ. (2021), benzer bir çalışmada Mermer tozunun yüksek CaO<sub>2</sub>+ iyonik içeren bir malzeme olduğu için ince kum ve çimentonun, Mermer Tozu ile reaksiyona girdiğinde katyon değişimi oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca şekilden de görüleceği gibi %25 mermer tozu ilavesinden sonra karışım numunelerinin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları sabitlenmiştir, yani %25 ve %30 mermer tozu karışımları yaklaşık aynı değerleri vermiştir.



**Şekil 4.2.** Karışımların kuru birim hacim ağırlık - su içeriği grafikleri

**Tablo 4.2.** Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri

Karışımlar	Maksimum kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{kuru}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Optimum su içeriği, w (%)
100K	14,79	19,3
5MT3Ç	15,63	18,1
10MT3Ç	16,67	15,2
15MT3Ç	17,15	15,1
20MT3Ç	17,82	13,5
25MT3Ç	18,23	11,5
30MT3Ç	18,40	11,3

### 4.3 California Taşıma Oranı Denev Sonuçları

Hazırlanan 7 farklı karışım üzerinde, 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletilerek yapılan CBR deneyleri sonuçları bu bölümde irdelenmiştir. Taşıma gücü oranlarının belirlenmesi için hazırlanan karışımlarda Proktor deneyinden elde edilen optimum su içerikleri kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar, ASTM'ye göre uygun olarak CBR kalıplarına konup 5 tabaka olarak sıkıştırılmıştır. Ardından, her numune plastik strele sarılıp 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük küre bırakılmıştır. Kr süresi tamamlanan numuneler üzerinde CBR cihazıyla hem üst hem de alt okuma alınmıştır, CBR okumaları Şekil 4.3'de verilmiştir. CBR eğrileri ise Şekil 4.4'te gösterilmiştir. CBR deneylerinin yk-penetrasyon eğrileri ise Şekil 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.3'te karışımların 1, 7 ve 28 günlük CBR değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, mermer tozu oranı yükseldikçe karışımların taşıma oranları artmıştır, dolayısıyla zemin karışımlarının taşıma gücü iyileşmiştir. Ayrıca, hazırlanan her numunede, kr süresi ile taşıma gücü yüzdesinde artış olduğu grlmştir.

Mermer tozu ilavesi ile tüm karışımlarda 1 günlük CBR değerlerinin arttığı görülmektedir. 1 günlük kür süresi tamamlanan karışımlar için CBR değerleri %20,76 ile %100,30 arasında bulunmuştur. En yüksek değer (%100,30) 30MT3 no'lu karışımda tespit edilmiştir. Doğal zemin ile kıyasla CBR değerinde 1 günlük kür sonunda %448 artış grlmştir. 7 ve 28 günlük kür süresi tamamlanan karışımlar için de, benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. 7 günlük kür sonunda, elde edilen CBR değerleri bakıldığında en yüksek değer (%169,46) 25MT3 no'lu karışımda tespit edilmiştir. Doğal zeminle kıyaslayınca %718 artış grlmştir. 30MT3 no'lu karışımda yani %30 mermer tozu oranı için CBR değerinde (%128,02) düşüş yaşanmıştır.

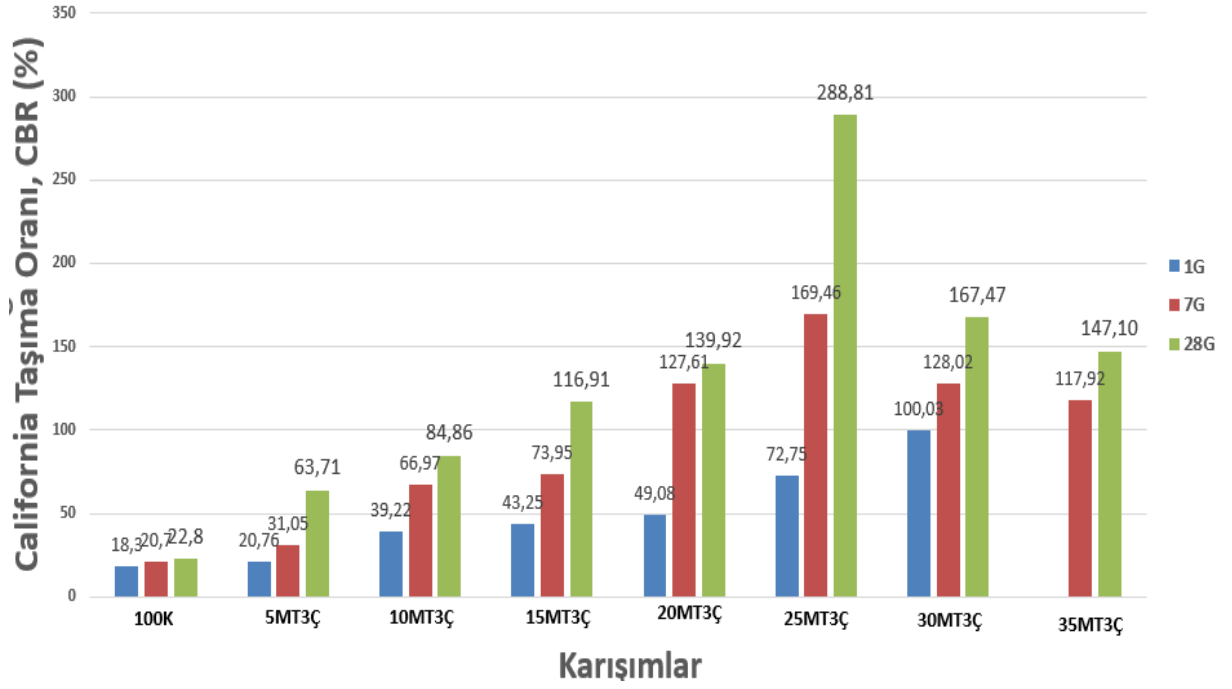
En yüksek CBR oranı, 28 günlük kür süresi sonunda 25MT3 no'lu numunede tespit edilmiştir. 30MT3 no'lu karışımda 25MT3 numune'ye göre 7 günlük ve 28 günlük kür sürelerinde CBR değerlerinde düşüş yaşanmıştır; 7 günlük karışımlarda taşıma gücü yüzdesi %169,46'dan %128,02'e düşmüş, 28 günlük numunede ise CBR oranı %288,81'ten %169,46'e dşmştir. En yüksek CBR oranı, %25MT3 no'lu karışımda 28 gün kürlenmeden sonra elde edilmiş, taşıma oranında doğal zemine kıyasla %1166,71 artış grlmştir. %30 mermer tozu ilavesi ile CBR oranlarında gözlemlenen

düşmeyi irdelemek için %35 mermer tozu ilavesiyle de 7 ve 28 günlük numune üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında 7 ve 28 günlük numuneler için CBR değerleri sırasıyla , %117,92 ve %147,10 bulunmuştur. Yani %30 mermer tozu ilavesinde olduğu gibi %35 mermer tozu ilavesiyle de CBR değerlerindeki düşüş devam etmiştir. Bu durumda en iyi dayanımın %25 mermer tozu ilavesinde elde edildiğini söyleyebiliriz. Mermer tozu yüzdesi %25'i geçtiğinde zeminin taşıma kapasitesinin azalması, daha fazla ilave edilen mermer tozunun mermer-ince kum iyileştirilmesinde etkili olmadığını göstermektedir.

