



**BARAJ DOLGU MALZEMESİ İYİLEŞTİRMESİNDE UÇUCU KÜL VE
MERMER TOZU KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sadva BABA

Danışman

Prof. Dr. İsmail ZORLUER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2022

Bu tez çalışması 19. FEN. BİL. 49 numaralı proje ile A.K.Ü BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ BİRİMİ tarafından desteklenmiştir

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BARAJ DOLGU MALZEMESİ İYİLEŞTİRMESİNDE UÇUCU KÜL
VE MERMER TOZU KULLANIMI**

Sadva BABA

Danışman

Prof. Dr. İsmail ZORLUER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2022

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BARAJ DOLGU MALZEMESİ İYİLEŞTİRMESİNDE UÇUCU KÜL VE MERMER TOZU KULLANIMI

Sadva BABA

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Son yıllarda endüstriyel üretim artışına bağlı olarak atık miktarlarında da büyük artışlar görülmektedir. Bu artışlar atıkların depolama sorunu ile birlikte çevre problemlerine de neden olmaktadır. Atıkların çeşitli amaçlarla kullanılarak ekonomiye kazandırılması özellikle çevresel açıdan önem arz etmektedir.

Bu çalışmada endüstriyel atık olan uçucu kül ve mermer tozunun zeminin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla ocaklardan alınan malzemeye farklı oranlarda mermer tozu ve uçucu kül ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelere farklı kür süreleri uygulanarak numunelerdeki dayanımın zamana bağlı değişimi gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre uçucu kül ve mermer tozu katkısının zemin dayanımını artırdığı görülmüştür. En yüksek dayanım artışları Uluköy numunesi için %15MT+%15UK-%15MT+%30UK karışımında, Ballık numunesi için %10MT+%20UK-%15MT+%30UK karışımında olmuştur. Permeabilite katsayısı Ballık numunesinde azalırken, Uluköy numunesinde fazla bir değişim gözlenmemiştir. Atık katkıları ile dayanım artışı ve geçirimsizliğin azalması baraj dolgusunda kullanılacak malzeme açısından olumlu sonuçlardır. Ancak dolgular için gereken diğer kriterleri de karşılaması gerekir.

2022, x + 48 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mermer Tozu, Uçucu Kül, Zemin İyileştirme.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

USING FLY ASH AND MARBLE DUST IN IMPROVEMENT OF DAM FILLING MATERIAL

Sadva BABA

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail ZORLUER

In recent years, there has been a great increase in the amount of waste due to the increase in industrial production. These increases cause environmental problems along with the storage problem of wastes. It is especially important from an environmental point of view that wastes are used for various purposes and brought into the economy.

In this study, the effects of fly ash and marble dust, which are industrial wastes, on the geotechnical properties of the soil were investigated. For this purpose, samples were prepared by adding different proportions of marble dust and fly ash to the material taken from the quarries. Compaction test, unconfined pressure test and permeability test were performed on the prepared samples. Different curing times were applied to the samples prepared for the unconfined pressure test, and the time-dependent variation of the strength of the samples was observed.

According to the results obtained, it was observed that the additive of fly ash and marble dust increased the soil strength. The highest strength increases were observed in samples with a mixture of 15%MT+15%UK-15%MT+30%UK for Uluköy sample, and samples with a mixture of 10%MT+20%UK-15%MT+30%UK for Ballık sample. While the permeability coefficient decreased in the Ballık sample, no significant change was observed in the Uluköy sample. The increase in strength and decrease in permeability with waste additives are positive results for the material to be used in the dam filling. However, it must also meet other criteria required for fillings.

2022, x + 48 pages

Keywords: Marble Powder, Fly Ash, Soil Improvement.



TEŐEKKÖR

Tez çalıőmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve her konuda eğitim ile ilgili, eğitim dıőı, maddi ve manevi desteklerinden dolayı değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. İsmail ZORLUER'e sonsuz teőekkör ve saygılarımı sunarım.

Bu tez alıőması 19.FEN. BİL.49 numaralı, "Baraj dolgu malzemesi iyileştirmesinde uçucu kül ve mermer tozu kullanımı" isimli proje ile A.K.Ö. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teőekkör ederim.

Sadva BABA
Afyonkarahisar 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Zemin	4
2.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri	4
2.2.1 Mekanik Yöntemleri	5
2.2.1.1 Dinamik Kompaksiyon	5
2.2.1.2 Vibro Kompaksiyon	6
2.2.2 Kimyasal Yöntemleri	9
2.2.3 Geotekstil	11
2.2.3.1 Geotekstil Çeşitleri.....	11
2.2.4 Vakum Konsolidasyon	14
2.2.5 Donatı Kullanılarak İyileştirme.....	15
2.2.5.2 Mini Kazıklar	16
2.2.5.3 Zemin Çivisi	17
3. MATERYAL ve METOT	19
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeleri	19
3.1.1 Zemin	19
3.1.2 Uçucu Kül	20
3.1.3 Mermer Tozu.....	20
3.2 Deneyler.....	21
3.2.1 Su Muhtevası Belirlenmesi	21
3.2.2 Tanımlama Deneyleri.....	22
3.2.2.1 Granülometri	22
3.2.2.3 Özgül Ağırlık.....	25

3.2.3 Kompaksiyon	26
3.2.4 Permeabilite.....	28
3.2.5 Tek Eksenli Basınç Deneyi	31
4. BULGULAR	33
4.1 Kompaksiyon	33
4.2 Eksenel Basınç.....	35
4.2.1 Numune Hazırlama	35
4.3 Permeabilite	40
4.4 Dolgu Baraj Açısından Değerlendirme.....	42
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	44
6. KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	48

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

LL	Likit limit
PL	Plastik limit
PI	Plastisite
C-S-H	Kalsiyum silikatlar
C-A-H	Alüminat kalsiyum
C ₃ S	Alit
C ₂ S	Belit
C ₃ A	Tri kalsiyum alüminat
C ₄ AF	Tetrakalsiyum alümineferrit
OH ⁻	Hidroksil radikali
γ_d	Kuru yoğunluk
W _{opt}	Optimum su muhtevası
CaCO ₃	Kalker
CL	İnorganik kil, siltli kil, düşük plastiseli kumlu kil
SW	İyi derecelenmiş kum, çakıllı kum, ince taneli az veya yok

Kısaltmalar

CEC	Kasyon değişim kapasitesi
MT	Mermer tozu
UK	Uçucu kül

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Dinamik Kompaksiyon Uygulaması (Bergado vd. 1996).....	6
Şekil 2.2 Vibrokompaksiyon ekipmanı (İnt.Kyn.1)	7
Şekil 2.3 Keçi ayaklı ve düz tekerlekli silindir	8
Şekil 2.4 Vibrasyonlu silindir ve lastik ayaklı silindir	9
Şekil 2.5 Dokuma geotekstil (İnt.Kyn. 2)	12
Şekil 2.6 Dokusuz geotekstil (İnt.Kyn. 2)	12
Şekil 2.7 Vakum konsolidasyon (İnt.Kyn. 3)	15
Şekil 2.8 Fore kazık Uygulaması	16
Şekil 2.9 Mini kazıklar	17
Şekil 2.10 Zemin Çivisi Uygulamaları.....	18
Şekil 3.1 Uluköy numunesinin granülometri grafiği.....	19
Şekil 3.2 Ballık numunesinin granülometri grafiği.....	20
Şekil 3.3 Casagrande Likit Limit Deney Alet	24
Şekil 3.4 Plastik Limit Deneyi	25
Şekil 3.5 Piknometre (İnt.Kyn. 2)	26
Şekil 3.6 Kompaksiyon kalıbı	28
Şekil 3.7 Sabit seviyeli (İnt.Kyn. 2)	29
Şekil 3.8 Düşen seviyeli permeabilite (İnt.Kyn. 4)	30
Şekil 4.1 Uluköy numunesinin kompaksiyon grafiği.....	34
Şekil 4.2 Ballık numunesi kompaksiyon grafiği	34
Şekil 4.3 Uluköy eksenel basınç deney sonuçları	36
Şekil 4.4 Uluköy Numunesine kür süresine bağlı dayanım değişimleri	37
Şekil 4.5 Uluköy kür süresine göre katkılı numunelerindeki basınç değişimi.....	38
Şekil 4.6 Ballık numunesi eksenel basınç deney sonuçları.....	39
Şekil 4.7 Ballık numunesi karışım oranı dayanım	40
Şekil 4.8 Ballık numunesi kür süresine göre basınç değişimi.....	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Numune olarak kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri.....	20
Çizelge 3.2 Katkı Malzemelerinin Kimyasal Bileşimi.....	21
Çizelge 4.1 Kompaksiyon sonuçları.....	35
Çizelge 4.2 Uluköy eksenel basınç deney sonuçları	37
Çizelge 4.3 Ballık numunesi eksenel basınç deney sonuçları	39
Çizelge 4.4 Ballık permeabilite deney sonuçları.....	41
Çizelge 4.5 Uluköy permeabilite deney sonuçları.....	41
Çizelge 4.6 Geçirimsiz baraj dolgu malzemesi için özelliklerinin sınır değerleri	42



1. GİRİŞ

Son yıllarda inşaat sektöründe büyük projelerin artmasıyla beraber mühendislik özellikleri yüksek zeminlere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Mühendislik özellikleri yüksek yani yapılacak yapıya uygun özelliklere sahip zeminlerin her yerde bulunması söz konusu değildir. Bu durumda yapının zemin özellikleri uygun bir yerde yapılması ise birçok nedenden dolayı tercih edilmemektedir. Yapının yapılacağı yerdeki zemin problemini aşmak için zemin özelliklerinde iyileştirme yoluna gitmek çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Problemlili zeminin yeterli seviyede kazılıp alınarak yerine özellikleri yüksek zemin yerleştirmek çözümlerden biridir. Bu metot çoğu zaman yetersiz kalmakta ve bazen de ekonomik nedenlerden dolayı uygun bir çözüm olarak kabul edilmemektedir. Diğer taraftan yapılacak projeye uygun bir tasarım sağlayacak şekilde zemin iyileştirmesi için mekanik, kimyasal ve bazı katkıların karıştırılması gibi yöntemlerden biri kullanılır. Zemin iyileştirme ile zemin mukavemetinin artırılması sağlanırken, zeminin geçirgenliğinin ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılması gibi sonuçlar elde edilir.

Zemin iyileştirme yönteminin seçimi projeye ve değişmesi istenilen zemin özelliklerine göre yapılmalıdır. Zemin iyileştirmede kullanılan en yaygın yöntemlerden biri zeminin bir bağlayıcı katkı (çimento, kireç, bitüm, kimyasal maddeler, gibi) malzemesiyle karıştırılmasıdır. Katkı maddeleri katılmasıyla zeminde oluşan reaksiyon zeminin mikro dokusunda değişime neden olur. Bu değişim zemin taneleri arasında bağ oluştururken boşlukların azalmasına da neden olur. Bunun sonucunda dayanım artar boşluklar azaldığı için oturmalar azalır ve geçirimsizlik düşer. Sıvılaşma riski olan zeminlerde sıvılaşma potansiyeli azalır. Ayrıca kil zeminlerde şişme-büzülme davranışı kontrol altına alınır.

Son yıllarda endüstriyel atık olarak tanımlanan uçucu kül, mermer tozu, fırın cürufu vb malzemelerin zemin iyileştirmede kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı ile zemin iyileştirmenin yanında ekonomik ve çevresel kazanımlar da sağlanmaktadır. Endüstriyel üretim sonucunda ortaya çıkan bu atıklar ucuz olması nedeniyle ekonomiktir. Atık sahalarından alınarak kullanılması ile çevre kirliliğinin azalmasına da katkı sağlamaktadır.

Doğal taşlar ve özellikle mermer bakımından Türkiye büyük kaynaklara sahiptir. Türkiye dünyanın en eski mermer üreticilerinden biridir. Türkiye'deki doğal taş rezervi 5,2 milyar

m³ veya 13,9 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervin büyük kısmı Afyon, Konya, Eskişehir, Balıkesir, Muğla, Denizli ve Elâzığ illerinde bulunmaktadır. Türkiye’de 4 milyar m³ mermer rezervi bulunduğu tahmin edilmektedir. Sektörde 1500’den fazla mermer ocağı, 2000 fabrika ve 9000 atölye faaliyet göstermektedir. Taş ocaklarının %90’ı batı Anadolu’da, özellikle Ege ve Marmara bölgelerinde bulunmaktadır. Afyonda bulunan fabrika ve atölyelerde işlenen mermerden yılda yaklaşık 3 milyon ton mermer tozu atığı ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan mermer tozu çoğunluğu düzensiz olan depolama alanlarında depolanır. Depolanan mermer tozu miktarı büyük boyutlara ulaşmakta ve kullanım alanlarının az olması sonucu verimli olarak değerlendirilememektedir. Bu durum da çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Depolama alanlarına ıslak olarak bırakılan mermer tozu kurduğunda, çok küçük boyutlara sahip taneler rüzgârlı günlerde havada uçarak ciddi toz kirliliği oluşturmakta ve daha büyük alanlara yayılmaktadır. Bu durum çevre kirliliğini artırmaktadır.

Zemin iyileştirmede kullanılan atıklardan bir diğeri olan uçucu kül, elektrik üretimi için termik santrallarda yakılan kömür külüdür. Bu kül çok küçük tane boyutlarına sahip olduğundan dumanla birlikte uçarak bacadan çıkar. Bu nedenle uçucu kül adını alır. Çevre kirliliğine neden olmaması için baca filtreleri yardımıyla toplanarak depolama sahalarına götürülür. Türkiye’de 11 santral termik bulunmakta ve bu santrallerde elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan uçucu kül miktarı ortalama 15 milyon ton civarındadır (Perçinel 2000).

Dolgu barajlar gelişmekte olan ülkelerde ekonomik nedenlerden dolayı tercih edilirler. Dolgu barajın ekonomik yapımı için, dolgu malzemesinin ekonomik üretilmesi veya elde edilmesi gereklidir. Dolgu barajlarda kullanılan malzemeler, baraj yeri çevresi esas alınarak araştırılır ve özellikleri uygunsa baraj yapımında kullanılır. Bu malzemelerin araştırılırken ilk önce özelliklerinin uygun olmasına, baraj yerine yakın olmasına ve bulunduğu noktada (malzeme ocağında) baraj inşası için yeterli miktarda bulunmasına dikkat edilir. Ancak barajın yapım yerine yakın alanlarda uygun malzemenin bulunması her zaman mümkün olamamaktadır. Uzak malzeme ocaklarından alınan malzeme ise ekonomik olmamakta ve hatta bazen ocaktaki malzeme miktarı yeterli olmamaktadır. Dolgu baraj yapımında uygun malzemenin temini çoğu zaman problemlidir.

Dolgu baraj yapımında kullanılacak malzemenin baraj yapım yerine yakın olmaması veya yeterli miktarda bulunmaması durumunda, mevcut malzeme özellikleri iyileştirilerek kullanılabilir hale getirilmesi tercih edilen bir uygulama değildir. Bu nedenle toprak dolgularda kullanımı çok sınırlı kalmaktadır. Ancak bu atıklardan uçucu kül, puzolonik özelliğinden dolayı yol dolgularında ve atık barajlarında yoğun olarak kullanılmaktadır (Das et al 2009).

