

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMERLER İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KUMLARIN KAYMA
MUKAVEMETİNİN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Neval UYSAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMERLER İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KUMLARIN KAYMA
MUKAVEMETİNİN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Neval UYSAL
(501111310)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Aykut ŞENOL

OCAK, 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 50111310 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Neval UYSAL** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Polimerlerle Stabilize Edilmiş Kumların Kayma Mukavemetinin Laboratuvar Deneyleriyle Belirlenmesi**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Aykut ŞENOL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan BAYKAL
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans çalışmalarım ve tez aşamasındaki çalışmalarım süresince gösterdiği her türlü yardım, destek, hoşgörüsünden ve bilgi ve tecrübelerini paylaşmasından dolayı danışman hocam Doç. Dr. Aykut ŞENOL' a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın başlangıç aşamasından itibaren her konuda desteğini gördüğüm, günlük hayatta da güler yüzüyle hep yanımda olduğunu hissettiğim Araştırma Görevlisi Sayın Feyzullah GÜLŞEN' e, deney çalışmalarım sırasında sorularımı cevapsız bırakmayan zemin mekaniği laboratuvarı çalışanlarına, deney çalışmalarım sırasında beni evinde misafir eden sevgili arkadaşım Ezgi AYDIN'a ve hayatımı her konuda kolaylaştıran, sıkıntılarımı paylaşan Mustafa ATİK'e teşekkür ederim.

Aralık 2013

Neval UYSAL
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	ixx
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	3
1.2 Kapsam ve Adımlar.....	4
2. ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ	7
2.1 Mohr – Coulomb Göçme Hipotezi	8
2.2 Efektif Gerilmeler ve Kayma Mukavemeti	9
2.3 Kumların Kayma Mukavemeti	10
2.4 Zeminlerin Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi.....	11
2.4.1 Kesme kutusu deneyi	12
2.4.1.1 Basit kesme deneyi.....	13
2.4.2 Serbest basınç deneyi	14
2.4.3 Üç eksenli basınç deneyi.....	14
3. ZEMİNLERDE YAPILAN ÇEŞİTLİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	17
3.1 Zeminlerde Yapılan Geleneksel İyileştirme Yöntemleri	19
3.1.1 Vibrasyonlu yöntemler.....	19
3.1.2 Ön yükleme	20
3.1.3 Enjeksiyon teknikleri	21
3.1.4 Geosentetikler	24
3.2 Zemin İyileştirmesinde Alternatif Yöntemler	26
3.2.1 Atıklar	26
3.2.1.1 Kireç ve çimento	27
3.2.1.2 Uçucu kül	29
3.2.1.3 Atık lastik.....	30
3.2.2 Biyopolimerler	32
3.2.2.1 Xsantan gum	33
3.2.2.2 Kitosan	35
3.2.3 Polimerler.....	36
4. ALTERNATİF MALZEMELER İLE ZEMİN STABİLİZASYONUNUN	
LABORATUVAR DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI	45
4.1 Malzemeler.....	45
4.1.1 Zemin	45
4.1.2 Virgin homopolimer polipropilen (VHP) fiber	46
4.1.3 Kopolimer (KP) fiber	47
4.2 Kesme Kutusu Deney Düzenegi	48

4.3 Deney Düzeneği ve Numunelerin Hazırlanması	49
4.3.1 Numune hazırlama yöntemi	49
4.3.2 Direkt kesme kutusu deney düzeneği.....	53
4.3.3 Direkt kesme kutusu deney aletine numunelerin yerleştirilmesi	54
4.4 Kesme Kutusu Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	62
4.4.1 Yalın kum numunesi	62
4.4.2 Kum – VHP karışımları	63
4.4.2.1 Rölatif sıkılık %20 durumunda kum – VHP karışımları.....	63
4.4.2.2 Rölatif sıkılık %30 durumunda kum – VHP karışımları.....	65
4.4.2.3 Rölatif sıkılık %40 durumunda kum – VHP karışımları.....	66
4.4.3 Kum –KP karışımları	69
4.4.3.1 Rölatif sıkılık %20 durumunda kum – KP karışımları.....	69
4.4.3.2 Rölatif sıkılık %30 durumunda kum – KP karışımları.....	71
4.4.3.3 Rölatif sıkılık %40 durumunda kum – KP karışımları.....	72
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
5.1 Sonuçlar.....	78
5.2 Öneriler.....	78
KAYNAKLAR.....	81
EKLER.....	855
EK A: Kesme Kutusu Deney Sonuçları.....	85
ÖZGEÇMİŞ	93

KISALTMALAR

$\circ$	: Derece
τ	: Kayma gerilmesi
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
c	: Kohezyon
C_c	: Derecelenme katsayısı
C_u	: Uniformluk katsayısı
c_v	: Konsolidasyon katsayısı
D_{10}	: Granülometre Eğrisinde %10'a Karşılık Gelen Dane Çapı
D_{30}	: Granülometre Eğrisinde %30'a Karşılık Gelen Dane Çapı
D_{60}	: Granülometre Eğrisinde %60'a Karşılık Gelen Dane Çapı
Dr	: Rölatif sıkılık – grafiklerde gösterimi
e	: Boşluk oranı
e_{mak}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
W_L	: Likit limit
I_p	: Plastisite indisi
W_P	: Plastik limit
q_u	: Serbest basınç dayanımı
u	: Boşluk suyu basıncı
V	: Hacim
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
σ_n	: Normal gerilme
τ_{mak}	: Maksimum kayma gerilmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 : Kum ve borik alçı karışımının kayma mukavemeti açısı değerleri.....	28
Çizelge 3. 2 : Kum ve lastik karışımının kayma mukavemeti açısı değerleri	31
Çizelge 3. 3 : Kum ve xanthan gum karışımının kür süresi 7 gün olduğunda kayma mukavemeti açısı değerleri	34
Çizelge 3. 4 : Kum ve xanthan gum karışımının kür süresi 26 gün olduğunda kayma mukavemeti açısı değerleri	34
Çizelge 3. 5: Kum ve xanthan gum karışımının kür süresi 50 gün olduğunda kayma mukavemeti açısı değerleri	34
Çizelge 3. 6 : Kitosanın %25 su içeriğindeki %40 kum - %40 kaolin - %20 bentonit üzerinde içsel sürtünme açısına etkisi	36
Çizelge 3. 7 : Kitosanın %50 su içeriğindeki %40 kum - %40 kaolin - %20 bentonit üzerinde içsel sürtünme açısına etkisi	36
Çizelge 3. 8 : Polipropilen özellikleri (polimernedir.com).....	41
Çizelge 3. 9 : Kum ve karışımların kayma mukavemeti açısı değerleri.....	42
Çizelge 4. 1 : Zeminin e_{max} ve e_{min} değerleri.	45
Çizelge 4. 2 : Zemin sınıflandırması.....	45
Çizelge 4. 3 : Virgin homopolimer fiberlere ait fiziksel özellikler.....	46
Çizelge 4. 4 : Kopolimer fiberlere ait fiziksel özellikler	47
Çizelge 4. 5 : Deney setlerinin malzeme oranları.....	49
Çizelge 4. 6 : Yalın kumun Dr %20, %30 ve %40 iken kayma mukavemeti açısı değerleri.....	63
Çizelge 4. 7 : Dr %20 iken VHP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.....	64
Çizelge 4. 8 : Dr %30 iken VHP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.....	65
Çizelge 4. 9 : Dr %40 iken VHP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.....	68
Çizelge 4. 10 : DR %20, DR %30 , DR %40'ın farklı VHP oranlarında kayma mukavemeti açısına etkisi	68
Çizelge 4. 11 : Dr %20 iken KP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.....	69
Çizelge 4. 12 : Dr %30 iken KP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.....	71
Çizelge 4. 13 : Dr %40 iken KP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.....	72
Çizelge 4. 14 : Dr %20, 30 , 40'ın farklı KP oranlarında kayma mukavemeti açısına etkisi	74
Çizelge 4. 15 : Kum – VHP - KP karışımları kayma mukavemeti açıları.....	75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Coulomb sürtünme teorisi (Bardet, 1997).....	8
Şekil 2.2 : Mohr gerilme daireleri ve göçme zarfı.....	9
Şekil 2.3 : Göçme durumunu gösteren toplam ve efektif gerilme daireleri ve kırılma zarfları	10
Şekil 2.4 : Üç eksenli basınç deneyi (Önalp, 2007).....	15
Şekil 3.1 : Dane çapına göre zemin iyileştirme yöntemleri.....	18
Şekil 3.2 : Vibrasyonlu yöntem için kullanılan vibratör	19
Şekil 3.3 : Ön yükleme ile zemin iyileştirmesi ve düşey drenler ile ön yükleme	21
Şekil 3.4 : Kademeli enjeksiyon işlemi (Bell, 1993).....	22
Şekil 3.5 : Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi (Essler, 2000).....	22
Şekil 3.6 : Düşey yönde çatlakların oluşumu ve yatay sıkıştırma (insaatim.com)	23
Şekil 3.7 : Jet enjeksiyonu işlemi (insaatim.com)	23
Şekil 3.8 : Geotekstil çeşitleri ve uygulamaları.	25
Şekil 3.9 : Çimento hammaddesi ve kireç.	28
Şekil 3.10 : Uçucu kül.	30
Şekil 3.11 : Atık lastik.	30
Şekil 3.12 : Xanthan gumın SEM ile çekilmiş fotoğrafı.	33
Şekil 3.13 : Kitosan hidrojellerinin yapısı (Cho et al, 1999).	35
Şekil 3.14 : Polimer kavramları ve özellikleri	37
Şekil 3.15 : Kopolimerlerin kimyasal yapısı (www.polimernedir.com)	40
Şekil 3.16 : Polipropilenin molekül yapısı (Utracki ve Jamieson, 2010).	41
Şekil 4.1 : VHP fiber (a) fibril form (b) deforme form.	46
Şekil 4.2 : Normal durumda ve deforme edilmiş kopolimer fiberler.	47
Şekil 4.3 : Kesme kutusu deney aletinin şematik görünümü.....	48
Şekil 4.4 : Deneylerde kullanılan kum numune.....	51
Şekil 4.5 : KP ve VHP nin deneylerde kullanılmak üzere hazırlanışı	52
Şekil 4.6 : Numunelerin tartılması.....	52
Şekil 4.7 : Direkt kesme deney düzeneği görünüşü.....	53
Şekil 4.8 : Direkt kesme kutusu alt ve üst parçaları	54
Şekil 4.9 : Direkt kesme kutusu numune koyma hücresi.....	54
Şekil 4.10 : Direkt kesme kutusu hücresine poroz kağıdı yerleşimi.....	55
Şekil 4.11 : Direkt kesme kutusu deney hücresine numune konulması	55
Şekil 4.12 : Deney numunesinin hücre içinde yerleştirilmesi	56
Şekil 4.13 : Deney numunesinin hücre içinde yüksekliğinin ayarlanması.	56
Şekil 4.14 : Numune kutuya konulduktan sonra üst poroz kağıdının konulması	57
Şekil 4.15 : Üst numune tutucunun yerleştirilmesi.....	57
Şekil 4.16 : Numune üst tutucu konulduktan sonra bilya konulması.	58
Şekil 4.17 : Kutu üzerine yükleme kolunun yerleştirilmesi	58
Şekil 4.18 : Yük kolunun üzerine kuvvet halkasının yerleştirilmesi	59
Şekil 4.19 : Yatay deformasyon okuma saatinin ayarlanması.	59
Şekil 4.20 : Miknatıslı deformasyon okuma saatinin yerleştirilmesi.	60

Şekil 4.21 : Yük koluna yüklerin bindirilmesi.....	60
Şekil 4.22 : Kesme işlemi sonra yük kolunun kaldırılması.	61
Şekil 4.23 : Kesilmiş numunenin kutudan çıkartılması	61
Şekil 4.24 : Deney sonrası görünüm.....	62
Şekil 4.25 : Yalın kum numunenin rölatif sıkılık – kayma mukavemeti açısı değişimi	63
Şekil 4.26 : DR %20 iken VHP oranı – kayma mukavemeti açısı	64
Şekil 4.27 : VHP oranı - ϕ/ϕ^*	65
Şekil 4.28 : DR %30 iken VHP oranı – kayma mukavemeti açısı	66
Şekil 4.29 : VHP oranı - ϕ/ϕ^*	66
Şekil 4.30 : DR %40 iken VHP oranı – kayma mukavemeti açısı.	67
Şekil 4.31 : VHP oranı - ϕ/ϕ^*	68
Şekil 4.32 : DR %20, DR % 30 , DR %40’ın farklı VHP oranlarında kayma mukavemeti açısının değişimi.....	69
Şekil 4.33 : DR %20 iken KP oranı – kayma mukavemeti açısı.	70
Şekil 4.34 : KP oranı - ϕ/ϕ^*	70
Şekil 4.35 : DR %30 iken KP oranı – kayma mukavemeti açısı	71
Şekil 4.36 : KP oranı - ϕ/ϕ^*	72
Şekil 4.37 : DR %40 iken KP oranı – kayma mukavemeti açısı.	73
Şekil 4.38 : KP oranı - ϕ/ϕ^*	73
Şekil 4.39 : Dr %20, 30 , 40’ın farklı KP oranlarında kayma mukavemeti açısının değişimi	74
Şekil 4.40 : Kum – VHP - KP karışımları kayma mukavemeti açıları.....	76
Şekil A. 1: Numune 1’e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	85
Şekil A. 2: Numune 2’ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	86
Şekil A. 3: Numune 3’e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	87
Şekil A. 4: Numune 4’e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	88
Şekil A. 5: Numune 5’e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	89
Şekil A. 6: Numune 6’ya ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	90
Şekil A. 7: Numune 7’ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	91

POLİMERLERLE STABİLİZE EDİLMİŞ KUMLARIN KAYMA MUKAVEMETİNİN LABORATUVAR DENEYLERİYLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, İstanbul Silivri bölgesinden alınan sarı kumun kayma mukavemetinin belirlenmesi kapsamında, ağ yapılı kopolimer (KP) ve virgin homopolymer (VHP) katkısıyla içsel sürtünme açısının arttırılmasına yönelik bir deneysel çalışma yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları 2013 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Araziden elde edilen zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen granülometri analizi sonucunda zemin sınıflandırılması yapılmış ve (SP) kötü derecelenmiş kum zemin sınıfı olarak belirlenmiştir. Dane birim hacim ağırlığını belirlemek için piknometre deneyi yapılmış ve kayma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesi için de farklı rölatif sıklıktaki numuneler üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Rölatif sıklık değerleri %20, %30 ve %40 olan katkısız zemin numunelerine ek olarak, kuru zemin ağırlığının % 0.50, % 1.00 ve % 1.50' si oranlarında kum-KP ve kum-VHP karışımları hazırlanmıştır. Böylece 21 farklı deney seti üzerinde kesme kutusu deneyi yapılmış, rölatif sıklıkların ve katkı malzemelerinin kayma mukavemeti üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda, hazırlanan farklı rölatif sıklıklardaki numunelerde sıklığı fazla olan numunenin daha yüksek kayma mukavemetine sahip olduğu ve hazırlanan birleşimlerde katkı malzemesi oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının da arttığı gözlemlenmiştir.

Zemin numunesinin rölatif sıklığının arttırılmasının zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Numunelerin yalın hallerine kopolimer ve virgin homopolimer fiber katkı malzemelerinin katılmasının zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Deney numunelerindeki polimer fiber katkı malzemelerinin kütlece yüzde (%) oranlarının artmasının zeminin kayma mukavemeti açısını arttırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan 21 set deneyde en düşük kayma mukavemeti açısı kum numunenin %20 rölatif sıklıktaki katkı malzemesi katılmamış, yalın halinde 28° içsel sürtünme açısına sahip olduğu durumdur. En yüksek kayma mukavemeti açısı ise numunenin %40 rölatif sıklıktaki durumunun kütlece %1.5 virgin homopolymer (VHP) fiber içerdiği 39° içsel sürtünme açısına sahip olduğu durumdur. Yapılan deneyler sonucunda oransal olarak kayma mukavemeti açısının en çok arttığı durumun rölatif sıklığın %20 olduğu durumda %21'lik bir artışla gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH OF POLYMER REINFORCED SAND BY LABORATORY TESTS

SUMMARY

All structures are generally built on the ground or inside the soil with a certain depth and they transfer their loads by help of their foundations. On the other hand, soil is able to be used as a material in the most of the areas such as dams and highway fills. Soil strength, permeability, compressibility and determination of these properties are very important to use for the geotechnical applications.

In the civil engineering, the soil must be considered like a material for constructions such as concrete and steel materials. The information of the engineering properties of soils are obtained from the laboratory and the field tests. The features of concrete, steel, wood, soil and other materials are determined by the chemical composition and the physical state. The soil minerals are very complex but strength, rigidity, stability, resistance to erosion and irrigation can be determined with the various experiments.

For the experiments, the identification and the classification of these materials, the physical properties are used. The grain size, shape, particle size distribution, specific gravity of soil is related to the load which is carried by the soil. The load bearing capacity can be calculated with experiments such as compression test, shear box test.

The soil beneath the pavement, the fill or other landfill constructions should be controlled with the tests such as compaction to determine the ratio of mixing.

In this thesis, the experimental research was conducted to calculate the strength of the material in the ITU Soil Mechanics Laboratory. The samples having different relative densities were stabilized with different ratio of the polymers. In terms of the laboratory program, all engineering properties of soil used in experiments were firstly determined by laboratory tests. Then, the samples were prepared with the certain relative density and the additive materials were added inside it with a percentage of the weight. The shear box tests were performed with the plain and mixed samples to determine the internal friction angle. The aim of the thesis is to determine the changes of the shear strength of a sand soil reinforced with a type of polymer.

Soils are used for many different purposes as a construction material since human existence. Nowadays, soil can be used as a material for the highway and the airport transportation system, dams and the construction of surface coating of aerospace vehicles. Soils should be selected according to the aim of usage. For instance, the permeability of the fill dams desired to be very low.

The soil improvement applications in the geotechnical engineering increase the shear strength and reduce the compressibility, the settlement and the permeability.

The soil formations could be considered as a combination of four main types: gravel, sand, clay, and silt. It generally has significant shear strength and its characteristics may depend strongly on the environmental conditions (e.g. dry versus wet). On the other hand, the stabilization consists of incorporating certain materials with some desired properties within other materials having lack properties. Therefore, the soil stabilization is defined as a technique to improve the engineering characteristics of the soil in order to develop the parameters such as shear strength, compressibility, density and hydraulic conductivity.

The soil reinforcement using discrete randomly distributed fibers has been widely investigated over the last 30 years. The mechanical behavior of clean sands was investigated firstly by Coulomb in the 18th century (Coulomb 1776). The studies of the mechanical behavior of pure clays were reported only approximately 150 years later (Terzaghi 1925). Lots of models were recommended to estimate the improvement by various fibers to increase the shear strength of soils. The objectives of this thesis are to supplement the data available on the behavior of fiber-reinforced sands affected the shear strength of fiber-reinforced sands.

The geosynthetics are the planar products manufactured from polymeric materials used for soil, rock, or other geotechnical related materials as a of a civil engineering project or system. In 1970, there were only five or six geosynthetics available, while today more than 600 different geosynthetic products are sold throughout the world. The worldwide annual consumption of geosynthetics is approximately close to 1,000,000,000m². Last 30 years, the geosynthetics have been innovated in many aspects of the practices. In some applications, they have entirely replaced the traditional construction material. In many cases, the use of the geosynthetic can significantly increase the factor of safety, improve the performance, and reduce the costs in comparison with the conventional design.

ASTM has defined the geosynthetics as a planar product manufactured from a polymeric material used with the soil as an integral part of a geotechnical engineering application. A type of geotextiles is a permeable geosynthetic made from the synthetic textile materials. The geogrids are primarily used for the reinforcement. They are formed by a regular network of the tensile elements with the apertures of sufficient size to interlock with the surrounding fill material. The geomembranes are low permeable geosynthetics used as the fluid barriers. The geotextiles and related products such as nets and grids can be combined with the geomembranes and the other synthetics to take advantage of the best attributes of each component. These products are called geocomposites and they may be composites of geotextile-geonets, geotextile-geogrids, geotextile-geomembranes, geomembrane-geonets, geotextile-polymeric cores, etc...

The use of fibers in reinforced soils is widely used particularly with regard to the applications involving the stabilization of the slopes and the steep cover systems for the fills. In addition, the fiber-reinforced soils are currently being used to recycle and reuse shredded and fibrous inorganic wastes in the geotechnical engineering applications and as alternate backfills and improved pavement materials. The design of geotechnical systems involving fiber-reinforced soils is typically based on

empirical experience or available models developed from the laboratory tests on the composite fiber-reinforced soils samples.

The safe and the economical design of the geosynthetic-reinforced soil structures, such as retaining walls, slopes, and embankments require the information of the behaviour of the soil–reinforcement interface. The mobilization of the internal friction angle between the soil and the reinforcement material is an important factor governing the stability analysis for the design.

In this research thesis, a sand soil taken from Silivri region in Istanbul and a type of copolymer fiber (CP) and a type of virgin homopolymer (VHP) were used. The aim is to increase the shear strength of the relevant sand soil by use of the additive materials such as the copolymer and the homopolymer. The grain-size analysis performed on the clean sand and it has been classified as poorly graded sand (SP). The tests were performed to determine the shear strength of the samples having the different relative density values. With the relative density values of 20%, 30% and 40%, the CP ratios and the VHP ratios of 0.50%, 1.00% and 1.50% by the weight of dry sand-CP and sand-VHP mixtures were prepared. Then the shear box tests were done as the 21 different experiments set. It shows that how different relative density values and the additional materials effect the shear strength. The result of the tests improved that the shear strength values are higher when the ratio of the relative density and additional materials are getting higher percentage.

Consequently, in this study which is consist of experiment researches done in laboratory environment, the calculations of shear strengths are made by adding polymer additive material to the sands of different relative density according to their masses.

At the end of the experiments, soil classification is carried out, then the highest and the lowest void ratio is calculated, lastly relative density is calculated.

The phases of the study carried out can be listed as; selecting the sand which is going to be used as the main material; doing experiments to determine the engineering properties of the selected sand; selecting polymer filter materials which is going to be used as additive material for the sand; determining soil weights which are going to be placed in shear box; doing trial experiments to determine the range of the values which experiments will be done with; doing shear box experiments when materials, datum, the range of the values and ratios are decided and prepared.

This study is presented as a thesis which is consist of five main phases. In the first section, the details of the purposes and the goals of this study are explained.

In the second phase of this thesis, the shear strengths of soil, the factors which affects the shear strengths and the methods which are adopted to calculate these are introduced.

The detailed research of literature is made in the third phase of this thesis. The main materials, additive materials, ratios of these which were used earlier studies are reported and examined. Following this, the experimental results of these studies are presented with their details in tables.

In the fourth phase, the studies which are done in the Istanbul Technical University Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Soil Mechanics Laboratory, how the studies are carried out, the sand used and the properties of additive materials are presented. The results of the experiments done in this study are presented with the help of figures and table; and the details of the evaluation of these results and the comparison of the results are also presented.

At the last section, general results and recommendations are presented.

1. GİRİŞ

Genel olarak bütün yapılar zemin üzerine, zemin içerisine, zeminden ya da bunların kombinasyonu biçiminde yapılmaktadırlar. Tüm yapılar yüklerini temelleri aracılığı ile zeminlere aktarmaktadırlar.

Öte yandan; zeminler çoğu alanlarda, örneğin baraj ve karayolu dolgularında, tuğla ve kerpiç üretiminde malzeme olarak kullanılmaktadırlar. Zeminlere ait dayanım, geçirimsizlik, sıkışabilirlik ve benzeri özelliklerin belirlenmesi, bu yapıların ekonomik ömrü boyunca kullanılabilmesi açısından çok önemlidir. Ülkemizdeki ve dünyadaki yapılan barajlara bakarak, toprak dolgu barajlarının en yaygın baraj tipi olduğunu söylemek mümkündür. Toprak dolgu barajların inşaatında zemine ait geçirimsizlik, sıkışabilirlik, plastisite, dayanım ve oturma özellikleri bilinmek zorundadır. Karayolları ve hava limanlarının tasarımında bu yapıların altında bulunan zeminin dayanımı, sıkışabilirliği ve bunların kaplama dayanımına katkısı büyük önem taşımaktadır. Zeminlerin yeterli derecede iyi olmaması durumunda bunların stabilizasyonu gündeme gelmektedir. Ayrıca; karayollarında, demiryollarında, su yapılarında, kanalizasyonlarda ya da bu tür yapıların geçirileceği güzergahların seçilmesinde zemine ait özelliklerin bilinmesi çok büyük önem arz etmektedir.

İnşaat mühendisliğinde zeminler, bir inşaat malzemesi olarak, beton ve çelik malzemelerde olduğu gibi dikkate alınabilir. Doyasıyla bir mühendis, inşaatlarda kullandığı veya üzerine yapı inşa ettiği zemini iyi bir şekilde değerlendirebilmek için bu malzeme hakkında temel bilgilere sahip olmalıdır. Bu önemli temel bilgiler laboratuvar ve arazi deneylerinden elde edilirler. Beton, çelik, ahşap, zemin vb. malzemelerin özellikleri, kimyasal bileşimleri ve fiziksel durumları ile belirlenir. Zemin mineralleri, çok kompleks ve bu mineralleri bir arada tutan kuvvetler atomik ve moleküler ölçekte tam olarak anlaşılmış değildir, fakat zeminlerin dayanımı, rijitliği, stabilitesi, erozyona ve sulamaya karşı direnci söz konusu zemin üzerinde yapılacak olan deneyler ile belirlenebilir.

Malzeme deneylerinde, bu malzemelerin tanımlanmasında ve sınıflandırılmasında onların fiziksel özellikleri kullanılır. Bir zeminin taşıyabileceği yükü, zemin danelerinin büyüklüğü, şekli, granülometrik dağılımı, özgül ağırlığı ve kompaksiyon özellikleri ile yakından ilgilidir. Serbest basınç deneyi, kesme kutusu deneyi gibi deneylerle zeminin yük taşıma kapasitesi doğrudan olarak ölçülebilir. Bu tür deneylerle tanınan ve sınıflandırılan zeminin bir altyapıda kullanılıp kullanılmayacağına veya iyi bir temel zemini olup olmayacağına karar verilebilir. Yol kaplamalarının altında kullanılan zeminler, dolgular ve diğer toprak dolgu yapılarda zeminler inşaat süresince kompaksiyon ve karışım oranları açısından deneylerle sürekli olarak kontrol edilmelidirler.

İnsanlığın varoluşundan beri zeminler, çeşitli amaçlar için inşaat malzemesi olarak kullanılmıştır. Günümüzde, karayolu ve havaalanı gibi ulaşım sistemlerinin, baraj ve bağlamalar gibi su toplama ve depolama yapılarının, binaların ve uzay araçlarının yüzey kaplamalarının inşasında (Smith, 1986) zeminler malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu kullanımların amaçlarına göre uygun zeminler seçilmektedir. Örneğin, dolgu barajlarda zeminin geçirimsizliğinin çok düşük olması istenirken, uzay araçlarının yüzey kaplamalarında kullanılan zeminlerin ısıya dayanıklı ve hacim değişimi göstermeyen türden olması gerekmektedir. Ayrıca kullanım amacına uygun olarak zemin özelliklerinin stabilizasyonu için değişik yöntemler kullanılmaktadır.