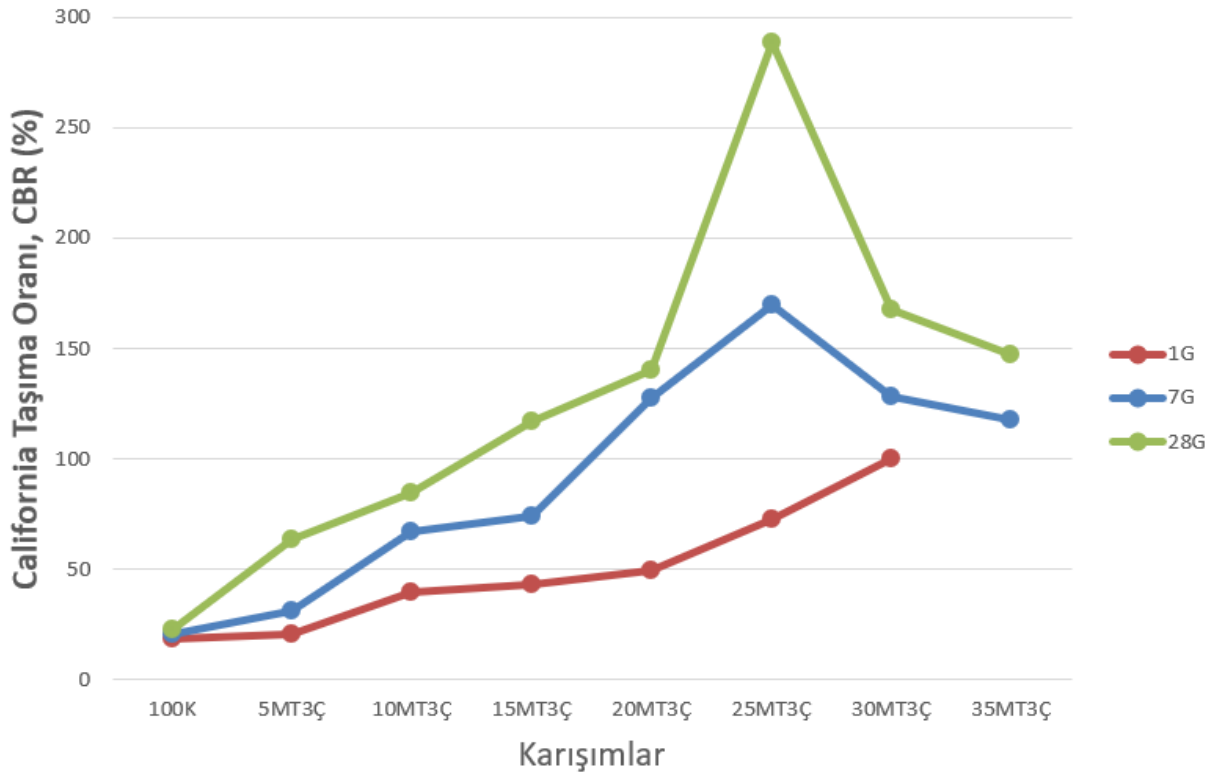
Zeminlerin taşıma gücü artışı, mermer tozundaki kireç ile zemindeki amorf silis ve alümina arasındaki puzolanik etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Ana tepki olan kimyasal hidrasyon, parçacıkları birbirine bağlayan ve zemini güçlendiren ek çimentolu malzemenin oluşmasına yol açmıştır (Muntohar ve diğ., 2013). Ayrıca bu durum, mermer tozu ile zemin taneleri arasındaki boşlukların dolmasıyla ve dolayısıyla zeminin maksimum kuru yoğunluğunun artmasıyla da ilişkilendirilebilir.

**Tablo 4.3.** Karışımların ait CBR değerleri

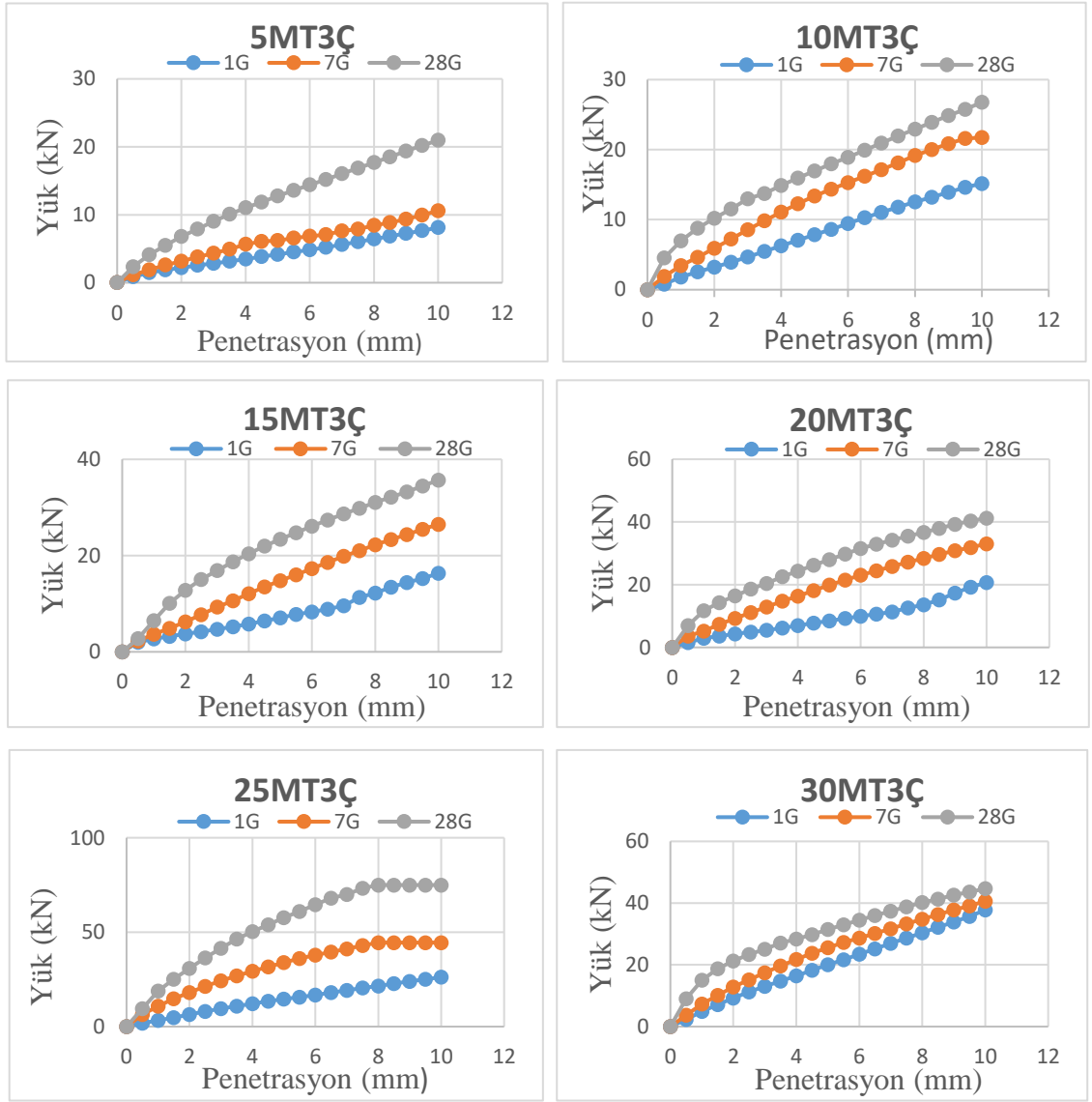
Karışımlar	CBR (%)		
	1 Gün	7 Gün	28 Gün
100K	18,30	20,70	22,80
5MT3Ç	20,76	31,05	63,71
10MT3Ç	39,22	66,97	84,86
15MT3Ç	43,25	73,95	116,91
20MT3Ç	49,08	127,61	139,92
25MT3Ç	72,75	169,46	288,81
30MT3Ç	100,30	128,02	167,47
35MT3Ç	-	117,92	147,10