Baraj yapımında Roller Compacted Concrete (RCC) barajlarda kullanılan çimento miktarını azaltmak (%20-%40 yer değiştirerek) için karışıma ilave edilmektedir. Bu sayede hidrasyon ısısını düşürmekte ve uzun dönemli dayanımı artırmaktadır (Nagayama and Jikan, 2003). Beton barajlarda ise, kütle beton dökümünde hidrasyon ısısını düşürmesi ve beton kapasitesini iyileştirmesi nedeniyle çimentoyla birlikte kullanılmaktadır (Topçu ve Canbaz 2001).

Uçucu kül katkı olarak tek başına veya puzolonik etkiyi artırmak için kireç ile birlikte belli oranlarda karışım yapılarak kullanılır. Çünkü uçucu kül, CaO olan ortamlarda suyun varlığı ile oluşan reaksiyon sonucu taneler arasında bağ oluşturarak zemin dayanımını artırır, geçirimsizliği düşürür (Heebink 2001).

Ayrıca uçucu kül ağır metallere kirlenmiş olan zeminlerde kirlilik bariyeri olarak kullanılmaktadır. Uçucu külün kendi bünyesinde de ağır metaller bulunmakla birlikte puzolonik reaksiyon sonucu ağır metalleri tutarak ortam suyuna geçmesini önlemektedir. Özellikle kireç ile beraber kullanıldığında etkisi artmaktadır. Bu olay zemin iyileştirme için kullanılan uçucu külün dayanım artışı ve geçirimsizliği azaltma etkisi yanında; yeraltı suyuna ve toprağa geçebilecek ağır metallerin tutulması konusunda da etkili olacağını göstermektedir (Goswami and Mahanta 2007).

Baraj yapım kriterlerine uygun olmayan dolgu baraj malzemesinin uygun hale getirilmesi için zemin, uçucu kül ve mermer tozu ile iyileştirilerek deneysel çalışmalar yapmak bu tezin ana hedefidir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Zemin

Geçmişten bugüne tüm inşaat mühendisliği projeleri, barajlar, yollar, binalar, mühendislik yapıları vb. zemin üzerine inşa edilir veya zemini yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. İnşaat projeleri için ideal olan zeminlerin projenin gereksinimlerini karşılamak amacıyla kabul edilebilir geoteknik mühendisliği özelliklerine sahip olduğu bir arazinin bulunması gerekmektedir. Ancak ideal zemini bulmak her zaman mümkün değildir. Son yıllarda nüfusun, büyük projelerin ve çeşitli altyapıların artmasıyla iyi bir zemin bulmak zorlaştığı için geoteknik özellikler bakımından zayıf zemine sahip araziler üzerine yapıyı inşa etmek zorunda kalınmaktadır. Zayıf zemin problemlerini ortadan kaldırmak için yaygın olarak iki yönteme başvurulur. Bu yöntemlerden birincisi, arazideki zemini geoteknik özellikleri iyi olan başka bir zeminle değiştirmektedir. Bu yöntem ekonomik açıdan her zaman uygun olmayabilir veya pahalı bir yöntem olarak kabul edilebilir. İkinci yöntem ise arazideki zemini çeşitli yöntemlerle iyileştirerek (stabilizasyon) geoteknik açıdan istenilen özellikleri kazandırmaktadır. Bu iki çözümün arasında en ekonomik olanı seçilir. Maliyet göz önünde bulundurulduğunda ise genellikle ikinci yöntem seçilmektedir (Bouassida 2009).

2.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin özellikleri taneler arasındaki boşlukların azaltılmasıyla veya zemine farklı bileşenlerden oluşan katkı maddelerinin karıştırılmasıyla geliştirilmektedir. Birinci yöntem mekanik iyileştirme yöntemleri olarak, ikincisi ise kimyasal iyileştirme yöntemleri olarak adlandırılmaktadır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinin amacı:

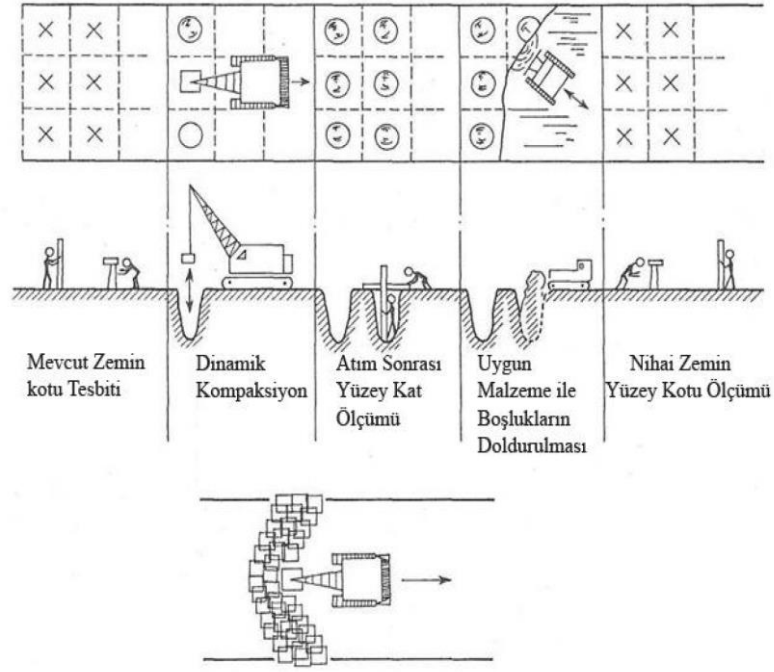
- Taşıma kapasitesini ve/veya kayma mukavemetini arttırmak
- Oturmaları azaltmak
- Deprem veya önemli bir titreşim durumunda sıvılaşma riskini azaltmak veya ortadan kaldırmak
- Şişme-büzülme davranışını kontrol altına almak

2.2.1 Mekanik Yöntemleri

2.2.1.1 Dinamik Kompaksiyon

Gevşek ve yumuşak zeminlere ağır bir yükün tekrarlı olarak değişik yükseklikten serbest düşüş ile bırakarak zemini sıkıştırma işlemidir. Bu teknik ilk olarak Menard tarafından 1970'lerin başında uygulanmıştır. Yeterli kapasitedeki bir vinç ile uygun ağırlıklar belli bir yükseklikten serbest düşüşe bırakılmaktadır. Yüklerin ağırlıkları genellikle 5 ile 27 ton ve düşüş yükseklikleri ise 12 ile 30 m arasında değişmektedir. Uygulamada kullanılan ağırlık genel olarak çelikten yapıldığı gibi bazen de betondan yapılanlar kullanılmaktadır. Dinamik kompaksiyon ile sıkıştırılan zeminin taşıma kapasitesinin artırılmasını, oturma ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasını sağlamaktadır. (Gambin ve Col 1981)

Genel olarak, dinamik olarak sıkıştırılmış granül zeminlerin geoteknik Özellikleri 2 ila 4 kat artacak ve iyileştirme derinliği 10 ila 6 metre arasında olacaktır. Geçirimliliği düşük olan zeminlerde uygulama sırasında bir boşluk suyu basıncı artışı ortaya çıkacaktır. Ancak bu basınç artışı granüler zeminlerde olduğu gibi hızlı bir şekilde dağılma göstermeyecektir. Bu tür zeminlerde drenaj yapılmadıkça dinamik kompaksiyon etkili olmayacak ve iyileştirmenin önemli bir kısmı uygulama bitiminden iki veya üç aydan sonra gerçekleşecektir. Ayrıca bu tür zeminlerde drenaj granüler zeminlerden yavaş olacağı için daha fazla enerji uygulanması gerekmektedir. Şekil 2.1'de dinamik kompaksiyon uygulaması şematik olarak gösterilmektedir (Bjølgerud ve Haug 1983).

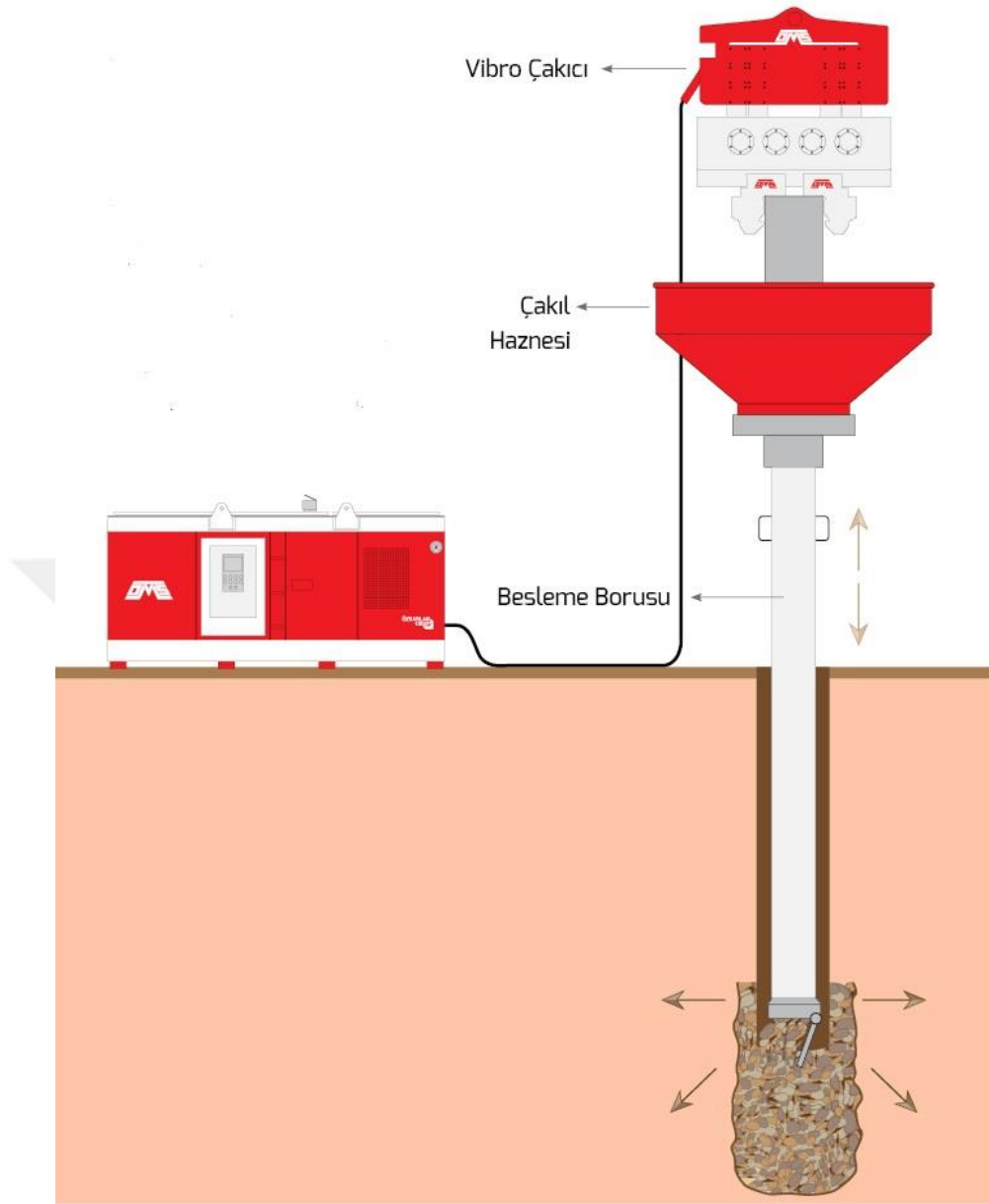


Şekil 2.1 Dinamik Kompaksiyon Uygulaması (Bergado 1996).

2.2.1.2 Vibro Kompaksiyon

1930'ların sonunda geliştirilen vibrokompaksiyon (veya vibroflotasyon) yöntemi, gevşek, kohezyonsuz zeminler ve sıkıştırılmamış dolgular, zemin içerisine yerleştirilen vibratörden kaynaklanan yüksek enerji titreşimleriyle sıkıştırma işlemidir. Bu yöntemin amacı arazideki zemini yoğunlaştırmaktır.

Bu yöntemde genel olarak Vibro-Kanal, Terraprobe ve Franki vibartör tipleri kullanılmaktadır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi uygulama ekipmanı, vibro çakıcı, çakıl haznesi ve beslenme borusundan oluşur. Tüm ekipman vibro çakıcıya bağlanarak zemine istenilen derinliğe kadar aşağı doğru dikey olarak itilir ve yukarı doğru çekilirken çakıl haznesi çakılla doldurulur ya da penetrasyon aşamasındayken doldurulur. Penetrasyon işlemi bittikten sonra beslenme borusu yukarı doğru yavaş yavaş çekilirken borunun alt kapağı açılır ve kazı çakıl haznesinden gelen malzemeyle doldurulur ve istenilen çap elde edilene kadar yatay sıkıştırılır (Xiang 1999)



Şekil 2.2 Vibrokompaksiyon ekipmanı (İnt.Kyn. 1).

Sonda tarafından yayınlan titreşimlerin yardımıyla granüler malzemenin, arasındaki boşluklar azalır ve mümkün olan en küçük hacmi işgal edilir. Sıkıştırılmış zemin, zemin başlangıç durumuna ve sıkıştırma kabiliyetine bağlı olarak başlangıç hacminin %15'ine kadar azaltılabilir.

Vibrocompaction, aşağıdakiler de dahil olmak üzere diğer temel çözümlere göre birçok avantaj sunar:

- Dolgu malzemesi olmadan zemin iyileştirilmesi (çok ekonomik çözüm),
- Hızlı ve kolay bir uygulama

- Düşük Çevresel Etki (az malzeme taşımacılığı, az gürültü, titreşim yayılımı belirli vibratörlerin kullanımı ile sınırlıdır).

2.2.1.3 Yüzey Kompaksiyonu

Yüzeysel kompaksiyon, statik dış kuvvetlerin uygulanması yoluyla zeminin yoğunluğunu ve taşıma kapasitesini artırma işlemidir.

Sıkıştırma işlemi, danelerin zeminde bir araya gelmesine ve havanın dışarı atılmasına neden olur. Danelerin hacmi azalır, kütle aynı kalır, bu nedenle kaldırma ve oturmanın yanı sıra görünen yoğunluk artar.

Yüzey kompaksiyonu sırasında kullanılacak silindirin tipleri:

- Zemin cinsi
- Sıkıştırma derecesi
- İşin büyüklüğü
- Silindir tipleri kapasitesi şartlarına bağlıdır.



Şekil 2.3 Keçi ayaklı ve düz tekerlekli silindir.



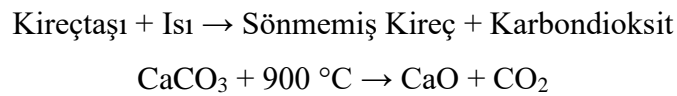
Şekil 2.4 Vibrasyonlu silindir ve lastik ayaklı silindir.

2.2.2 Kimyasal Yöntemleri

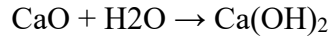
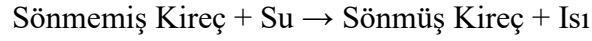
Kimyasal stabilizasyon, ince taneli zeminlere kimyasal maddelerin karıştırılması sonucu oluşan kimyasal reaksiyonun zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmesidir. Geliştirilebilecek farklı özellikler direnç, plastisite, sıkıştırılabilirlik, geçirgenlik, şişme potansiyeli ve çökme potansiyelidir. Bu özellikler ya direnç gibi bazılarını artırarak ya da plastisite, geçirgenlik ve erozyon gibi bazılarını ise azaltarak geliştirilir. Kimyasal stabilizasyon maddeleri olarak hidrolik bağlayıcı maddeler (çimento, kireç ve alçı vb.), puzolanik maddeler (uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu vb.) ayrıca mermer tozu, bitüm, sodyum klorür, kalsiyum klorür ve selüloz atıkları gibi maddeler de kullanılmaktadır.