Dayanma yapılarına gelecek yatay gerilmelerin bilinmesi gerekir. Bu gerilmelerin belirlenebilmesi için zemine ait kayma direnci parametrelerinin doğru olarak belirlenmelidir.

Kazı yapılan bölgede veya dolgularda meydana gelen problemler için de güvenli şev açısının ve şev yüksekliğinin belirlenebilmesi için zemine ait kısa ve uzun süreli kayma dayanımlarının ve muhtemel kayma yüzeyinin tespit edilmesi gerekmektedir. Stabilitate problemlerinden en önemlileri, zemin kütlelerinin yatay doğrultuda oluşturduğu gerilmelerin (yatay toprak basınçlarının) hesaplanması, dış yüklere karşı zemin kütlelerinin sınır dayanımlarının (taşıma gücünün) hesaplanması ve şevlerin stabilitesinin araştırılması olarak özetlenebilir. Bu problemleri çözebilmek için zeminlerin göçme anındaki gerilme koşullarının bilinmesi yeterlidir. Deformasyonların önemli olmadığı durumlarda sadece gerilme koşullarının bilinmesi

yeterli olmakla birlikte, deformasyonların etkili olduğu durumlarda örneğin yatay desteklerde (iksalarda) şekil değiştirmeler de dikkate alınmalıdır. (Aytekin, 2004)

1.1 Amaç

Bu tez çalışması kapsamında, farklı rölatif sıkılıklardaki sade kum numunelerinin ve bu sade kum numunelerin farklı oranlarda polimerlerle stabilize edilmiş hallerinin kayma mukavemeti değerlerini hesaplamak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışma sistemine göre ilk olarak araştırmada kullanılan zeminin mühendislik özellikleri çeşitli laboratuvar deneyleri ile elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen değerlere göre zemin istenilen rölatif sıkılıklarda hesaplanmış ve ağırlıklarının yüzdelere göre katkı malzemeleri katılmıştır. Elde edilen sade ve katkılı farklı rölatif sıkılıklardaki numunelerin kayma mukavemeti değerlerini hesaplamak için laboratuvar da kesme kutusu deneyi yapılmış ve numunelerin içsel sürtünme açıları hesaplanarak aralarındaki fark gözlemlenmiştir.

Kohezyonsuz zeminlerin kayma mukavemetini elde etmek için yapılan bu çalışmanın amaçları aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir.

- Kohezyonsuz zeminlere polimer katkı malzemesi katıldığında, kayma mukavemetindeki değişimi gözlemlemek.
- Kesme kutusu deneyi ile numunelerin kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek.
- Rölatif sıkılık değerinin zeminin kayma mukavemeti açısını nasıl değiştirdiğini hesaplamak.
- Farklı oranlardaki polimer katkı malzemelerinin, farklı rölatif sıkılıklardaki zemin numunelerinde içsel sürtünme açılarını nasıl değiştirdiğini gözlemlemek.

1.2 Kapsam ve Adımlar

Laboratuvar ortamında yapılan deneysel araştırmadan oluşan bu çalışmada, zeminlerin farklı rölatif sıklılıklardaki durumlarına kütlelerince belirli oranlarda polimer katkı malzemesi katılarak kayma mukavemeti hesapları yapılmıştır.

Deneyler sonucunda zeminin sınıflandırması yapılmış, en büyük ve en küçük dane boşluğu hesaplanmış ve bunun sonucunda rölatif sıklılık hesaplanmıştır. Toplamda 21 set kesme kutusu deneyi yapılmıştır. %20, %30 ve %40 olmak üzere 3 farklı rölatif sıklılıktaki kumun önce sade hali üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılmış ve kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Ardından kopolimer (KP) ve virjin homopolymer (VHP) olarak isimlendirilmiş 2 farklı polimer fiber katkı malzemesini 3 farklı rölatif sıklılık değerinde, kütlece %0.5, %1 ve %1.5 olmak üzere 3 farklı oranda katılması ile bu çalışmada kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın başlıca adımları şöyle sıralanabilir;

- Ana malzeme olarak kullanılacak kumun seçilmesi,
- Seçilen kumun mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için deneyler yapılması,
- Kuma katılacak polimer fiber malzemelerin seçilmesi,
- Kesme kutusuna yerleştirilecek zemin kütlelerinin belirlenmesi,
- Çalışmada hangi aralıktaki değerlerle deney yapılacağının belirlenmesi için önceden deneme deneyleri yapılması ve değerlere karar verilmesi,
- Malzemeler ve veriler, aralıklar, oranlar hazır iken kesme kutusu deneylerinin yapılması.

Çalışma beş bölümde oluşan bir tez olarak sunulmuştur. İlk bölümde çalışmanın yapılma sebebi ve çalışmanın genel içeriği özetlenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, zeminlerin kayma mukavemetinden, kayma mukavemetini etkileyen faktörlerden ve bunların hangi yöntemlerle hesaplandığından bahsedilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde önceki çalışmaların literatür taraması ve deneysel sonuçlarının tablolar ile gösterilmesine yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde İstanbul Teknik Üniversitesi Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmış deneyler, deneylerin yapılışı ve deneylerde kullanılan zemin ve katkı malzemelerinin özellikleri verilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları grafik ve tablolarla gösterilmiş ve sonuçların değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasının anlatımına yer verilmiştir.

Son bölümde ise deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerden yararlanılarak çıkartılan genel sonuçlar ve öneriler maddeler halinde yer almaktadır.

2. ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ

Zeminlerin kayması, kırılması, göçmesi ya da yenilmesi, ortamın uygulanan gerilmelere dayanma yeteneğinin ortadan kalkması olarak tarif edilmektedir. Diğer bir deyişle, zeminlerde göçme meydana gelebilmesi için olası bir kayma düzlemi boyunca kayma mukavemetinin aşılması gerekmektedir. Belirtilen kayma düzlemi her zaman en büyük kayma gerilmesi düzlemi olmayabilir. Kayma mukavemeti ise göçme meydana gelmeden zeminin karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir (Özaydın, 2010).

Kayma mukavemeti kavramı, zeminlerin temel ya da ana özelliği değildir. Ancak kayma mukavemeti arazide etkili olan koşullara bağlıdır ve zamana bağlı olarak değişim gösterebilir. Laboratuvarda yapılan deneylerde ölçülen değerler, deneylerin yapıldığı koşullara bağlı olmaktadır. Ayrıca, bazı çalışmalarda ölçülen bu değerler deneylerin süreçlerine de bağlı olabilmektedir (Head, 2006).

Kayma mukavemeti kavramını dört kategoride incelemek mümkündür.

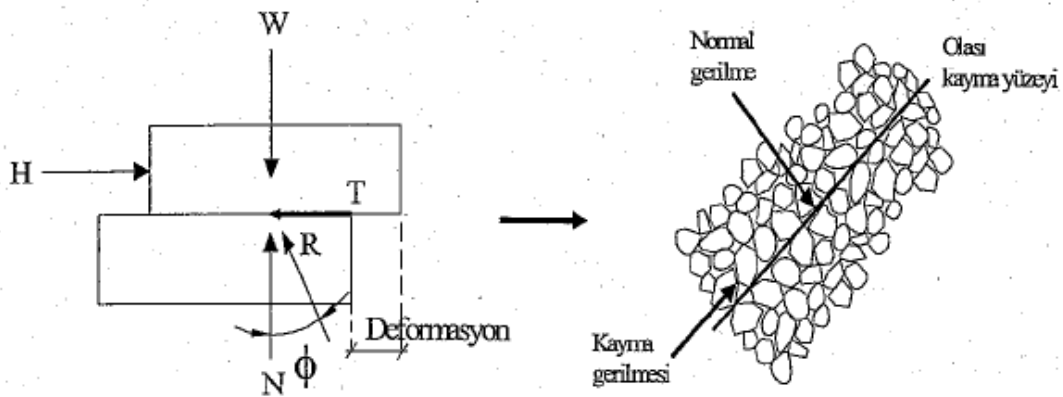
- i. Zamandan bağımsız, drenajın serbest olduğu kohezyonsuz zeminlerin (çakıl, kum gibi) kayma mukavemeti,
- ii. Kohezyonlu zeminlerin kayma sırasında drenaja izin veren, yeterince yavaş bir yer değiştirme hızına bağlı drenajlı kayma mukavemeti,
- iii. Aşırı konsolide killeri gibi büyük yer değiştirme hareketleri ve yavaş yer değiştirme hızı gerektiren zeminlerin uzun dönem veya kalıcı drenajlı kayma mukavemeti,
- iv. Drenajsız koşullar altında bulunan çok yumuşak kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemeti.

Göçmeye neden olan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önünde bulunduran birçok hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezler içerisinde en basit, en

bilinen ve uygulamalarda en çok kullanılan hipotez Mohr - Coulomb göçme hipotezidir (Özaydın, 2010).

2.1 Mohr – Coulomb Göçme Hipotezi

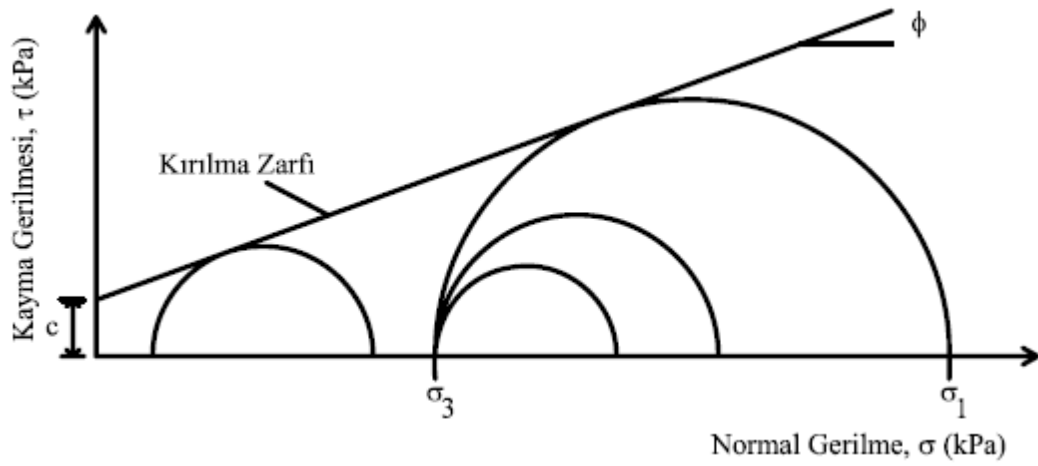
Zeminlerin kayma direncinin matematiksel bir ifade ile gösterimi Coulomb (1776) ve Tresca (1869) ile başlamıştır. Zeminler için ilk geçerli göçme hipotezi ilk kez 1911 yılında Mohr tarafından geliştirilmiştir. Zeminler için uygulanabilirliği her durumda geçerli olan Mohr hipotezini yıllar içinde başka teoriler izlemiştir. Bunlar arasında en basit olanı ve uygulamada yaygın olarak kullanılanı Mohr - Coulomb göçme hipotezidir. Bu hipoteze göre zeminlerin kayma mukavemeti, Coulomb sürtünme yasasına dayanmaktadır. Şekil 2.1’de birbirleri üzerinde kaydırılmaya çalışılan iki blok yer almaktadır. Hareketin gerçekleşmesi için uygulanan H kuvvetinin bloklar arasındaki sürtünme kuvvetini yenmesi gerekir (Bardet, 1997).



Şekil 2.1 : Coulomb sürtünme teorisi (Bardet, 1997).

Mohr hipotezi zamanla Coulomb’un yatay bağıntısı ile birleştirilerek Mohr-Coulomb göçme hipotezi oluşturulmuştur. Buna göre zeminin kayma mukavemeti Şekil 2.2’de gösterilen kırılma zarfı ile temsil edilmektedir. Bu şekilde, normal gerilmeler yatay ekseninde, kayma gerilmeleri dikey ekseninde gösterilmektedir. Kırılma zarfının altında kalan gerilme durumları için göçme ortaya çıkmazken, bu zarfa ulaşıldığı anda zeminde göçme meydana gelmektedir. Zeminin göçme zarfının doğrusal olmadığı bilindiği halde uygulamada bu eğri bir doğru olarak kabul edilir. Bu doğrunun dikey eksenini kestiği nokta c ve yatay ile yaptığı açı φ ile gösterilirse, kayma mukavemetini veren bağıntı;

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$



Şekil 2.2 : Mohr gerilme daireleri ve göçme zarfı.

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte, c ve ϕ kayma mukavemeti parametrelerini göstermektedir. ϕ açısı zeminin kayma mukavemeti açısı olarak bilinmektedir.

Kayma mukavemeti açısı dane yüzeyleri arası sürtünmeden kaynaklanan direnci ve danelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitlenme etkisini de içeren toplam direnci temsil etmektedir. Mohr - Coulomb göçme hipotezindeki diğer kayma mukavemeti parametresi c ise kohezyondur. Bu katsayısının yaygın bilinen açıklaması danelerin birbirini tutma özelliğinden kaynaklandığı şeklindedir. Kayma mukavemeti parametreleri, belirli bir zemin için sabit olmayıp, deney sırasında hakim olan yükleme ve drenaj koşullarına göre değişirler (Özaydın, 2010).

2.2 Efektif Gerilmeler ve Kayma Mukavemeti

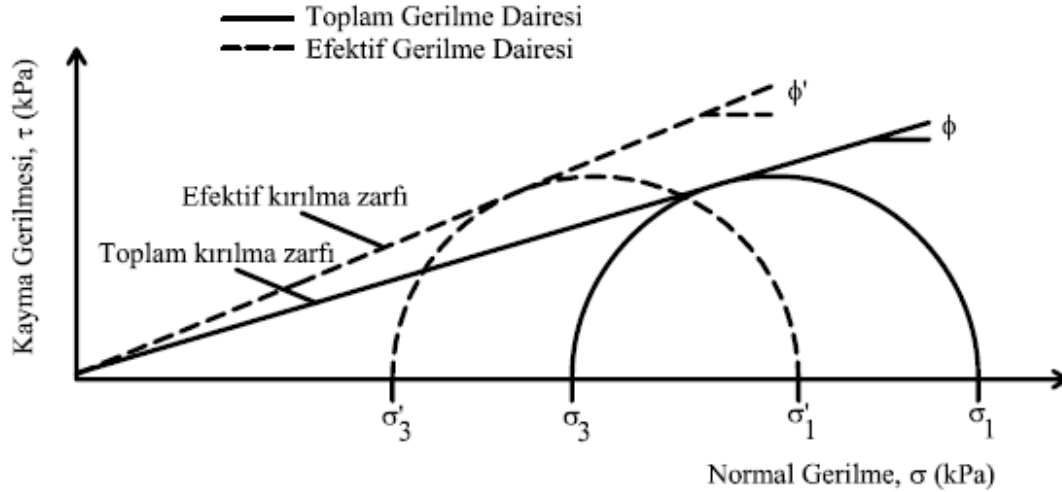
İnşaat mühendisliğinde stabilite problemlerinin analizinin hangi yaklaşımla yapılacağına zemin türü, yükleme hızı ve drenaj koşullarına bakılarak karar verilir.

Boşluk suyu basınçları zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesinde önemli bir etkidir. Zeminin toplam ve efektif gerilme türünden ifade edilen kayma direnci önemli farklar gösterebilmektedir. Bu nedenle zeminin kayma mukavemetini efektif gerilmeler cinsinden ifade etmek daha gerçekçi olmaktadır. Mohr-Coulomb göçme kriterine göre kayma mukavemetinin veren bağıntı efektif gerilmeler cinsinden yazılacak olursa;

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu eşitlikte, $(\sigma-u=\sigma')$ göçme düzlemine etkiyen efektif gerilmeyi, c' ve ϕ' efektif gerilmeler cinsinden kayma mukavemeti parametrelerini göstermektedir.

Mohr gerilme dairelerini, toplam gerilmeler cinsi ile birlikte efektif gerilmeler cinsinden de çizmek mümkün olmaktadır. Şekil 2.3'te toplam ve efektif gerilme daireleri ve bu dairelere teğet olan göçme zarfları gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Göçme durumunu gösteren toplam ve efektif gerilme daireleri ve kırılma zarfları.

2.3 Kumların Kayma Mukavemeti

Kohezyonsuz veya iri daneli olarak nitelendirilen kum zeminlerde en belirgin özellik sistemde yerçekimi diğer bir ifade ile kitle kuvvetlerinin hakim olmasıdır. Sürtünme kumlarda birincil derecede etkin olmaktadır. Kum zeminlerde kohezyon parametresi sıfır olarak alınmaktadır. Bu nedenle kum zeminler için kayma mukavemeti bağıntısı;

$$\tau = \sigma \times \tan \phi \quad (2.3)$$

olarak belirtilmektedir. Kumlarda drenajlı koşulların geçerli olduğunu düşünmek gerçekçi bir yaklaşım olmaktadır. Bunun nedeni, yükleme sırasında boşluk suyunun rahatlıkla zemin içerisinden çıkabilmesidir. Böylece boşluk suyu basıncında da herhangi bir artış meydana gelmemektedir. Sonuç olarak, kumların arazi yüklemeleri altında davranışları incelenirken drenajlı kayma mukavemeti açısının bulunması

yeterli olmaktadır. Kayma mukavemeti açısı da laboratuvarda yapılan kesme kutusu veya üç eksenli basınç deneyleri ile bulunmaktadır. Kum zeminlerin kayma mukavemeti açısını (ϕ) etkileyen faktörler;

- Dane biçimi: Yuvarlak danelerden oluşan zeminlerin kayma mukavemeti, açısı köşeli danelilerden biraz daha düşük olmaktadır.
- Dane çapı dağılımı: Üniorm kumların sahip olduğu kayma mukavemeti açısı iyi derecelenmiş zeminlerinkinden daha düşük değerdedir.
- Kum zeminlerin sıklık derecesi: Boşluk oranı azaldıkça, (yoğunluk arttıkça) kayma mukavemeti açısının değeri artmaktadır.
- Danelerin mineral yapısı: Daneler arası sürtünmeyi etkilemekle birlikte çoğu tabii kumlar için oldukça dar aralıkta değiştiği kabul edilmektedir.
- Su etkisi: Zeminlerin kuru veya su altında olması kayma mukavemeti açısının değerini çok az etkilemektedir.

Bütün belirtilen bu unsurlar göz önüne alınarak, laboratuvarda yapılacak olan deneyler sonucunda elde edilecek kayma mukavemeti açısının doğru olabilmesi için deney numunesi ile arazi sıklığının aynı olması gerekmektedir. Bunun nedeni, sıklık derecesine bağlı olarak kayma mukavemeti açısı geniş bir aralıkta değişmesidir (Özaydın, 2010).

2.4 Zeminlerin Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışının ve kayma mukavemetinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için, deney koşulları ile doğal koşulların olabildiğince benzer olması gerekmektedir. Kayma mukavemeti zeminin arazide yüklenmeden önce yerindeki başlangıç durumunu yansıtan konsolidasyon basıncı, boşluk oranı, su muhtevası, suya doygunluk derecesi gibi faktörlerden, arazi yükleme türü ve hızından ve drenaj koşullarından etkilenmektedir (Özaydın, 2010).

Uygulamada birbirinden farklı koşullar ile karşılaştırılması nedeniyle, zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Örselenmemiş numune almanın zor olduğu kumlu zeminlerde ve yumuşak killerde arazi deney sonuçlarından yararlanılmaktadır. Killi zeminlerin drenajsız kayma mukavemetleri ile arazi deneylerinde yapılan ölçümler

arasında çeşitli geliştirilmiş korelasyonlar bulunmaktadır. Kayma mukavemetini belirlemek amacıyla yapılan arazi deneylerinin başlıcaları SPT, CPT ve arazi veyn deneyidir.

Zeminlerin kayma mukavemetlerini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemlerinden en yaygın olanları kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve üç eksenli basınç deneyidir. Basit kesme, halka kesme ve laboratuvar veyn deneyi ise diğer yöntemlerdir. Aşağıda kısaca kesme kutusu, serbest basınç, üç eksenli basınç ve basit kesme deneylerinden bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan kesme kutusu deneyi detaylı bir şekilde ilgili bölümlerde anlatılmıştır.

2.4.1 Kesme kutusu deneyi

Bu deney kayma direnci parametrelerinin ölçümünde kullanılmış ilk yöntemdir. Zemin numunesi dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutunun içine yerleştirilmektedir. Numune, belirli bir normal gerilme altında konsolidasyonunu tamamladıktan sonra uygulanan kesme kuvveti ile gereken hızda kesilir. Uygulanan kesme kuvveti altında, kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket etmektedir ve zemin kaymaya zorlanmaktadır. Deney sırasında yatay hareket, düşey deformasyon ve kesme kuvveti ölçülmektedir.

Deneyin en sakıncalı yanı, kesilmeye zorlanan yüzeyin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmayabileceğidir. Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının ölçülememesi, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının uniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır. Ayrıca, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenebildiği deformasyona ulaşmak için deneyin durdurularak geriye alınması ve çevrimler halinde yapılması da birtakım sorunlar yaratabilmektedir (Önalp, 2007).

Kesme kutusu deneyi daha çok kumların kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Kum zeminler için elde edilen kayma mukavemeti açısı drenajlı yükleme durumlarını temsil etmektedir. Deney numunesinin arazi boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmasına dikkat edilmelidir.

2.4.1.1 Basit kesme deneyi

Kesme kutusunda numunenin deney aletinin yapısı nedeniyle belirli bir düzlemde kesilmesi sakıncasını gidermek için üst üste dizilmiş metal halkaların içine yerleştirilen silindirik biçimli numunenin öne itilmesi yoluyla kesilmesi ilk olarak 1940'lı yıllarda gündeme gelmiştir. Daha sonraları halkaların yerini bir kauçuk kılıfla kaplanmış tel sargılı gömlek almıştır. Böylece numunede değişmez kesit ve üniform gerilme dağılımı sağlanır. Bu deney yöntemine basit kesme deneyi denilmektedir.

Basit kesme deney yönteminin 3 çeşit modeli bulunmaktadır. Bunlar; İsveç, Norveç ve Cambridge modelleridir. İsveç modelinde numunenin çevresi üst üste dizilen ince çelik halkalar, Norveç modelinde kauçuk kılıfın içinde tel sargı, Cambridge modelinde ise numune çevresinde rijit plakalar kullanılmaktadır. Basit kesme deneyi drenaj, boy ve hacim kontrolü yanında statik ve dinamik yüklerle yapılabilmesi ve kayma düzlemi kenarlarında olası gerilme yığınlarını önlemesi nedeniyle tercih edilmektedir. Böylece, numuneler tam drenajsız koşullarda üniform olarak kesildiği gibi oluşan boşluk suyu basınçlarının ölçümü de sağlanmaktadır.

Belirtilen laboratuvar deney yöntemlerinden kesme kutusu deneyi aynı zamanda aşırı konsolide veya fisürlü killerin kalıcı kayma mukavemetini belirlemede kullanılabilir. Düşük hızda gerçekleştirilen deney üç farklı gerilme altında ve her gerilme için yeterli çevrimler yapılarak gerçekleştirilir. Bu deneye tekrarlı kesme kutusu deneyi adı verilmektedir. Bu deney haricinde kalıcı kayma mukavemeti belirlemede kullanılan diğer bir deney türü ise halka kesme deneyidir. Halka kesme deney aleti, halka şeklindeki zemin numunesi üzerinde farklı gerilmeler altında büyük deformasyonlar yaratmaya izin vermektedir. Büyük deformasyonlara izin vermesi halka kesme deneyinin en önemli özelliğidir. Kalıcı kayma mukavemetini belirlemede drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı olması ve kalıcı kayma mukavemetinin de büyük deformasyonlar sonucu ortaya çıkması bu deney yönteminin kalıcı kayma mukavemetini belirleme açısından kullanışsız olmasına neden olmaktadır.

Kayma mukavemetini arazide yerinde belirleyebilmek için çeşitli deney yöntemleri vardır. Bunlar arazi deney yöntemleridir ve deneyler genellikle muayene çukurları veya sondaj kuyuları içerisinde gerçekleştirilirler. Kumlu zeminlerden ve yumuşak

killerden örselenmemiş numune almanın zor olması arazi deneylerinin sonuçlarından yararlanmayı faydalı kılacaktır. Kumlu zeminlerde yapılan arazi deneylerinde kumun kayma mukavemeti açısı ile arazi ölçümleri arasında ampirik korelasyonlardan yararlanırken, killi zeminlerde drenajsız kayma mukavemeti doğrudan ölçülerek ya da korelasyon yolu ile belirlenmektedir (Özaydın, 2010).

2.4.2 Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi üzerine yalnızca eksenel doğrultuda yük uygulanmaktadır. Bu deneyin ön koşulu zeminin kendisini desteksiz tutacak kadar dayanıma sahip olmasıdır. Bu nedenle kumlarda uygulanamamaktadır.

Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilmediğinden, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir.

Deneyde eksenel yüklemeye önce zemini konsolide etmek ve eksenel yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün değildir. Bu olumsuzluklara karşın killerin kıvamını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.1’de killerin kıvamı ve serbest basınç mukavemetleri arasındaki ilişki görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Killerin serbest basınç dayanımına göre kıvamı (Özaydın, 2000)

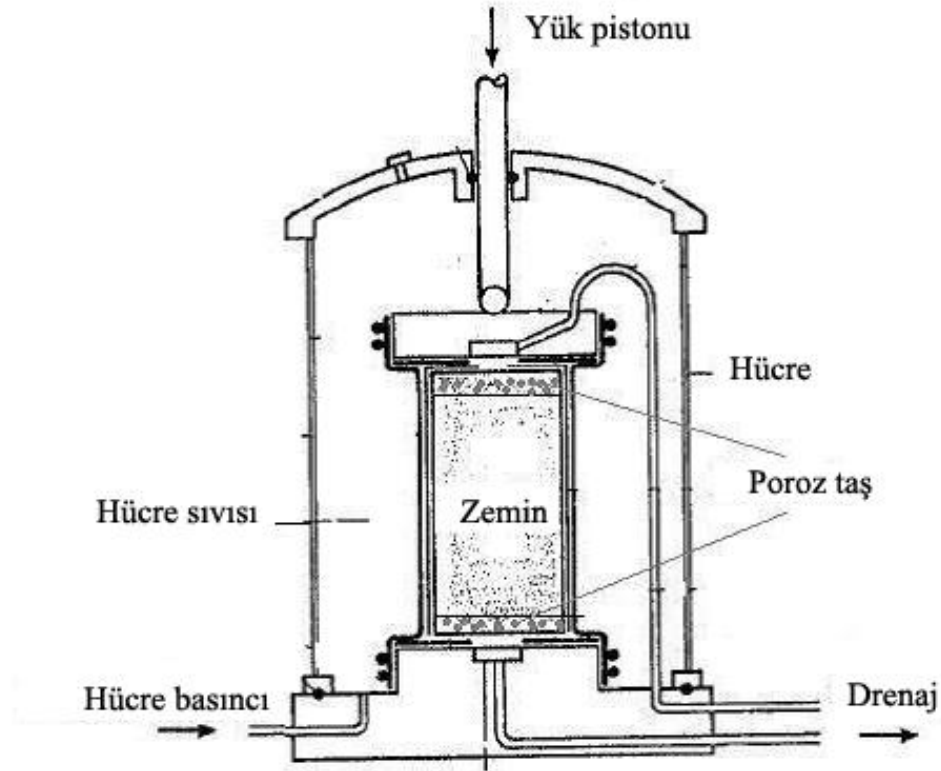
Kıvam	q_u (kPa)
Çok yumuşak	<25
Yumuşak	25-50
Orta katı	50-100
Katı	100-200
Çok katı	200-400
Sert	>400

2.4.3 Üç eksenli basınç deneyi

Zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan laboratuvar deneyleri arasında en gelişmiş olan yöntem üç eksenli basınç deneyidir. Bu deney ile, zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemetini gerçeğe en yakın

şekilde belirlenebilmektedir. Üç eksenli basınç deneylerinde zemin numunesinin arazi gerilmeleri altında konsolidasyonu sağlanabilmekte ve suya doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir. Deney, konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonlu-drenajlı (CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) olacak şekilde üç farklı türde gerçekleştirmek mümkündür. Drenajsız yükleme deneylerinde, zemin numunesinde oluşan boşluk suyu basınçları, drenajlı yükleme deneylerinde ise meydana gelen hacim değişiklikleri ölçülebilmektedir.