Şekil 4.3. Karışımlara ait CBR taşıma oranlarının grafiği



Şekil 4.4. Karışımlara ait CBR taşıma oranlarının eğrileri



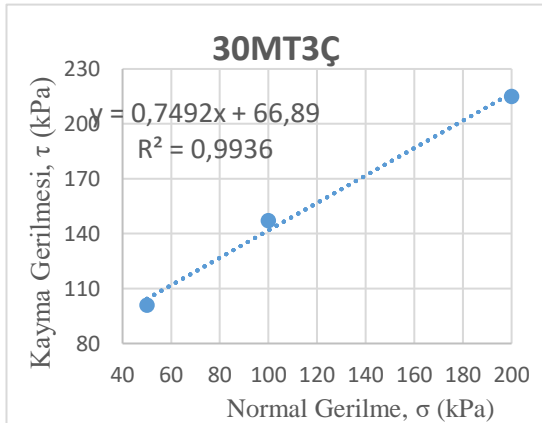
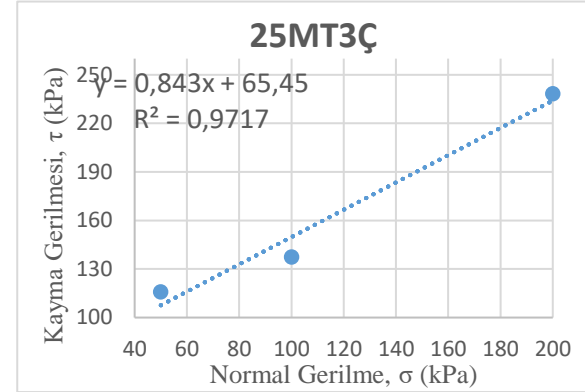
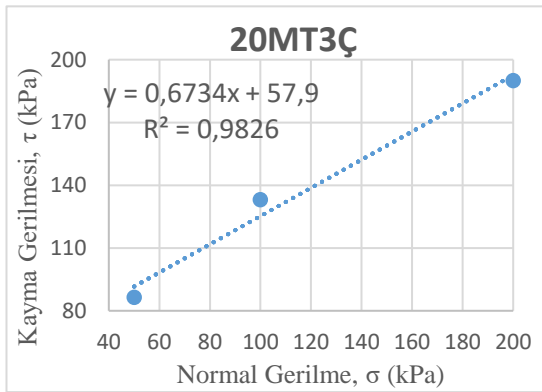
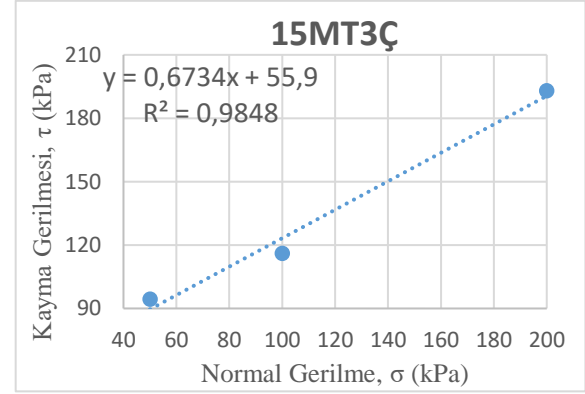
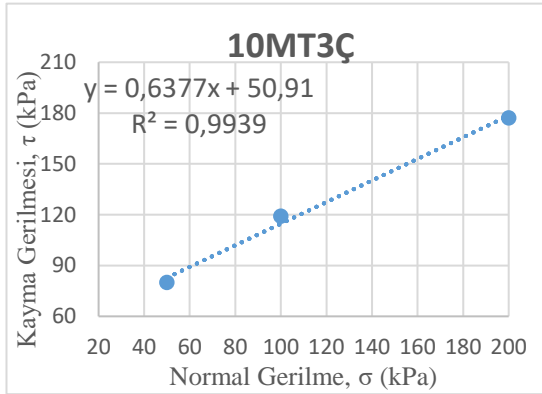
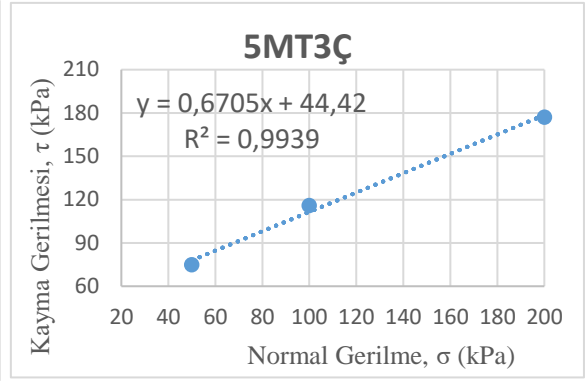
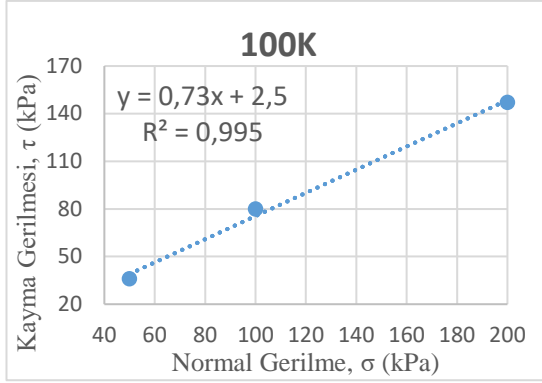
**Şekil 4.5.** Karışımlara ait CBR grafikler

#### 4.4 Direkt kesme deney sonuçları

Karışımlar üzerinde Direkt kesme deneyleri yapılarak, karışımların kohezyon ve içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Deneylerde tüm karışımlar %30 ve %80 olarak iki farklı sıklıkta hazırlanmış, TS 17892-10 standardına göre uygun bir şekilde deneyler yapılmıştır. %30 ve %80 sıklıkta hazırlanan karışımlara 100, 200 ve 400 kPa düşey yükler altında, 0,5 mm/s hızla yatay yük uygulanmıştır.