Kireç: kireçtaşının (CaCO_3 kalker) 900°C üzerindeki sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda elde edilir. Kireç, suya duyarlı zeminler (dolgu vb.) için katkı maddesi olarak uzun zamandır kullanılmaktadır. Kireçle iyileştirmede sönmüş kireç veya sönmemiş kireç kullanılmaktadır. Sönmemiş kireç kalsinasyon reaksiyonunun sonucunda elde edilir. Sönmemiş kireç, higroskopik (su moleküllerini difüzyon) özelliklere sahiptir ve suyla reaksiyona (hidratasyon) sokularak toz halindeki sönmüş kirece dönüştürülür.

Kalsinasyon reaksiyonu:



Hidratasyon:



Genel olarak zemin iyileştirmesinde sönmemiş kireç sönmüş kireçten daha etkilidir. Kireç, ince taneli zeminlerde granüler zeminlerden daha iyi sonuç vermektedir. Kil ve kireç karışımına su ilave edildiğinde kil mineralleri ile kireç arasında oluşan mekanizma iki aşamada özetlenebilir:

- Kireç ilavesi, suyun buharlaşmasına ve kirecin iyonizasyonu ile Ca^{2+} ve OH^- iyonlarının serbest bırakılmasına neden olur.
- Ca^{2+} ve OH^- iyonlarının yüksek konsantrasyonu ile emilen iyonlar ile katyonlar arasında katyon değişimi meydana gelir, bu da CEC (katyon değişim kapasitesi) seviyesini artırır ve zeminin pH'ını 12,5'ten daha yüksek duruma getirir.
- Kil parçacıklarının çift tabaka kalınlığının azaltılması ve aralarındaki itme kuvvetlerinin azaltılmasına neden olur.
- Kil parçacıklarının flokülasyonuna neden olur.
- Geoteknik özelliklerin değişimi, milimetre büyüklüğünde topraklar oluşumu ve su duyarlılığında azalmaya neden olur.

Orta ve uzun vadede mekanik özellikler gelişir. Şişmenin azaltılması veya ortadan kaldırılması ise bir başka gelişmedir. Bu iyileştirme aşağıdaki maddelerle özetlenebilir:

- Ca^{2+} ve OH^- iyonunun yüksek konsantrasyonu zemin pH'ını artırır ($\text{pH} \geq 12,5$)
- Yüksek pH kil parçacıklarının silika ve alüminyum oksit çözünmesine neden olur ve kireç tarafından sağlanan kalsiyum ile reaksiyona (puzolanik reaksiyonu) girer.
- Çimentolu ürünlerin oluşumu, yani kalsiyum silikatlar (C-S-H) ve kalsiyum alüminatların (C-A-H) oluşumuna neden olur.

Portland çimentosu, klinker ve alçı karışımından oluşan ince bir malzemedir. Klinker esas olarak silikat ve katı eriyik fazlarından oluşur. Silikat fazları C_3S (Alit) ve C_2S (belit) bileşenlerden oluşur. Katı eriyik fazları C_3A (tri kalsiyum alüminat) ve C_4AF (tetrakalsiyum alüminaferrit) bileşenlerden oluşur. Zemin stabilizasyonunda silikat fazı

katı eriyik fazından daha önemli bir rol oynar. Hidratasyon sırasında bu iki fazın kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silika bileşenler meydana gelir. Birinci bileşen, katyon değişimi ve kil flokülasyonu için gereken kalsiyum miktarını sağlar. İkinci bileşen ise direnç sağlar.

Uçucu kül, kömür yakıtlı santral kazanlarında kömürün yanmasından kaynaklanan üç atıktan biridir. Uçucu külün kile eklenmesi geçirgenliğini önemli ölçüde azaltır. Uçucu kül tek başına bağlayıcı özelliğine sahip değildir. Ancak, uçucu kül ve kireç karışımı, bir hidrolik bağlayıcının özelliklerine sahiptir, yani sadece havada değil, suda da sertleşebilir. Puzolanik özelliği sayesinde, uçucu kül ve kireç zeminin mekanik özelliklerini birkaç yıl boyunca arttırmaya devam edebilir (lav et al 1997).

2.2.3 Geotekstil

2.2.3.1 Geotekstil Çeşitleri

Geotekstiller, geoteknik ve inşaat mühendisliği alanında kullanılan, geçirgen, esnek, dayanıklı ve filtreli levhalar şeklinde polimer elyaf esaslı tekstil ürünleri olarak tanımlanmaktadır. Aslında, kelimenin tam anlamıyla, zeminle temas halinde kullanılan tekstillerdir.

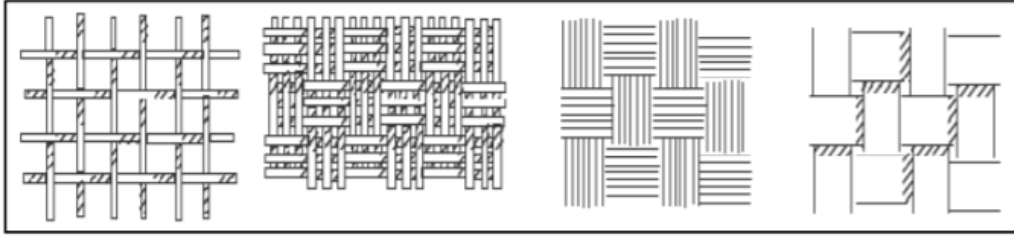
Son otuz yıldır, geotekstillerin kullanımı genel olarak her tür inşaat mühendisliği işini kapsıyor. Kullanımı kolay ve nispeten ucuz oldukları için, mega yapıların inşası da dahil olmak üzere geleneksel malzemelerin yerini yavaş yavaş almaya başladılar.

Yol geotekniğinden hidrolik yapılara, zemin stabilizasyonu dahil onlarca geotekstil kullanım alanı bulunmaktadır. Tüm bu yapılarda geotekstiller altı temel işlevden en az birini gerçekleştirir: ayırma, filtreleme, drenaj, güçlendirme, koruma ve erozyon kontrolü. Geotekstiller yapılarına göre, yani polimer elyaflardan (esas olarak polipropilen) bitmiş bir malzeme elde etmeyi mümkün kılan üretim yöntemine göre sınıflandırılır. Bu "aileler" tekstil endüstrisinden isimler taşıyor.

Dokuma geotekstil: Monofilament ipliklerden, multifilament ipliklerden veya bantlardan üretilirler, %10 ila %25 arasında değişen bir deforme olabilirliğe sahip olan (deforme edilebilirlik, kopma uzamasının yüzdesidir).

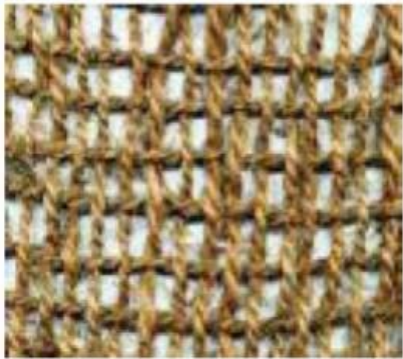
Dokuma, yüksek bir gerilme modülü ve düşük deforme olabilirlik elde etmeyi mümkün

kılar.



Şekil 2.5 Dokuma geotekstil (İnt.Kyn. 2)

Dokusuz geotekstil: İğnelenebilir veya termal olarak bağlanabilir veya hatta örülebilirler, %60 civarında bir deforme olabilirliğe sahiptir. Lifler veya filamentler, iki tip kaplama ile yönlü veya düzensiz bir şekilde dağıtılır. Mekanik tepeleme, dişleri boyayan ve onları tek yönlü olarak yönlendiren aletlerle gerçekleştirilir.



Şekil 2.6 Dokusuz geotekstil (İnt.Kyn. 2).

Geotekstillerin temel işlevlerinden en az birini sağlamak üzere tasarlanmış geotekstillere ilgili ürünler de bulunmaktadır.

Bu ürünler arasında, özellikle güçlendirme, drenaj ve erozyon önleyici kontrolde

kullanılan geogridler, geokompozitler, geohücreler, geonatural (doğal liflerden oluşan) bulunmaktadır.

2.2.3.2 Geotekstil Temel İşlevi

Ayırma:

Ayırma, geotekstillerin ana işlevidir ve yol ve demiryolu yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayırma işlevi, "bir geotekstil kullanılarak farklı bitişik toprakların ve/veya dolgu malzemelerinin karışmasının önlenmesi" olarak tanımlanmaktadır.

Geotekstil, ayırma işlevi gördüğünde, tane boyutları birbirinden çok farklı, biri ince, diğeri iri iki zemin arasına yerleştirilerek, her bir malzemenin bütünlüğünü ve performansını koruması amaçlanır. Akışkanların dolaşımına engel olmadan iki ortamın iç içe geçmesini engeller.

Filtreleme:

Geotekstillere, karayolu ve demiryolu yapımında ve kıyı korumasında filtrasyon için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir geotekstilin filtreleme işlevi, ayırma işleviyle aynı amaca hizmet eder, ancak farklı koşullar altında. Filtrasyon işlevi, "akışkanların bir geotekstil içine veya içinden geçişine izin verirken hidrodinamik kuvvetlere maruz kalan zemin veya diğer parçacıkların tutulması" olarak tanımlanır.

Filtre görevi gören bir geotekstil, suyun geçişine izin vermelidir. Düzlemine dik, ancak zemin parçacıklarınıninki değil. Bu işlevi sağlayan geotekstil, filtre edilecek zeminden daha geçirgen olmalıdır. Bu nedenle filtrasyon, ince parçacıkların kaybından kaynaklanan iç zemin erozyonu ile yapıya zarar veren boşluk basıncının artmasına neden olabilen filtrenin tıkanması arasında bir uzlaşmadır.

Drenaj:

Drenaj işlevi, geotekstil düzleminde yağmur suyu, yeraltı suyu ve/veya diğer sıvıların toplanması ve taşınması, olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, geotekstilin sıvıları kendi

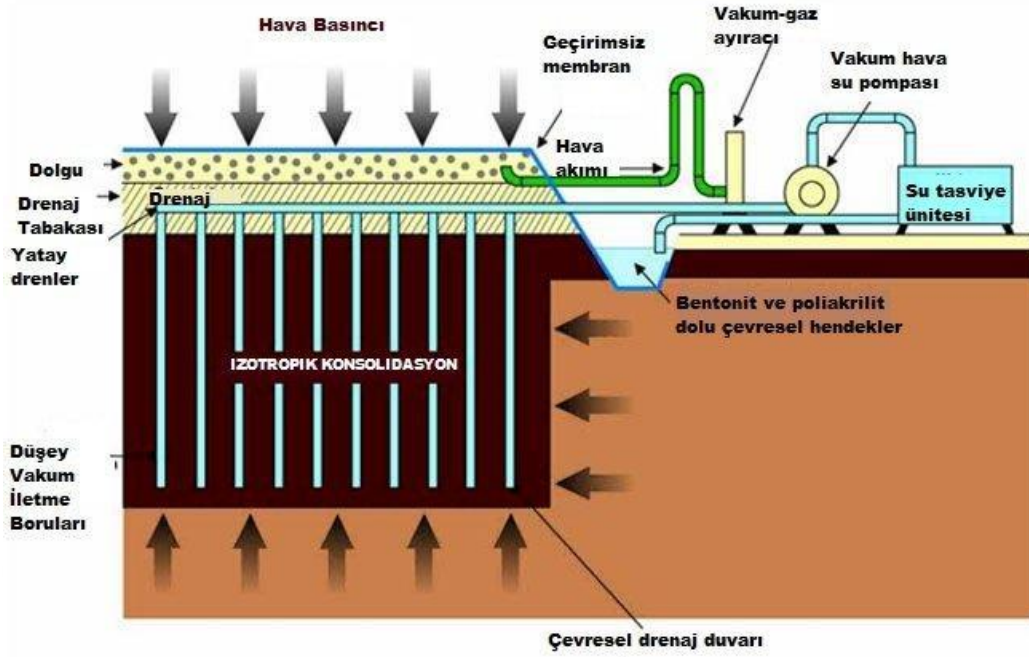
kendine tahliye etme kabiliyetidir, yani bir drenaj sistemi ile ilişkili değil, drenaj sisteminin kendisidir. Drenaj işlevi genellikle filtreleme işleviyle karıştırılır. Bir geotekstil, bir zemini ve kaba malzemedan yapılmış drenaj tabakasını ayırmak amacıyla kullanıldığı bir drenaj sisteminin parçası olduğunda, yerine getirdiği işlev bir filtrasyon işlevidir. Bir drenaj olarak kullanıldığında, bir geotekstil döşeme düzleminde akışa izin verir. Bu durumda geotekstil, boşluk basınçlarını dağıtabilen, sıvıları toplayıp bir çıkışa iletebilen bir drenaja benzetilir. Bu fonksiyon ayrıca, toprak parçacıklarının sürüklenmesini sınırlayan bir filtre, geotekstil veya diğerinin varlığını varsayar. Geotekstiller levha şeklinde olduğu için drene edilecek toprakla temas yüzeyi büyüktür ve bu nedenle su toplama olasılıkları önemlidir. Bu kullanım özellikle temeller altında, dolgu altında (sıkıştırılabilir zemin üzerinde), toprak barajların gövdesinde, zemin ile dikey duvar veya tünel gibi bir yapı arasında veya bir geomembran ile kombinasyon halinde drenaj ile ilgilidir.

Güçlendirme:

Takviye için kullanılan geotekstil, içinde bulunduğu zemin bloğunun mekanik direncini artırır. Geotekstil hem yatağın gerilme mukavemetini hem de kırılmadan önce deforme olma kabiliyetini geliştirir. Takviye, başka bir eleman veya zayıf bir arayüz üzerindeki gerilmelerin yeniden başlamasıyla da ilgili olabilir. Bu, bir yamaca yerleştirilmiş bir geomembranın bir toprak tabakası ile kaplanması durumunda geçerlidir ya da geomembranın gerilimindeki yırtılma ile ya da toprak tabakasının kayması ile yıkım olabilir. Bu durumda geomembran ile zemin arasına yerleştirilen bir geotekstil, gerilmelerin yeniden başlamasını sağlar.

2.2.4 Vakum Konsolidasyon

Dolgu ile ön yüklemenin bir çeşididir. Bu yöntem izotropik tiptedir. Zemin özelliklerini iyileştirir ve kırılma ve yanal sünme imkansızdır. Zemin, altında bir vakumun oluşturulduğu su geçirmez bir zar ile kaplanmıştır: zemin böylece atmosfer basıncı ile yüklenir. Bu sistem her zaman dikey ve bazen yatay bir drenaj ağı ile birleştirilir.



Şekil 2.7 Vakum konsolidasyon (İnt.Kyn. 3).

2.2.5 Donatı Kullanılarak İyileştirme

İyileştirilecek zemin tabakası içinde rijit kolonlar oluşturmak için donatı kullanılan bu yöntemde, zemine etkiyecek dış yüklerin büyük bir kısmı bu donatılar tarafından taşınabilecektir.