Deney düzeni Şekil 2.4'te gösterilen üç eksenli basınç deneyinde, zemin numunesi bir hücre içine yerleştirilmektedir. Numune üst başlığına temas eden bir piston vasıtası ile eksenel gerilme uygulanmakta, numune alt ve üst başlıklarına bağlı ince kanallar ile deney sırasındaki drenaj durumu kontrol edilmektedir (Özaydın, 2010).



Şekil 2.4 : Üç eksenli basınç deneyi (Önalp, 2007).

3. ZEMİNLERDE YAPILAN ÇEŞİTLİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zeminler, doğal durumunda her zaman üzerinde inşaa edilmesi planlanan yapının temelini taşıyabilecek özellikte olmayabilir. Böyle durumlarda gerekli taşıma gücüne sahip ve istenen projeye uygun olması için zemin özelliklerinin iyileştirilmesi düşünülmüştür. Genellikle zemin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulan durumlar ise;

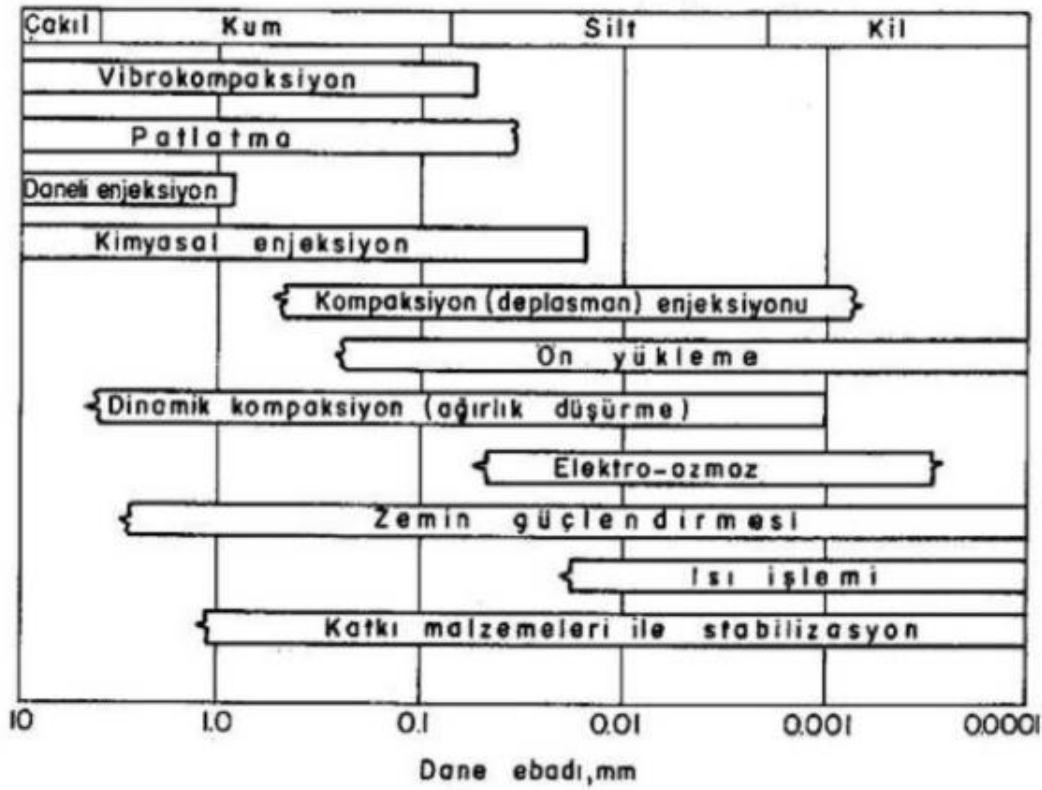
- Zeminde sıvılaşma potansiyelinin olması,
- Yapım esnasında ve sonrasında oluşabilecek aşırı oturmalar,
- Yetersiz taşıma gücü,
- Yapının eğilmesine, yatmasına sebep olacak farklı oturmalar,
- Temel kazısı ile ilgili problemler,
- Şev duyarızlığı,
- Kazı sonucu kabarmalar,
- Çökebilen, organik v.s. zeminlerin varlığı.

Yapılacak ve yapılan her yapının kendi projesi ve üstüne inşaa edileceği zemin kendisine özgü olduğundan dolayı çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinden duruma en uygun olanı seçilmelidir. Dane çapına göre zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Zemin iyileştirme yöntemlerinin seçimlerini etkileyen faktörler ise şunlardır:

- Zemin/kaya profili ve özellikleri (incelerin yüzdesi, kıvam, normal yüklenmiş/aşırı konsolide, vb.),
- Yeraltı suyu durumu,
- Gözetilen iyileştirme seviyesi (büyüklüğü),
- Farklı yöntemler ile elde edilebilecek iyileştirmelerin görece büyüklüğü ve yararı,
- İyileştirmeye ilişkin gerekli alan ve derinlik,
- Yapıma ilişkin faktörler (iş planı, ulaşılabilirlik, malzemeler, geçit hakkı, ekipman iş gücü, yeraltında çalışabilme alanlarına ilişkin engeller),

- Çevresel faktörler,
- Maliyet,
- Yeni veya mevcut yapılar ile etkileşim,
- Bakım, dayanıklılık ve işletme gereksinimleri,
- Diğerleri (sözleşme, politika, gelenek, vb.).



Şekil 3.1 : Dane çapına göre zemin iyileştirme yöntemleri

Yukarıda zemin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulan durumlardan bahsedildiğine göre, zemin iyileştirilmesi sonucunda beklenenler de bu durumlara paralel olarak çözüm sunacak öneriler olmalıdır.

Zemin iyileştirme tekniklerinin amaçlarını belli başlı şu şekilde sıralayabiliriz:

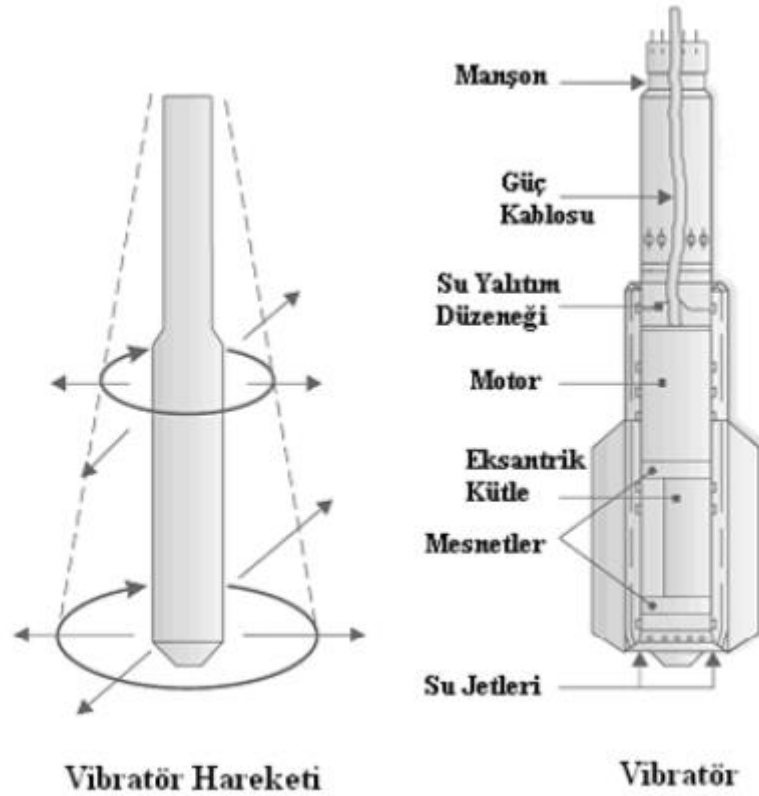
- Yapı oturmalarını azaltmak,
- Zeminlerin kayma dayanımını artırmak ve böylece sığ temellerin taşıma kapasitesini yükseltmek,
- Setlerin ve barajların mümkün eğimli göçmelerine karşı güvenlik faktörünü yükseltmek,
- Zeminlerin büzülmesini ve kabarmasını azaltmak.

Bu anlamda yapılan zemin iyileştirme yöntemleri 4 ana başlık altında incelenebilir.

3.1 Zeminlerde Yapılan Geleneksel İyileştirme Yöntemleri

3.1.1 Vibrasyonlu yöntemler

Vibroflotasyon, zemin içerisine yerleştirilen bir vibratörden kaynaklanan yatay titreşimler sonucu granüler zeminlerin sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Granüler zeminlerin başlangıçtaki boşluk oranları ve dolayısıyla sıkışabilirlikleri azalmaktadır. Diğer yandan içsel sürtünme açıları, taşıma gücü ve sıvılaşmaya karşı olan dirençleri de artmaktadır. Şekil 3.2’de vibratör şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Vibrasyonlu yöntem için kullanılan vibratör
(Erdoğan v.d., 2008)

Kum Sıkıştırma Kazıkları (SCP)

Kum sıkıştırma kazıkları yumuşak zeminleri iyileştirme tekniği olarak Japonya’da geliştirilmiştir. Bu teknik yumuşak zemin içerisinde titreşimli bir muhafaza borusu yardımıyla kum veya benzer bir malzeme kullanarak iyi sıkıştırılmış kum

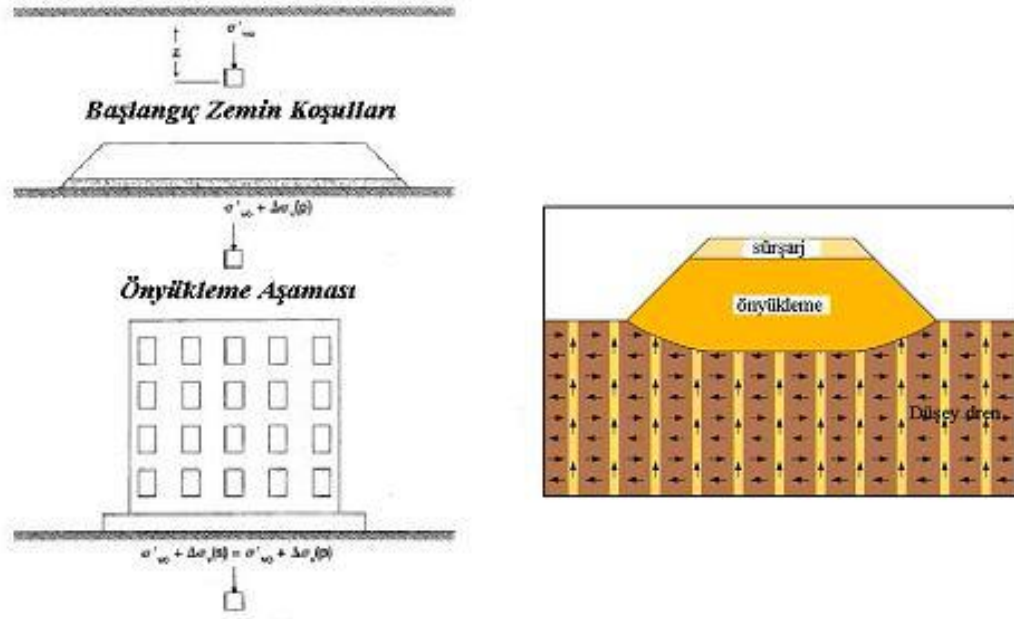
kazıklardan oluşmaktadır. Kum Sıkıştırma Kazıkları (SCP) tekniğine ilişkin ekipman kum dren yerleştirme ekipmanına benzemektedir. Ekipman istenilen derinliğe ulaştıktan sonra, daha önceden belirlenen boydaki gevşek kum ekipmanın mili arasından boşaltılır ve ekipman biraz yukarı çekilir. Daha sonra milin üstündeki bir vibratör yardımıyla mil gevşek kumu sıkıştırır ve çapını artırır. Bu işlemin tekrar ettirilmesiyle sıkıştırılmış kum kazıkları oluşturulur ve ayrıca etraftaki zeminde sıkıştırılmış olur.

3.1.2 Ön yükleme

Ek dolgu ile ön yükleme, konsolidasyon oturmalarının tamamlanması için gereken sürenin kabul edilemez derecede uzun veya çok kalın homojen kil tabakalarının mevcut olduğu durumlarda söz konusudur. Temel kural zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde ek dolgunun uygulanmasıdır. Eğer belli durumlarda böyle bir yükün uygulanması gerekecekse, yükleme hızı oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesini sağlayacak şekilde olmalı ya da dolgunun hemen altında geotekstiller kullanılmalıdır.

Ön yüklemenin amacı öngörülen yapısal yükler altında oluşacak nihai oturmaları daha kısa bir zaman aralığında gerçekleştirmektir. Konsolidasyonu hızlandırmanın en etkili yolu ön yüklemeden dolayı oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının hem düşey hem de yatay yönde sönümlenmesini sağlamaktır.

Belli aralıklarla kil içerisine yerleştirilen yüksek geçirimli düşey kolonlar yer altı suyunun yatay olarak hızlı bir şekilde drene olmasını sağlamakta, bu esnada aynı zamanda düşey drenaj da devam etmektedir (Şekil 3.3). Sonuç itibarıyla sistemin doğal durumdan çok daha hızlı bir şekilde konsolide olduğu görülecektir. Düşey drenler genellikle 0.3 m çapında kum kolonlardan veya 100 mm genişliği olan suni düz drenlerin zemin içerisine sokulmasıyla oluşturulmaktadır. Fitol drenlerin kullanılması kum drenlerin killi zemine yerleştirilmesi esnasında zeminin sıkışmasına yol açıp geçirimsizliği önemli ölçüde düşürmesinden dolayı tercih edilmelidir. Bu yöntem konsolidasyon katsayısı, c_v , 3×10^{-7} m²/s den küçük olan killerde etkili görülmektedir.



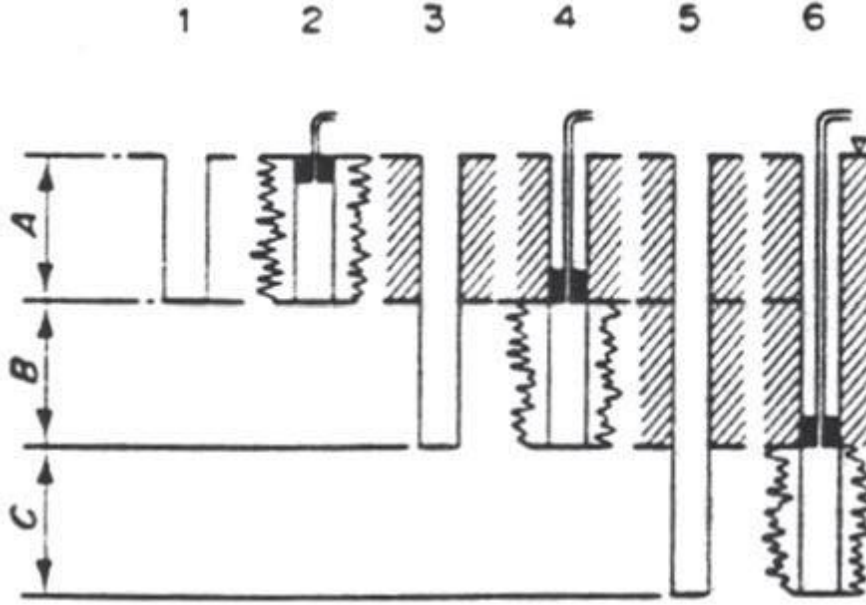
Şekil 3.3 : Ön yükleme ile zemin iyileştirilmesi ve düşey drenler ile ön yükleme (Özaydın, 2012).

3.1.3 Enjeksiyon teknikleri

Zemin enjeksiyonu, temel olarak akışkan malzemelerin basınç altında zemin içerisindeki boşluklara enjekte edilmesidir. Buradaki amaç zeminin ya da kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerini iyileştirmektir. Nitekim bu iyileştirme zeminin gerilme deformasyon ve dayanım gibi mekanik özellikleri ile geçirimsizlik gibi hidrojeolojik özellikleri değiştirilerek elde edilir.

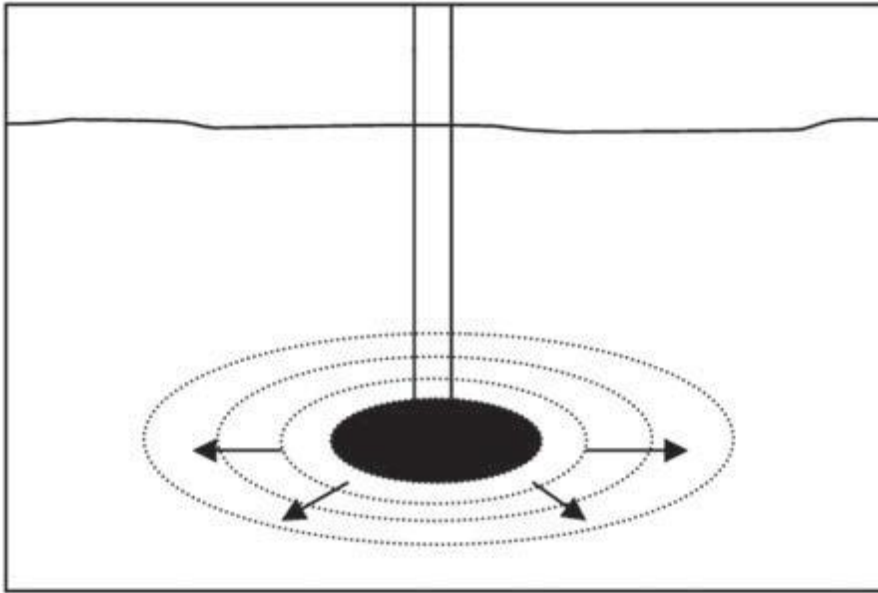
Zemin içine suspansiyon veya solüsyon halinde değişik maddelerin (enjeksiyonların) püskürtülmesi ile zemin özelliklerinde iyileşme sağlanabilmektedir.

Permasyon enjeksiyonu : Enjekte edilen maddenin zemin boşlukları içine nüfuz ederek yayılması ve sertleştiği zaman zemin kütlelerini bütün olarak iyileştirmesi ve suspansiyon enjeksiyonlarında askıdaki katı danelerin zemin boşluklarına girecek kadar küçük boyutta olması gereklidir. Şekil 3.4'te kademeli enjeksiyon işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



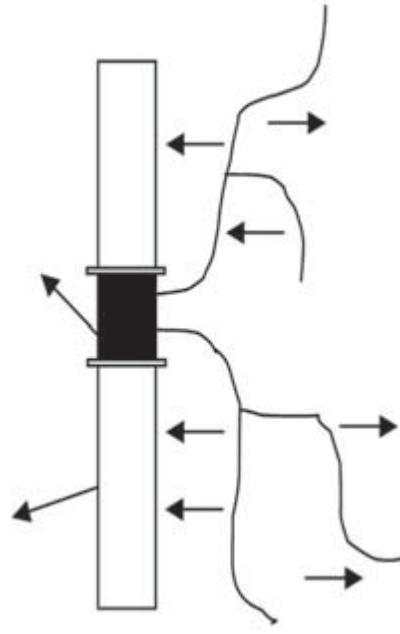
Şekil 3.4 : Kademeli enjeksiyon işlemi (Bell, 2000).

Kompaksiyon enjeksiyonu : Püskürtülen maddenin uygulanan basınç ile zemin danelerini yer değiştirmeye zorlayarak zeminin sıkışmasının sağlanmasıdır (Şekil 3.5).



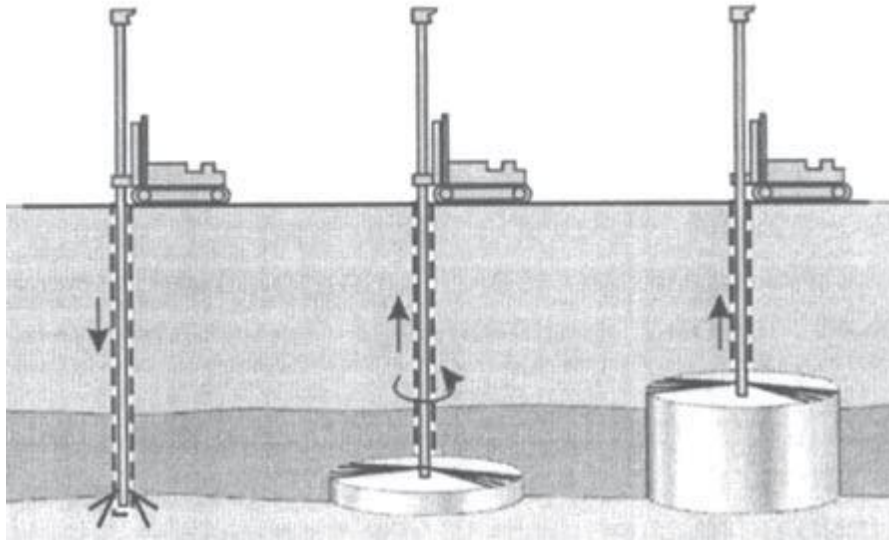
Şekil 3.5 : Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi (Essler, 2000).

Hidro çatlatma enjeksiyonu : Zeminlerde ve özellikle çatlaklı kayalarda çatlakların ve boşlukların basınç altında genişletilmesi ve enjeksiyon maddesi ile doldurulması (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Düşey yönde çatlakların oluşumu ve yatay sıkıştırma.

Jet enjeksiyonu : Bu enjeksiyon türünde tasarım derinliğine kadar, su kullanılarak delgi yapılmakta ve delgi için kullanılan tijlerin ucundaki nozullardan yüksek basınçlarda çimento şerbeti zemine jetlenmektedir. Bu jetleme esnasında tijler de belirli bir hızla döndürülmekte ve yine belirli bir hızla da zemin içinde aşağıdan yukarıya doğru çekilmektedir. Böylece, belirli bir çapta ve boyda zemin içinde silindirik bir kolon oluşturulmaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : Jet enjeksiyonu işlemi.

3.1.4 Geosentetikler

Geosentetikler sentetik hammaddelerden üretilen geçirimli dokuma ve geçirimsiz membran tipi tekstil ürünleri ile bu tanımın dışında kalan ve benzer sentetik hammaddelerden üretilen ağ, ızgara, tabaka, şerit hücre v.s. diğer ürünlere verilen genel isimdir.

Geosentetik, zemin ve kaya ortamlarında kullanılan geçirgen tekstil ürünü olup, sentetik yapılı ürünlerin tümü veya sistemidir. Özellikle otoyol ve toprak dolgularında kullanılırlar (Şekil 3.8).

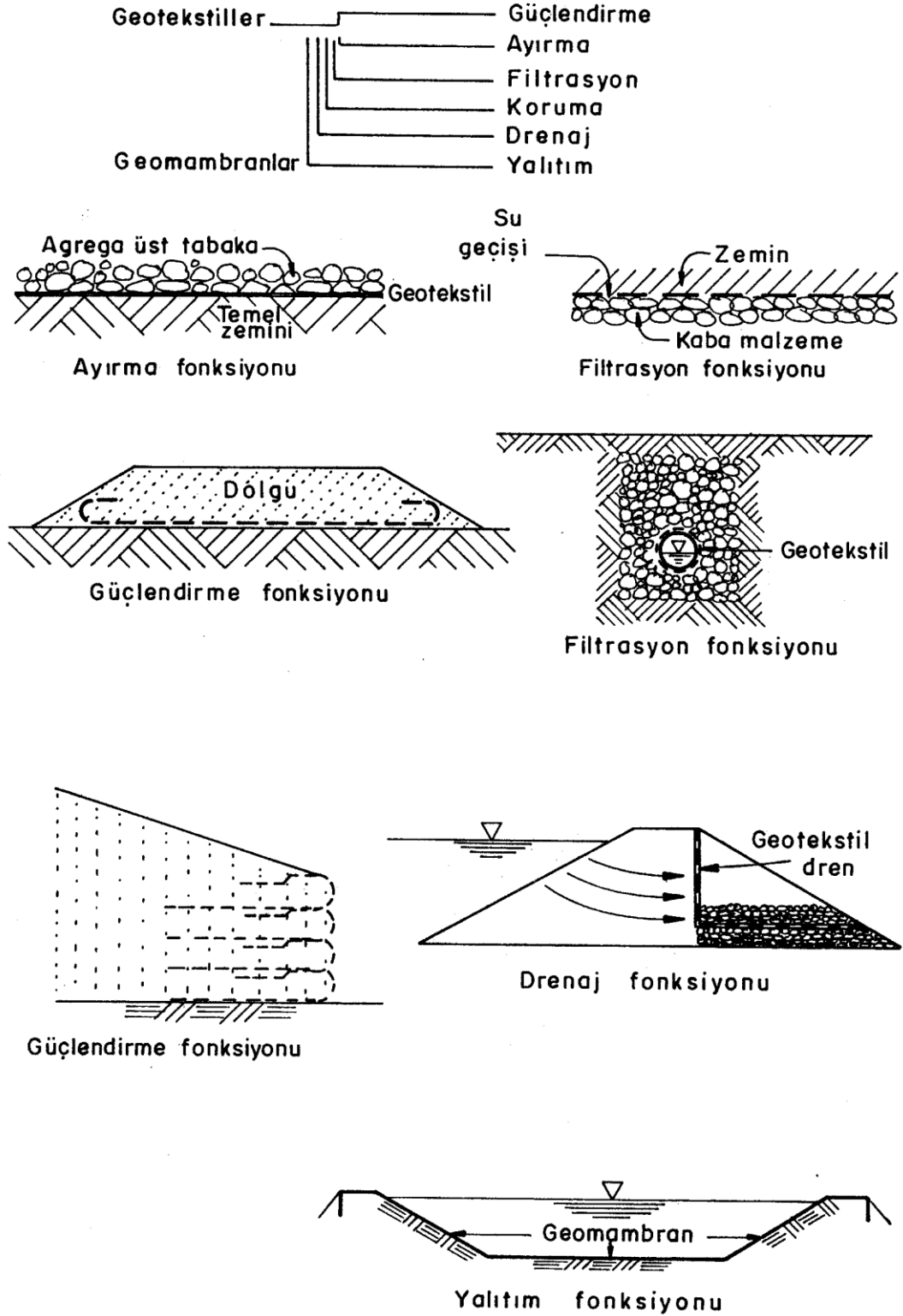
Geosentetiklerin kullanıldığı karayolları projeleriyle;

- Dolgu ve yarma tabanlarının dolgu + kaplama + trafik yüklerine karşı dayanımı,
- Yeraltı suyu durumu,
- Kazı malzemesinin sertliği, kabarma/sıkışma faktörü,
- Heyelan potansiyeli,
- Zemin karakteristikleri,
- Sanat yapıları temel inşaatı için taşıma gücü,
- Ariyet, depo ve su temin yerleri,
- Hafriyat malzemesinin dolgu için uygunluğu,
- Depremsellik ve dinamik etkiler belirlenerek mühendislik yaklaşımlarıyla karayollarının çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan en uygun şekilde üst yapı tasarımı oluşturulmaktadır.