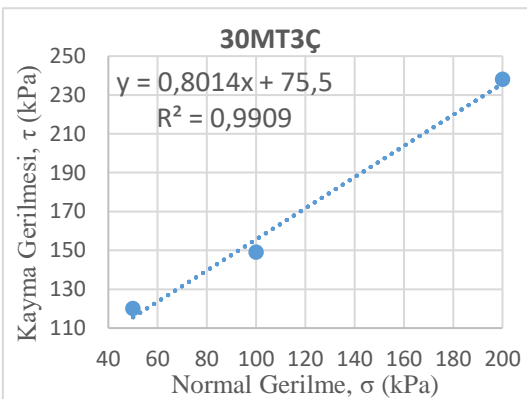
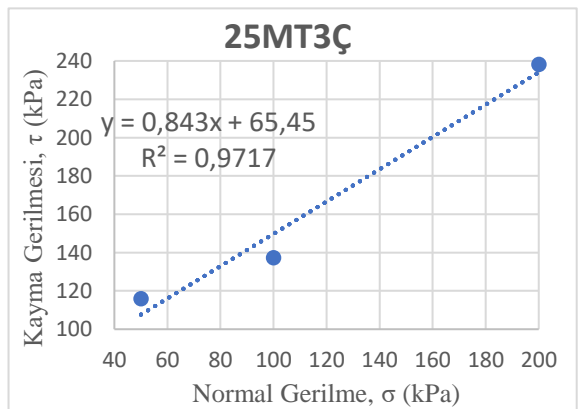
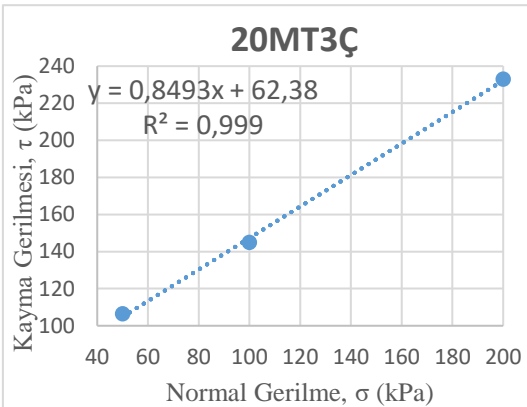
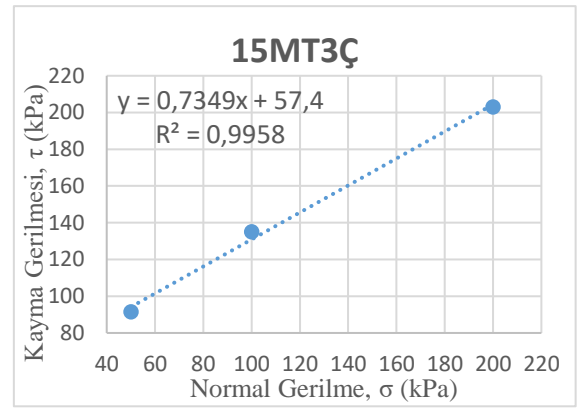
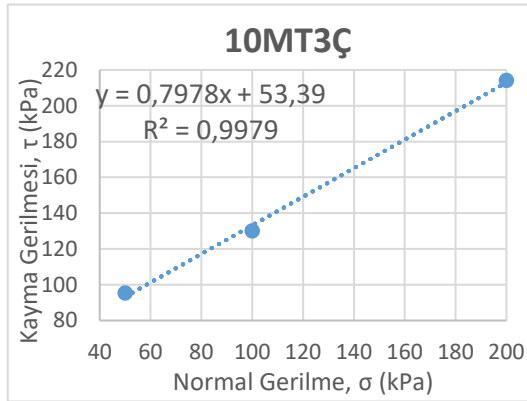
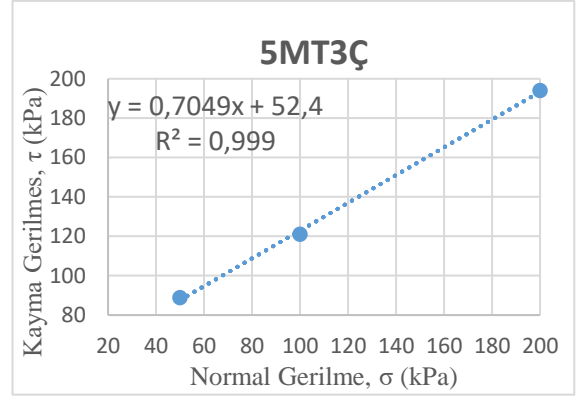
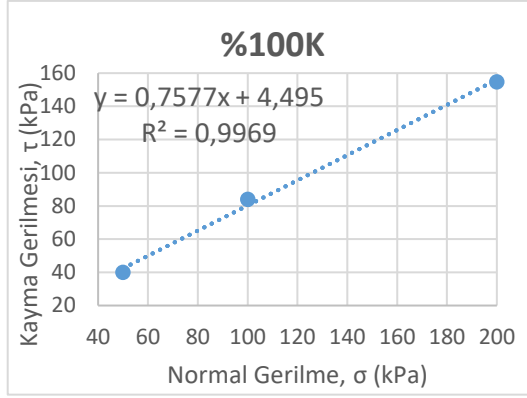
Deney esnasında kullanılacak numune miktarı minimum boşluk oranı ( $e_{min}$ ) ve maksimum boşluk oranına göre ( $e_{max}$ ) hesaplanmıştır. Elde edilen  $e_{min}$  ve  $e_{max}$  değerleri (1,042 ve 0,758) ve istenilen rölatif sıkılığa göre boşluk oranı ( $e$ ) bulunmuştur. Her karışıma ait numune miktarı ve optimum su ilavesiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de her iki sıklık için sırasıyla verilmiştir. %30 ve %80 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve yatay deformasyon grafikleri Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir. Grafiklerden elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Tablo 4.4’ te verilmiştir. Mermer tozu ilavesi ile karışımların kohezyon ve sürtünme açısı değerlerindeki değişim grafikleri ise her iki sıklık için Şekil 4.10 ve 4.11’de sırasıyla verilmiştir.

Yapılan deneylerde, %80 sıklıkta hazırlanan katkıli karışımların kohezyon değerleri 52-75,5 kPa arasında bulunmuş olup, içsel sürtünme açısı değerleri  $35^\circ$  ile  $40^\circ$  arasında değişmektedir. %30 sıklıkta hazırlanan karışımlar için ise kohezyon değerleri 44,42 - 66,89 kPa arası bulunmuş olup, içsel sürtünme açısı değerleri  $34^\circ$  ile  $37^\circ$  arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, %30 ve %80 sıklıkta hazırlanan karışımlarda mermer tozu oranındaki artışa bağlı olarak kohezyon değeri pozitif yönde artış göstermiştir. Kohezyon değerindeki artışın sebeplerinden biri, kendi başına kohezyona sahip olmayan kötü derecelenmiş kumun, katkıların kimyasal özellikleri nedeni ile kohezyon artışın neden olmasıdır. Bir diğer sebep ise, katkı malzemelerinin kumun gözenekli yapısını doldurarak ve aynı zamanda suyla tepkimeye girerek kohezyon oluşturmalarıdır. %30 sıklıkta ve %80 sıklıktaki karışımların kohezyon değerinde katkısız numuneye göre en yüksek artışlar 66,89kPa ve 75,50kPa ile 30MT3Ç karışımında gözlenmiştir, bu durumda katkı miktarındaki artışın kohezyonu düzenli olarak arttırdığını söyleyebiliriz. Karışımlardan elde edilen içsel sürtünme açısı,  $\phi$  ise çok fazla değişmemekle birlikte, en yüksek değere , %30 sıklıkta 25MT3Ç karışımında, %80 sıklıkta ise 20MT3Ç karışımında ulaşılmıştır. İçsel sürtünme açısındaki değişim kum ve mermer tozunun hazırlanan numune içindeki dağılımından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