Hangi metodun seçileceği hususunda; arazide karşılaşılan zemin koşulları, kolonların aynı geometride (hedeflenen çap ve boyda) ve istenen özellikte yapılabilmesi ile kolon/zemin arası sürtünmenin oluşturularak yük aktarımının sağlanması gibi parametreler çok önemlidir.

2.2.5.1 Fore Kazık

Taşıma gücü zayıf olan zemin türlerinde, yapıdan zemine gelecek yükleri sağlam zeminlere aktarmak ve buna ek olarak iksa amaçlı yapılan imalatlardır. Kazıklar, delme yapılarak imal edilecek olup yerleri; sahanın müsaitliği, zemin yapısı, kazığın çapı ve derinliğine bağlı olarak değişir. 50 cm ile 200 cm arasında fore kazık imalatı yapılabilmektedir. Genellikle zemin içerisinde kendi kendine boru sürebilen hidrolik delgi makineleri ile delinerek uygulama yapılır. Delme işlemi bittikten sonra zemin dışarı

alınmalı yer altı su seviyesi altında yapılan kazılarda muhafaza boruları delme ucundan önde ilerlemelidir. (Her fore kazık uygulamasında muhafaza borusu kullanmak şart değildir). Muhafaza boruları dökülen betonun akışkanlığı kaybolmadan çıkarılmalıdır. Muhafaza borusunun betonla sarılma oluşturmaması için muhafaza borusu çekilirken beton dökülmeye devam edilmelidir. Boru içerisinde 2 m kadar beton olması hususu sağlanmalıdır. Daha sonra zemin içine donatı kafesi yerleştirilmeli donatı kafesinin korozyona uğramaması için gerekli önlemler alınmalıdır. 12 metreyi geçen kafes imalatlarında bağ teli kullanılmalıdır. Şayet donatı kafesi daha uzunsu kaynak ya da klemens gibi bağlantı elemanları ile kullanılmalıdır. Kullanılan kafes gerekli pas payları bırakılarak servis vinci ile bozulmadan kuyuya indirilmelidir. Son olarak kuyuya beton dökümü yapılmaktadır. Betonun gerekli standartlara uygunluğu laboratuvar deneyleri ile ispatlanmalıdır. Mümkünse aynı gün beton dökümü yapılmalıdır. Aksi takdirde donatılı zemin şişebilir ve tekrar delme ve kuyu temizleme işlemleri tekrarlanabilmektedir.



Şekil 2.8 Fore kazık uygulaması.

2.2.5.2 Mini Kazıklar

Mini kazıklar genellikle, 10-30 cm arasında çaplarda çimento şerbeti veya harcı ile birlikte hazırlanmaktadır. Donatı olarak beton çeliği veya özel çelik profiller kullanılır. Kazığın zemine yükleri aktarması daima beton gövde sürtünme yüzeyinden oluşmaktadır. Yani yükler kayaya oturan kazıkların dışında, çevre sürtünmesi ile aktarılır. Kazık çapı

olarak delicinin veya kaplama borusunun dış çapı alınır. Mini kazıklar yatayla 100 eğimden düşey doğrultuya kadar çeşitli eğimlerle imal edilir.



Şekil 2.9 Mini kazıklar.

2.2.5.3 Zemin Çivisi

Zemin çivisi, $\Phi 20$ - $\Phi 30$ çelik donatıların zemin içine doğru çakılarak veya delindikten sonra içine donatı yerleştirip zeminin durağan hale gelmesini sağlama işlemidir (Toprak 2005). Bu yöntem, düşey yük taşımaktan ziyade yanal hareketlerinin önlenmesi amacı için kullanılmaktadır.

Şantiye sahasında zemin çivisi uygulama sıralamasında öncelikle zeminin cinsine bağlı olarak uygun delgi makinesi seçilir ve delgi işlemine projedeki değerlere uyularak başlanır. Açılan kuyulara hazırlanan zemin çivisi donatıları yerleştirilir. Donatı yerleştirilmesi sonucu hazırlanan enjeksiyon açılan kuyulara doldurulur. Enjeksiyon

işlemi sonrası hasır çelik serim imalatı gerçekleştirilir. En son işlem olarak shotcrete imalatı gerçekleştirilir. Zemin çivileri kalıcı ve geçici olarak ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 2.10 Zemin Çivisi Uygulamaları.

3. MATERYAL ve METOT

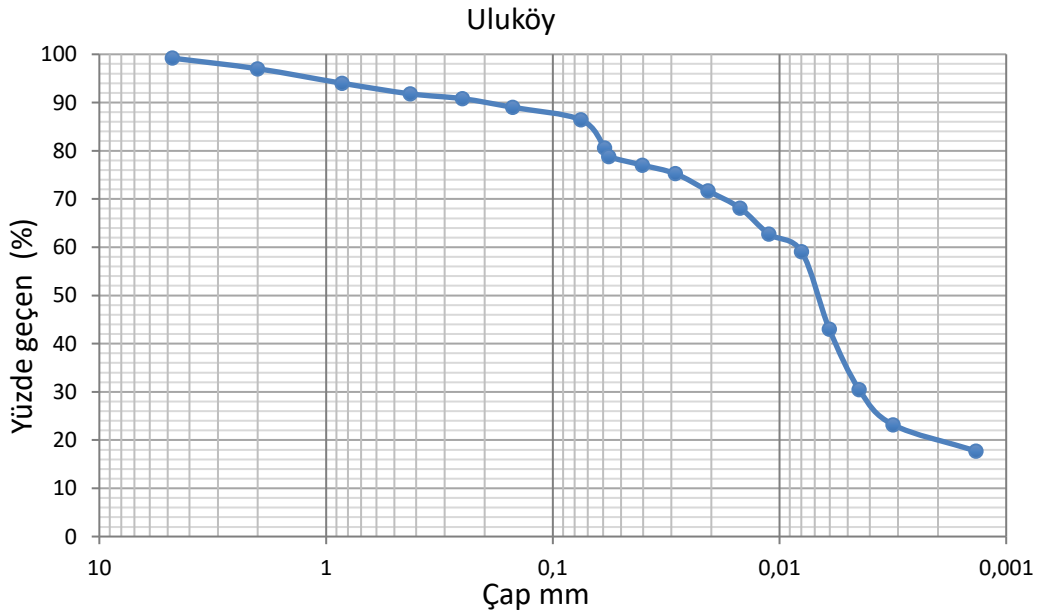
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeleri

Çalışmada toprak dolgu barajlarda kullanılabilirliği yeterli olmayan zemin numunesi ile deneyler yapıldı. Bu amaçla dolgu baraj yapımı için belirlenmiş ve özellikleri uygun bulunmayan malzeme ocaklarından numune temin edildi.

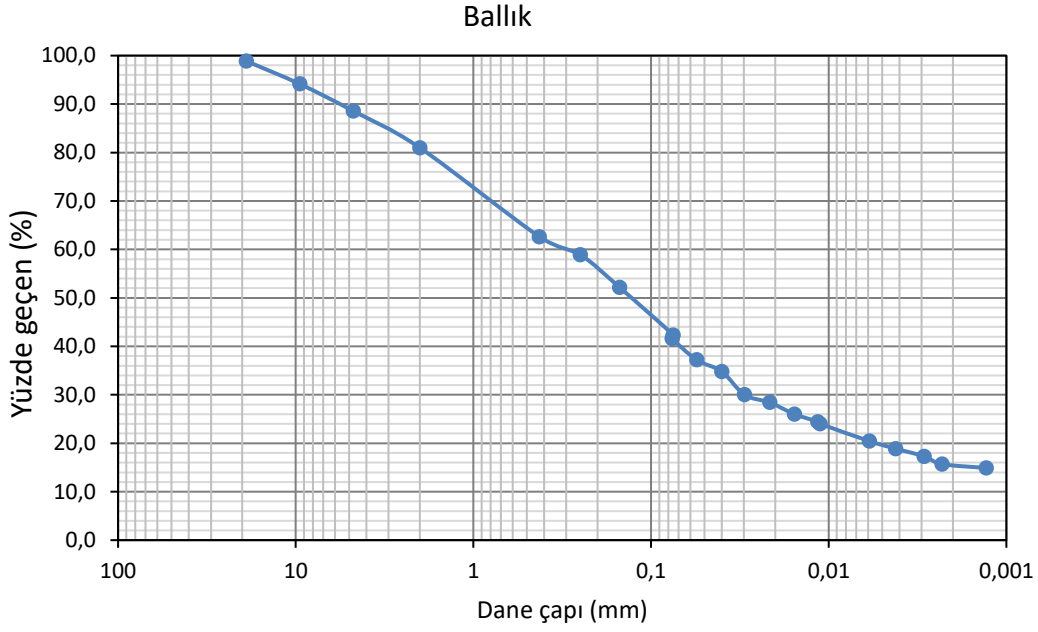
Katkı malzemesi olarak mermer tozu Afyonkarahisar'da bulunan özel bir mermer fabrikasından temin edildi. Diğer katkı maddesi uçucu kül ise Soma termik santralinden temin edildi.

3.1.1 Zemin

Malzeme Afyonkarahisar Dinar Uluköy'den ve Sandıklı Ballık'tan alınan malzemelerdir. Malzemenin elek analizi deneyi TS 1900-1 standardına göre yapılmıştır. Uluköy zeminini elek analizi sonucunda 200 nolu elek altı %86,4 olduğuna göre zemin ince tanelidir ve zemin grubu CL'dır. Ballık ise elek analizi ve Hidrometre deneyi sonucunda iyi derecelenmiş zemindir. Ballık numunesi 200 nolu elek altı %41,6 olduğuna göre zemin iri taneli bir zemindir ve zemin grubu SW'dır.



Şekil 3.1 Uluköy numunesinin granülometri grafiği.



Şekil 3.2 Ballık numunesinin granülometri grafiği.

Çizelge 3.1 Numune olarak kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri.

	Uluköy	Ballık
Özgül ağırlık	2,74	2,57
Likit limit (%)	29	58,07
Plastik limit (%)	(NP)(yapılamadı)	26,53
w_{opt} (%)	14,0	18,3
γ_{dmax} (kN/m³)	18,51	16,7
Zemin grubu	CL	SW
0,075 mm> (%)	86,40	41,60
4,76 mm> (%)	97,00	88,6

3.1.2 Uçucu Kül

Uçucu kül Manisa Soma termik santralından elde edilmiştir. ASTM C 618 standardına göre F tipi, TS EN 197-1 standardına göre ise W tipi uçucu kül sınıfındadır. Uçucu kül tanelerinin %80'i 200 nolu elek çapından (75 mikrometre) küçüktür.

3.1.3 Mermer Tozu

Mermer tozu, en küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi sırasında oluşan ve büyük çoğunluğu da 300 mikronun altında olan mermer tanecikleridir. Kesme işleminde su kullanılması nedeniyle suyla birlikte

çökeltme havuzlarına taşınır. Havuzlarda çökelen mermer tozu daha sonra atık sahalarına alınmaktadır. Kesme sırasında oluşan toz miktarı, Afyon ve İscehisar bölgesinde yaklaşık 125 000 ton/yıl gibi bir rakama ulaşmaktadır (Zorluer ve Usta 2003). Atıklar depolama sahalarında toplanmakta ve kullanım alanı kısıtlı olmasından dolayı atık miktarı her yıl katlanarak artmaktadır.

Katkı malzemesi olarak kullanılan mermer tozu Afyonkarahisar'da bulunan özel bir mermer fabrikasından temin edilmiştir.

Çizelge 3.2 Katkı Malzemelerinin Kimyasal Bileşimi.

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	KK
Mermer tozu	0,20	0,11	0,07	54,50	0,30	0,08	0,02	44,52
Uçucu kül	48,28	7,19	27,72	10,51	2,51	3,16	0,27	-

3.2 Deneyler

Çalışmada yapılan deneyler.

3.2.1 Su Muhtevası Belirlenmesi

Su içeriği, bir zemin örneğindeki suyun ağırlığının tanelerin ağırlığına oranıdır.

Su içeriği testi, doğal zemin bünyesindeki (numune) bulunan su miktarının belirlenmesini sağlar.

Deney yapılışı:

- Önceden numaralandırılmış numune kapları hassas bir terazide tartılıp kap ağırlıkları (W_1) olarak kaydedilir.
- Numuneden bir parçayı kabın içine doğal haliyle koyulur ve tartılır. Ağırlık W_2 olarak kaydedilir. (Kap + ıslak zemin ağırlığı = W_2)
- Sonradan numune kaplarını (110 ± 5) °C sıcaklıkta bir etüvde konularak sabit bir ağırlığa gelinceye kadar bekletilir.
- 24 saat geçtikten sonra numune çıkarılıp tartılır (W_3). Numune etüvde bekletme süresini 12 ile 24 saat arasında değiştir, bu süre zemin cinsine göre değişir.
- Yüzde olarak ifade edilen su içeriğini W belirlenir.

3.2.2 Tanımlama Deneyleri

3.2.2.1 Granülometri

Granülometrik analiz, bir zemin numunesini oluşturan farklı çaplardaki danelerin belirlenmesini sağlar.

Elek analizi:

Gerekli aletler

Elek takımı (4-10-20-40-60-100-140-200 nolu elekler), fırça, etüv, hassas terazi piset ve tepsi.

Deneyin yapılışı:

- Zemin numunesi çeyrekleme yöntemiyle alınıp etüvde kurutulur.
- 24 saat geçtikten sonra kuru numune tartılıp kayıt edilir.
- Sonra numuneyi yıkama yöntemiyle lavaboda 200 nolu elekten elenir. Elek üstü kalan numune tekrar etüve konulup 24 saat bekletilir.
- Kurutulmuş numune tartılır.
- Zemin numunesinin en büyük elekten en küçük eleğe kadar elenir. Her elek üstünde kalan malzemeyi tartılıp kayıt edilir. En son elek altında kalan yani tavada kalan miktarı da tartılıp kayıt edilir.
- Daha sonra her eleğin üstünde kalan ağırlık toplam ağırlıkla karşılaştırılır böylece kümülatif kalan (%) ve geçen yüzdesi elde edilir. Sonuçlar yarı logaritmik bir grafik üzerinde çizilir böylece granülometri eğrisi elde edilir.

Hidrometre: Hidrometre (sedimentasyon) deneyinin amacı, elek analizinde 200 nolu elekten geçen ince taneli (silt ve kil) zeminin tane boyutunun ağırlık dağılımını belirlemektir. Deneyin prensibi, hareketsiz haldeki bir sıvı ortamda, ince ila çok ince tanelerin çökme hızının boyutlarının bir fonksiyonu olduğu gerçeğini kullanır. Stokes yasası, aynı yoğunluktaki küresel tanecikler durumunda, çap ile çökme hızı arasındaki ilişkiyi verir.

Deney için gerekli aletler:

200 nolu elek, cam mezürü, kronometre ayrıştırıcı kimyasal (sodyum hexameta-fosfat

(NaPO₃)₆), hassas terazi, termometre, elektrikli bir mikser ve karıştırma kabı, etüv ve hidrometre aleti.