Zemin kitleleri içerisine geosentetik ürünler dahil edilmesi zemin kütlesinin mekanik özelliklerini iyileştirerek, hem toprak kütlesinin stabilitesini artırır aynı zamanda gerilme kuvvetlerini geliştirerek bir güçlendirme işlevi sağlar. Zemin ve geosentetik güçlendirme birleştirildiğinde, güçlendirilmiş zemin, yüksek sıkışma ve gerilme mukavemetine sahip bir kompozit malzeme oluşturulmuş olur (Lee v.d., 2000).

Kullanımları hızla artan geotekstillerin belli standartlarda üretimi amacıyla laboratuvar deney aletleri ve prosedürleri geliştirilmiştir (Eid, 2011). Mekanik özelliklerden çekme dayanımı, gerilme-deformasyon davranışı, sünme, delinme

dayanımı, yırtılma dayanımı, patlama dayanımı ve zemin geotekstil sürtünmesi ile geçirgenlik, gözenek boyutu gibi hidrolik yönden önem taşıyan özellikler çok sayıda ASTM ve DİN standartları olarak deneylerle tarif edilmektedir.



Şekil 3.8 : Geotekstil çeşitleri ve uygulamaları.

3.2 Zemin İyileştirmesinde Alternatif Yöntemler

Geoteknik literatüründe, kum ile katkı malzemesi karışımlarının mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili birçok deneysel çalışma mevcuttur. Özellikle son 30 senedir popüler olan alternatif malzemelere her yeni araştırmada bir başkası eklenmiştir. Bu malzemeler, kireç, çimento ve yapay polimer gibi yapı malzemeleri ya da, sanayi atığı olarak ortaya çıkan uçucu kül, metal cürufu, kullanılmış araba lastiği veya pirinç kabuğu külü olabilir. Uzun yıllardır atık malzemelerin alternatif inşaat malzemesi olarak yer altı ya da üst yapılarda kullanılmasına yönelik birçok çalışma ve araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar genel olarak karışımın kayma mukavemeti açısının iyileşmesi üzerine olsa da diğer mühendislik özelliklerinin iyileştiği de gözlemlenmiştir.

3.2.1 Atıklar

Günümüzde, gerek nüfus artışı gerekse endüstrinin gelişmesine paralel olarak, ihtiyaçlar neticesinde üretim sırasında ve kullanım sonrasında önemli miktarlarda cüruf, uçucu kül, plastik atıkları, cam kırıkları, atık araç lastikleri vb. atık malzemeler oluşmaktadır. Oluşan bu atık malzemelerin güvenli bir şekilde depolanması gittikçe daha zor ve pahalı bir işlem gerektirmekte ve çevre kirliliği dahil büyük sorunlara yol açmaktadır. Son yıllarda, atık malzemelerin değerlendirilip yeni ürünlerin elde edilmesi veya mevcut ürünlerde katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltmakta, atık malzemelere ekonomik bir değer kazandırmakta ve bu malzemelerin depolanması durumunda çevrede oluşacak problemleri aza indirmektedir (Zornberg v.d., 2005). Bu nedenle endüstriyel atıkların çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması gerekmektedir. Dünya üzerinde otomobil kullanımının oldukça yaygın hale gelmesinin bir sonucu olarak her yıl artan miktarda atık lastik oluşmaktadır. Bütün haldeki bu atık lastiklerin çok boşluklu olması, sıkıştırılmalarının zor olması ve ayrışmalarının uzun yıllar alması nedeniyle katı atık depo alanlarında depolanmaları tercih edilmemektedir (Gönüllü, 2004).

3.2.1.1 Kireç ve çimento

Kireç ve çimento ile zemin güçlendirilmesi zeminin kayma mukavemeti, konsolidasyon ve zeminin geçirimliliği gibi birçok mühendislik özelliğini iyileştirmede yardımcıdır.

Kireç ve çimento (Şekil 3.9) ile yol altyapısını oluşturan taban zemini, dolgu malzemesi kriterlerini sağlamayan veya Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değeri düşük, şişme potansiyeli yüksek, dolgu tabanı, dolgu malzemesi (ariyet, yarma) veya üstyapı tabanı malzemelerinin kullanılabilirlik özelliklerini arttırılabilir, yanı sıra alt temel kriterlerine yakın özellikler taşıyan malzemelerin alt temel olarak kullanılabilmesi amacıyla, bu malzemelere belli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip toz halinde sönmüş veya sönmemiş veya sıvı halde kireç sütü şeklinde sönmüş kireç katılması, karıştırılması ile yapılan iyileştirme veya stabilizasyon işlemi yapılabilir. İyileştirme çalışmaları dolgu tabakalarının, stabilizasyon çalışmaları ise alt temel tabakasının ve üst yapı tabanının kireçle iyileştirilmesi olarak tanımlanmaktadır.

Kimyasal karışımlar ile zemin stabilizasyonu, zeminlerin mukavemet ve deformasyon özelliklerini iyileştirmek için derin ve yüzeysel stabilizasyon için de kullanılabilen yöntemlerdir. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda (özellikle yol inşaatlarında), çimento karışımları kullanımı, kireç kullanımı kadar yaygın bir metottur.

Çimentonun aktif olarak zemin ile karıştırılmasının iki önemli getirisi vardır.

- Yumuşak temel altı malzemesinin taşıma gücünü arttırmak,
- Temel altı malzemesinin tasarım kalınlığını azaltmak.

Çimento kullanarak yüzeysel zemin stabilizasyonu özellikle karayolu ve demiryolu gibi yol inşaatlarında ya da havaalanı pistleri gibi hareketli yüklerin büyük değerler alabildiği yollarda tercih edilmektedir. Yüzeysel zemin stabilizasyonu dışında çimentonun kullanıldığı belli başlı alanlar şunlardır:

- Şev stabilizesini sağlamak,
- Derin stabilizasyon sağlamak,
- Derin kazı stabilizasyonu sağlamak,

- Kazıklarda oluşan negatif yüzey sürtünmesini düşürmek,
- Trafik yükleri, patlatma ve kazık çakma sırasında oluşan titreşimleri azaltmak,
- Dolgu altında oluşan konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak.



Şekil 3.9 : Çimento hammaddesi ve kireç.

Zaimoğlu (2011) tarafından yapılan çalışmada kuma %10 ile %40 arasındaki oranlarda borik alçı katılarak kayma mukavemeti açısının değişimi gözlemlenmiştir. Çizelge 3.1’de sade kum halinde kayma mukavemeti açısı 43° iken; %10 borik alçı - %90 kum durumunda kayma mukavemeti açısı 42° , %20 borik alçı - %80 kum halinde kayma mukavemeti açısı 41° , %30 borik alçı - %70 kum halinde kayma mukavemeti açısı 39° , %40 borik alçı - %60 kum halinde kayma mukavemeti açısı 45° dir.

Çizelge 3.1 Kum ve borik alçı karışımının kayma mukavemeti açısı değerleri

Karışım	ϕ ($^\circ$)
%100 kum + %0 BA	43
%90 kum + %10 BA	42
%80 kum + %20 BA	41
%70 kum + %30 BA	39
%60 kum + %40 BA	45

Borik alçı katıldıkça kayma mukavemeti açısının azaldığı görülmüştür. Bu durum %30 oranına dek tutarlı bir şekilde devam ederken oran %40 yapıldığında birden kayma mukavemeti açısının arttığı görülüyor.

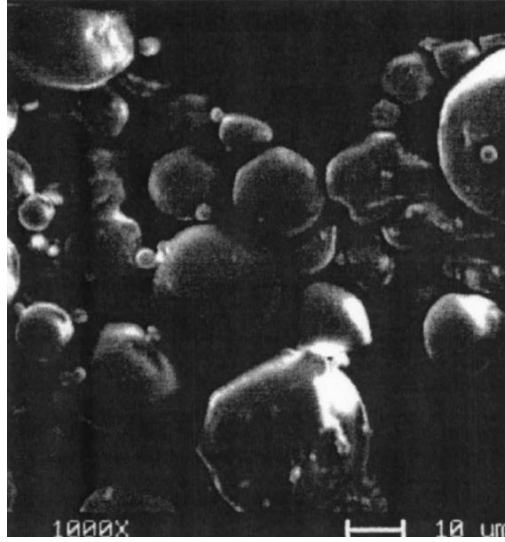
3.2.1.2 Uçucu kül

Uçucu küller, birçok farklı sektörde en çok kullanılan yapay puzzolandır. Bu malzeme, termik santrallerin içinde öğütülmüş kömürün yanması ile ortaya çıkan bir artık üründür. Santralde ortaya çıkan baca gazları içindeki hafif ve ince tozların, gazların atmosfere salınımından önce elektro filtreler ile tutulmasıyla elde edilir. Ayrıca kömürün yanması sırasında baca gazları ile karışmadan kazan tabanına çöken daha iri daneli küllere ise taban külü (bottom ash) denmektedir (Şekil 3.10).

Uçucu küllerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısıyla çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan uçucu küllerin biriktirilmesi veya atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. Uçucu küllerin neden olduğu çevre problemleri arasında, tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgar erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksin madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde son yıllarda uçucu külün kullanım alanlarının araştırılması ve alınan olumlu sonuçlarla uygulama alanlarını artırmıştır. Özellikle yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda alternatif bir yöntem olarak uçucu kül kullanımı ile başarılı sonuçlar elde edilmeye başlamıştır (Şenol v.d., 2003). Yüzeysel stabilizasyonda uçucu kül uygulaması temel olarak yumuşak zeminin uçucu kül ile karıştırılması ve ardından sıkıştırıcılar yardımıyla sıkıştırılması şeklindedir. Zemin-uçucu kül karışımlarının dayanım özelliklerini belirlemek ve arazi uygulaması için optimum karışım içeriğini bulmak için çeşitli laboratuvar deneylerinin gerçekleştirilmesi gereklidir.

Kim ve arkadaşlarının (2005) yaptığı çalışmada çeşitli dane boyutlarındaki zeminlerde çalışmalar yapmış ince danlediden ince kuma kadar ve kıyasla baktıklarında uçucu kül katkılı malzemelerin daha yüksek kayma mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 3.10 : Uçucu kül.

3.2.1.3 Atık lastik

Lastik malzemesi, yağlar ve çeşitli kimyasal maddelerin birleşiminden oluşmaktadır. Atık lastikler bütün olarak, kesilmiş, parçalanmış halde lastik kırıntısı veya öğütülmüş, granül hale getirilmiş ve toz kauçuk ürünü olarak kullanılabilirler (Şekil 3.11). Kesilmiş lastikler kesme makineleriyle, iki eşit parçaya veya lastiğin yere temas eden kısmının yan kenarından ayrılmasıyla elde edilirler. Parçalanmış lastikler, çeşitli işlemlerden geçirilerek gereksinim duyulan boyutlara küçültülmektedirler. Öğütülmüş lastikler ise, atık lastiklerin istenilen boyutlarda öğütülmesiyle elde edilirler. Atık lastiklerin kullanım alanları bütün halden işlenmiş hale kadar çeşitlilik göstermektedir (Keskin, 2012).



Şekil 3.11 : Atık lastik.

Atık lastiğin kumun kayma mukavemetini nasıl etkilediğine dair ve sonucunda neler verdiğine dair yapılan bir çalışma aşağıda örnek olarak anlatılmıştır.

Vinot V. ve Singh Baleshwar (2013) tarafından kuma hacimce farklı oranlarda atık lastik eklenerek sabit rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Çalışmalarında hacimce atık lastik oranları %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 dir. Kum numunelerine hacimce bu oranlarda atık lastik karıştırıldığında kayma mukavemeti açısı değerleri Çizelge 3.2’de görülmüştür.

Çizelge 3.2 Kum ve lastik karışımının kayma mukavemeti açısı değerleri

Karışım	ϕ (°)
%100 kum + %0 lastik	36.6
%90 kum + %10 lastik	41.3
%80 kum + %20 lastik	42.7
%70 kum + %30 lastik	40.7
%60 kum + %40 lastik	28.5
%50 kum + %50 lastik	8

Çizelge 3.2’de kum numunelerin kayma mukavemetinin, hacimce belli oranlardaki lastik parçacıklarıyla karıştırılmaları halinde arttırılabileceği görülmüştür. Lastik içeriğinin %20 olması durumuna kadar karışımın kayma mukavemeti parametreleri, %100 kum durumuna göre elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinden yüksek değer vermekte, daha fazla lastik içeriklerinde ise azalmaktadır. Kayma mukavemetindeki en büyük artış lastik içeriğinin %20 değerinde olması durumunda meydana gelmekte ve optimum değere ulaşmaktadır. Lastik içeriğinin %20’den daha fazla olması durumunda ise kayma mukavemeti, %100 kum durumunda elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinden daha düşük çıkmaktadır.

Atık lastik - kum karışımları üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deneylerine göre, kum numunelerin, lastik parçacıkları ile belli oranlarda karıştırılması durumunda kayma mukavemeti özellikleri %10’lara varan oranlarda iyileştirilebilmektedir. Sonuç olarak, atık lastiklerin, kumun mekanik özelliklerini

iyileştirmesi nedeniyle dolgu problemlerinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür.

3.2.2 Biyopolimerler

Biyopolimerler, Amerika Malzeme Test Standartları (ASTM)'nın yaptığı tanıma göre; bakteri, alg ve fungus gibi mikroorganizmaların doğal faaliyetleri sonucu tamamen yıkılabilen doğal materyallerdir (Visch, 2002). Son zamanlarda ise birçok farklı sanayi dalında çeşitli şekillerde kullanılmaya başlanmıştır. Başlıca kullanılan sanayi dalları; inşaat, petrol arama, tekstil, kozmetik, eczacılık, gıda olarak görülmüştür.

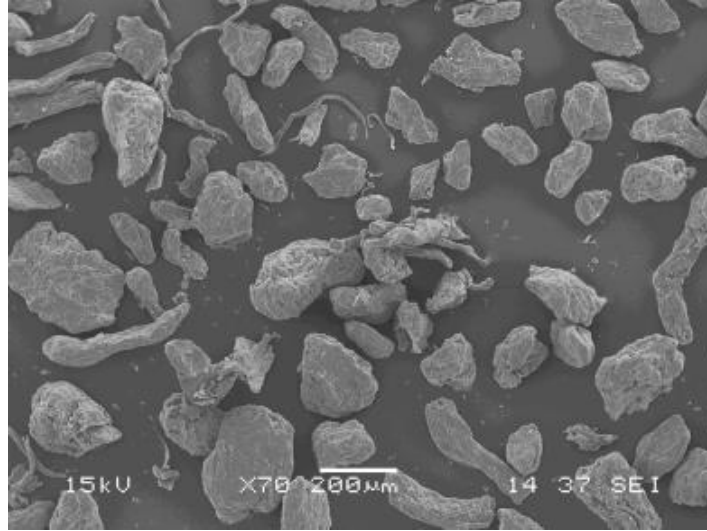
Son yıllarda yapılan araştırmalar zemin içindeki biyolojik aktivitelerin, zeminlerin oluşumunu ve yapısını etkilediğini ortaya çıkarmıştır (Mitchell ve Santamarina, 2005). İnşaat dalında zeminle etkileşim geoteknik konusunun içindedir ve bakıldığında bu konuda çok fazla araştırma ve çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle geniş ve kapsamlı bir çalışmaya gerek olduğu bilinmektedir.

Biyopolimerlerin, geoteknik mühendisliğindeki kullanımı son derece yeni bir konudur ve bu konuda yapılan çalışmalar son derece azdır. Genellikle zeminlerin hidrolik geçirimsizliğini azaltmada, kayma dayanımını arttırmada ya da erozyonu önleme konularında araştırmalar yapılmıştır. Biyopolimerlerin daneler arasındaki boşlukları dolduracağı ve böylelikle permeabiliteyi düşüreceği belirtilmiştir (Yang v.d., 1993). Biyopolimerlerin zeminlerin kayma dayanımını çok düşük oranda kullanılmasında dahi büyük bir artış sağladığı daha önce çok az sayıda çalışma yapılmasına rağmen gözlemlenmiştir. Fakat çok az çalışma olduğu için zeminin diğer mühendislik özelliklerinin nasıl etkilendiği bilinmemesine rağmen kayma dayanımı büyük artıştan dolayı fark edilmiştir. Önceki çalışmalarda, çok az miktardaki (%0,5) biyopolimer katkısının bile zeminlerin kayma dayanımlarında büyük ölçüde artışa neden olduğu göstermiştir.

Çabalar ve Çanakçı'nın 2011 yaptıkları çalışmada ise kullanılan bir biyopolimer çeşidi olan zantam gamın karışım oranının % 1'den %3'e çıkarıldığında %2'lik artışın kumun kayma mukavemeti açısını 20° birden arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu ve bugüne kadar yapılmış olan az sayıdaki çalışmaların gösterdiğine göre

biyopolimerlerin karıştırılmasının ortaya çıkardığı sonuçlar önemli derecede etkili bir biçimde zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştireceğine dair olumlu bir düşünce sunmaktadır.

Biyopolimerlerin geoteknik mühendisliğinde ve çevresel geoteknoloji alanında kullanımı ile çalışmalar ise çok sınırlı ve yenidir. Biyopolimerler metaller, yüzey partikülleri ve diğer polimerlerle kimyasal reaksiyona girmeye yatkındırlar. Çevresel geoteknolojide nükleer ve diğer aşırı zararlı metalik atıkları yok etmeyi amaçlayan teknolojilerde yaygın bir şekilde biyopolimerler kullanılmaya başlamıştır (Etemadi v.d., 2003). Geoteknik mühendisliğinde ise daha çok sondaj çukurları ve kazıların desteklenmesinde geçici amaçlarla kullanılmaktadır (Mitchell ve Santamarina, 2005).



Şekil 3.12 : Xanthan gumun SEM ile çekilmiş fotoğrafı.

3.2.2.1 Xanthan gum

Xanthan gum, *Xanthomonas Campestris* mikroorganizması tarafından salgılanan hücre dışı polisakkarittir (Kim v.d., 2006). Şekil 3.12’de SEM ile çekilmiş fotoğrafından görülmektedir.

Çabalar ve Çanakçı, (2011) yaptıkları çalışmada katkı malzemesi olarak Xanthan gum (zantan gam) kullanmışlardır. %1, %3 ve %5 oranlarında kullandıkları malzemeyi aynı zamanda suyla da karıştırıp 7 gün, 26 gün ve 50 gün sürelerinde kür etmişler daha sonra deney yapmışlardır.

Kür süresi 7 gün olduğunda Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi kayma mukavemeti açısı değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.3 : Kum ve xanthan gum karışımının kür süresi 7 gün olduğunda kayma mukavemeti açısı değerleri

Karışım	ϕ (°)
%99 kum + %1 XG	22
%97 kum + %3 XG	37
%95 kum + %5 XG	57

Kür süresi 26 gün olduğunda elde edilen kayma mukavemeti açısı değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Kum ve xanthan gum karışımının kür süresi 26 gün olduğunda kayma mukavemeti açısı değerleri

Karışım	ϕ (°)
%99 kum + %1 XG	15
%97 kum + %3 XG	43
%95 kum + %5 XG	54

Kür süresi 50 gün olduğunda elde edilen kayma mukavemeti açısı değerleri aşağıdaki Çizelge 3.5'te verilmiştir.

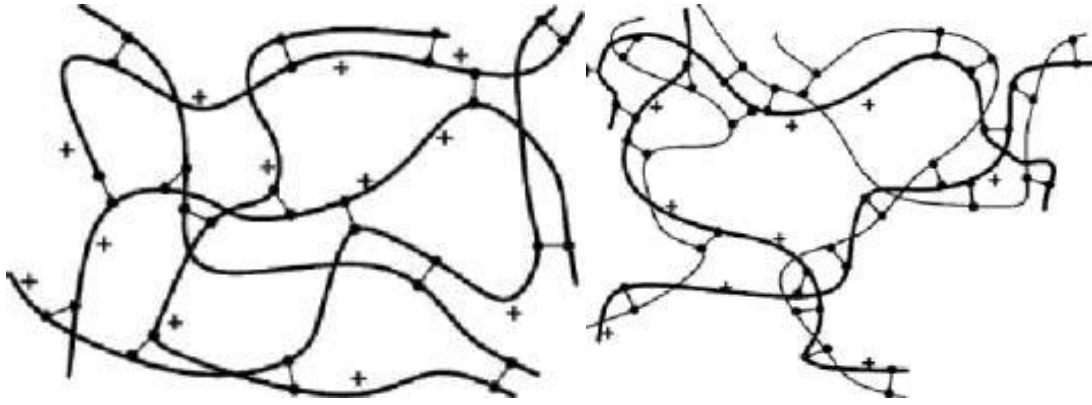
Çizelge 3.5 : Kum ve xanthan gum karışımının kür süresi 50 gün olduğunda kayma mukavemeti açısı değerleri

Karışım	ϕ (°)
%99 kum + %1 XG	15
%97 kum + %3 XG	37
%95 kum + %5 XG	55

Bu çalışmanın en önemli sonucu, kum numunelerinin zantam gam ile karışımının kür süreleri ve zaman aralıklarından pek etkilenmediğinin görülmesidir. xanthan gumın karışımındaki oranı ise daha etkilidir. Xanthan gum oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı gözlemlendiği için zemin iyileştirilmesinde kullanılabilecek bir katkı malzemesi olabilirliği görülmüştür.

3.2.2.2 Kitosan

Kitosan, bahsedilen biyopolimer özelliklerinin yanı sıra biyo uyumluluğu, antimikrobiyal etkisi, diğer malzemelerle birleşip kompozit oluşturabilmesi, hücresel tutunmaya ve çoğalmaya elverişli olmasının yardımıyla kullanım sahasında kendine yer bulmuştur. Kitosan, kullanılacağı yere/dokuya göre mekanik özellikleri güçlendirilebilmektedir (Şekil 3.13).



(a) Kitosanın kendi içinde çapraz bağlaması (b) Polimer ağı yapısı

Şekil 3.13 : Kitosan hidrojellerinin yapısı (Cho v.d., 1999).

Arka sayfadaki Çizelge 3.6' da %25 su içeriğindeki %40 kum - %40 kaolin - %20 bentonit karışımına ait kitosanın farklı konsantrasyonlarındaki içsel sürtünme açısına etkisi görülmektedir. Kitosanın %1 oranındaki katkısı, %40 kum - %40 kaolin - %20 bentonit karışımı üzerinde içsel sürtünme açısı üzerinde 1.5 derecelik bir artışa neden olmuştur. Kitosan da, zantan gama benzer şekilde kayma dayanımı üzerinde artış görülmektedir.

Çizelge 3.6 : Kitosanın %25 su içeriğindeki %40 kum - %40 kaolin - %20 bentonit üzerinde içsel sürtünme açısına etkisi

Kitosan konsantrasyonu (%)	ϕ (°)
0	13.25
1	14.83

Aşağıdaki Çizelge 3.7’de %50 su içeriğindeki %40 kum - %40 kaolin - %20 bentonit karışımına ait kitosanın farklı konsantrasyonlarındaki içsel sürtünme açısına etkisi görülmektedir. Karışım içindeki bentonit oranı %10 oranında artırıldığında içsel sürtünme açısı düşüş göstermiştir.

Çizelge 3.7 : Kitosanın %50 su içeriğindeki %40 kum - %40 kaolin - %20 bentonit üzerinde içsel sürtünme açısına etkisi

Kitosan konsantrasyonu (%)	ϕ (°)
0	11.79
1	13.12

3.2.3 Polimerler

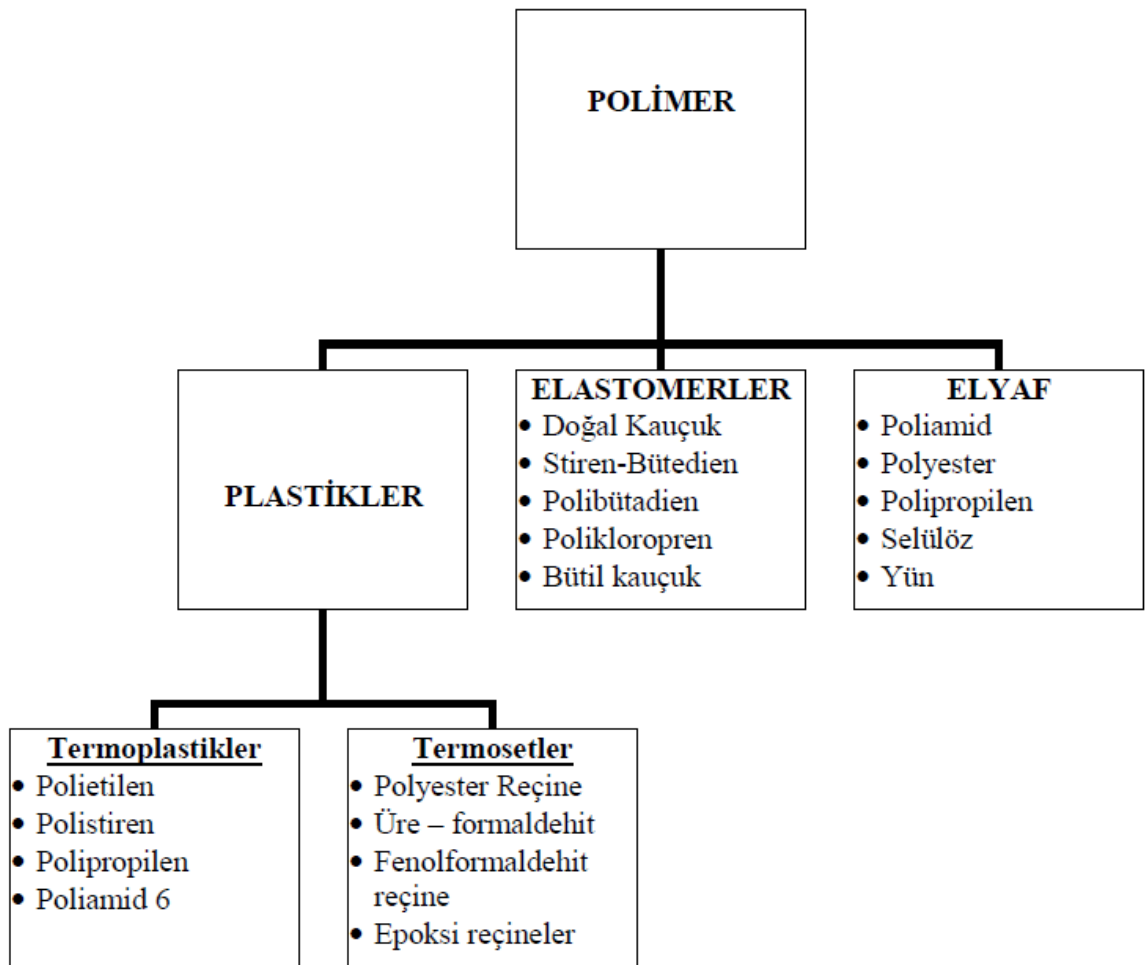
Polimerler küçük basit moleküllerin devamlı bir şekilde birbirini takip etmesi neticesi oluşan makro bileşik yapılardır (Şekil 3.14). Polimerleri oluşturan en küçük birimler monomer olarak adlandırılır. Aynı tür monomerlerin birleşmesi sonucunda oluşan polimer zincirine homopolimer, iki farklı tür monomerin birleşmesi sonucu oluşan zincire kopolimer, üç farklı türün birleşmesi sonucu oluşturduğu yapıya ise terpolimer adı verilir. Günümüzde polimerlerin çeşitli kullanım alanları vardır. Polimerler, pencerelerde kullanılan PVC (Poly Vinyl Chloride)’den, Teflon (politetrafloroetilen (PTFE))’a kadar günlük hayatın içinde kendini göstermektedir.