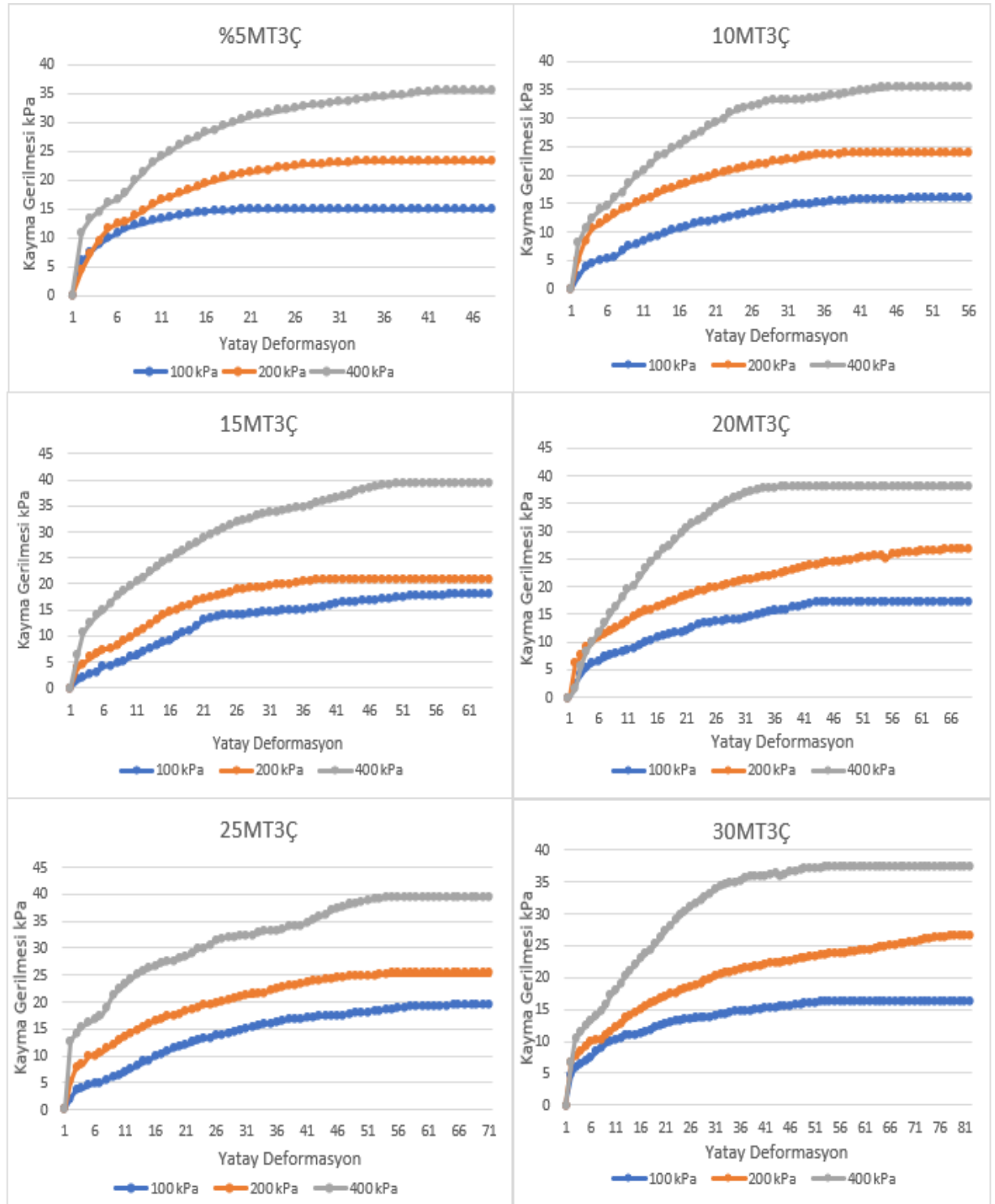


**Şekil 4.6.** %30 sıklılıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve normal gerilme grafikleri

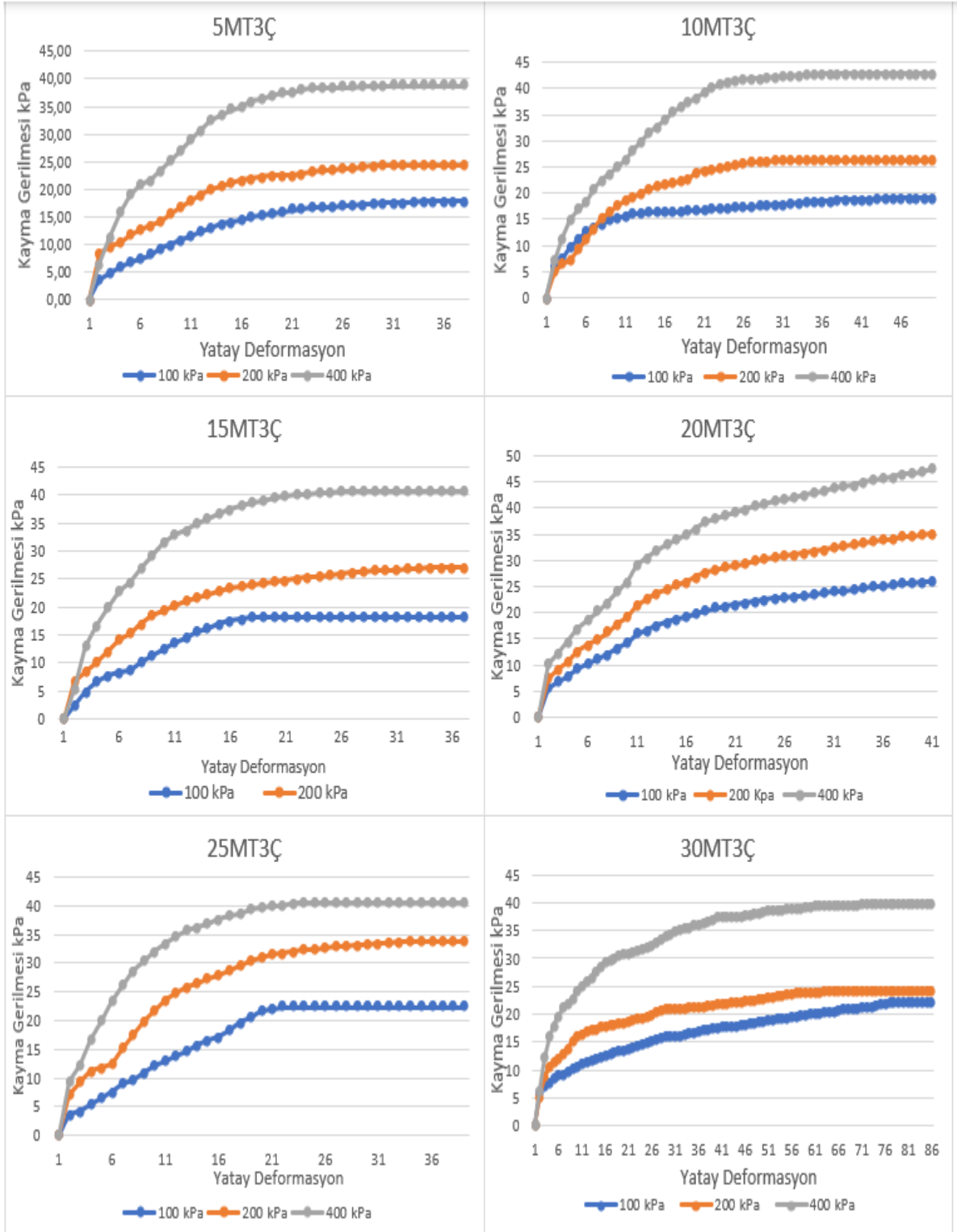




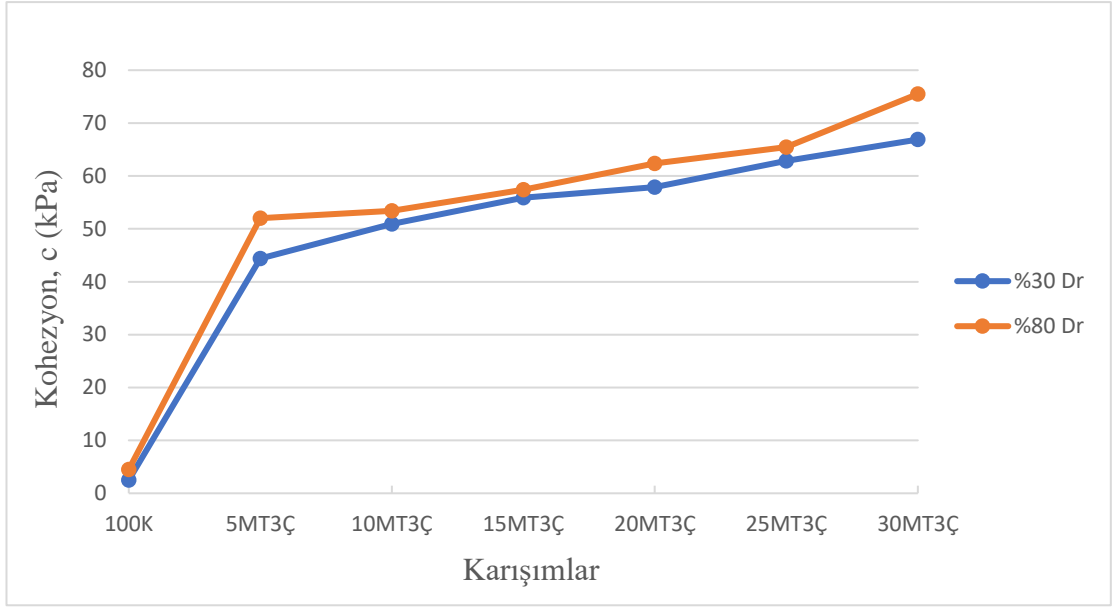
**Şekil 4.7.** %80 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve normal gerilme grafikleri



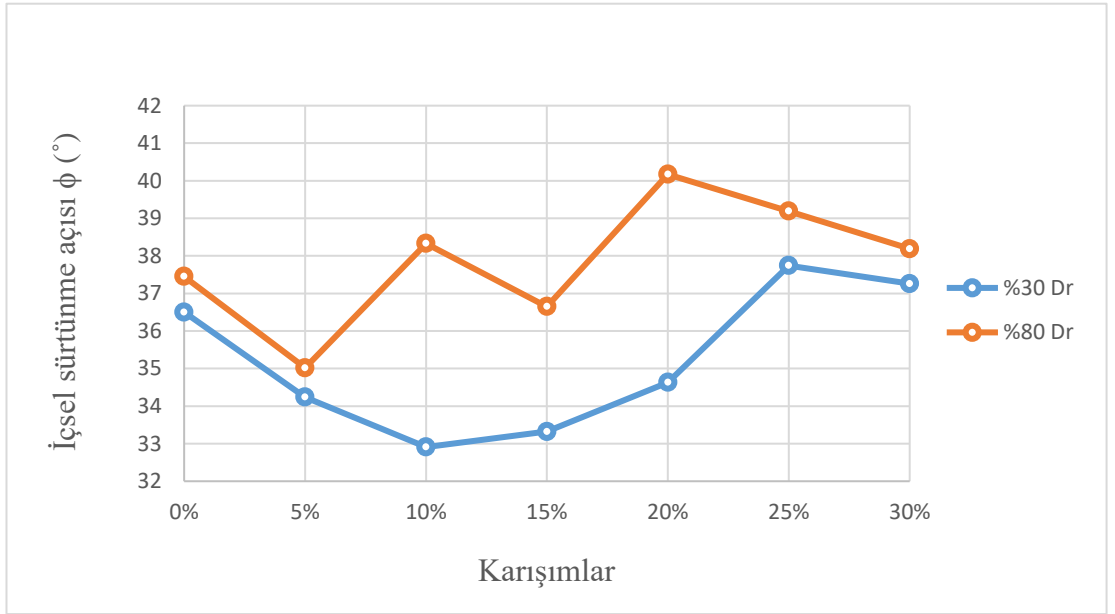
**Şekil 4.8.** %30 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve yatay deformasyon grafikleri



Şekil 4.9. %80 sıklıkta hazırlanan karışımlara ait kayma gerilmesi ve yatay deformasyon grafikleri



**Şekil 4.10.** %30 ve %80 sıklık için karışımlara ait kohezyon grafiği



**Şekil 4.11.** %30 ve %80 sıklık için karışımlara ait içsel sürtünme açısı grafiği

**Tablo 4.4.** Karışımların kohezyon ve sürtünme açısı değerleri

Karışımlar	$D_R(\%)$			
	30		80	
	c (kPa)	$\phi$ (°)	c (kPa)	$\phi$ (°)