Deney yapılışı:

- 0,075 mm elekten geçen 50 g zemin alınır.
- Numune 250 ml'lik bir kap içine yerleştirilir ve üzerine su ve kimyasal ayrıştırıcı (sodyum hexameta-fosfat (NaPO₃)₆) 125 ml ilave ederek silt ve kil danelerin birbirinden ayrılır. Numune iyice karıştırılır ve 24 saat bekletilir.
- Bekleme süresi sonunda bir elektrik mikseri kullanılarak zemin kimyasal madde iyice karıştırılır.
- Karışmış olan süspansiyon mezüre konular üzerine su ilave ederek 1000 ml olması sağlanır.
- Deney başlamadan önce mezür üst tarafını poşet ile kapatılır ve el avucu ile kapatılır bir dakika boyunca alt-üst edilerek süspansiyon homojen hale getirilir.
- Bu işlemi sonunda hızlı bir şekilde kronometre başlatılır. Hidrometre aletini süspansiyon içine yavaşça çok sarımadan daldırılır ve 5, 10, 120 saniyeleri çıkarılmadan okumalar alınır ve termometre ile düzenli olarak süspansiyon sıcaklığı alınır.
- Hidrometreyi süspansiyondan yavaşça çıkarılır okuma zamanı geldiğinde tekrar süspansiyona daldırılır.
- Okuma zamanı şu şekilde: 5, 10, 15, 30, 60 saniye ve 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 1440 dakikalarda okuma alınır.
- Okumalar bazen okumalar 72 saat içinde tamamlanır. Süspansiyon içindeki bütün zeminlerin daneleri Stoke yasası gereği hepsi dibe çökeceğe kadar deney devam eder başka bir deyişle hidrometre okuma sıfır oluncaya kadar.
- Deney sonunda süspansiyon bir porselen içine konular ve etüvde kurutulur. Sonradan tartılır.

3.2.2.2 Atterberg Limitleri

Kıvam limitleri amacı, katı, plastik ve sıvı hal arasındaki sınırları işaretleyen su içeriği cinsinden ifade edilen kıvam sınırlarını belirlemektir. Bu testlerin yalnızca tane çapının

0,075 mm'den küçük olduğu tanımlanan ince zemin için geçerlidir.



Şekil 3.3 Casagrande Likit Limit Deney Alet.

Likit limit: plastik durum ile sıvı hal arasındaki geçişi karakterize eder. Zeminin kendi ağırlığının etkisi altında viskoz bir sıvı olarak aktığı yüzde olarak ifade edilen ağırlıkça su içeriğidir.

Deneyin yapılışı:

- Zemin numunesi etüvde 24 saat bekletilir.
- Etüvden çıkarılan numune 40 nolu elekten elenip bir miktar alınarak porselen kabına yerleştirilip piset ile su ilave ederek karıştırılır.
- Numune yaklaşık olarak macun kıvamına kadar karıştırılır.
- Numuneden biraz alınır Casagrande aletine yerleştirilir. Spatula ile düzeltilir. Yarık açma çubuğu yardımıyla mümkün olunca numune iki eşit parçaya bölünür.
- Sonrasında aletin çevirme kolu çevrilerek çevirme sayısı not alınır. Yükseklikten saniye 2 defa düşürülür. Çevirme işlemini yarık açma çubuğu ile açılan oyuk kapanmaya kadar devam edilir. Kapandığı anda tastaki numuneden bir miktar alınır su muhtevası belirlemek için. Son olarak vuruş sayısı kayıt edilir.
- Bu işlemi, numuneye tekrar su katarak, en az 4 kez tekrarlanır.

Plastik limit: katı hal ile plastik durum arasındaki geçişi karakterize eder. Bu sınır, zeminin işlenmesi ve sıkıştırmanın desteklenmesi için en uygun olan su içeriğini, yüzde

olarak ağırlıkça gösterilir.

Deneyin yapılışı:

- Bu deneyin numune hazırlaması likit limitteki aynısıdır ve plastik limit deneyin sonunda su muhtevası daha fazla olacağı için likit limit deneyin sonundaki numune kullanılır.
- Belli bir miktar alıp buzlu bir cam üzerinde el avucu ile yuvarlanır.
- Avuç ile yuvarlama sırasında oluşan 3 mm kalınlıktaki çubuklarda ve kendi kendine kopmalar oluştuğunda su muhtevasını belirlemek için numune kabına alınır.
- Elde edilen su muhtevası plastik limittir.



Şekil 3.4 Plastik Limit Deneyi.

3.2.2.3 Özgül Ağırlık

Zemin üç fazdan oluşur, katı parçacıkları ve boşluklardan (su ve hava) oluşur. Zemin özgül ağırlığı, katı parçacıkların birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına ifade eder ve G_s olarak gösterilir. G_s birimsizdir. G_s zemin mekaniğinin önemli bir parametresi. G_s , porozite kuru ve doymuş yoğunluk ve doygunluk derecesi gibi birkaç

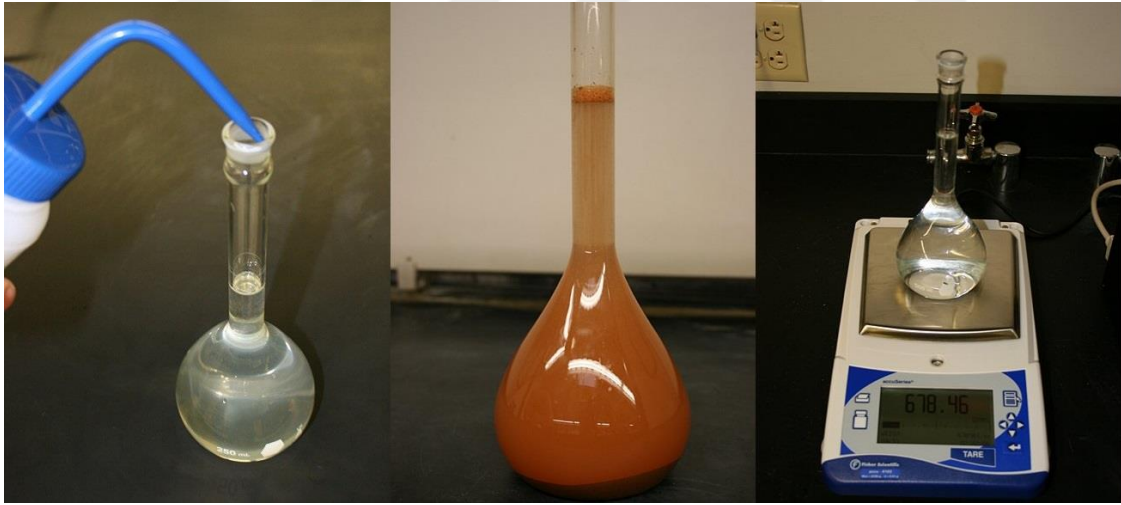
önemli zemin parametresini türetmek için de kullanılır. Özgül ağırlık elde etmek için piknometre deneyi yapılır.

Deney için gerekli aletler:

Hass terazi, 250 ml veya 500 ml hacminde bir piknometre, piset, desikatör, elektrikli mikser, etüv, sodyum hexameta-fosfat, pipet ve vakum uygulayıcı alet.

Deney yapılışı:

- Kurutulmuş zemin numunesinden 50 gr alınır (w_1).
- Numune piknometreye boşaltılır ve üzerine su ilave edilir. Piknometre iyice çalkalanır sonradan piknometre desikatör içinde yerleştirilip numunedeki hava kabarcıkları vakum pompası ile dışarı atılır.
- Piknometre üzerine işaretli noktaya kadar su ilave edilir ve tartılır (w_3). Boş piknometre damıtık su ile eklenir işaretli yere kadar doldurulur ve tartılır (w_2).



Şekil 3.5 Piknometre (İnt.Kyn. 2)

3.2.3 Kompaksiyon

Kompaksiyon, zemin danelerin arasındaki havanın dışarıya atılarak zeminin sıkıştırılması işlemidir. Danelerin arasındaki hava azalırsa yoğunluk artmaktadır. Zemini sıkıştırmanın ana nedeni, yapı yükleri altında sonraki oturmaları azaltmaktır. Sıkıştırma, zeminin

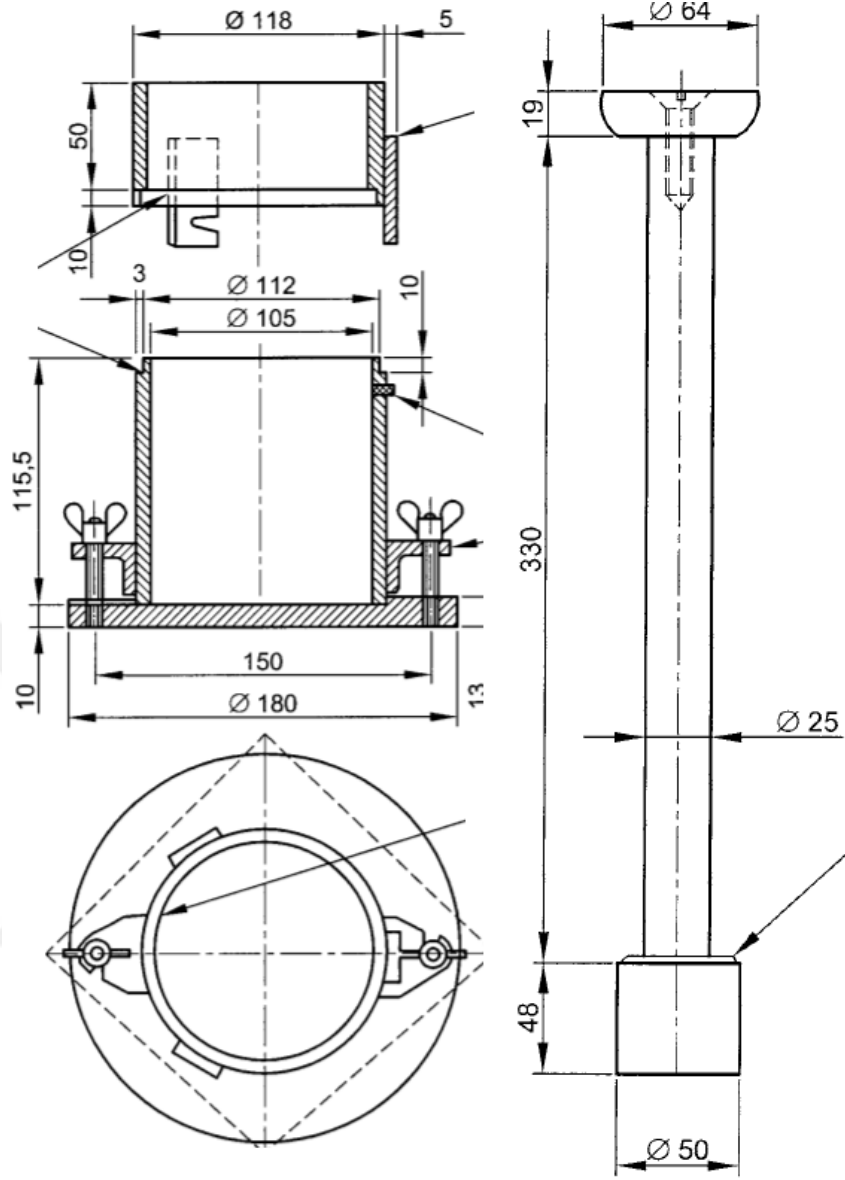
kayma mukavemetini arttırır ve suyun Zeminden akmasını zorlaştıran boşluk oranını azaltır.

Gerekli aletler :

Mold sıkıştırma kalıbı (11,55 yüksekliği ve 10,5 çapı) tokmak, ağırlığı 2,5 kgdır. Hassas ve hass olmayan terazi, spatula, damıtık su, karıştırma kalıbı, etüv, küçük numune kapları (su muhtevası için).

Deney yapılışı :

- Zemin numunesi açıkta kurutup 20 mm'lik elek yardımıyla elenir. Elenen zeminden yaklaşık 4-5 kg alınır.
- Karıştırma kabında su ilave ederek topuklar kalmayacak şekilde iyice karıştırılır. İlave edilen suyun miktarını zemin cinsine göre değişir.
- Mold yere oturtulur ve tokmak yardımıyla numune 3 tabaka eşit miktarda sıkıştırılır. Tokmak 30,5 cm'lik bir yükseklikten düşürülür ve her tabaka için 25 vuruş uygulanır. Tokmak hep aynı noktaya düşmeyecek. Deneyi başlamadan önce Mold taban kısmı hassas olmayan terazide ölçülür.
- Kalıp üst seviyesi çıkarılır, alt kısmı spatula ile düzeltip tartılır. Kalıptan çıkarılan numuneden (üstten ve alttan) su muhtevası için yeterli miktarda alınır, kalan numune karıştırma kabında ufalanır.
- Bu sıkıştırma işlemi en az 5 kere tekrarlanır ve her kerede su uygun artışlarla ilave edilir.



Şekil 3.6 Kompaksiyon kalıbı (TS-1900)

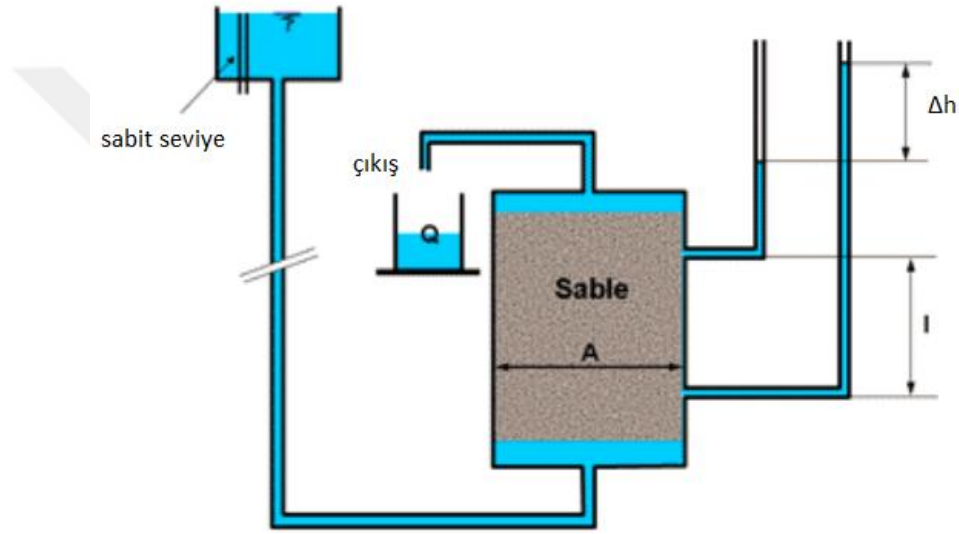
3.2.4 Permeabilite

Zemin geçirgenliği, zeminin katmanları aracılığıyla suyu hareketliği veya depolama yeteneğinin bir göstergesidir ve içindeki gözeneklerin boyutuna ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerine bağlıdır.

Sabit seviyeli permeabilite:

Çakıllı ve kumlu iri taneli ve geçirgenliği yüksek olan zeminlerde sabit seviyeli permeabilite deneyi uygulanır. Kullanılan deneysel cihazın diyagramı şekil 3.7'da

gösterilmektedir. Deney başlamadan önce zemin numunesinden 4-5 kg alınır ve kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su ilave edilip iyice karıştırılır. Numune metal sıkıştırma kalıbında üç tabaka halinde sıkıştırılır. Sonra numuneyi permabilite sistemine yerleştirilip doygun hale getirilir. Sabit su düzeyli bir haznedan gelen su, zeminden geçerek, hacim bölümlü bir kapta toplanır. Kararlı akış elde edildikten sonra, belli bir sürede (Δt), kapta toplanan su miktarı (ΔQ) belirlenir. Zemin örneğinin alt, üst ve orta kısımlarına bağlanan borularda, su düzeyleri gözlenir, okunur, kaydedilir. Darcy Yasasından k hesaplanır.