Polimerik malzemelerin gündelik hayatta da bu kadar yaygın olmalarının sebepleri çok yönlü kullanıma yatkın, hafif, güvenli, dayanıklı ve düşük maliyetli olmalarıdır. Aynı zamanda;

- Her alanda kullanılabilir olmaları, her türlü şekilde kolaylıkla üretilibilmeleri,

- Tasarımında sınır olmaması ve bu sebeple binlerce farklı uygulamada kullanılabilmeleri,
- İstenilen mekanik uygulamaya göre, sert ya da esnek yapılabildikleri gibi, katı ve gözenekli yapıda da kolayca üretilebilmeleri,
- Metal ya da seramik gibi malzemelerle karşılaştırıldıklarında çok daha hafif olmaları,
- Güvenli olmaları,
- Parçalanmaya karşı dayanıklı olmaları,
- Uygun maliyetli olmaları, gibi sebepler sayılabilir.

Polimerleri fiziksel özelliklerine göre sınıflandırırken, sınıflandırma kesin çizgilerle birbirinden ayrılmayabilir. Polimerleri aşağıdaki şekilde fiziksel özelliklerine göre sınıflandırabiliriz.



Şekil 3.14 : Polimer kavramları ve özellikleri.

Polimerler tekstil, kozmetik, spor malzemeleri gibi birçok dalda kullanıldığı gibi yapı sektöründe de altyapı ürünlerinden, ev dekorasyon ürünlerine kadar yapı malzemesinin her alanında plastik malzemeleri ya da plastik bazlı kompozit malzemeleri görülmektedir. En sık kullanılan altyapı ürünü poli(vinil klorür) (PVC) bazlı plastik su boruları olduğu gibi bunların kontrolünü sağlayan vanalar da borular polipropilen malzemedir. Kısaca bütün bir su tesisatı alt yapısını tamamen plastik elemanlardan inşaa etmenin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, PVC polimeri çatı ve yer kaplaması olarak da kullanılabilmektedir.

Yapıların iç kısmına bakıldığında ise duvarlarda plastik ürünlerinin büyük bir hız ve çeşitle yayıldığı, içerisinde plastik bazlı akrilikler, poliüretanlar, poliesterler, epoksiler ve melamin reçinelerinin bulunduğu boya endüstrisiyle karşılaşılır. Çeşitli özelliklere sahip bu kimyasallar boyanın uygulandığı yüzeye ve birbirine daha iyi tutunmasını sağladığı gibi aynı zamanda da boyaya daha güzel bir son görünüm kazandırır. Bu yönde son zamanlarda artan bilimsel araştırmalar ve çalışmaların ışığında bu polimerler nano-parçacıklarla geliştirilerek, su tutmayan, kendi kendini temizleyen ya da UV ışınlarından koruyan, gelişmiş özellikli ileri teknoloji ürünü boyalar üretilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan yararlanarak polimer malzemelerin önümüzdeki zamanlarda güneş enerjisini de kullanması beklenmektedir.

Maliyetlerin düşük olması ve dayanıklı olması sebebiyle uzun süreli kullanım sağlayan polyester fiberlerle güçlendirilmiş ve epoksi reçine ile kalıplanan su depoları, evyeler ve banyo küvetleri de yapı endüstrisinde kullanılan plastiklerin başlıca örnekleridir. Özel kalıplama teknikleriyle sandalyeler, banklar, çöp kutuları gibi gündelik hayatta da her durumda kullanılan parçalar da plastikten üretilir. Bu tür yapı malzemeleri üretilirken polyesterden, polipropilene, epoksiden, poliakrilik gibi çeşitli plastikler kullanılabilir. Üretilen parçanın maruz kalacağı fiziksel ya da kimyasal etkenlere göre hangi plastiğin ve hangi güçlendirme elyafının kullanılacağını belirlenir.

Yüzeyel zemin stabilizasyonu kapsamında ve zeminin taşıma gücünü arttırmada alternatif atık malzemelerin kullanımının yanı sıra homopolimer polipropilen, polyester ve kopolimer gibi polimerler, son yıllarda yapılan çalışmalar neticesinde geoteknik mühendisliğinin ilgisini çekmiş ve kullanım alanına girmiştir. Bu

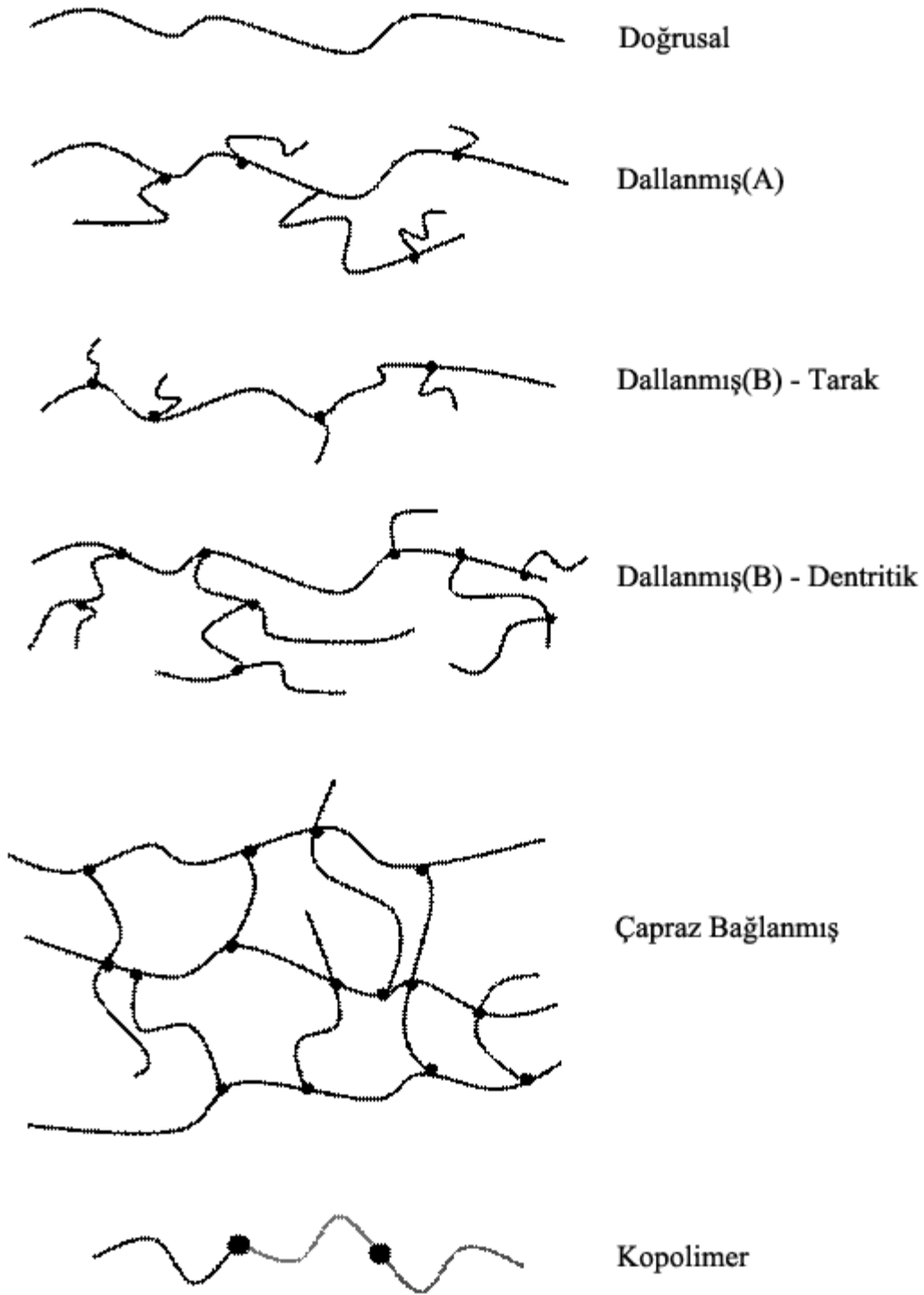
malzemelerin yüksek çekme mukavemetine sahip oluşu zemine belli oranda karıştırılıp içinde kullanıldıklarında gerilmeleri üstlenip, dağıtma eğilimi oluşturdıkları görülmüştür.

Uzun zincirler halinde bulunan lineer ya da dallanmış zincirlerden oluşan polimer sistemlerine aynı zamanda termoplastik adı da verilmektedir. Yüksek oranda çapraz bağ içeren sistemler ise termosetting olarak tanımlanır. termoplastik bir malzeme sıcaklık artışı ile eriyerek şeklini değiştirebilir ve böylece kalıplara dökülebilmesi mümkün olur. Oysa yüksek oranda çapraz bağ içeren bir yapının sıcaklık artışı ile böyle bir değişim geçirmesi, zincirlerin hareketli olmayışı nedeniyle, zordur ve sıcaklığın artışı bu tür malzemelerin erimesine değil, malzemenin parçalanmasına neden olur.

Tek tür birimlerden oluşan polimer zinciri homopolimer, iki ya da daha fazla monomer içeren polimerler ise kopolimer olarak adlandırılırlar. Kopolimerler genellikle farklı monomerlerin düzensiz birleşmesinden oluşarak rastgele (random) kopolimeri oluştururlar. İki monomerin sentezinden oluşan kopolimerler kendini oluşturan iki farklı monomerin sahip olduğu iki farklı özelliği de taşımaktadır. Böylece kendini oluşturan monomerlerden daha üstün bir davranışa sahip olurlar. Ayrıca kopolimerler termoplastik ve termosetlere benzer reaksiyon gösterirler, akıcı veya katı formda olabilirler (Şekil 3.15).

Polipropilen genelde 3 farklı şekilde üretilir. Piyasada çoğunlukla homopolimer, kopolimer ya da blok-kopolimer olarak görülür. Kopolimerler üretilirken kullanılan ko-monomer genellikle etilendir ve etilen-propilen kauçuğu elde edilir. EPDM diye adlandırılan bu kopolimer polipropilenin modifikasyonunda sıkça kullanılır ve düşük sıcaklıklardaki darbeye karşı direncinin artmasında büyük rol oynar. Buna ek olarak, etilen monomerinin kopolimer zincirine rasgele yerleştirilmesi polipropilenin kristalliğinin düşmesine sebep olur ve böylece daha şeffaf bir plastik elde edilir.

Bu tez çalışmasında da bir homopolimer ve bir kopolimer kullanılmıştır.



Şekil 3.15 : Kopolimerlerin kimyasal yapısı (polimernedir.com).

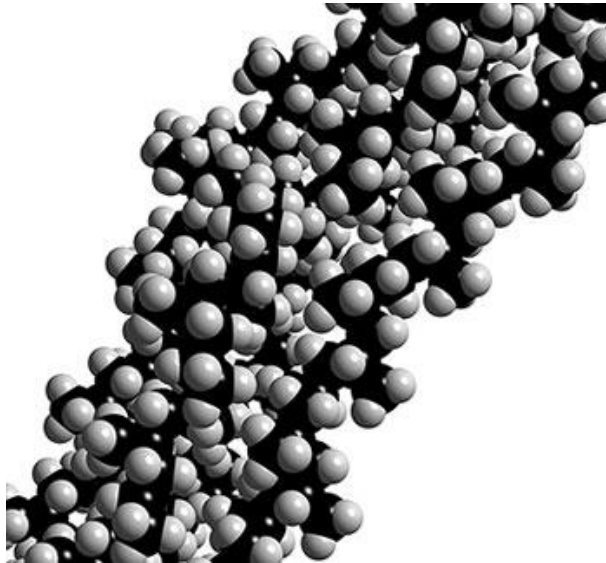
Aşağıdaki Çizelge 3.8’de polipropilen özellikleri tablo halinde verilmiştir. Tabloda ortalama değerler verilmiştir. Bu değerlerin polimerin molekül ağırlığına ve numunenin üretim şekline göre farklılık göstermesi mümkündür (polimernedir.com).

Şekil 3.16’da ise polipropilen molekül yapısı görülmektedir.

Çizelge 3.8 : Polipropilen özellikleri (polimernedir.com).

Polipropilen	
Yapı	Kristal
Yoğunluk	0.93 g/cm ³
Erime sıcaklığı	160°C
Kristalleşme sıcaklığı	111°C
Camsılaşma sıcaklığı	-10°C
Doğrusal genleşme katsayısı (CTE)	115 µm/m-°C
Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT)	102 °C @ 0.46 MPa
Azami servis sıcaklığı (Hava)	78°C
Dielektrik dayanımı	23 kV/mm
Saydamlık	Yarı saydam

Mekanik özellikleri	
Gerilme mukavemeti	31 MPa
Basma mukavemeti	45 MPa
Çekme modülü	1.4 GPa
Kopma esnemesi	200 %
Darbe dayanımı (çentiksiz izod)	8.39 J/m
Sertlik	R95 Shore ölçeği



Şekil 3.16 : Polipropilenin molekül yapısı (Utracki ve Jamieson, 2010).

Zeminler ile karıştırılan polimer bazlı fiberler zeminlerin mühendislik davranışlarında önemli değişikliklere ve iyileştirmeye sebep olur. Fiber ile güçlendirilmiş zeminler üzerinde üç eksenli basınç deneyi, serbest basınç deneyi, CBR deneyi, kesme kutusu deneyi, çekme ve eğilme dayanımı testleri gibi birçok test yapılmıştır. Zemin içinde dağılmış fiberlerin kazandırdığı en büyük avantaj ise, zemin ile karıştığında rastgele dağıldığı için zayıf bir kesit oluşturmamasıdır (Kumar v.d., 2007).

Sezer ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada, fiber katkısının kumların dayanım özelliğine etkisi araştırılmıştır. Üç değişik boydaki ve iki farklı medyan çaptaki fiber farklı iki kum zemine %1 oranında karıştırılarak iki değişik sıklıkta hazırlanan örnekler üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Q1 ve Q2 sırasıyla kaba ve orta kumu, FM6, FM12 ve FM19 sırasıyla 6, 12 ve 19 mm boyutunda fiberi, DR30 ve DR70, sırasıyla % 30 ve % 70 rölatif sıklığı göstermektedir. Fiber katkılı zeminin hem kırılma esnasındaki kayma gerilmesinde ve içsel sürtünme açısı değerlerinde kayda değer artışlar gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu etkilerin rölatif sıklığın artması ile daha belirgin olduğu ve artan fiber uzunluğunun zemin örneklerinin kayma mukavemeti açısını pozitif olarak etkilediği gözlemlenmiştir (Çizelge 3.9).

Çizelge 3.9 : Kum ve karışımların kayma mukavemeti açısı değerleri.

Örnek	ϕ (°)	
	Dr= %30	Dr=%70
Q1	34.7	36.8
Q1FM6	41.3	39.2
Q1FM12	40.8	44.1
Q1FM19	47.1	48.8
Q2	31.8	33.9
Q2FM6	35	35.5
Q2FM12	39.7	40.1
Q2FM19	39.6	40.5

Literatür çalışmaları, katkı malzemelerinin, kumun mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, kum içerisine katılan malzeme oranlarının şeklinin ve boyutlarının, karışımın kayma mukavemeti açısını ise belirli derecede olumlu etkilediği görülmektedir.

4. ALTERNATİF MALZEMELER İLE ZEMİN STABİLİZASYONUNUN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI

4.1 Malzemeler

4.1.1 Zemin

Deneysel çalışmada kullanılan zemin numunesi, İstanbul' un Silivri bölgesinden alınmış sarı renkli bir kum (SP) numunesidir. Numunenin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla standart zemin mekaniği laboratuvarı deneyleri yapılmıştır.

Elek analizi sonuçlarına göre toplam zeminin %99'unun kum olduğu görülmüştür.

Çalışmada zeminin rölatif sıkılıklarını değiştirerek deneyler yapılacağı için e_{mak} ve e_{min} değerleri bulunmuş ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Daha sonra bu değerler ile deneylerde kullanılan zemin numunelerinin kütlesi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1 : Zeminin e_{mak} ve e_{min} değerleri.

Numunenin Adı ve No	γ_s (Dane Birim Hacim Ağırlığı)	e_{mak}	e_{min}	W_L	W_P	I_p
SARI KUM	2,604	0,756	0,589	-	-	-

Elek analizi neticesinde zemine dair bütün parametreler ve sınıflandırılması Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Zemin sınıflandırması.

Numunenin Adı ve No	Çakıl (%)	Kum (%)	Kil ve Silt (%)	D_{60}	D_{30}	D_{10}	C_c	C_u	USCS
SARI KUM	0	99	1	0,315	0,256	0,215	0,968	1,465	SP

4.1.2 Virgin homopolimer polipropilen (VHP) fiber

Virgin homopolimer polipropilen (VHP) fiber tamamen monofilament lifli güçlendirmeden meydana gelmektedir. Bu fiber yapı uzun süre dayanıklılık, homopropilen fiber plastik özelliklerini ve yerleşim büzülmesini azaltmak için kullanılır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 : Virgin homopolimer fiberlere ait fiziksel özellikler (Forta Katalog, 2011).

Malzeme	Virgin Homopolimer
Renk	Beyaz
Form	Tekil Fiber
Asit/Alkali Direnci	Mükemmel
Yoğunluk	0.91
Su Emme	Yok
Çekme Gerilmesi	758 Mpa
Uygunluk	ASTM C-1116
Uzunluk	15 mm

Homopolimerpolipropilen kullanılmasının amacı plastik ve büzülme oturmalarının neden olduğu ilk oturma öncesi gerçekleşen beton çatlaklarını inhibe etmektir. Bükülmüş monofilament ağ şeklinde ve homopolimerpolipropilen elyaf deforme şeklinde olarak Şekil 4.1 'de gösterilmiştir (Etminan, 2012).



(a) VHP fiber



(b) Deforme VHP fiber

Şekil 4.1 : VHP fiber (a) fibril form (b) deforme form.

4.1.3 Kopolimer (KP) fiber

Kopolimer fiberler (lifler) betonarme döşeme imalatlarında beton içerisinde donatı amaçlı kullanılabilen, dayanımı yüksek, polimer esaslı, sentetik fiberlerdir. ASTM C-1116 gerekliliklerine uygun kopolimer fiberlerin fiziksel özellikleri Çizelge 4.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.4 : Kopolimer fiberlere ait fiziksel özellikler (Forta Katalog, 2011).

Malzeme	Kopolimer
Renk	Gri
Form	Tekil Fiber
Asit/Alkali Direnci	Mükemmel
Yoğunluk	0.91
Su Emme	Yok
Çekme Gerilmesi	570 Mpa
Uygunluk	ASTM C-1116 ve CE
Uzunluk	54 mm

Fiziksel işleme tabi tutularak eskitilmiş kopolimer malzemenin yüzeyi bu işlem sonucunda pürüzlü bir yüzeye sahip olmuştur. Bu pürüz malzemenin yüzeysel sürtünmesini arttırmaya yönelik oluşturulmuştur. Gri renkte ve sert bir dokuya sahip olan kopolimer fiberlere, birbirleri etrafında bükülerek burgulu bir yapı kazandırılmıştır. Herhangi bir bağlayıcı yapıya sahip olmayan kopolimer fiberler, deforme edilmesi halinde birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 4.2).



a) Kopolimer fiberler



b) Deforme edilmiş kopolimer fiberler

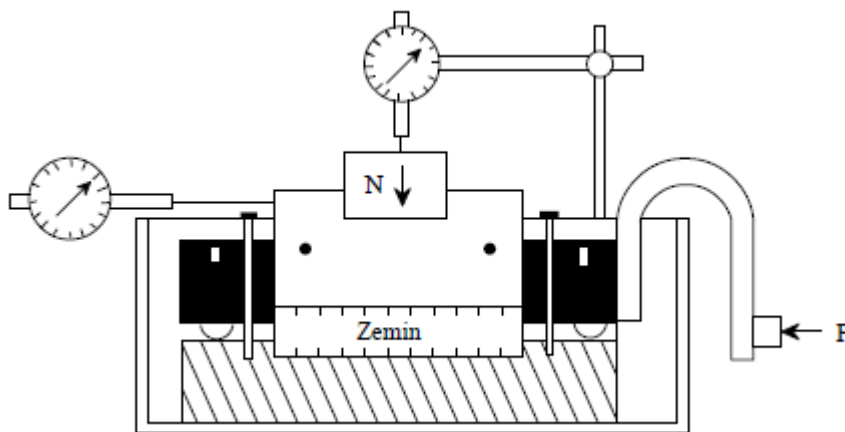
Şekil 4.2 : Normal durumda ve deforme edilmiş kopolimer fiberler.

4.2 Kesme Kutusu Deney Düzeneği

Zeminlerin kayma direncinin ölçümü laboratuvar yöntemleriyle ilk olarak 1846'da Fransız mühendis Alexandra Collin tarafından yapılmıştır (Head, 1982). Direkt kesme kutusu deneyi, kayma dayanımının elde edilmesi için kullanılan en eski deneydir. Coulomb yaklaşık 200 yıl kadar önce zeminin kayma parametreleri hesabı için bir tür kesme kutusu kullanmıştır. Şu an kullanılan kesme kutusu deney düzeneği (ASTM D3080) yirminci yüzyılın ilk yarısında son halini almıştır.

Kayma mukavemeti zemine uygulanan sürekli deplasmanlar altında zemin danelerinin birbirine göre rölatif hareketlerine karşı gösterdikleri dirençtir. Kesme kutusu deneyi kohezyonlu ya da kohezyonsuz zeminlerin kayma dirençlerini belirlemek için kullanılan bir deneydir. Kesme kutusunun üst başlığı sağa doğru kaydırılarak zorlanmaktadır. Bu şekilde zemin numunesi yatay zorlanmayla kesilerek kayma parametreleri bulunabilmektedir.

Çalışma prensibi açısından çok basit bir deney olan direkt kesme deneyinde, dikdörtgen veya dairesel kesitli iki parça halindeki rijit bir kutu içerisine yerleştirilmektedir (Şekil 4.3). Bir kesme kuvveti uygulanırken rijit kutunun bir parçası sabit tutulur diğer parçanın ise yatay düzlem üzerinde hareket edebilmesine izin verilir. Bunun sonucunda kutu içerisindeki numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmış olur.



Şekil 4.3 : Kesme kutusu deney aletinin şematik görünümü.

4.3 Deney Düzenegi ve Numunelerin Hazırlanması

4.3.1 Numune hazırlama yöntemi

Bu çalışmada %20, %30 ve %40 rölatif sıkılıkta hazırlanmış yalın kum numunelerin ve ayrıca yine bu rölatif sıkılıklarda VHP ile KP karışımı kum numunelerin direkt kesme deneyi ile kayma mukavemeti açıları hesaplanmıştır. 3 adet yalın kum, 9 tane VHP katkılı ve 9 tane de KP katkılı olmak üzere toplamda 21 set deney yapılmıştır (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 : Deney setlerinin malzeme oranları.

Rölatif sıkılık (Dr) %20	Rölatif sıkılık (Dr) %30	Rölatif sıkılık (Dr) %40
1. Yalın kum	8. Yalın kum	15. Yalın kum
2. %0.5 VHP + %99.5 kum	9. %0.5 VHP + %99.5 kum	16. %0.5 VHP + %99.5 kum
3. %1 VHP + %99 kum	10. %1 VHP + %99 kum	17. %1 VHP + %99 kum
4. %1.5 VHP + %98.5 kum	11. %1.5 VHP + %98.5 kum	18. %1.5 VHP + %98.5 kum
5. %0.5 KP + %99.5 kum	12. %0.5 KP + %99.5 kum	19. %0.5 KP + %99.5 kum
6. %1 KP + %99 kum	13. %1 KP + %99 kum	20. %1 KP + %99 kum
7. %1.5 KP + %98.5 kum	14. %1.5 KP + %98.5 kum	21. %1.5 KP + %98.5 kum

Numunelerin rölatif sıkılıkları ve kaç gram kullanılacakları ise aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D_r(\%) = \frac{e_{mak} - e}{e_{mak} - e_{min}} \quad (4.1)$$

Bu förmülde;

D_r : rölatif sıkılık

e_{mak} : hazırlanan kuru numunenin en gevşek halindeki boşluk oranı

e_{min} : hazırlanan kuru numunenin en sıkı halindeki boşluk oranı

e : deneylerde kullanılacak kuru numunenin istenilen rölatif sıkılıktaki boşluk oranı

Kesme kutusu iç hacmi 90 cm³ olduğundan ve istenilen rölatif sıkılık değerleri de bilindiğinden her bir deney için gereken kuru malzeme miktarı eşitlik 4.2 ile hesaplanır. G_s değeri önceden biliniyor.

$$\rho_d = \frac{G_s}{1+e} \times \rho_w = \frac{M_s}{V} \quad (4.2)$$

Burada;

ρ_d : numunenin kuru yoğunluğu, g/cm³

G_s : numunenin özgül ağırlığı

e : deneylerde kullanılacak kuru numunenin istenilen rölatif sıkılıktaki boşluk oranı

ρ_w : deneyde kullanılan suyun birim hacim kütlesi (1,0 g /cm³)

M_s : deney için gerekli kuru numune kütlesi, g

V : deney yapılan kesme kutusunun iç hacmi, cm³

Sade kum elek analizi yapıldıktan sonra bir kutuda iken rölatif sıkılık değerine göre 0,01 gram hassasiyetinde tartılmış, kütle oranına göre katkı malzemelerinden biri katılmıştır.

Katkı malzemelerinin kütle oranına göre kaç gram katılacağı hesaplandıktan sonra önce katkı malzemesi tartılmış, üstü kum ile tamamlanmıştır. Çalışma süresince deneylerde kullanılan Silivri'den alınmış sarı kum olarak nitelendirilen kum numunesi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Deneylerde kullanılan kum numune.

Katkı malzemesi olarak kullanılan KP ve VHP'nin de deneylerde kullanılmak üzere hazırlanışı Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Kopolimer (KP) makas yardımıyla yaklaşık 15 mm boyutunda olarak kesilmiş, virgin homopolimer (VHP) ise 15 mm boyunda topak halinde bulunduğu el yardımı ile topak durumundan uzaklaştırılmaya çalışılmıştır.

Katkı malzemeleri her bir deney için hesaplanan oranda hazırlandıktan sonra gerekli kum miktarları da Şekil 4.6'da görüldüğü gibi üstüne ilave edilerek kesme kutusu deneyi yapabilmek için hazır numune haline gelmiştir.



Şekil 4.5 : KP ve VHP nin deneylerde kullanılmak üzere hazırlanışı.



Şekil 4.6 : Numunelerin tartılması.