100K	2,50	36,50	4,50	37,45
5MT3Ç	44,42	34, 24	52,04	35,02
10MT3Ç	50,91	32,91	53,39	38,33
15MT3Ç	55,90	33,32	57,40	36,65
20MT3Ç	57,90	34,63	62,38	40,17
25MT3Ç	62,88	37,74	65,45	39,19
30MT3Ç	66,89	37,26	75,50	38,19

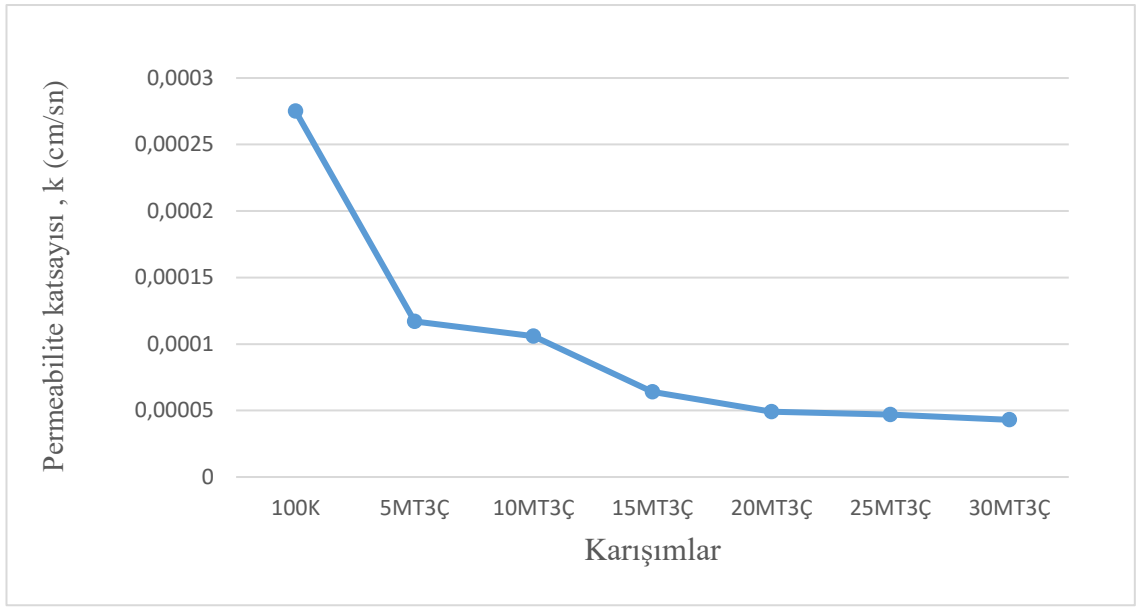
#### 4.5 Düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları

Karışımların geçirgenlik katsayısını bulmak amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Zemin numuneleri homojen bir şekilde karıştırılarak proktor deneyinden elde edilen optimum su içerikleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneleri üzerinden yapılan deneyler ASTM 5084 standart'a göre yapılmıştır. Elde edilen geçirgenlik katsayıları Tablo 4.5' te verilmiştir. Mermer tozu ilavesi yüzdesindeki artışa bağlı olarak, permeabilite katsayısındaki düşüş grafiksel olarak Şekil 4.12' de gösterilmiştir.