Şekil 3.7 Sabit seviyeli (İnt.Kyn. 4).

Numunede süzülen suyun miktarı Q , belirli bir t süresi için ölçülür. Geçirgenlik katsayısı k şu şekilde verilir:

$$K = \frac{QL}{A \cdot \Delta h} \text{ (cm. s}^{-1}\text{)} \quad (3.1)$$

Δh : Su yükseklikleri arasındaki fark.

Δt : Zaman (s).

Q : t zamanında zeminden geçen su hacmi.

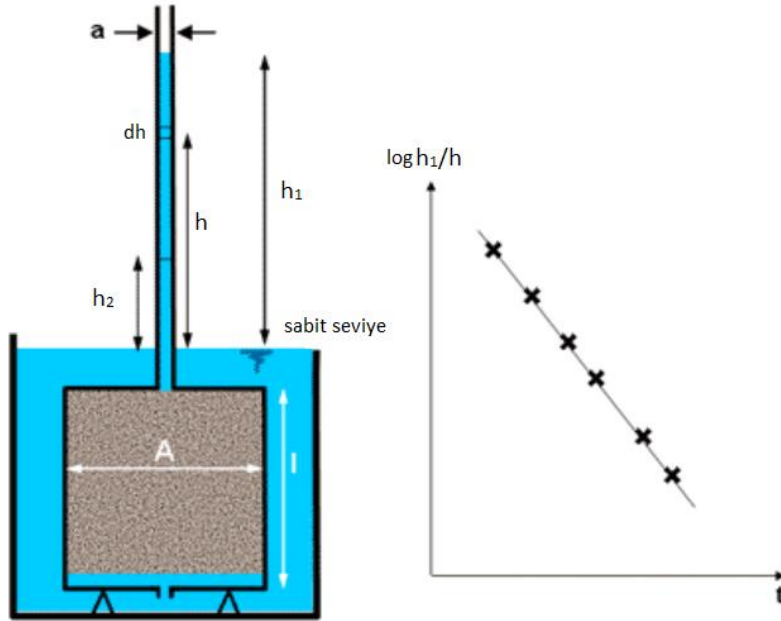
L : Hücrenin yüksekliği.

A : Zemin numunesinin düşey alanı.

Düşen seviyeli permeabilite:

Siltli ve killi ince taneli ve geçirgenliği düşük ($<10^{-7}$ m/s) olan zeminlerde düşen seviyeli permeabilite deneyi uygulanır.

Kullanılan deneysel cihazın diyagramı şekil 3,8’da gösterilmektedir. Deney başlamadan önce zemin numunesinden 4-5 kg alınır ve kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su ilave edilip iyice karıştırılır. Numune metal sıkıştırma kalıbında üç tabaka halinde sıkıştırılır. Sonra numuneyi permabilite sistemine yerleştirilip doygun hale getirilir, bu işlem 24 saatten fazla alabilir. Numune doygun hale geldikten sonra deneyi başlatılır ve suyun ilk seviyesini okunup kaydedilir ve kronometre başlatılır. Zaman içinde su seviyesi h_1 düzeyinden h_2 düzeyine düşer ve geçen zaman kaydedilir. K geçirgenlik katsayısı hesaplanır.



Şekil 3.8 Düşen seviyeli permeabilite (İnt.Kyn. 4).

A: kesit alanı

L: numune boyu

a: borunun kesit alanı

h: t anında hidrolik yükü

Geçirgenlik katsayısı aşağıdaki ifade ile hesaplanır:

$$K = 2,3 \frac{a}{A} \frac{L}{t_2 - t_1} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.2)$$

3.2.5 Tek Eksenli Basınç Deneyi

Tek eksenli basınç deneyi üç eksenli deneyinin özel bir şeklidir. Konsolidasyonsuz drenajsız (UU) deneyiyle aynı koşullara sahiptir. Deney numune hazırlama kalıbının iç çapı 5 cm yüksekliği 10 cm'dir. Zemin numunesine çevre gerilmesi tatbik edilmeksizin, düşey kuvvet etkisinde, eksenel deformasyon ve düşey gerilme grafikleri çizilir. Bu grafikten elde edilen maksimum gerilemeye serbest (tek eksenli) basınç dayanımı denir.

Gerekli aletler :

- Tek eksenli basınç deneyi cihazı
- 0,01 mm duyarlıklı deformasyon okuma saati,
- Su içeriği için kaplar
- Terazî
- Etüv
- Kronometre
- Kumpas
- Maket bıçağı

Deney yapılışı:

- Zemin numunesi deney cihazının alt kısmının merkezine yerleştirilir. Cihaz çalıştırılarak numunenin üst kısmına hiçbir boşluk kalmayacak şekilde temas etmesi sağlanır. Zemin numunesi alt ve üst yüzeyleri deney aygıtının alt ve üst kısımlarının merkezlerine gelecek şekilde ayarlanır.
- Deformasyon okuma saati ve kuvvet sıfırlanır. Deney hızı ayarlanır.
- Numunenin yüklenmesine başlanır ve deformasyon saatinin 10-15-20-25-... gibi aralıklarında kuvvet halkası saatinden okumalar alınır.

- Kırılmanın gözle görülebilir olması halinde; yüklemeler örnekte kırılma düzlemi görülünceye kadar devam ettirilir. Böyle durumlarda yükler önce artar ve bir pik (maksimum) değere ulaşır. Okumalardan birbirini takip eden birkaç tanesi sabit kalabilir. Sonraki okumalarda genelde ani azalmalar görülür.



4. BULGULAR

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar tablo ve grafik olarak verilmektedir.

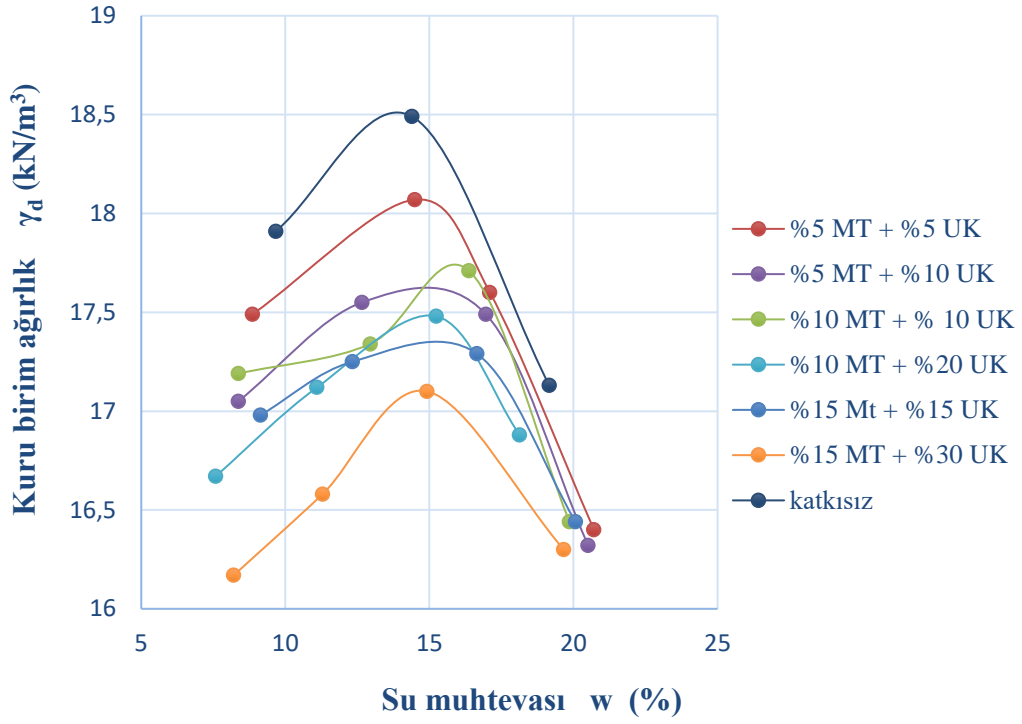
4.1 Kompaksiyon

Bu deney zemin numunelerinin en büyük birim kuru ağırlık ve optimum su muhtevasının belirlenmesi için yapılmaktadır. Ayrıca serbest basınç deneyi için numunelerin hazırlanmasında kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su muhtevası ve en büyük kuru birim ağırlık değerleri kullanılmıştır.

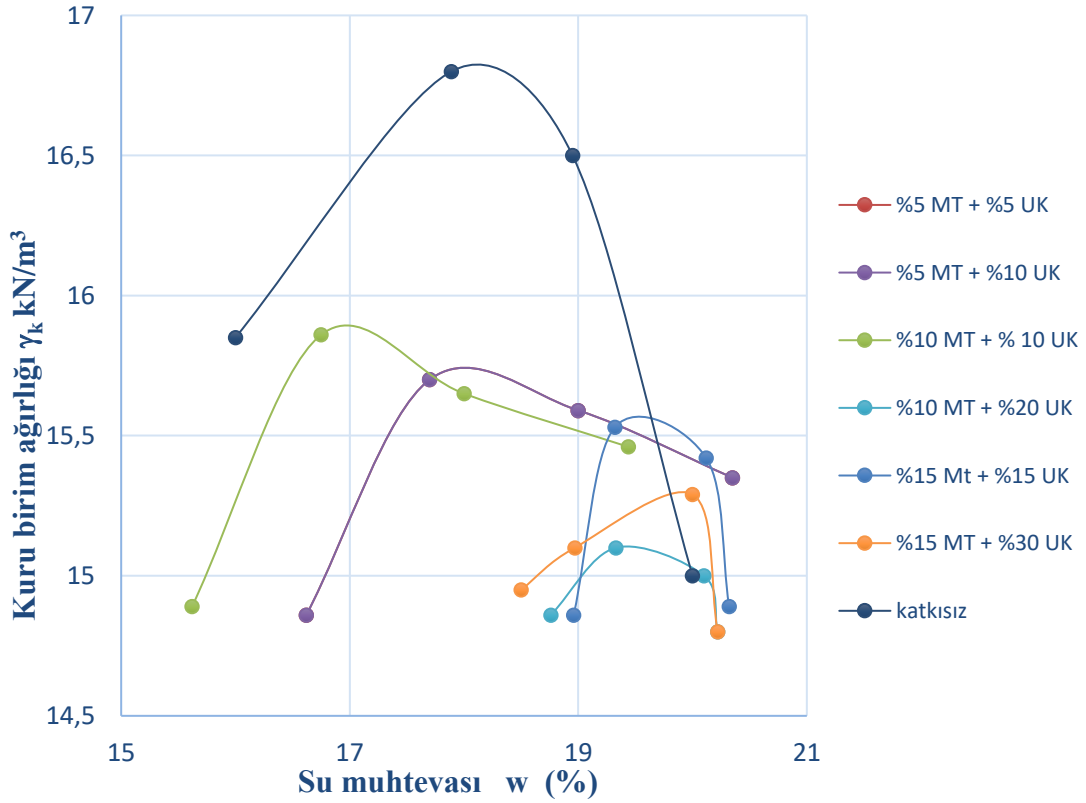
Şekil 4.1, şekil 4.2 ve çizelge 4.1'e bakıldığında, tüm karışımlarda kuru birim hacim ağırlığında azalma, optimum su muhtevasında ise artış gözlenmiştir. Uluköy numunesinde en büyük kuru yoğunluk değeri katkısız numunede $18,51 \text{ kN/m}^3$ görülürken, katkı miktarı arttıkça bu değer düşmüş ve 15 MT- 30 UK numunesinde $17,11 \text{ kN/m}^3$ olarak elde edilmiştir. Optimum su muhtevası ise katkısız numunede %14 iken, yine 15 MT- 30 UK numunesinde %16,8 olarak görülmektedir.

Ballık numunesinde de benzer durum söz konusudur. Ballık numunesinde en büyük kuru yoğunluk değeri katkısız numunede $16,78 \text{ kN/m}^3$ iken, katkı miktarı arttıkça bu değer düşmüş ve 15 MT- 15 UK numunesinde $15,11 \text{ kN/m}^3$ olarak elde edilmiştir. Optimum su muhtevası ise katkısız numunede %18,3 iken, 15 MT- 30 UK numunesinde %19,8 olarak görülmektedir.

Katkı miktarı arttıkça kuru yoğunluk değerlerinde azalma, optimum su muhtevasında ise artış oluşumu, daha küçük tane çapına sahip zemin oranında artma ile ortaya çıkmaktadır. Bu durum tane çapının küçülmesi ile numunenin birim kütlesi veya hacminde daha büyük tane yüzey alanına sahip olması, yüzey alanının büyümesi ile de daha çok suya ihtiyaç göstermesi olarak açıklanabilir.



Şekil 4.1 Uluköy numunesinin kompaksiyon grafiği.



Şekil 4.2 Ballık numunesi kompaksiyon grafiği.

Çizelge 4.1 Kompaksiyon sonuçları.

	Uluköy		Ballık	
	W _{opt} (%)	ƒ _{dmax} (kN/m ²)	W _{opt} (%)	ƒ _{dmax} (kN/m ²)
Katkısız	14,0	18,51	18,3	16,78
5MT-5UK	15,0	18,07	18,0	15,72
5MT-10UK	15,0	17,61	19,0	15,81
10MT-10UK	15,9	17,74	17,0	15,79
10MT-20UK	16,0	17,48	19,5	15,55
15MT-15UK	15,1	17,35	19,5	15,11
15MT-30UK	16,8	17,11	19,8	15,35

4.2 Eksenel Basınç

Bu deney mermer tozu uçucu kül katkısının ve kür süresinin zemin dayanımına yaptığı değişimleri gözlemlemek için yapılmıştır.

4.2.1 Numune Hazırlama

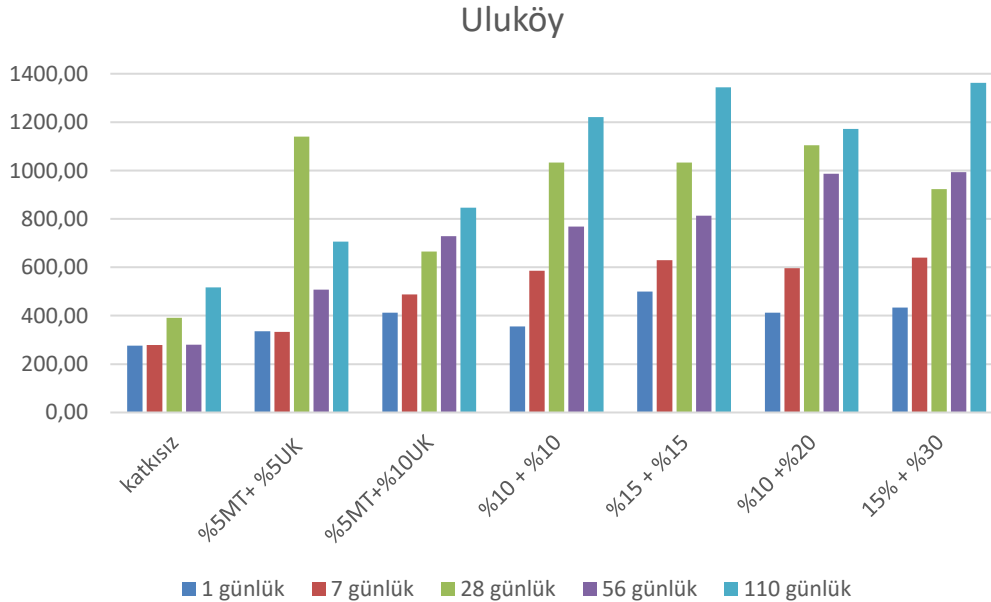
Serbest basınç deneyi için hazırlanacak numunelerde, her bir karışım için kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim ağırlık değerleri esas alınmıştır. Numuneler hacim kontrollü olarak hazırlanmıştır. İç çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm olan kalıplarda silindirik numuneler hazırlayabilmek için gereken kuru zemin, karışım suyu ve oranlara göre mermer tozu-uçucu kül birlikte karıştırılmıştır. Sonra 3 tabaka halinde ve kalıbın hacmine tam olarak yerleşecek şekilde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sırasında su muhtevasının değişmemesi için numuneyi karıştırdığımız kabın üzeri nemli bir bezle örtülmüştür.