4.3.2 Direkt kesme kutusu deney düzeneği

Deneysel çalışmalarda kullanılan direkt kesme deney düzeneği şekil 4.7’de gösterilmiştir.



şekil 4.7 : Direkt kesme deney düzeneği görünüşü.

Laboratuvar alışmaları, 2013 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakóltesi Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Araziden elde edilen zemin üzerinde gerçekleştirilen sınıflandırma deneyleri sonucunda zemin sınıflandırılması yapılmış ve kum olarak belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılan laboratuvardaki kesme kutusu 60×60 mm kare kesitli ve 25 mm numune yüksekliğine sahiptir. Kesme kutusu içerisine yerleştirilecek numune hacmi 90 cm³ tür (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9).



Şekil 4.8 : Direkt kesme kutusu alt ve üst parçaları.



Şekil 4.9 : Direkt kesme kutusu numune koyma hücresi.

Kesme kutusu tabanına yerleştirilip vidalar iyice sıkıldıktan sonra poroz tabakası tabakanın çizgileri kesme yönüne paralel olacak şekilde yerleştirilir. Ardından da numuneyi tutmak amacıyla Şekil 4.10'da görüldüğü gibi poroz kağıdı yerleştirilir.



Şekil 4.10 : Direkt kesme kutusu hücreesine poroz kağıdı yerleşimi.

Daha önce hazırlanmış olunan numune kesme kutusu içerisine Şekil 4.11'deki gibi dökülür.



Şekil 4.11 : Direkt kesme kutusu deney hücreesine numune konulması.

Direkt kesme kutusu içerisine tamamı aktarılmış numune el ile olabildiğince aynı yükseklikte dağıtıldıktan sonra demir mastar aparatı ve plastik veya tahta bir tokmak

yardımıyla Şekil 4.12ve Şekil 4.13'teki gibi numune yüksekliği her deneyde aynı olacak şekilde sıkıştırılır.



Şekil 4.12 : Deney numunesinin hücre içinde yerleştirilmesi.



Şekil 4.13 : Deney numunesinin hücre içinde yüksekliğinin ayarlanması.

Numune iyice kutu içerisine yerleştirildikten sonra üstüne de yine poroz kağıdı konulduktan sonra (Şekil 4.14) üst numune tutucu da çizgileri kesme yönüne paralel olacak şekilde konulur (Şekil 4.15).



Şekil 4.14 : Numune kutuya konulduktan sonra üst poroz kağıdının konulması.



Şekil 4.15 : Üst numune tutucunun yerleştirilmesi.

Numune kesme kutusu içerisinde, üzerinde poroz kağıdı ve üst başlık konulduktan sonra Şekil 4.16'daki gibi bilye konulur. Numunenin yerleştirilme işlemi tamamlandıktan sonra yük verilme işlemine başlanmak üzere yükleme kolu Şekil 4.17'deki gibi konulur.

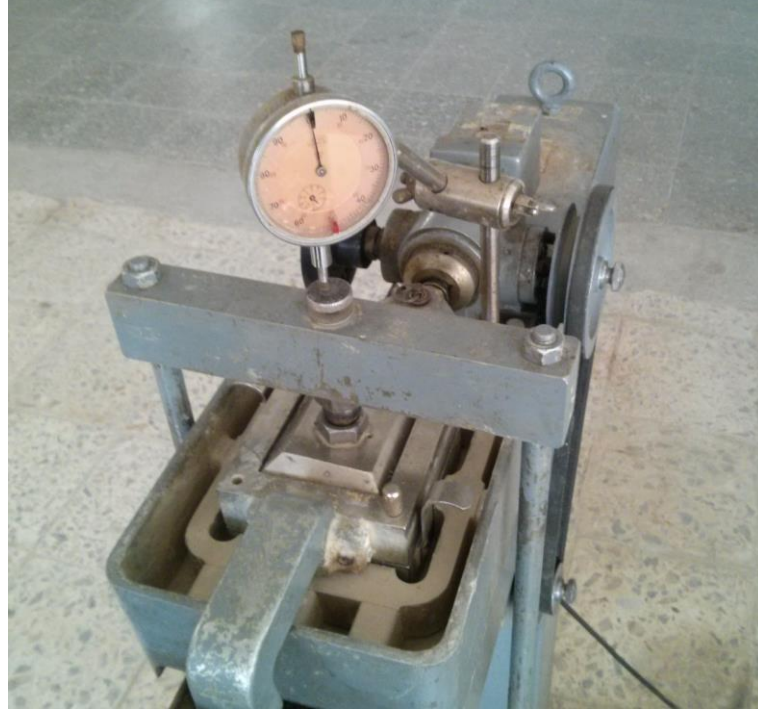


Şekil 4.16 : Numune üst tutucu konulduktan sonra bilye konulması.



Şekil 4.17 : Kutu üzerine yükleme kolunun yerleştirilmesi.

Daha sonra kuvvet halkası ile yatay deformasyon okuma saatleri okuma kolaylığı açısından sıfırı gösterecek şekilde (Şekil 4.18-19) ayarlanır. Kesme kutusunun alt ve üst parçalarının birbirinden ayrılmasını engelleyen vidalar gevşetilir çıkarılır.



Şekil 4.18 : Yük kolunun üzerine kuvvet halkasının yerleştirilmesi.



Şekil 4.19 : Yatay deformasyon okuma saatinin ayarlanması.

hızı 0,125 mm/dakika olacak şekilde ayarlanır. Numunesi normal gerilmeye de maruz olarak bu düzencek ile zorlanır. Gerekli okumalar

motorun vitesi geri alınarak yük halkası üzerindeki kuvvet boşaltılır. Daha sonra düzeneğe kendinden mıknatıslı olarak tutturulmuş olan düşey deformasyon okuma saati gevşetilerek düzenek üzerinden alınır. Ardından yükleme kolu üzerindeki yükler kaldırılır ve yükleme kolu numune üzerinden kaldırılır (Şekil 4.22-23-24).



Şekil 4.22 : Kesme işlemi sonra yük kolunun kaldırılması.



Şekil 4.23 : Kesilmiş numunenin kutudan çıkartılması.



Şekil 4.24 : Deney sonrası görünüm.

4.4 Kesme Kutusu Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Kullanılan zemin numunelerinin yalın halinde ve kopolimer ile virgin homopolymer'in farklı oranlarda karışımları ile hazırlanmış halinde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

4.4.1 Yalın kum numunesi

Çalışma için kullanılan kumun katkı malzemesi olmaksızın sade halinde farklı rölatif sıkılıkları için sabit hacimli direkt kesme kutusu cihazına göre farklı kütleleri hesaplanmış ve bu yapılan deneyler sonucunda kayma mukavemeti açısı değerleri hesaplanmıştır.

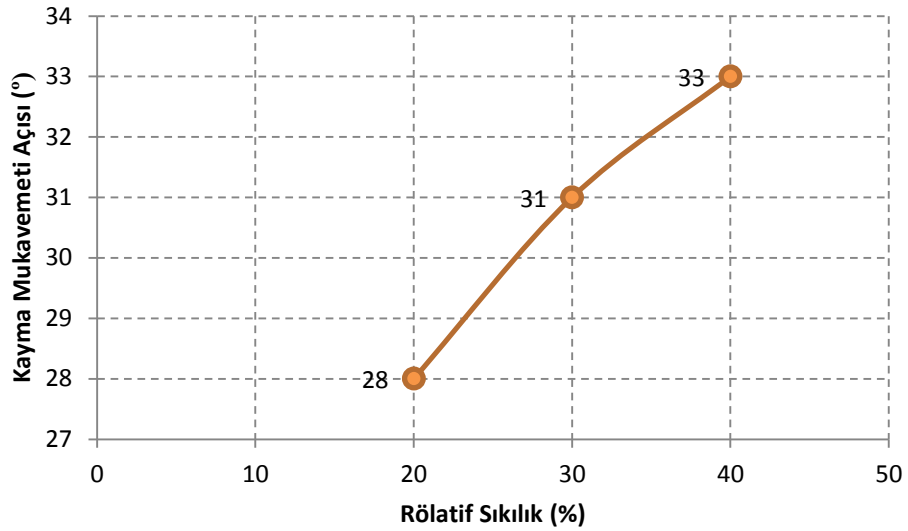
Aşağıdaki Çizelge 4.6'da yalın kumun rölatif sıkılık değerleri %20, %30 ve %40 iken yapılan direkt kesme kutusu deney sonuçlarına göre kayma mukavemeti açıları görülmektedir.

Çizelge 4.6'da rölatif sıkılığın arttıkça kayma mukavemeti açısı değerlerinin de arttığı ve bu durumda en düşük kayma mukavemeti açısının rölatif sıkılık %20

olduğunda; en yüksek kayma mukavemeti açısının da rölatif sıkılık %40 olduğunda elde edildiği Şekil 4.25'te de görülmektedir.

Çizelge 4.6 : Yalın kumun Dr %20, %30 ve %40 iken kayma mukavemeti açısı değerleri.

Rölatif Sıkılık (%)	Kayma mukavemeti açısı (ϕ) derece (°)
20	28
30	31
40	33



Şekil 4.25 : Yalın kum numunenin rölatif sıkılık – Kayma mukavemeti açısı değişimi.

4.4.2 Kum - VHP karışımları

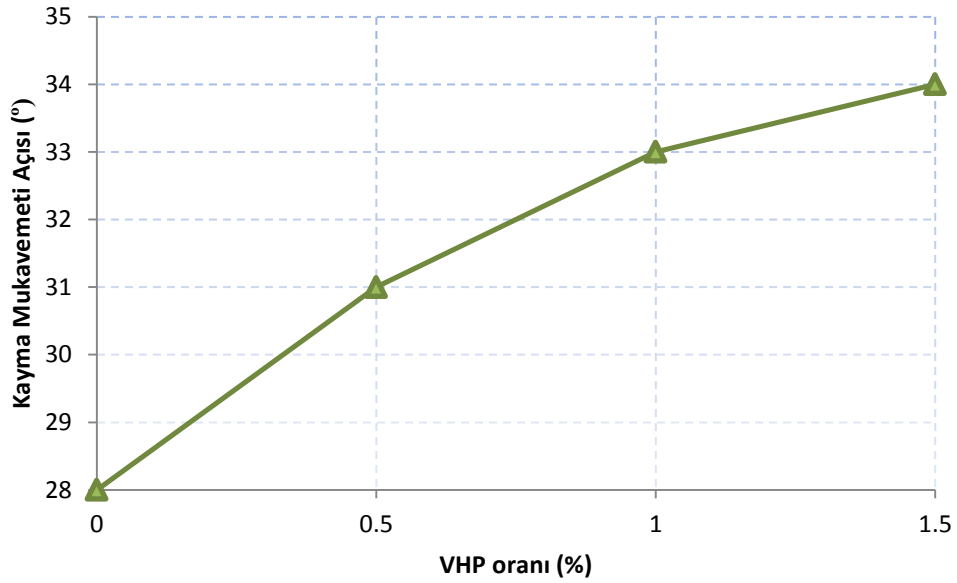
4.4.2.1 Rölatif sıkılık %20 durumunda Kum – VHP karışımları

Yalın kumun kütlesi rölatif sıkılığı % 20 olacak şekilde hesaplandıktan sonra, toplam kütlenin %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında VHP katkı malzemesi katılmıştır. Böylece rölatif sıkılık %20 iken VHP katkı malzemesinin kumun kayma mukavemetini nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir. Aşağıdaki Çizelge 4.7'de her oran için yapılan deney sonucunda bulunan kayma mukavemeti açısı yazılmıştır.

Çizelge 4.7 : Dr %20 iken VHP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.

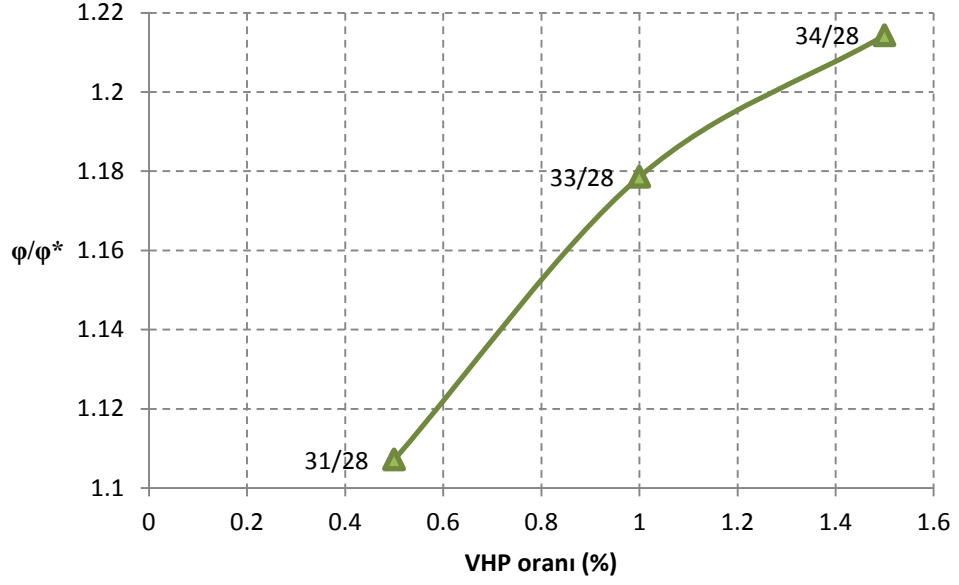
VHP (%)	Kayma mukavemeti açısı (ϕ) derece (°)
0,5	31
1	33
1,5	34

Rölatif sıkılık %20 iken VHP katkı malzemesi eklenme oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı Şekil 4.26’da görülmektedir.



Şekil 4.26 : Dr %20 iken VHP oranı – Kayma mukavemeti açısı.

Aşağıdaki Şekil 4.27’de ϕ^* yalın kum numunesinin kayma mukavemeti açısı değerini temsil ederken, ϕ ise katkı malzemesi katıldığı zaman elde edilen kayma mukavemeti açısını temsil ediyor. Normalizasyon yapılarak elde edilen grafikte ϕ değerlerinin ϕ^* ’ne oranı görülmektedir. Katkı malzemesi oranı arttıkça kayma mukavemeti açısı da arttığı için artan bir grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.27 : VHP oranı - ϕ/ϕ^*

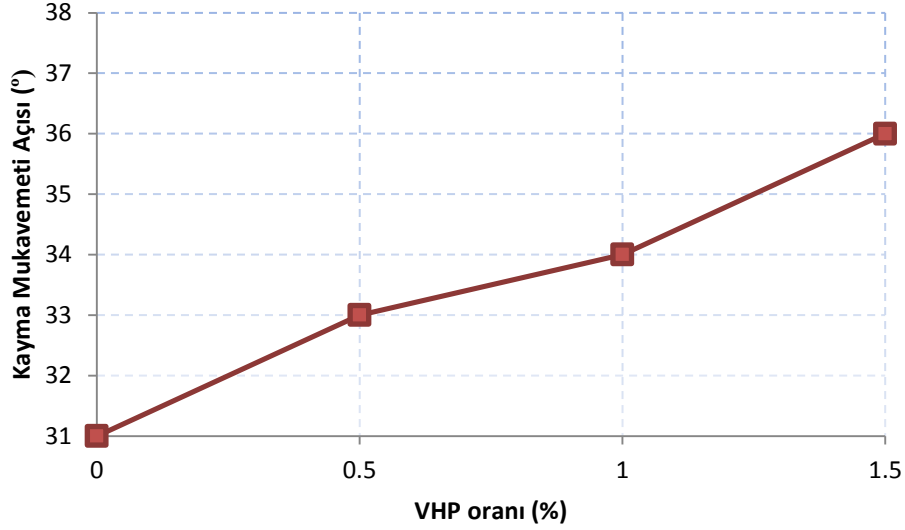
4.4.2.2 Rölatif sıklık %30 durumunda Kum – VHP karışımları

Rölatif sıklık %30 olacak şekilde sabit hacimli kesme kutusuna kaç gram numune konulacağı hesaplanmış ve yalın kuma yine %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında VHP katkı malzemesi eklenmiştir. Katkı malzemesi oranları sabit tutulup rölatif sıklık değeri %20'den %30'a arttırıldığında artan VHP katkı malzemesi oranları ile katkı malzemeli kumun kayma mukavemetinin arttığı Çizelge 4.8'de görülmektedir.

Çizelge 4.8 : Dr %30 iken VHP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.

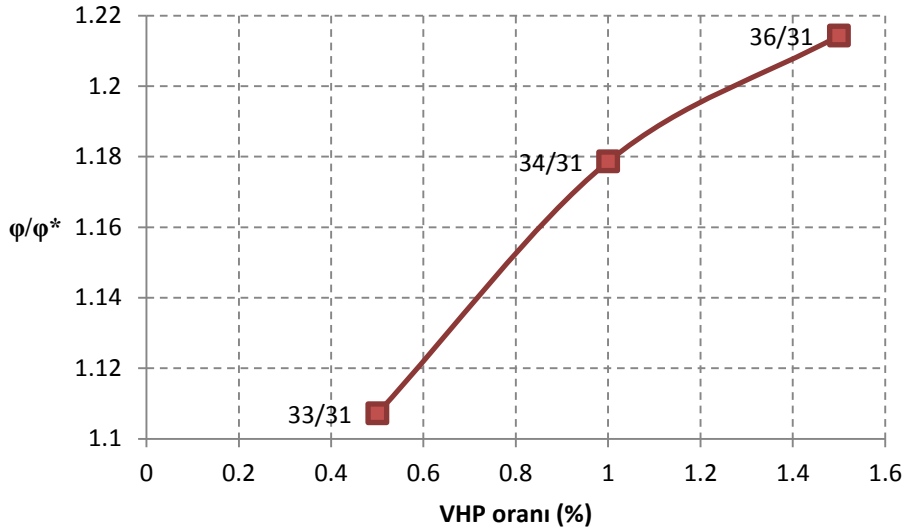
VHP (%)	Kayma mukavemeti açısı (ϕ) derece (°)
0,5	33
1	34
1,5	36

Arka sayfadaki Şekil 4.28'de katkı malzemesi oranı arttırıldıkça kayma mukavemeti açısının kaç derece arttığı görülmektedir.



Şekil 4.28 : Dr %30 iken VHP oranı – Kayma mukavemeti açısı.

Rölatif sıkılığın %30 olduğu durumda yalın kum numunesinin kayma mukavemeti açısı ϕ^* 31° iken artan oranlarda katılan VHP ile değişen kayma mukavemeti açıları ϕ olarak gösterilmiş normalizasyon grafiği çizilmiş ve Şekil 4.29’da ϕ/ϕ^* oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.29 : VHP oranı - ϕ/ϕ^*

4.4.2.3. Rölatif sıkılık %40 durumunda Kum – VHP karışımları

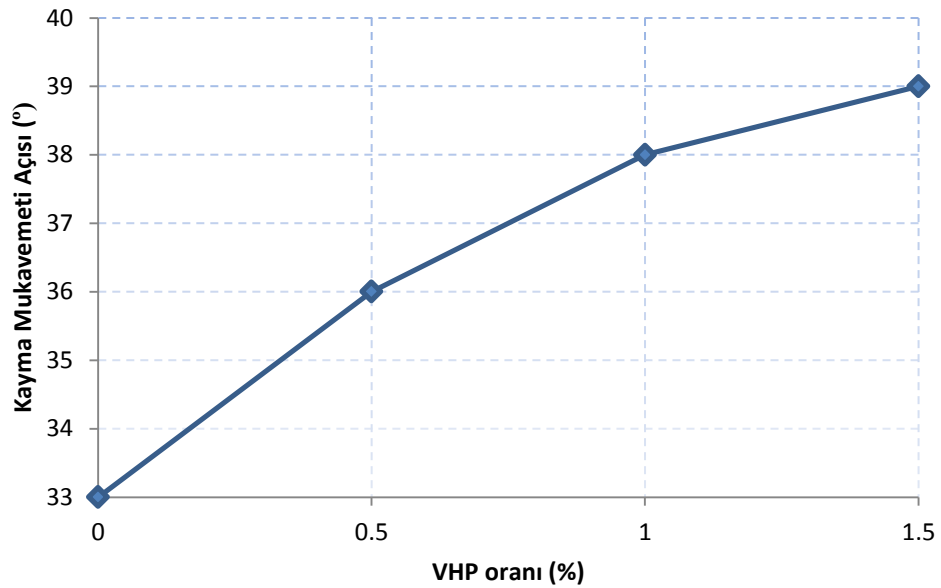
Aşağıdaki Çizelge 4.9’da rölatif sıkılığın %40 olduğu durumda VHP fiberin kütlece %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında olduğu durumda kayma mukavemeti açısına etkileri görülmektedir. Zeminin rölatif sıkılığı %20 ve %30’dan sonra %40’a arttırıldığında

yine VHP fiber katkı malzemesi oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı gözlemlenmiştir. Bir önceki durumda (Çizelge 4.8) rölatif sıkılık %20'den %30'a arttırıldığında rölatif sıkılığa da bağlı olarak VHP kayma mukavemeti açısının artışından sonra rölatif sıkılığın %30'dan %40'a arttırılmasının da aynı etkiyi yaparak kayma mukavemeti açılarını yükselttiği görülmüştür.

Çizelge 4.9 : Dr %40 iken VHP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.

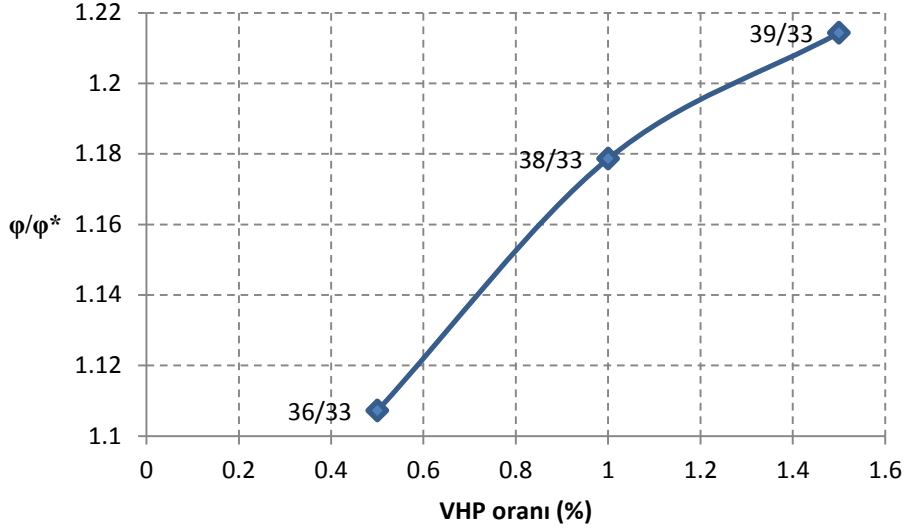
VHP (%)	Kayma mukavemeti açısı (ϕ) derece ($^{\circ}$)
0,5	36
1	38
1,5	39

Aşağıdaki Şekil 4.30'da rölatif sıkılığın %40 olduğu durumda VHP fiber katkı malzemesi katıldıkça kayma mukavemeti açılarının kesme kutusu deneylerinde kaç derece çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.30 : Dr %40 iken VHP oranı – Kayma mukavemeti açısı.

Normalizasyon grafiğinde yalın kum numunesinin 33° olan kayma mukavemeti açısı ϕ^* ile ifade edilmiş, katkı malzemesi oranı ile elde edilen yeni kayma mukavemeti açılarının ϕ^* ile oranları şekil 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4.31 : VHP oranı - ϕ/ϕ^*

Çizelge 4.10’da 3 farklı rölatif sıklığın ve farklı oranlarda katılan VHP fiber katkı malzemesinin kayma mukavemeti üzerine etkisi bütün durumlar üzerinde görülmektedir.

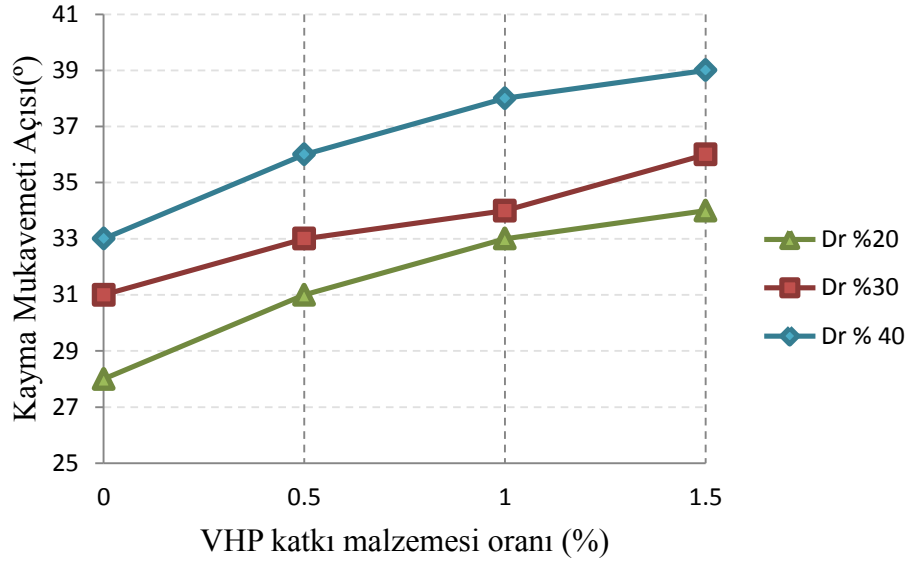
Çizelge 4.10 : Dr %20, Dr %30 , Dr %40’ın farklı VHP oranlarında kayma mukavemeti açısına etkisi.

% Dr	Sade	% 0.5 VHP	% 1 VHP	%1.5 VHP
20	28	31	33	34
30	31	33	34	36
40	33	36	38	39

Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9’da görüldüğü gibi rölatif sıklık sabit tutulduğu zaman virgin homopolimer fiber (VHP) oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının artmıştır. Çizelge 4.10’da ise farklı rölatif sıklıkların kayma mukavemeti açısını nasıl etkilediği görülmektedir. Rölatif sıklık oranı arttıkça kumun yalın halindeki kayma mukavemeti açısı da artmaktadır. Daha sonra virgin homopolimer fiber malzeme ilave edildiğinde de farklı rölatif sıklıkta olsa dahi katkı malzemesi oranı arttıkça kayma mukavemeti açısı artmıştır.

Şekil 4.32’de yine farklı rölatif sıklıklardaki kum numunelerine farklı oranlarda virgin homopolimer eklenmesi sonucunda yapılan direkt kesme kutusu deneyleri

neticesinde kayma mukavemeti açıları ϕ değerlerinin nasıl değiştiği daha açık şekilde görülmektedir.



Şekil 4.32 : Dr %20, Dr % 30 , Dr %40'ın farklı VHP oranlarında kayma mukavemeti açısının değişimi.