**Tablo 4.5.** Karışımların geçirgenlik katsayıları

Karışımlar	Zaman (sn)	Permeabilite katsayısı (cm/sn)
100K	205	$2,75 \times 10^{-4}$
5MT3Ç	489	$1,17 \times 10^{-4}$
10MT3Ç	540	$1,06 \times 10^{-4}$
15MT3Ç	895	$0,64 \times 10^{-4}$
20MT3Ç	1175	$0,49 \times 10^{-4}$
25MT3Ç	1206	$0,47 \times 10^{-4}$
30MT3Ç	1323	$0,43 \times 10^{-4}$

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, mermer tozu ilavesi ile farklı zemin numunelerinde suyun infiltrasyon süresinin arttığı görülmüştür, dolayısıyla geçirgenlik katsayısı düşmüştür. 5MT3Ç ve 10MT3Ç no'lu numunler için geçirgenlik katsayısı 0,000117 cm/sn ve 0,000106 cm/sn bulunmuştur. Diğer numuneleri için de benzer bir düşüş görülmüştür. En düşük değer, 30MT3Ç no'lu numune için 0,000043 cm/sn olarak bulunmuştur yani doğal zeminle kıyasla bu karışımın geçirimlilik katsayısı 6.4 kat azalmıştır. Bunun nedeni, mermer tozunun ve çimentonun zemin arasındaki boşlukları doldurarak azaltması, dolayısıyla geçirgenlik katsayısını düşürmesidir.



Şekil 4.12. Karışımlara ait permeabilite katsayısı grafiği

## 5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, mermer tozu ve çimentonun ince kum zeminin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İnce kum zemine stabilizatör olarak sabit oranda çimento (%3) ve farklı oranlarda mermer tozu (%5-%30) eklenerek karışımların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, Özgül ağırlık, Standart proktor, California taşıma oranı (CBR), Düşen Seviyeli Permeabilite, Direkt Kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Temin edilen kötü derecelenmiş kum olan doğal malzemenin stabilizasyonunda, %3 çimentoya ilaveten farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) mermer tozu ilave edilerek toplam 7 tane karışım hazırlanmış ve karışımların mühendislik özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

- Özgül ağırlık değerleri mermer tozu oranı arttıkça yükselmiştir. En yüksek özgül ağırlık değeri 30MT3Ç no'lu karışımında tespit edilmiştir. Bu durum mermer tozu ve çimentonun özgül ağırlık değerlerinin şahit numuneden daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.
- Yapılan Standart Proktor deneyinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri mermer tozu ilavesiyle her oranda artmıştır. En düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık doğal zeminde görülürken ( $14,79 \text{ kN/m}^3$ ), en yüksek değer ( $18,40 \text{ kN/m}^3$ ) ise %30 mermer tozu ilavesiyle bulunmuştur. Maksimum kuru birim hacim ağırlıktaki artışı nedeni; mermer tozunda yüksek oranda  $\text{CaO}_2+$  olması dolayısı ile ince kum ile reaksiyona girdiği zaman katyon değişimi oluşmasıdır. Optimum su içeriği değerlerinde ise mermer tozu ilavesiyle her oranda düşüş yaşanmıştır. En yüksek değer (%19,1) doğal zeminde bulunmuş olup, en düşük değer (%11,3) ise 30MT3Ç no'lu karışımında tespit edilmiştir.
- CBR değerleri, mermer tozu oranındaki artış ve özellikle kürlenme süresi ile birlikte artmıştır. Kürlenme süresi arttıkça her karışım için taşıma oranlarında artış görülmüştür. 1 günlük karışımların CBR deneyi sonucunda en yüksek taşıma oranı (%100,03) 30MT3Ç no'lu numunede bulunsada, 7 günlük ve 28 günlük sonuçlarda en yüksek CBR oranları (%169,46 ve %288,81) 25MT3Ç no'lu karışımında tespit edilmiştir. 7 günlük ve 28 günlük kürlenmede 25MT3Ç no'lu

karışımında taşıma oranlarında doğal zemin numunesine göre sırasıyla 6 ve 9 kata varan dayanım artışları görülmüştür. 30MT3Ç no'lu karışımında ise 25MT3Ç no'lu karışıma kıyasla 7 ve 28 günlük kürlenmede CBR değerlerinde sırasıyla %76 ve %58 oranlarında azalma görülmüştür.

- Direkt kesme deneyinde %30 ve %80 sıklıkta elde edilen kohezyon değerleri mermer tozu katkısı ile iyileştirilmiş olup, içsel sürtünme açısı ise fazla değişmemiştir. %30 sıklık ve %80 sıklıkta hazırlanan numunelerde en yüksek kohezyon değeri sırasıyla 66,89 kPa ve 75,5 kPa ile %30 Mermer tozu oranı ilavesiyle bulunmuştur. Mermer tozu ve çimentonun zemin boşluklarını doldurup daha kararlı bir yapı oluşturması sayesinde kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinde artış olmuştur.
- Mermer tozu ilavesiyle, geçirgenlik katsayısı katkılı tüm karışımlarda düşmüştür. En düşük değer ise 30MT3Ç no'lu karışımında bulunmuştur. Mermer tozu, kum zemin taneleri arasındaki boşluğu azaltmakta başarılı olmuş, dolayısıyla geçirgenlik katsayısının düşmesine neden olmuştur. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, 30MT3Ç no'lu karışımında doğal zeminle kıyasla geçirgenlik katsayısı 6,4 kat azalmıştır.

Yapılan deneysel çalışmaların neticesinde, kötü derecelenmiş ince kumun stabilizasyonunda mermer tozunun katkı maddesi olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Bütün deneylerde, mermer tozu oranı artıkça karışımlar daha stabil hale gelmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, farklı dane boyutlarında kum kullanılarak çimento ve mermer tozunun katkısının değişen dane boyutlarında nasıl bir performans sergilediği incelenebilir. Ayrıca çimento kullanmadan sadece mermer tozu kullanılarak, mermer tozunun ince kumun mühendislik özellikleri üzerindeki performansı değerlendirilebilir. CBR deneylerinde kür süresi arttırılabilir, karışımların 90 gün kür süresinden sonraki performansı değerlendirilebilir. Katkılı malzeme araziye serilerek belirli kür sürelerinden sonra dayanımı ölçülebilir. Son olarak mermer tozunun diğer stabilizatörlerle mesela uçucu kül ile farklı oranlarda birleştirilmesiyle ince kumun stabilizasyonuna etkisi incelenebilir.