Kalıba sıkıştırılan numune, zarar vermeyecek şekilde numune çıkarıcı yardımıyla çıkarılmış ve 3 kat streç film ile sarılmış ve etiketlenerek desikatöre yerleştirilmiştir. Desikatörlere yerleştirilen numunelere 1, 7, 28, 56 ve 110 günlük kürler uygulanmıştır. Kür süresi sonunda numuneler desikatörden alınarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Her kür süresi ve karışım serisi için en az 3 numune hazırlanmıştır. Üçer tane numune hazırlanmasının nedeni, numunenin deneyden önce zarar görmesi, deney sırasında beklenmeyen bir durum oluşması ve kabul edilemeyecek bir sonuç çıkma ihtimallerine karşı hazırlıklı olmaktır. Bu numunelerin dayanım sonuçları ise iki numunedan elde edilen sonuçların ortalamasıdır. Böylece deneysel hata oranı azaltılmış olmaktadır.

Uluköy numunesinin sonuçları:

Serbest basınç deneylerinde her bir karışım ve kür süresi için hazırlanan çift numune sonuçları ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Buna göre Uluköy numunesinde karışımlarda katkı miktarı ve kür süresi arttıkça dayanım değerleri yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.2). Numunelere karıştırılan mermer tozu ve uçucu kül arasında oluşan reaksiyon çok yavaştır. Bu reaksiyon sonucu zemin dayanımı artmaktadır. MT ve UK ile daha önce yapılan çalışmalarda da (Zorluer, 2014, 2016, 2020) benzer sonuçlar görülmüştür.

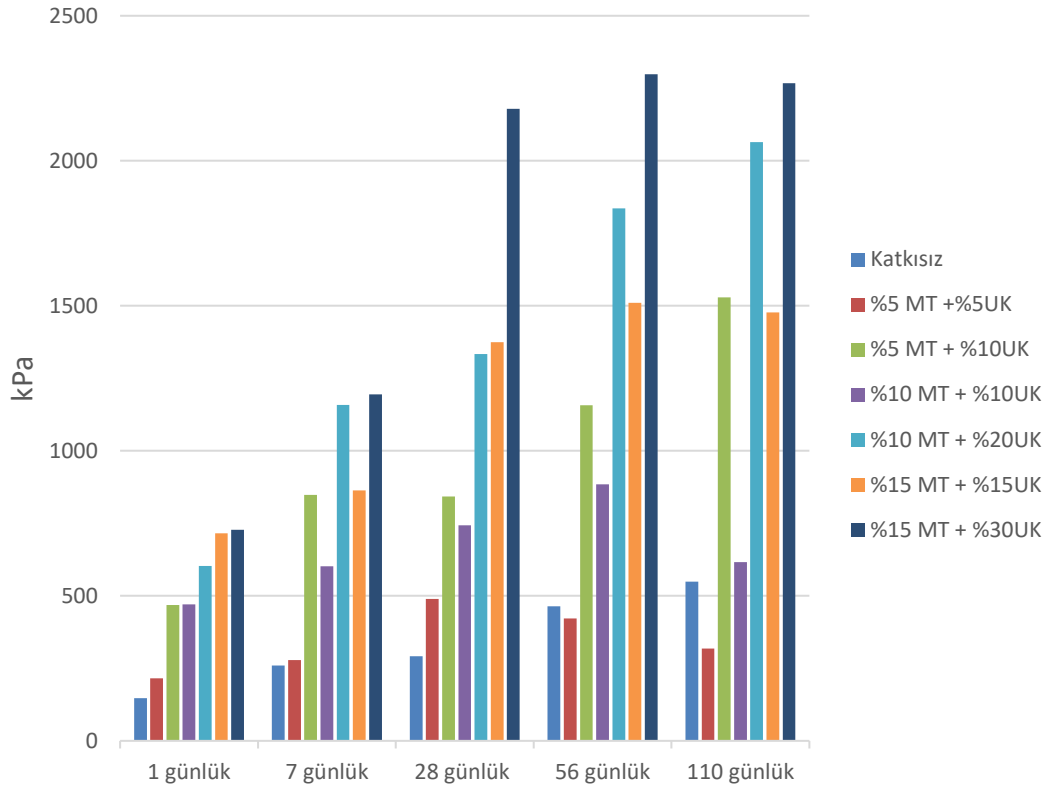
Uluköy numunesinde 7, 56 ve 110 günlük kür süreleri sonunda %15MT+%30UK katkılı numunelerde en yüksek dayanım değerleri elde edilirken, %15MT+%15UK katkılı numunede 1 günlük kür süresi sonunda, %5MT+%5UK katkılı numunede 28 günlük kür süresi sonunda en büyük dayanım elde edilmiştir. Uluköy numunesinde oluşan en yüksek dayanım değerleri çizelge 4.2’de koyu renkli olarak belirtilmiştir. Şekil 4.3’te ise her kür süresi sonunda karışımlarda oluşan dayanım değişimleri ayrı grafikler olarak görülmektedir. Şekil 4.4’de ise kür sürelerine bağlı dayanım değişim eğrileri görülmektedir.



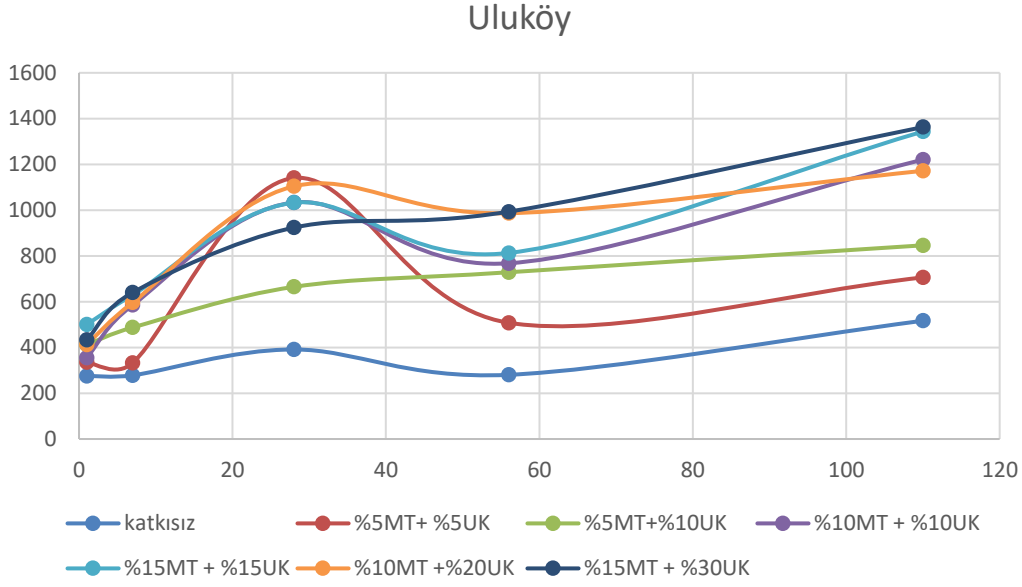
Şekil 4.3 Uluköy eksenel basınç deney sonuçları.

Çizelge 4.2 Uluköy eksenel basınç deney sonuçları.

Uluköy	1 günlük (kN/m ²)	7 günlük (kN/m ²)	28 günlük (kN/m ²)	56 günlük (kN/m ²)	110 günlük (kN/m ²)
Katkısız	275,55	278,49	391,26	280,45	516,78
%5MT + %5UK	335,37	332,42	1140,44	507,95	706,03
%5MT + %10UK	411,85	487,36	664,85	728,59	846,26
%10MT + %10UK	354,98	585,42	1033,55	767,81	1220,85
%15MT + %15UK	500,11	629,55	1032,57	812,92	1343,42
%10MT + %20UK	412,83	596,20	1104,16	986,48	1171,82
%15MT + %30UK	433,43	640,33	923,73	993,35	1363,03



Şekil 4.4 Uluköy Numunesine kür süresine bağlı dayanım değişimleri.



Şekil 4.5 Uluköy kür süresine göre katkılı numunelerindeki basınç değişimi.

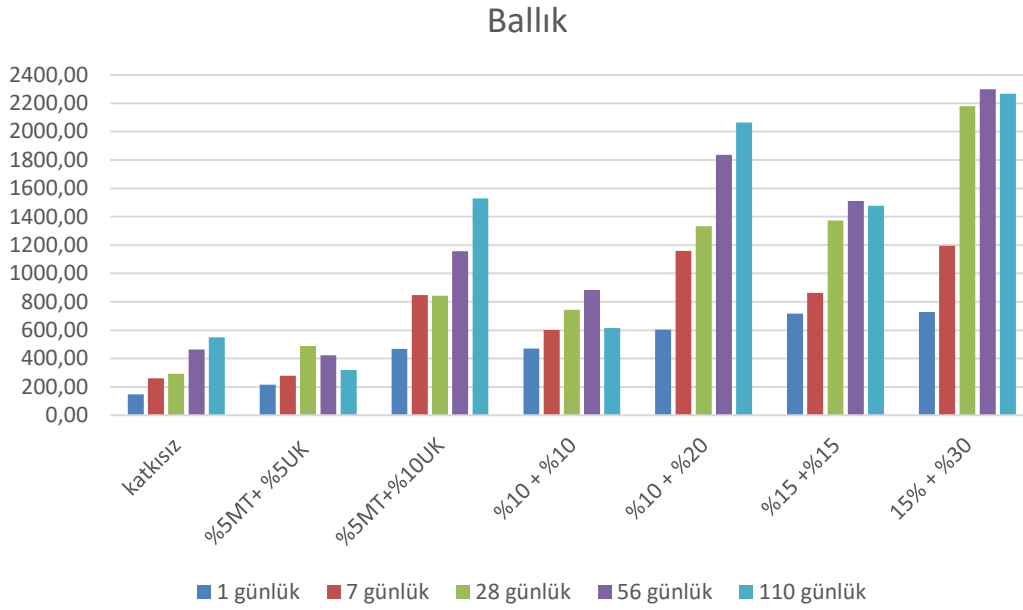
Ballık numunesinin sonuçları:

Ballık numunesiyle yapılan serbest basınç deneylerinde de Uluköy numunelerine benzer sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 4.4, Şekil 4.6). Ballık numunesinin en büyük dayanım değerleri tüm kür sürelerinde %15MT + %30UK karışımında elde edilmiştir. En büyük dayanım değerleri çizelge 4.4'te koyu renkli olarak gösterilmiştir. Şekil 4.7'te ise her kür süresi sonunda karışımlarda oluşan dayanım değişimleri ayrı grafikler olarak görülmektedir. Şekil 4.8'de ise kür sürelerine bağlı dayanım değişim eğrileri görülmektedir.

Ballık numunesinde tüm kür süreleri için en büyük dayanım değerlerinin aynı karışım oranında elde edilmesinin nedeni iyi derecelenmiş kum (SW) zeminden kaynaklandığı düşünülmektedir. İri taneli dokusunun MT ve UK katkılarının daha homojen bir şekilde karıştırılabilmesine neden olduğu ve iri tanelerin arasında bağlayıcı etkisini yükselttiği ifade edilebilir.

Dayanım değerlerinde görülen bir diğer sonuç ise UK katkı miktarının MT katkı miktarından 2 kat fazla olduğu numunelerde, MT ve UK oranlarının eşit numunelere göre daha yüksek dayanımların elde edilmiş olmasıdır. Bu durum Ballık numunesinde çok net görülürken (şekil 4.6, şekil 4.8), Uluköy numunesinde biraz daha dalgalı seyir izlemiştir.

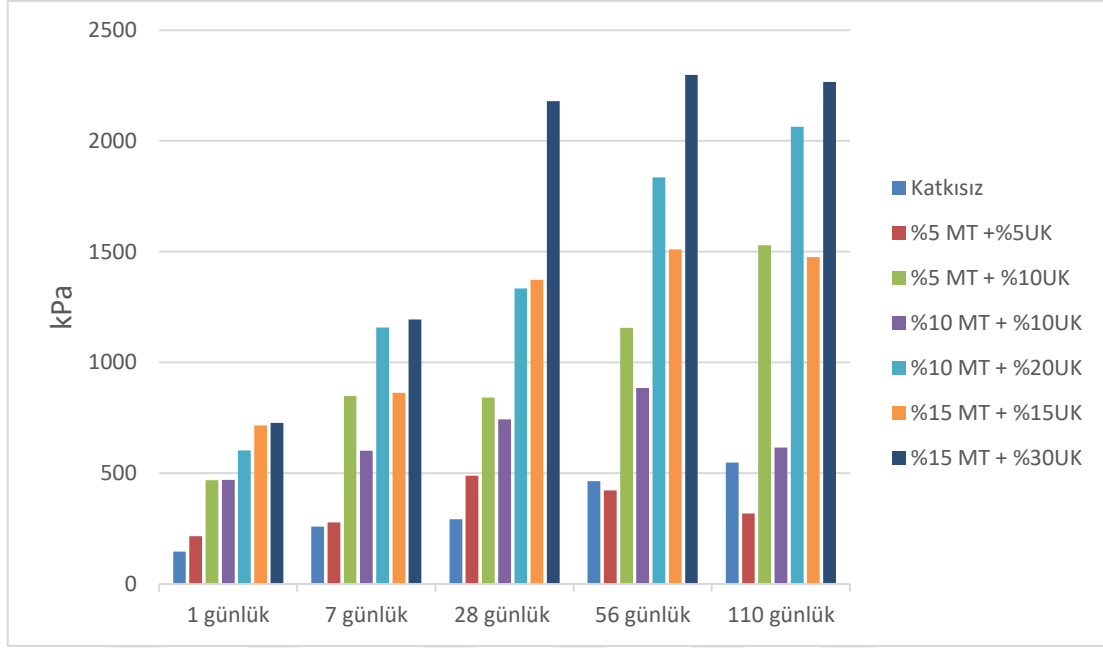
Bu sonuç UK'nin miktarının MT'den fazla olması (çalışmada 2 kat fazla) durumunun daha yüksek dayanım değerleri verdiğini göstermektedir. Diğer taraftan iri taneli zeminlerde ince taneli zeminlere göre daha lineer bir dayanım artışı oluşturduğu sonucu da çıkmaktadır.