4.4.3 Kum - KP karışımları

4.4.3.1 Rölatif sıklık %20 durumunda Kum – KP karışımları

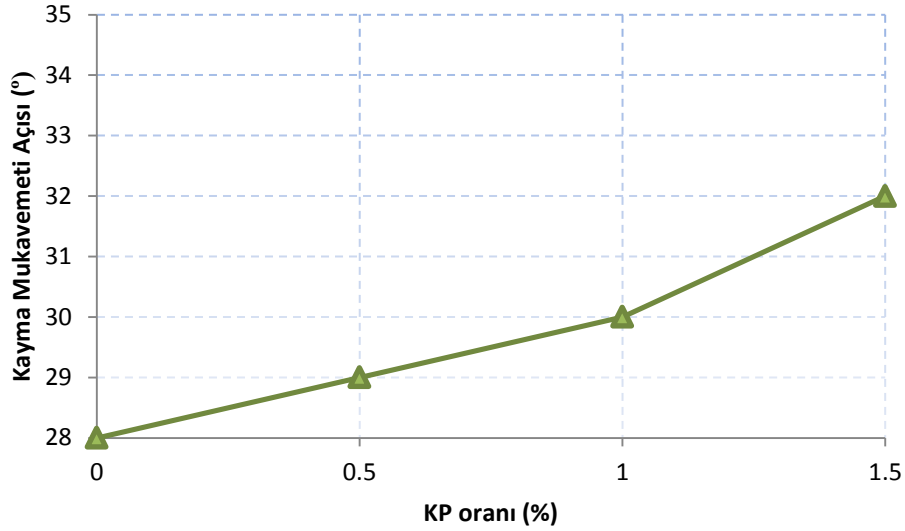
Kum – VHP fiber karışımlarından sonra, kum – KP fiber karışımlarıyla kesme kutusu deneyleri yapıldı. İlk olarak yine rölatif sıklık %20 iken kopolimer fiber katkı malzemesinin yalın kuma kütlece %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında karıştırılmasının kayma mukavemeti açısını nasıl değiştirdiği deney sonuçlarından hesaplanmıştır. Çizelge 4.11'de ise açılar nasıl değiştiği tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Dr %20 iken KP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.

Kopolimer (%)	Kayma mukavemeti açısı (ϕ) derece (°)
0,5	29
1	30
1,5	32

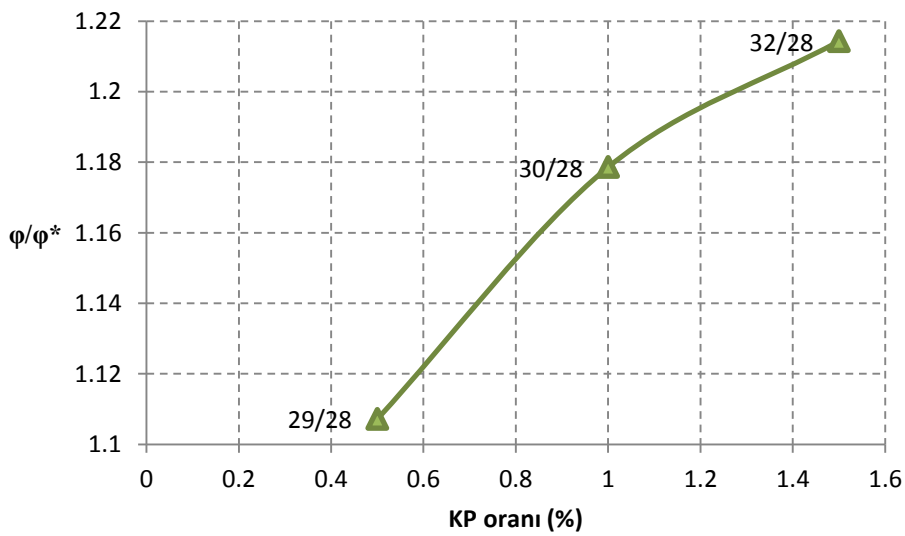
Rölatif sıklık sabit %20 iken kopolimer oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının da arttığı görülmüştür.

Şekil 4.33'te kayma mukavemeti açısının rölatif sıklık %20 olduğu durumda katkı malzemesi kattıkça yalın halinde sahip olduğu değerin nasıl arttığı görülmektedir.



Şekil 4.33 : Dr %20 iken KP oranı – Kayma mukavemeti açısı.

Şekil 4.34'te yalın halindeki kayma mukavemeti açısı ϕ^* ile katkı malzemesi oranı arttıkça elde edilen kayma mukavemeti açıları ϕ değerlerinin oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.34 : KP oranı - ϕ/ϕ^*

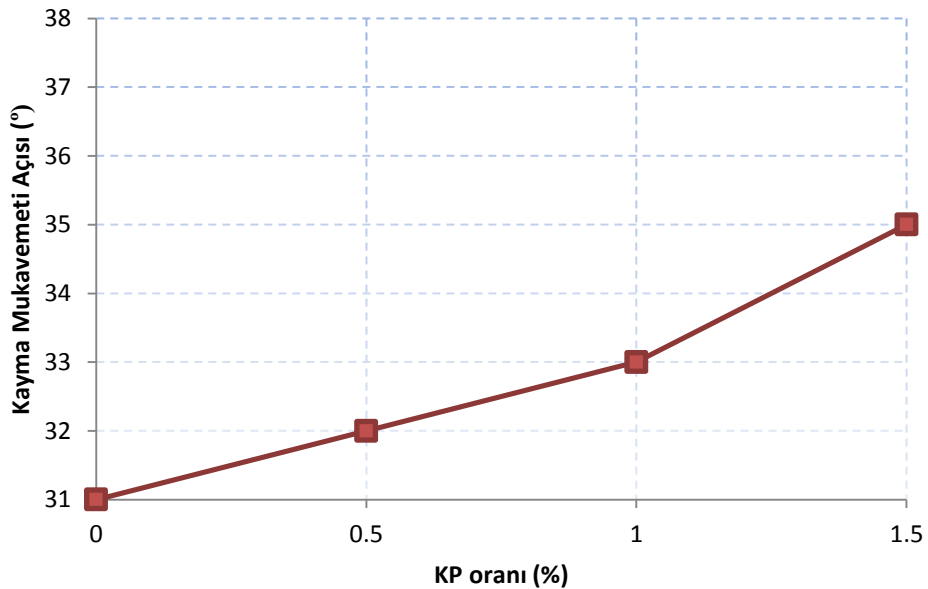
4.4.3.2 Rölatif sıklık %30 durumunda Kum – KP karışımları

Çizelge 4.12’de rölatif sıklığın %30 olduğu durumda yine kopolimerin kütlece %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında olduğu durumda kayma mukavemeti açısına etkileri görülmektedir. Zeminin rölatif sıklığı %20’den %30’a çıkartıldığında artan kopolimer oranlarının yine kayma mukavemeti açısı değerlerini arttırdığı görülmektedir. Aynı zamanda rölatif sıklığın %20 olduğu duruma göre %30 olduğu durumdaki kayma mukavemeti açıları daha büyük değere sahiptir.

Çizelge 4.12 : Dr %30 iken KP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.

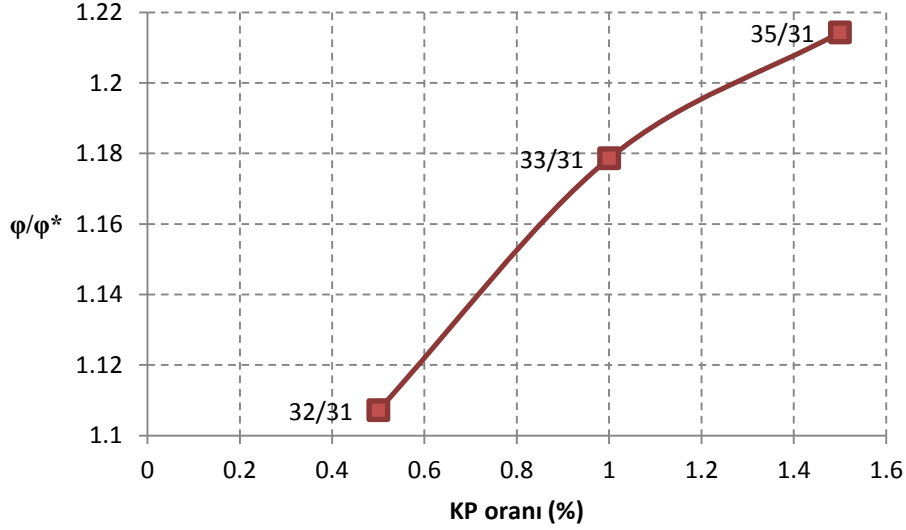
Kopolimer (%)	Kayma mukavemeti açısı (ϕ) derece
0,5	32
1	33
1,5	35

Aşağıdaki Şekil 4.35’te rölatif sıklık %30 iken kumun sade halindeki kayma mukavemeti açısı 31° nin katkı malzemesi oranı arttıkça arttığı ve oranlarının nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.35 : Dr %30 iken KP oranı – Kayma mukavemeti açısı.

Şekil 4.36’da yalın kum numunesinin kayma mukavemeti açısı ϕ^* nün katkı malzemesi katıldıkça değişen kayma mukavemeti açıları ϕ değerlerine oranı görülmektedir.



Şekil 4.36 : KP oranı - ϕ/ϕ^*

4.4.3.3 Rölatif sıkılık %40 durumunda Kum – KP karışımları

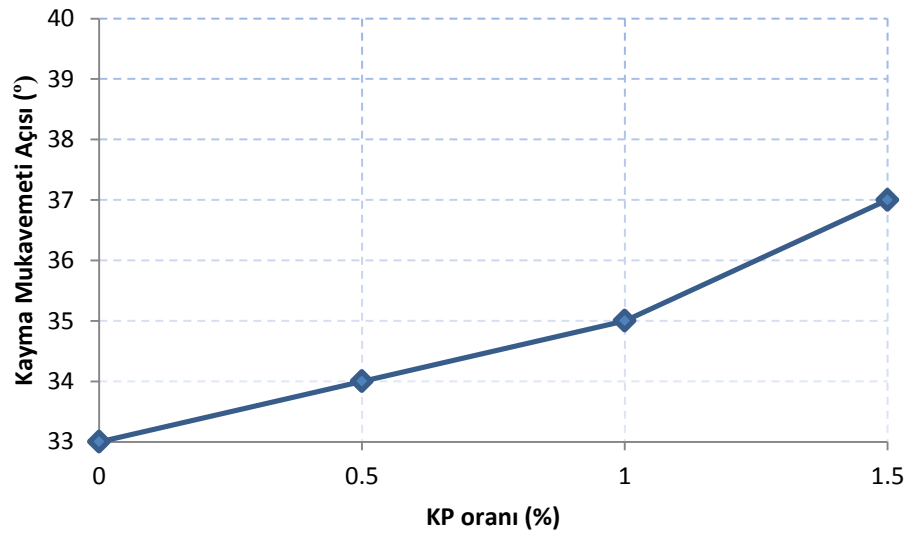
Aşağıdaki Çizelge 4.13’te rölatif sıkılığın %40 olduğu durumda kopolimer fiberin kütlece %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında olduğu durumda kayma mukavemeti açısına etkileri görülmektedir. Zeminin rölatif sıkılığı %20 ve %30’dan sonra %40’a arttırıldığında yine kopolimer oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı gözlemlenmiştir. Bir önceki durumda (Çizelge 4.12) rölatif sıkılık %20’den %30’a arttırıldığında rölatif sıkılığa da bağlı olarak kopolimer oranlarıyla artış gösterdiği görülmesinin yanında rölatif sıkılığın %40 olduğu durumda kayma mukavemeti açılarının en yüksek değerleri göstermesi rölatif sıkılığın da arttıkça kayma mukavemeti açılarının arttığını göstermektedir.

Çizelge 4.13 : Dr %40 iken KP oranlarının kayma mukavemeti açısına etkisi.

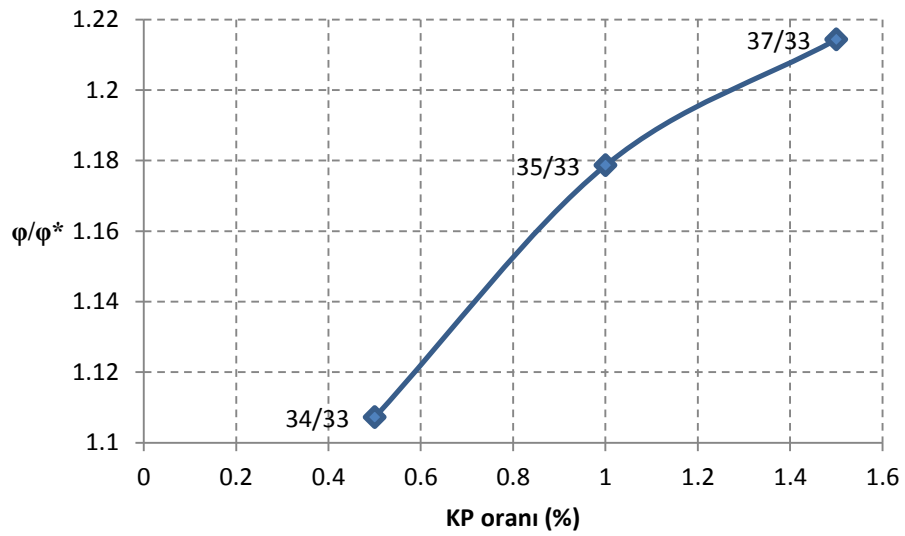
Kopolimer (%)	Kayma mukavemeti açısı (ϕ) derece (°)
0,5	34
1	35
1,5	37

Şekil 4.37’de rölâtif sıkılık %40 durumunda yalın kumun kayma mukavemeti açısı 33° iken katkı malzemesi katıldıkça kayma mukavemeti açısının değişimini daha açık görmek amacıyla yalın hali ile katkı malzemesi oranlarının artmasıyla nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Rölâtif sıkılığın %40 olduğu durumda yalın kum numunesinin kayma mukavemeti açısı $\phi^* 31^\circ$ iken artan oranlarda katılan KP ile değişen kayma mukavemeti açıları ϕ olarak gösterilmiş normalizasyon grafiği çizilmiş ve Şekil 4.38’de ϕ/ϕ^* oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.37 : Dr %40 iken KP oranı – Kayma mukavemeti açısı.



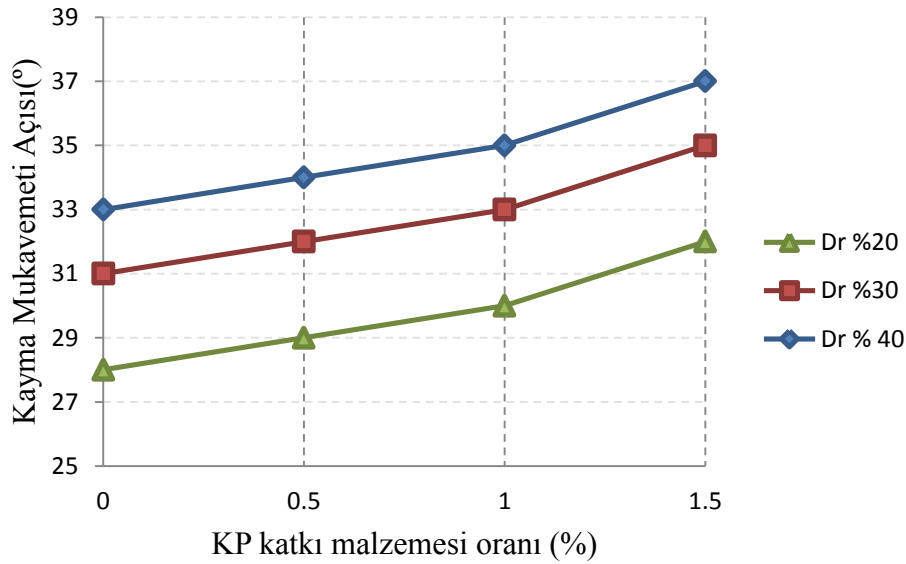
Şekil 4.38 : KP oranı - ϕ/ϕ^*

Çizelge 4.14'te 3 farklı rölatif sıkılığın ve farklı oranlardaki kopolimerlerin kayma mukavemeti üzerine etkisi bütün halinde görülmektedir.

Çizelge 4.14 : Dr %20, 30 , 40'ın farklı KP oranlarında kayma mukavemeti açısına etkisi.

% Dr	Sade	% 0.5 KP	% 1 KP	%1.5 KP
20	28	29	30	32
30	31	32	33	35
40	33	34	35	37

Çizelge 4.14 ve Şekil 4.39'da kum- KP karışımlarının farklı rölatif sıkılıklar ve farklı KP katkı oranlarında değişimi birlikte gösterilmiştir. Artışlar arasında doğrusal bir bağlantı olmadığı da görülmüştür.



Şekil 4.39 : Dr %20, 30 , 40'ın farklı KP oranlarında kayma mukavemeti açısının değişimi

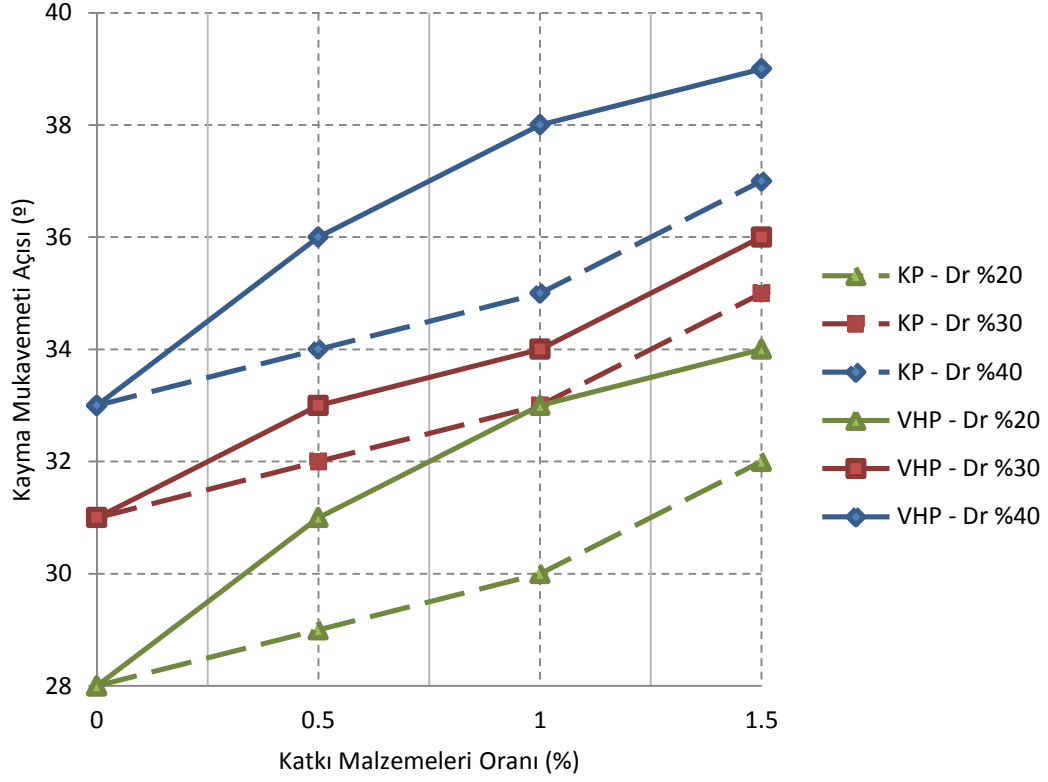
Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14'te görüldüğü gibi rölatif sıkılık sabit tutulduğu zaman kopolimer (KP) oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı görülmüştür. Çizelge 4.15'te ve Şekil 4.40'ta ise farklı rölatif sıkılıkların kayma mukavemeti açısını nasıl etkilediği görülmektedir. Rölatif sıkılık oranı arttıkça kumun sade halindeki kayma mukavemeti açısı da artmaktadır. Daha sonra kopolimer fiber

malzeme ilave edildiğinde de farklı rölatif sıklıkta olsa dahi katkı malzemesi oranı arttıkça kayma mukavemeti açısı artmıştır.

Şekil 4.39’da yine farklı rölatif sıklıklardaki kum numunelerine farklı oranlarda kopolimer eklenmesi sonucunda yapılan direkt kesme kutusu deneyleri neticesinde kayma mukavemeti açısı ϕ değerlerinin nasıl değiştiği daha açık şekilde görülmektedir.

Çizelge 4.15 : Kum – VHP - KP karışımları kayma mukavemeti açıları.

Rölatif sıklık (Dr) %20	Rölatif sıklık (Dr) %30	Rölatif sıklık (Dr) %40
1. Yalın kum $\phi=28$	8. Yalın kum $\phi=31$	15. Yalın kum $\phi=33$
2. %0.5 VHP + %99.5 kum $\phi=31$	9. %0.5 VHP + %99.5 kum $\phi=33$	16. %0.5 VHP + %99.5 kum $\phi=36$
3. %1 VHP + %99 kum $\phi=33$	10. %1 VHP + %99 kum $\phi=34$	17. %1 VHP + %99 kum $\phi=38$
4. %1.5 VHP + %98.5 kum $\phi=34$	11. %1.5 VHP + %98.5 kum $\phi=36$	18. %1.5 VHP + %98.5 kum $\phi=39$
5. %0.5 KP + %99.5 kum $\phi=29$	12. %0.5 KP + %99.5 kum $\phi=32$	19. %0.5 KP + %99.5 kum $\phi=34$
6. %1 KP + %99 kum $\phi=30$	13. %1 KP + %99 kum $\phi=33$	20. %1 KP + %99 kum $\phi=35$
7. %1.5 KP + %98.5 kum $\phi=32$	14. %1.5 KP + %98.5 kum $\phi=35$	21. %1.5 KP + %98.5 kum $\phi=37$



Şekil 4.40 : Kum – VHP - KP karışımları kayma mukavemeti açıları.

Çizelge 4.15 ve şekil 4.40'ta bütün deney sonuçları ve katkı malzeme oranlarının kayma mukavemeti açısını nasıl değiştirdiği toplu halde görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zeminlerin kayma direnci; zemine uygulanan sürekli deplasmanlar altında zemin danelerinin birbirlerine göre rölatif hareketlerine karşı gösterdikleri dirençtir. Kayma mukavemeti açısı dane yüzeyleri arası sürtünmeden kaynaklanan direnci ve danelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitlenme etkisini de içeren toplam direnci temsil etmektedir. Kohezyonsuz veya iri daneli olarak nitelendirilen kum zeminlerde en belirgin özellik sistemde, yerçekimi diğer bir deyişle kitle kuvvetlerinin hakim olmasıdır. Sürtünme kumlarda birincil derecede etkin olmaktadır.

Kumlu zeminlerin kayma mukavemeti dane biçiminden, dane çapı dağılımından, sıklık derecesinden, danelerin mineral yapısından ve su içeriğinden etkilenmektedir. Zemin tabakalarının gerilme - şekil değiştirme davranışlarını ve kayma mukavemetlerini belirlemek için birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar içinde en eski yöntemlerden biri de kesme kutusu deneyidir. Direkt kesme deneyi birden fazla numune üzerinde yapılan deneylerden elde edilen maksimum kayma gerilmeleri, τ_{mak} , ile normal gerilmeler, σ_n , arasındaki ilişkiyi gösteren eğri çizilebilir. Bu doğrunun yatayla yaptığı açı kayma direnci (içsel sürtünme) açısına, ϕ , eşittir.

Laboratuvar deneyleri kapsamında önce yalın numune %20, %30 ve %40 rölatif sıklığa sahip şekilde direkt kesme kutusu deneyine tabii tutulmuştur. Ardından bu 3 farklı rölatif sıklıktaki yalın numune ağırlıkça %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında kopolimer fiber ve virgin homopolymer fiberle karıştırılmıştır. Böylece bu çalışma kapsamında 21 farklı numune üzerinde direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Kayma mukavemeti açısının farklı rölatif sıklık ve farklı oranlardaki polimer fiberlerle karışımdan nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir.

5.1 Sonuçlar

İki çeşit polimer fiber malzeme ilave edilerek, yalın haldeki kum zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin arttırılmasına yönelik deneysel çalışmayı içeren bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir. Deney numunelerinden elde edilen veriler, değerlendirmelere göre;

- Zemin numunesinin rölatif sıklılığının arttırılmasının zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Numunelerin yalın hallerine kopolimer ve virgin homopolimer fiber katkı malzemelerinin katılmasının zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Deney numunelerindeki polimer fiber katkı malzemelerinin kütlece yüzde (%) oranlarının artmasının zeminin kayma mukavemeti açısını arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Yapılan 21 set deneyde en düşük kayma mukavemeti açısı kum numunenin %20 rölatif sıklılıktaki katkı malzemesi katılmamış, yalın halinde 28° içsel sürtünme açısına sahip olduğu durumdur.
- En yüksek kayma mukavemeti açısı ise numunenin %40 rölatif sıklılıktaki durumunun kütlece %1.5 virgin homopolymer (VHP) fiber içerdiği 39° içsel sürtünme açısına sahip olduğu durumdur.
- Yapılan deneyler sonucunda oransal olarak kayma mukavemeti açısının en çok arttığı durumun rölatif sıklılığın %20 olduğu durumda %21’lik bir artışla gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

5.2 neriler

Yayınlanan nceki çalışmalarda olduğu gibi polimer fiberlerin katkı malzemesi olarak kullanılması zeminin kayma mukavemeti açısını arttırarak mühendislik özelliklerini iyileştiriyor.

Katkı malzemeleri daha çok ince daneli zeminde kullanımıyla ilgili çalışma yapılmış fakat kumlu zeminde de katkı malzemesi kullanılabileceği görülmüştür.

Yapılan bu çalışmada laboratuvarda küçük ölçekli kesme kutusu deney cihazı kullanıldığı için polimer fiberler belli orana dek kullanılabilmemiştir. Katkı malzemesi

oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının artmaya devam edip etmeyeceği büyük ölçekli kesme kutusu deney düzeneği ile çalışılabilir.