## KAYNAKLAR

- Abdelkader, H., Hussein, M., Ye, H. (2021). Influence of Waste Marble Dust on the Improvement of Expansive Clay Soils. *Advances in Civil Engineering*. 1-13. doi:10.1155/2021/3192122.
- Akinwumi, I., Booth, C. (2015) Experimental insights of using waste marble fines to modify the geotechnical properties of a lateritic soil. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 23. 121-128. doi.org/10.3846/16486897.2014.1002843.
- Aksoy, H., Gör, M. (2011) Kumul Zeminlerin Farklı Malzemeler Kullanılarak Stabilize Edilmesi. *Geoteknik Sempozyumu, 1-2 Aralık 2011, Çukurova Üniversitesi, Adana*.
- Alam, M., Lal, C. Anand, N. (2021) Stabilization of Sandy Soil by Use of Phosphogypsum and Marble Dust. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org)*, ISSN:2349-5162, 8(6), 133-136.
- Anitha, K.R., Ashalatha, R., Johnson, A.S. (2009) Effects of marble dust on different types of subgrade soil., *10th National Conference on Technological Trends*, 6-7.
- Arora, R.P, Ameta, N.K., Kapil K.S. (2014) Enhancement of engineering characteristics by use of marble slurry in udaipur region, *International Journal of Agricultural Engineering*, 7(2), 384-390. doi: 10.15740/HAS/IJAE/7.2/384-390
- ASTM (1992) Standards on Soil Stabilization with Admixtures, 2nd Edition.
- ASTM D5084 – 16a (2016) Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, *ASTM International*.
- ASTM D1883-21 (2021) Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, *ASTM International*.
- Babu, S.V., Sharmila, M.R. (2017) Soil stabilisation using marble dust. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(4). 1706-1713.
- Bansal, H., Sidhu, G.S.J.P. (2016) Influence of waste marble powder on characteristics of clayey soil, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(8), 78-82.
- Bauer Maschinen GmbH. (2012) “Ground Improvement by Depth Vibrator.” *PI 80, Schrobenhausen, Germany*.
- Besancon, G., Pertusier, E. (1982). Soil Improvement by Deep Vibration. *Proc. ASCE Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*. Bangkok, 1982.

Bhavsar, S.N., Patel, A.J. (2014) Behavior of Black Cotton Soil after Stabilization with Marble Powder, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(12), 769-772.

Demiröz, A., Karaduman, M. (2009) Zemin iyileştirme metotları., *Selçuk-Teknik Dergisi*, 8(3): 176-191.

Doğal Taş Sektör Raporu. (2018) Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, *İhracat Genel Müdürlüğü Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi, Ankara*.

Eltwati, A., Elkaseh, A., Tarhuni, F. (2020) Engineering Properties of Clayey Soil Stabilized with Waste Granite Dust. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 29. 750-757.

Garber, N.J., Hoel., L.A. (2000). Traffic and highway engineering, 2nd ed. Brooks/Cole Publishing Company, London, 2000, 481- 492, 927- 930.

Gary, S.K. (2007). Geotechnical Engineering, Soil Mechanics & Foundation Engineering, *Khanna Publishers, seventh revised edition, New Delhi*.

Hamdy, D.B. (2022) A sustainable approach for improving the behavior of collapsible soil using marble dust . *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 260. doi:10.1007/s41062-022-00859-z

Hossain, A.S.M.F. (2012). Geotechnical Engineering III Lecture Notes. [https://www.researchgate.net/publication/335219148\\_GEOTECHNICAL\\_ENGINEERING\\_III](https://www.researchgate.net/publication/335219148_GEOTECHNICAL_ENGINEERING_III)

Jain, A., Jha, A., Shivanshi. (2020). Geotechnical behaviour and micro-analyses of expansive soil amended with marble dust. *Soils and Foundations*. 60. doi:10.1016/j.sandf.2020.02.013.

Jha, A.K., Jain, A.K., Shivanshi. (2019) Potential of Marble Dust to Improve the Physical Behavior of Soil. *Geotechnics for Transportation Infrastructure*, 28, 189-201. doi.org/10.1007/978-981-13-6701-4\_12

Justo, C.E.G., Krishnamurthy (2008) Laboratory studies on properties of soils treated with RBI-81 stabilizer, *RASTA Center for Road Technology*.

Kaljahi, A.E., Yasrobi, S. (2004) Dynamic Compaction in Assalouyeh, İran, *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, April 13-17, 1-5*.

Liu, H.L., Chu, J., Ren, Z. (2009) New methods for measuring the installation depth of prefabricated vertical drains., *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6), 493-496.

Loos, W. (1936) Comparative studies of the effectiveness of different methods for compacting cohesionless soils., *In Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3. 174–179*.

Mahdi, A., Nalbantoglu, Z. (2021) Performance of Using Waste Marble Dust for the Improvement of Loose Sand in Deep Soil Mixing. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 47. 1-14. doi:10.1007/s13369-021-06252-9.

Muntohar, A., Widiyanti, A., Hartono, E., Diana, W. (2013) Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9), 1260-1270. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000659

Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K. (2004) Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soils, *Construction and Building Materials*, 18 (4), 263-267. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2003.11.003

Rahman, M., Nahar, T.T. (2015) Influence of Marble Dust on Shear Strength Behavior of Sand. *International Journal for Research & Development in Technology*, 2015.

Sabat, A. (2012). Stabilization of expansive soil using waste ceramic dust. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 17. 3915-3926.

Saygılı, A. (2015) Use of waste marble dust for stabilization of clayey soil, *Materials science (Medziagotyra)*, ISSN 1392–1320, 21(4). doi:10.5755/j01.ms.21.4.11966

Sivrikaya, O., Uysal, F., Yorulmaz, A., Aydin, K. (2020). The Efficiency of Waste Marble Powder in the Stabilization of Fine-Grained Soils in Terms of Volume Changes. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 45. doi:10.1007/s13369-020-04768-0.

Solanki, A., Sharma, J. (2020) Enhancing the Properties of Dune Sand Using Marble Dust, *Proceedings of Indian Geotechnical Conference 2020 At: IGC 2020 Andhra University, Visakhapatnam*

Taube. M.G., Herridge J.R. (2002) Stone Columns for Industrial Fills, *Nicholson Construction Company*, Cuddy, Pennsylvania, 18, 2.

TS EN ISO 1097-3 (1999) Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 1900-1 (2006) İnşaat mühendisliği zemin laboratuvar deneyleri Bölüm 2: Fiziksel özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN ISO 17892-10 (2016) Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 10: Doğrudan kesme deneyi, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN ISO 17892-3 (2016) Geoteknik etüt ve deneyler Zemin laboratuvar deneyleri Bölüm 3: Tane yoğunluğunun belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN ISO 17892-4 (2016) Geoteknik etüt ve deneyler Bölüm 4: Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü.

Tumluer, G. (2006) Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Waheed, A., Arshid, M.U., Khalid, R.A., Gardezi, S.S.S. (2021). Soil Improvement Using Waste Marble Dust for Sustainable Development. *Civil Engineering Journal*, 7(9), 1594–1607. doi:10.28991/CEJ-2021-03091746

Yılmaz, I., Erzin, Y. (2004) Selection of Core Material for an Earth Dam in the Lower Çekerek Basin, Tokat, Turkey. *EJGE*,9(F), 0472.

Zorluer, Usta, M. (2003) Zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi. *Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (mersem '2003) Bildiriler Kitabı, 18-19 Aralık 2003.*

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdoullah KEBE  
Doğum Yeri ve Tarihi : 15-04-1995 Libreville Gabon Cumhuriyeti  
Yabancı Dil : Fransızca, Türkçe

Eğitim Durumu  
Lise : Bamako Teknik Lisesi  
Lisans : Bamako uygulamalı teknoloji ve yönetim yüksek enstitüsü  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Zemar Zemin Araştırma

İletişim (e-posta) : abdoullahk@live.fr

Yayımları :