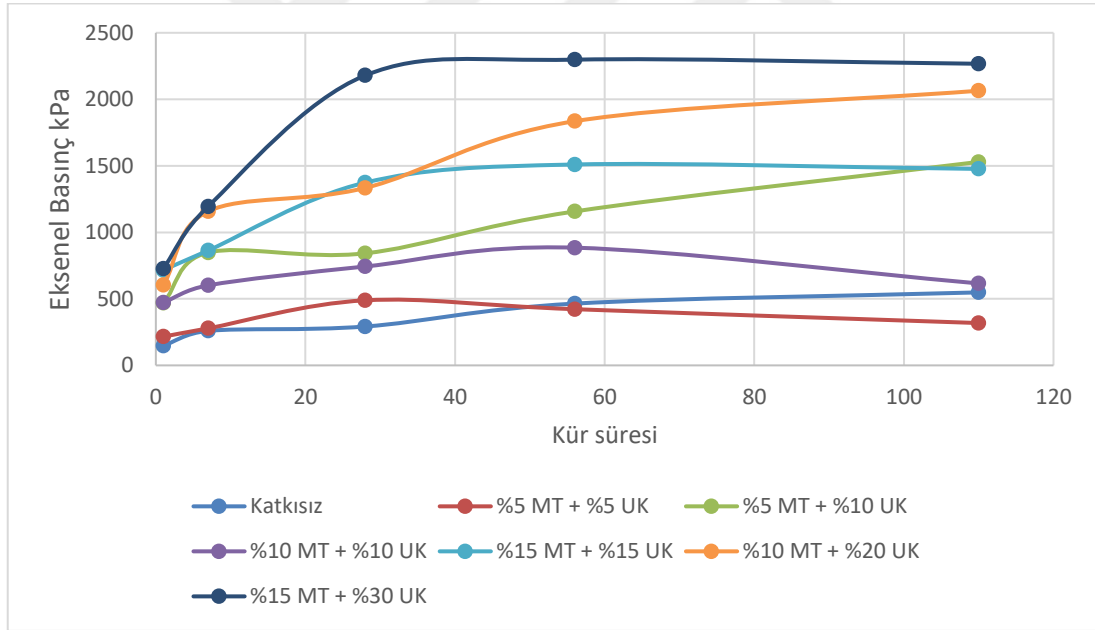
Şekil 4.6 Ballık numunesi aksenal basınç deney sonuçları.

Çizelge 4.3 Ballık numunesi aksenal basınç deney sonuçları.

Ballık	1Günlük (kN/m ²)	7Günlük (kN/m ²)	28Günlük (kN/m ²)	56Günlük (kN/m ²)	110Günlük (kN/m ²)
Katkısız	146,70	259,50	292,03	464,34	548,52
%5 MT +%5UK	216,00	278,60	489,00	422,2	318,2
%5 MT + %10UK	468,60	848,20	842,35	1157,25	1529,38
%10 MT + %10UK	470,90	601,60	743,4	884,63	616,00
%10 MT + %20UK	603,30	1157,90	1333,80	1835,40	2064,30
%15 MT + %15UK	716,10	863,60	1374,05	1510,08	1476,70
%15 MT + %30UK	727,20	1194,90	2179,67	2298,04	2267,13



Şekil 4.7 Ballık numunesi karışım oranı dayanım.



Şekil 4.8 Ballık numunesi kür süresine göre basınç değişimi.

4.3 Permeabilite

Katkı maddelerinin zemin geçirgenliğine etkisini gözlemlemek için permeabilite deneyleri yapılmıştır. Permeabilite deneyi Ballık numunelerinde sonuç verirken Uluköy numunelerinde sonuç alınamamıştır. Çizelge 4.4 Ballık numunesinde yapılan

permeabilite deney sonuçlarını, Çizelge 4.5 Uluköy numunesinde yapılan permeabilite deney sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 4.4 Ballık permeabilite deney sonuçları.

Karışımın adı	Permeabilite Katsayısı (k) (cm/sn)
Katkısız	$1,25 \cdot 10^{-5}$
%5 MT + %5 UK	$4,45 \cdot 10^{-4}$
%5 MT + %10 UK	$3,31 \cdot 10^{-6}$
%10 MT + %10 UK	$6,39 \cdot 10^{-5}$
%10 MT + %20 UK	$3,67 \cdot 10^{-6}$
%15 MT + %15 UK	$6,70 \cdot 10^{-6}$
%15 MT + %30 UK	$3,62 \cdot 10^{-7}$

Deney sonrası sonuçlarda genel olarak katkı miktarının artmasıyla geçirgenlik katsayısı azalmaktadır. Geçirgenlik katsayısının en düşük değeri $3,62 \cdot 10^{-7}$ cm/s ile % 15 MT + %30 UK karışımında gözlemlenmiştir. Bu karışımında ince oranı arttığı için numune içindeki boşluklar azalmış ve bu durumda geçirgenlik azalmıştır. Dolgu barajlar gibi geçirimsizliği düşük malzemelerin kullanıldığı durumlarda MT ve UK katkısının geçirimsizliğin azaltılmasında avantaj sağlayacağı görülmektedir.

Uluköy:

Çizelge 4.5 Uluköy permeabilite deney sonuçları.

Karışımın adı	Geçirgenlik (cm/sn)
Katkısız	$4,30 \cdot 10^{-7}$
%5 MT + %5 UK	$1,08 \cdot 10^{-6}$
%5 MT + %10 UK	$1,03 \cdot 10^{-6}$
%10 MT + %10 UK	$2,43 \cdot 10^{-6}$
%10 MT + %20 UK	$2,48 \cdot 10^{-6}$
%15 MT + %15 UK	$2,69 \cdot 10^{-6}$
%15 MT + %30 UK	$3,30 \cdot 10^{-6}$

Uluköy numunesinde yapılan permeabilite deneyleri sonunda geçirimsizliğin çok değişmediği söylenebilir. Katkısız numune permeabilite katsayısı $4,3 \cdot 10^{-7}$ cm/s iken 15MT-30UK katkılı numunede permeabilite katsayısı $3,3 \cdot 10^{-6}$ cm/s olarak elde edilmiştir. Diğer katkılı numunelerde de 10^{-6} cm/s değerlerinde permeabilite katsayıları olduğu görülmektedir. MT ve UK katkıları ince taneli zeminin geçirimsizliğinde çok etkili bir

azalma oluşturmadığı aksine çok az bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Muhtemelen MT ve UK arasında meydana gelen reaksiyon zemin taneleri ile birlikte kümelenmeye neden olmuş olabilir. Kümelenme ise bir nevi tane çapı büyümesi gibi değerlendirilebilir.

4.4 Dolgu Baraj Açısından Değerlendirme

Çizelge 4.6 da baraj dolgularında kullanılan geçirimsiz malzemelerin bazı özellikleri için sınır değerler ve tavsiye edilen değerler verilmiştir. Özgül ağırlık açısından değerlendirdiğinde Uluköy 2,74, Ballık 2,57 her iki numune alt ve üst limitler arasında kalırken, tavsiye edilen 2,6'dan büyük olmalı kriteri ballık taşımıyor.

w_{opt} Uluköy %14, ballık %18,3 değerlerinde %15-%25 olan alt ve üst limitlerine göre Uluköy'ün alt limitlerin altındaki w_{opt} değeri uygun değildir. Ballık numunesi tavsiye edilen %20 değerinin altında kalmasına rağmen alt-üst sınırlar içerisinde kaldığından uygundur.

Çizelge 4.6 Geçirimsiz Baraj dolgu malzemesi için bazı özelliklerinin sınır değerleri (Emre ve Hassan 2006)

	Alt-Üst sınır	Tavsiye edilen
G_s	2,5-2,8	>2,6
w_{opt}(%)	15-25	20
γ_{dmax} (g/cm³)	14,02-18,55	>16,19
I_p	14-20	14-20
w_L	40-50	-
Elek analizi	En az %12 kil	-
Permeabilite cm/sn	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁸

Kuru birim ağırlık değeri, Ballık numunesinde 16,7 kN/m³ ile alt ve üst kriterlerin (16,19-18,35 kN/m³) arasında kalırken Uluköy 18,51 kN/m³ ile üst limitin biraz üzerine çıkmıştır. Ancak kabul edilebilir bir sınırdaki olduğu görülmektedir.

Likit limit ve plastisite indisi açısından değerlendirildiğinde her iki numunede alt ve üst limit değerlerinin dışında kalmaktadır. Bu açıdan uygun olmadığı görülmektedir.

Dane çapı dağılımı grafikleri (Şekil 3.1, Şekil 3.2) incelendiğinde Uluköy numunesinde 0,002 mm'den küçük taneler %20, Ballık numunesinde ise %15 olduğu görülmektedir. Geçirimsiz numunelerin en az %12 oranında 0,002 mm'den küçük tane içermesi istendiğinden kabul edilebilir durumdadır. Uluköy numunesinden permeabilite kat sayısı $4,3 \cdot 10^{-7}$ cm/s ile alt-üst sınır değerleri arasında kalmaktadır. Ballık numunesinde $1,25 \cdot 10^{-5}$

cm/s olan permeabilite katsayısı alt limit sınırındadır. Her iki numunede sınırlar içinde kalan permeabilite katsayıları ile uygun oldukları ifade edilebilir.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada uçucu kül ve mermer tozu atıkları zemin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmıştır. Uçucu külün puzolan etkisi, mermer tozunun ise kalsiyum içeren yapısı nedeniyle tercih edilmişlerdir. Mermer tozu ile uçucu külün reaksiyonu sonucu bir çeşit çimentolamanı oluşturmaktadır. Mermer tozunun tane çapı 300µ'dan daha küçük taneleri, uçucu külün ise 75µ'dan daha küçük taneleri içermektedir. Başka bir ifadeyle ince taneli bir zemin boyutundadırlar.

Kompaksiyon sonuçlarını incelediğimizde maksimum kuru yoğunlukta katkı miktarının artışına paralel olarak bir azalış, su muhtevasında ise bir artış gözlenmiştir. Genel olarak hemen hemen tüm numunelerde aynı durum geçerlidir. Ancak %15 MT + %15 UK karışımında çok az su muhtevasının düşümü gözlenmiştir. Kompaksiyon özelliklerinde optimum su muhtevası artarken kuru yoğunlukta azalma görülmektedir. Katkı oranı arttıkça optimum muhtevanın artma sebebi tane çapı küçük tanelerin miktarında artışa bağlı büyüyen spesifik yüzey alanının daha çok suya ihtiyaç göstermesi olarak ifade edilebilir.

Serbest basınç deney sonuçlarında genel olarak katkı miktarı artışına göre eksenel gerilme değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. Genelde tüm numunelerde elde edilen en büyük eksenel basınç değeri %15MT+30UK karışım yapılmış numunelerde görülmüştür. Diğer taraftan özellikle Ballık numunesinde karışım oranları dikkate alınarak yapılan değerlendirmede mermer tozunun 2 katı miktarında uçucu kül kullanımı daha büyük dayanım artışı olduğu görülmüştür.

Kür sürelerine göre yapılan değerlendirmede tüm numunelerde kür süresi artışına bağlı olarak dayanım değerlerinde artış görülmüştür. Bu artış mermer tozu ve uçucu kül arasında yavaş bir şekilde gelişen reaksiyondan kaynaklanmaktadır.

Mermer tozu ve uçucu kül katkısının zeminin geçirimsizliğine etkisini belirlemek amacıyla permeabilite deneyleri yapılmıştır. Ballık numunelerinde yapılan Permeabilite deneyleri sonuçlarında geçirimsizlik azalarak, katkısız numunedeki $1,25 \cdot 10^{-5}$ cm/s permeabilite katsayısı, %15MT+%30UK numunesinde $3,62 \cdot 10^{-7}$ cm/s değerine düşmüştür. Uluköy

numunelerinde geçirimsizlikte çok fazla bir değişim gözlenmemiştir. Katkısız numuneye göre çok az bir miktar geçirimsizlikte artış görölmektedir. Katkısız numune permeabilite katsayısı $4,3 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$ iken diğer katkılı numunelerde permeabilite katsayıları 10^{-6} cm/s olarak elde edilmiştir.

Atıkların katılması ile özellikleri iyileştirilen bu zemin numunelerinin, baraj dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için katkıların etkisi ile olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Numunelerin serbest basınç dayanımı artarken, geçirimsizlikleri artmıştır. Bu durum baraj dolgusu için gereken önemli bir özelliktir. Ancak dolgu barajlarda kullanılacak geçirimsiz malzemelerde olması gereken ve burada bahsedilmeyen diğer kriterler içinde deneysel çalışmalar yapılmalı ve sonuçlar değerlendirilmelidir. Bu deneysel çalışmalar 3 eksenli deney, konsolidasyon deneyi, dispersibilite deneyleri, gibi deneylerle yapılan çalışmalardır. Dolgu için uygun bir malzeme olduğuna karar verebilmek için yukarıda bahsedilen deney sonuçlarından elde edilecek bilgiler önemlidir.

6. KAYNAKLAR

- Bjolgerud O, Haug A K, 1983, Dynamic Consolidation of Rockfill at an Oil Refinery Site, 213-218.
- Coussy L, Olivier D, 2002, Mécanique des Sols non Saturés, Paris, Hermes Sciences Publication.
- Das A, Jayashree Ch, Viswanadham B V, 2009, Effect of Randomly Distributed Geofibers On The Piping Behaviour of Embankments Constructed With Fly Ash As a fill Material, Geotextiles and Geomembranes, 27, 341-349.
- Emre A, Hasan A, 2006, Baraj Dolgularında Kullanılan Doğal Malzemenin Seçimi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10, 16-23.
- Gresilon J M, 1976, Etude sur la Stabilisation et la Compression des Terres Pour Leur Utilisation Dans La Construction.
- Heebink L V, And Hassett D J, 2001, Coal Fly Ash Trace Element Mobility in Soil Stabilization. International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 64.
- Mounir B, 2009, Amélioration des Sols, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis Université de Sherbrooke, 10-20.
- Nagayama I, Jikan S, 2003, 30 Years's History Roller-Compacted Concrete Dams In Japan, Proceedings of The Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, 17, 27-38.
- Radhey S H, Qiming Ch, Murad Abu-F, Sungmin Y, 2009, Analytical Modeling of Geogrid Reinforced Soil Foundation, Geotextiles and Geomembranes, 27.
- Reiffsteck P H, 1996, Étude du Comportement Mécanique du Géotextile Tridimensionnel Alvéolaire Armater, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, Paris.
- Tolga R, 2011, Killi Zeminlerin Tek Eksenli Dayanımı üzerinde Örnek Boyutu Ektisi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimler, Yüksek Lisans Tezi, 278s, Adana.

- Xiang L I, 1999, Guide Technique du Traitement des Sols à la Chaux et/ou aux Liants Hydrauliques, Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 25-27, Paris.
- Zorluer İ, Usta M, 2003, Zeminlerin Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi, Türkiye IV Mermer Sempozyumu, 305-312.
- Topçu İ, Canbaz M, 2001, Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14, 11-23.
- Zorluer İ, Gücek S, 2016, Zemin İyileştirmede Endüstriyel Atıkların Dayanıma Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Özel Sayı 16, 244-248.
- Zorluer İ, Gücek S, 2014, The Effect of Marble Dust and Fly Ash on Clay Soil, Science and Engineering of Composite Materials, 59-67.
- Zorluer İ, Gücek S, 2020, The Usability of Industrial Wastes on Soil Stabilization, Revista de La Construcción, 80-89.

İnternet Kaynakları

- 1- www.geoengineer.org, 12/08/2021
- 2- essai-laboratoire.blogspot.com, 24/05/2021
- 3- <http://www.geoslab.fr>, 15/06/2020
- 4- www.ozkanlarmakina.com.tr, 20/11/2020