Deneylerde kullanılan malzemelerin fiyatları şubat 2013 tarihinde virgin homopolymer (VHP) için kargo dahil 18 kilogramlık kolisi 75 Türk Lirası, kopolimer (KP) için kargo dahil 23 kilogramı 80 Türk Lirası olarak temin edilmiştir. Sonuç olarak, tez çalışması kapsamında kopolimer (KP) ve virgin homopolymer (VHP) fiberlerin düşük maliyeti ve fazla hacim kaplamaları nedeniyle kumlu zemin stabilizasyonu çalışmalarında alternatif yöntem olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- ASTM D3080/D3080M** (2011). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained*. American Society for Testing and Materials, USA.
- Aytekin, M.** (2004). *Deneysel Zemin Mekaniği*. Teknik Yayınevi, Ankara.
- Bardet, J. P.** (1997). *Experimental Soil Mechanics*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Bell, F.G.** (2000). *Engineering Treatment of Soils*. Taylor and Francis group, London, UK.
- Cabalar, A.F., Çanakçı, H.** (2011). *Direct Shear Tests on Sand Treated with Xanthan Gum, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Ground Improvement*, vol. 164, p.p. 57–64.
- Cho, Y. W., Cho, Y. N., Chung, S.H., Yoo, G., Ko, S. W.** (1999). *Water soluble chitin as a wound healing accelerator*. *Biomaterials*, vol. 22, p.p. 2139-2145, Netherlands.
- Eid, H. T.** (2011). *Shear Strength of Geosynthetic Composite Systems for Design of Landfill Liner and Cover Slopes*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 29, p.p. 335-344.
- Erdoğan, S., Altun, S.** (2008). *Kum / Geotekstil Arayüzey Kayma Dayanımının Kesme Kutusu Deneyleriyle Belirlenmesi*. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, c.23, s.2, Konya, Türkiye.
- Essler, R., Drooff, E., Falk, E.** (2000). *Compensation Grouting: Concept, Theory and Practice. Advances in Grouting and Ground Modification*. ASCE, USA.
- Etemadi, O., Petrisor, I. G., Kim, D., Wan, M. W., Yen, T.F.** (2003). *Stabilization of metals in subsurface by biopolymers: Laboratory drainage flow studies. Soil and Sediment Contamination*. Taylor and Francis group, London, UK.
- Etminan, E.,** (2012). *Soft Soil Stabilization Using Fly Ash, Polypropylene, Copolymer and VHP*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

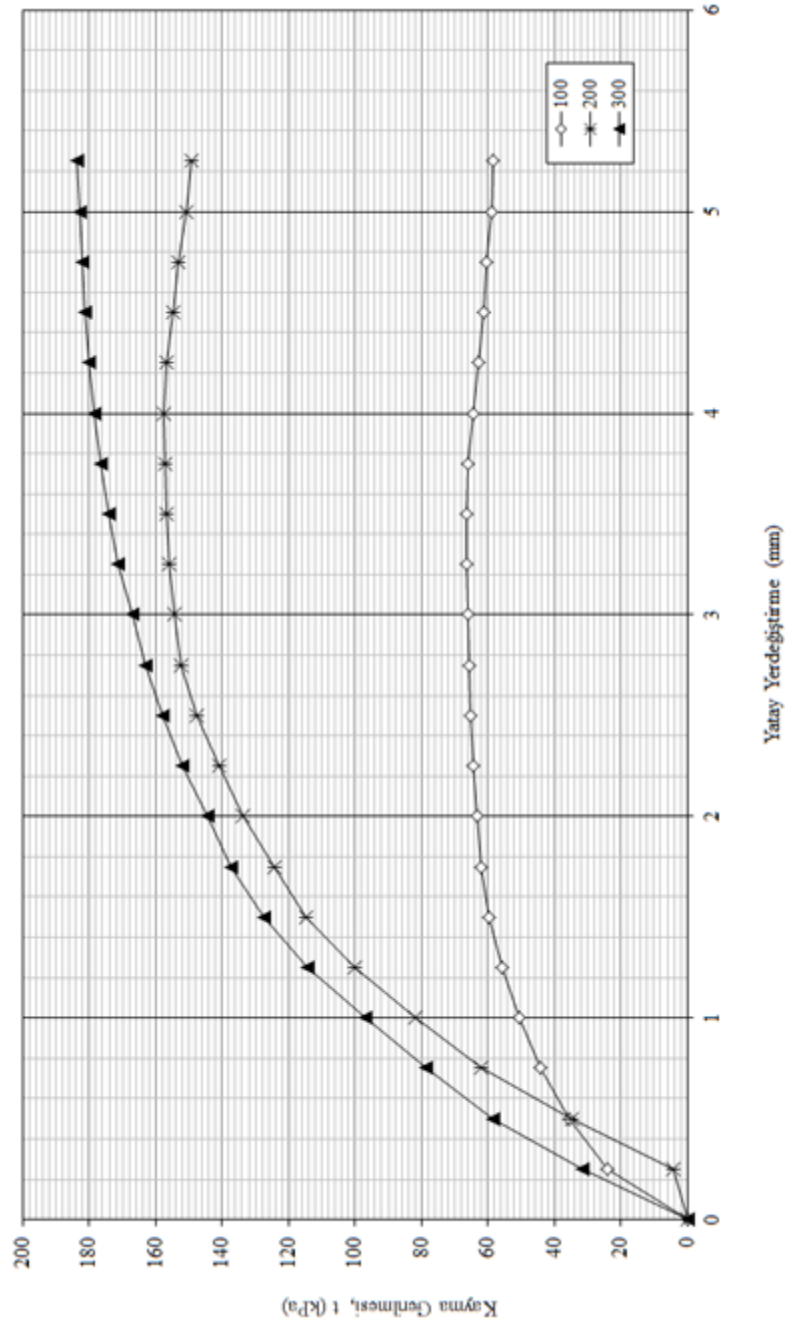
- Forta Dış Ticaret İnşaat Taahhüt Ltd. Şti.** (2011). *Forta Ferro Fiber Donatı Katalogu*.
- Gönüllü, M. T.** (2004). *Atık Lastiklerin Yönetimi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Head, K. H.** (2006). *Manual of Soil Laboratory Testing*. Third Edition, Whittles Publishing, Scotland, UK.
- Keskin, S., Laman, M.** (2012). *Atık Lastik - Kum Karışımlarının Kayma Mukavemetinin Laboratuar Deneyleriyle İncelenmesi*. Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 27(2), p.p. 27-35, Adana, Türkiye.
- Kim, B., Prezzi, M., Solgado, R.** (2005). *Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 131, no. 7, p.p. 914-924, USA.
- Kim, J. G., Kim, T. H., Lee, J. S., Ko, K. S., Lee, G. H., Chon, C. M., Cho, C. H., Cheong, Y. W.** (2006). *Soil characteristics and phosphorus accumulation in surface soil in relation to geological and land-use conditions*. Soil Science and Plant Nutrition, vol. 52, p.p. 313-320, JAPAN.
- Kumar, A., Walla, B. S., Bajaj, A.** (2007). *Influence of Fly Ash, Lime and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, USA.
- Lee, K.M., Manjunath, V.R.** (2000). *Soil-Geotextile Interface Friction by Direct Shear Tests*. Canada Geotech Journal, vol. 37, p.p. 238-252, Canada.
- Mitchell, J.G., Santamarina, J.C.** (2005). *Biological Considerations in Geotechnical Engineering*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 131, p.p. 1222-1233, USA.
- Önalp, A.** (2007). *Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özaydın, K.** (2010). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özaydın, K.** (2012). *Zeminlerin İyileştirilmesi*. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Sadek, S., Najjar, S. S., Freiha, F.** (2010). *Shear Strength of Fiber-Reinforced Sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 136, p.p. 490-499, USA.

- Şenol, A., Edil, T. B., Acosta, H., A., Benson, C.H.** (2003). *Soft Subgrades Stabilization by Using Various Fly Ashes*. Resources, Conservation and Recycling, vol.46, p.p. 365-376.
- Sezer, A., Altun, S., Göktepe, A. B., Narin, T., Kanberoğlu, S.** (2012). *Polipropilen Fiber ile İyileştirilen Kumların Kayma Direnci*. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Utracki, L.A. and Jamieson, A. M.** (2010). *Polymer Physics : from suspensions to nanocomposites and beyond*. Hoboken, NJ, USA.
- Vinot, V., Baleshwar, S.** (2013). *Shredded Tyre-Sand as Fill Material for Embankment Applications*. Journal of Environmental Research and Development, vol. 7, no. 4A, p.p. 1622-1627, Bhopal, India.
- Visch, S. M.** (2002). *Biopolymers; what is their place in future society in relation with sustainable design*. Sustainable design report.
- Yang, I. C. Y., Li, Y., Park, J. K., Yen, T. F.** (1993). *The Use of Slime-Forming Bacteria to Enhance the Strength of Soil Matrices*. Developments in Petroleum Science, vol. 39, p.p. 89-96, UK.
- Zaimoğlu, A.Ş.** (2011). *Engineering Properties of Sand Stabilised with Borogypsum*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, p.p. 277–282.
- Zornberg, J.G., Cabral, A.R., Viratjandr, C.** (2004). *Behaviour of Tire Shred – Sand Mixtures*. Canada Geotech Journal, vol. 41, p.p. 227-241, Canada.

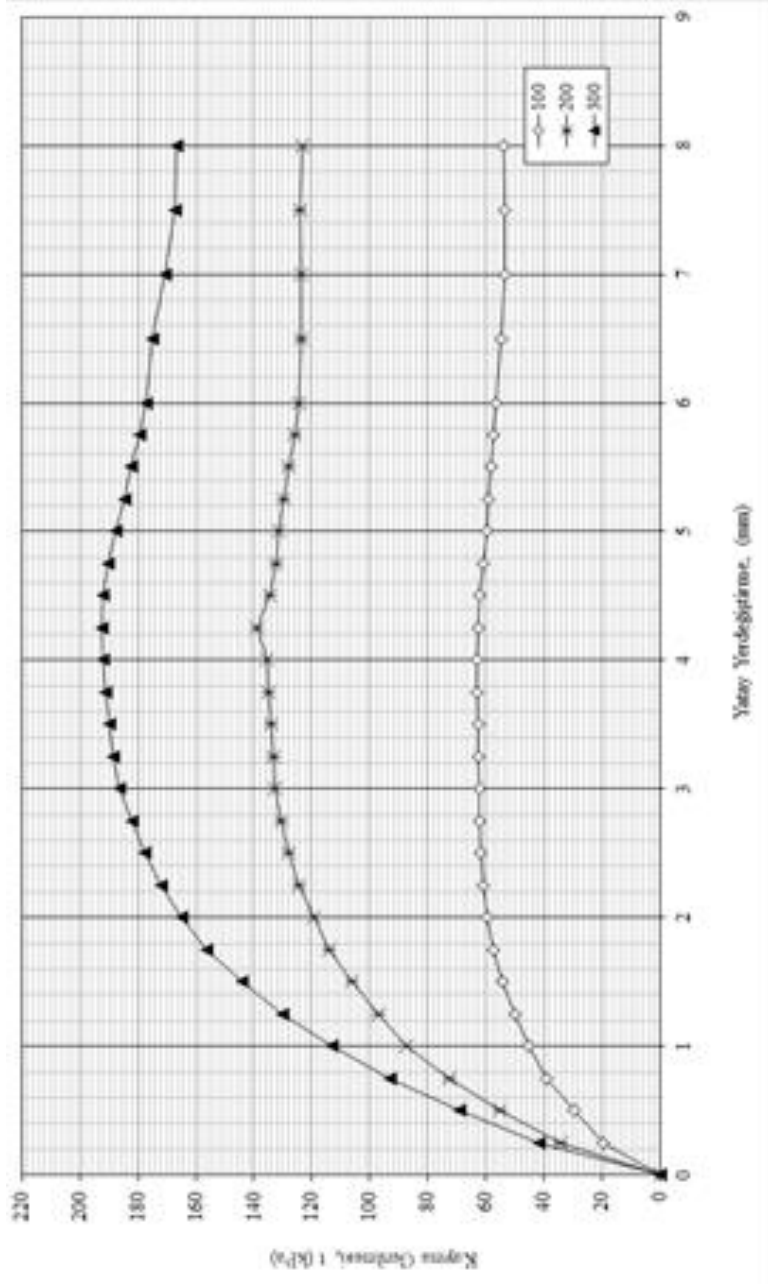
Url-1<<http://www.polimernedir.com>>, alındığı tarih: 12.09.2013.

EKLER

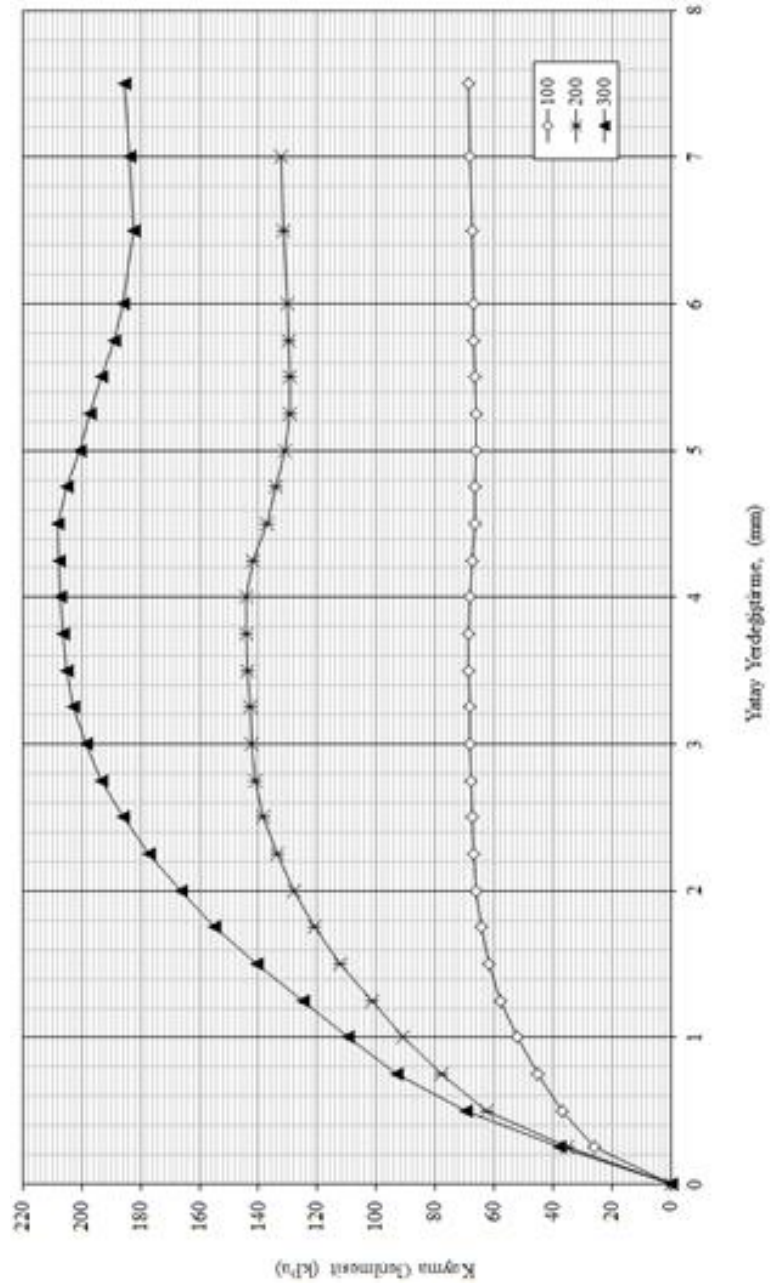
EK A: Kesme Kutusu Deney Sonuçları



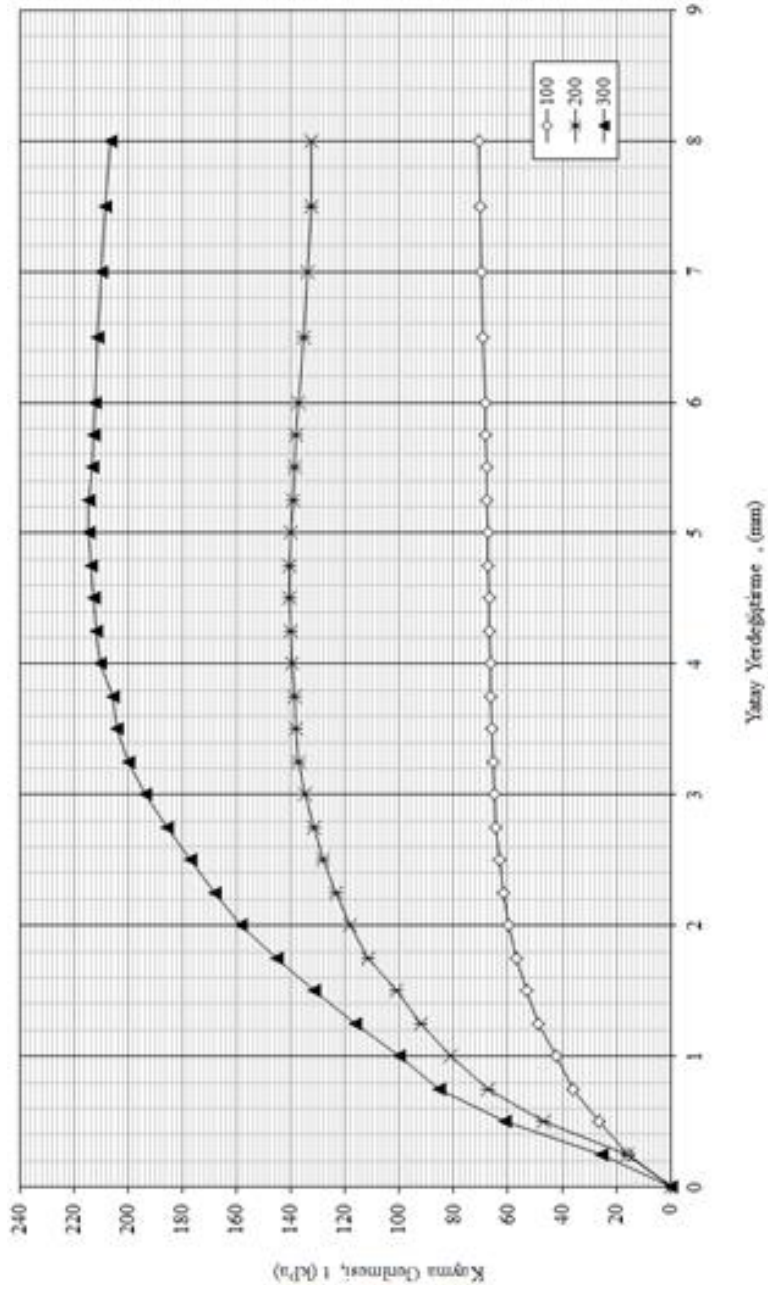
Şekil A. 2: Numune 1'e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.
(Dr %20 durumunda yalın kum)



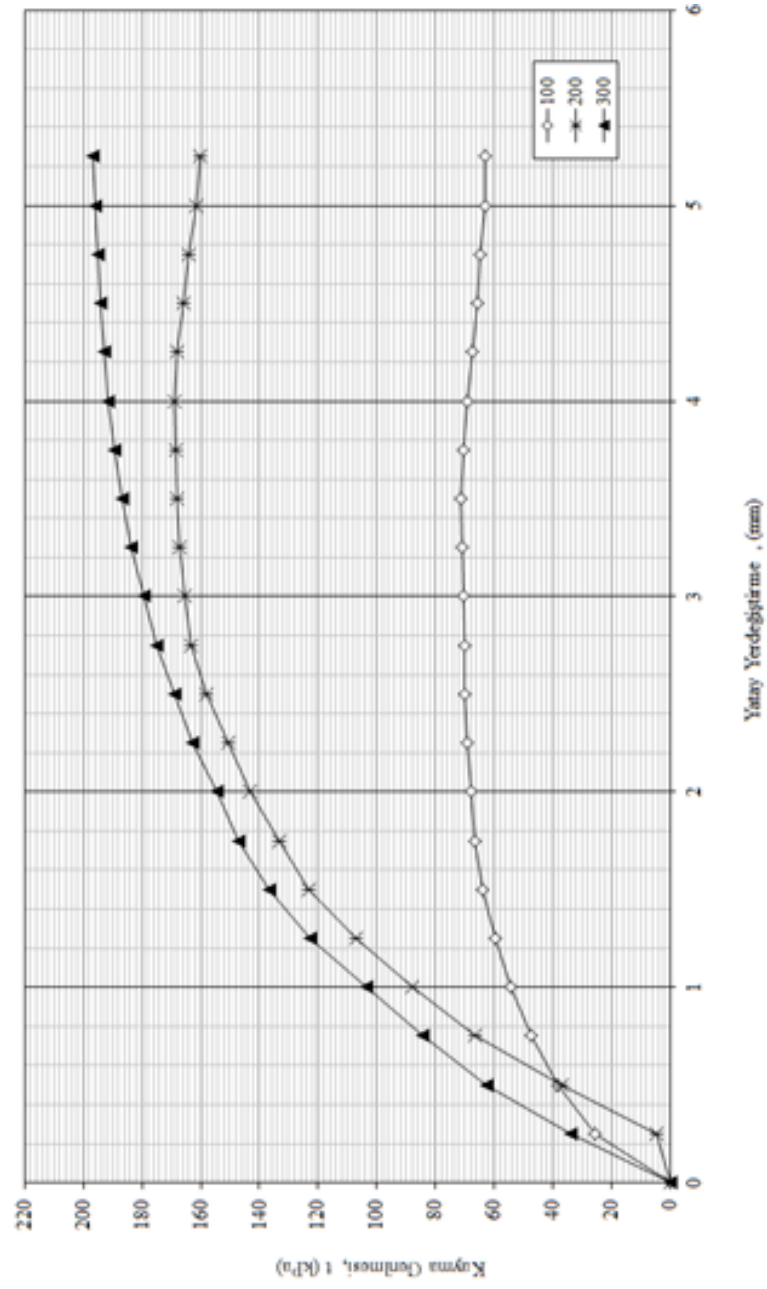
Şekil A. 2: Numune 2'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.
(Dr %20 durumunda %0.05 VHP + %99.5 kum)



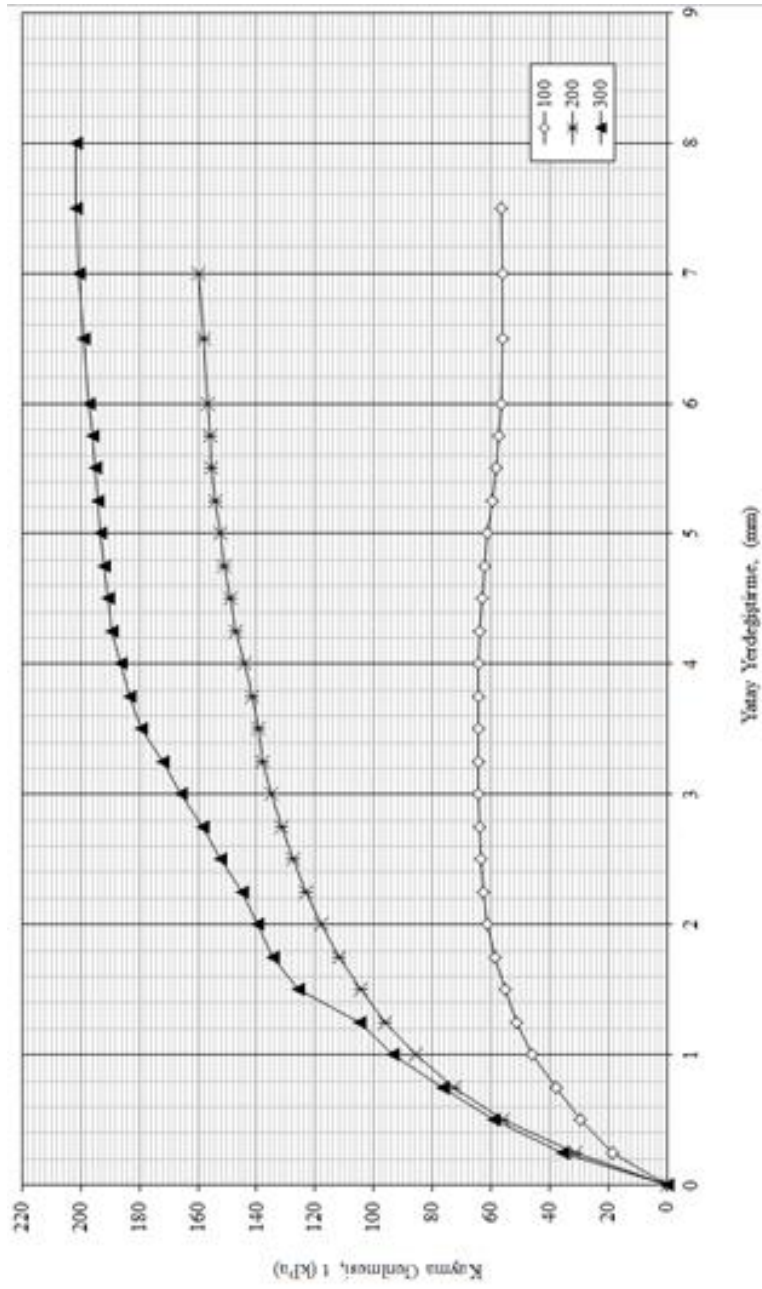
Şekil A. 3: Numune 3'e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.
(Dr %20 durumunda %1 VHP + %99 kum)



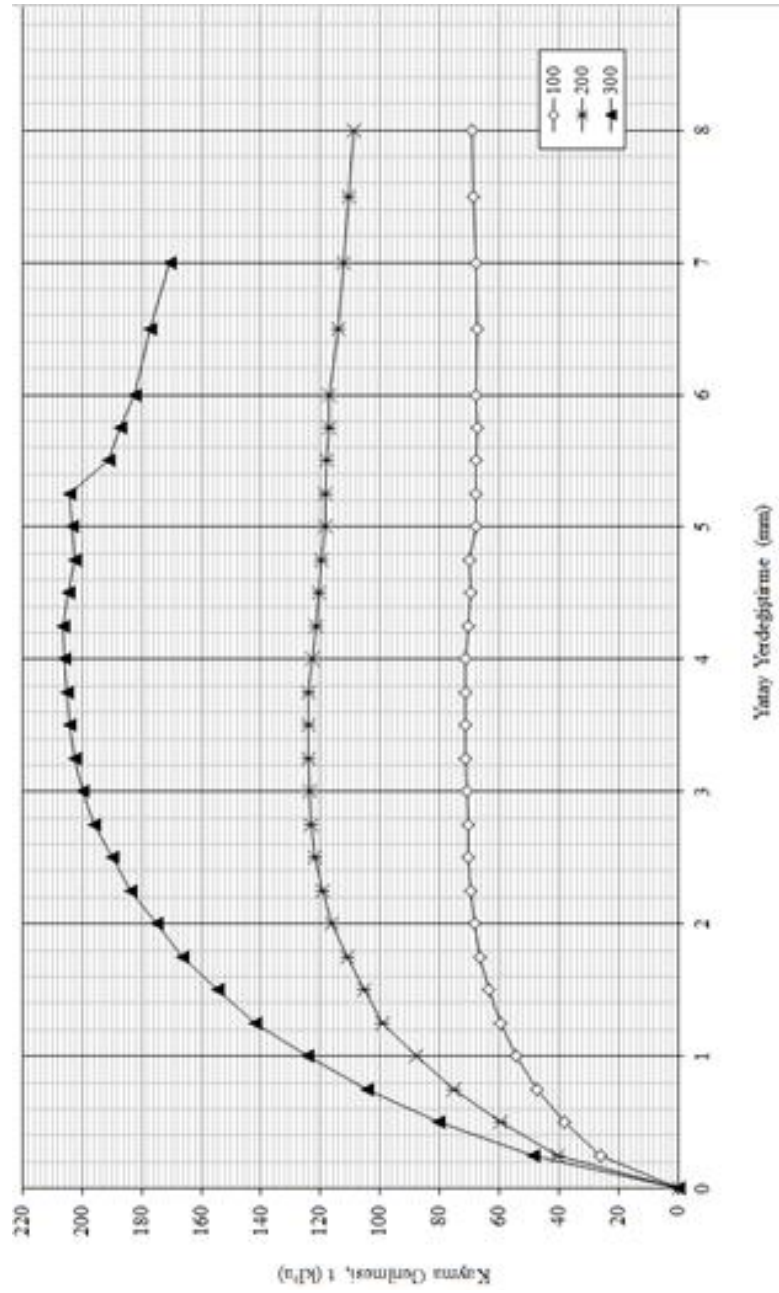
Şekil A. 4: Numune 4'e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.
(Dr %20 durumunda %1.5 VHP + %98.5 kum)



Şekil A. 5: Numune 5'e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.
(Dr %20 durumunda %0.5 KP + %99.5 kum)



Şekil A. 6: Numune 6'ya ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.
(Dr %20 durumunda %1 KP + %99 kum)



Şekil A. 7: Numune 7'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.
(Dr %20 durumunda %1.5 KP + %98.5 kum)

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Neval UYSAL

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara, 08/08/1988

Adres: Ş.C. Karaca Mah. 1059. Cad. 45/14 Dikmen/Ankara

E-Posta: nevaluysal@gmail.com

Lisans: İstanbul Kültür Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
(İngilizce), 2011