

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMİK SANTRAL VE SİLİS KUMU HAZIRLAMA TESİSLERİNDEN
KAYNAKLANAN ATIKLARIN YENİDEN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SERKAN ÖREN

TEMMUZ 2019

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMİK SANTRAL VE SİLİS KUMU HAZIRLAMA TESİSLERİNDEN
KAYNAKLANAN ATIKLARIN YENİDEN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serkan ÖREN**

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Sefa KOCABAŞ

**ZONGULDAK
Temmuz 2019**

KABUL:

Serkan ÖREN tarafından hazırlanan “Termik Santral ve Silis Kumu Hazırlama Tesislerinden Kaynaklanan Atıkların Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.

16/07/2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sefa KOCABAŞ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Beyhan PEKEY

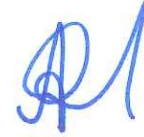
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Yılmaz YILDIRIM

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./..../20....



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Serkan ÖREN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMİK SANTRAL VE SİLİS KUMU HAZIRLAMA TESİSLERİNDEN KAYNAKLANAN ATIKLARIN YENİDEN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Serkan ÖREN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sefa KOCABAŞ

Temmuz 2019, 105 sayfa

Katı atık deponi sahalarında sızıntı sularının kontrolü geçirimsiz bir kil tabakası ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada kile alternatif olabilecek düşük permeabilite değerine sahip bir materyal geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Zonguldak Eren Enerji Termik Santrali uçucu külü ile Ereğli Borcam Silis Kumu üretimi tesisi yan ürünü olan silisli kum atığı seçilmiştir. Yapılan analizlerde uçucu külün tek başına permeabilite değerinin çok yüksek olduğu saptanmış ve uçucu külün hedeflenen permeabilite değerini sağlayamayacağı gözlenmiştir. Farklı karışım oranlarının etkisinin ortaya çıkarılması için, silisli kum atığı, silisli kum atığı+%10 uçucu kül karışımı, silisli kum atığı+%20 uçucu kül karışımı, silisli kum atığı+%30 uçucu kül karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum su içeriği bulunmuştur. Numuneler maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılarak düşen seviyeli permeabilite düzeneğinde permeabiliteleri ölçülmüştür. Ayrıca uygun permeabilite değerindeki numunelerde, kimyasal

ÖZET (devam ediyor)

analizler, serbest basınç deneyleri ve kıvam limit değerleri deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğine, çalışmada kullanılan silisli kum atığı malzemesinin en düşük permeabilite değerini ($1,38 \times 10^{-10}$ m/sn) verdiği bulunmuştur. Diğer karışımların da hedeflenen permeabilite değerlerini sağladığı görülmüş, uçucu kül karışım oranı arttıkça permeabilite değerinin yükseldiği saptanmıştır. Numunelerde uçucu kül oranı arttıkça hem 1 günlük de hem de 28 günlük kür süresinde serbest basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Uçucu kül miktarındaki artış istenen permeabilite değerlerinden uzaklaşmaya yol açmaktadır. Bu çalışma ile uçucu kül ve silis kumu hazırlama tesisi atığının yeniden kullanılabilceği ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Permeabilite, Geçirimsiz zemin, Serbest basınç, Silisli kum atığı

Bilim Kodu: 615.0.00

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

A STUDY ON REUSABILITY OF WASTES FROM THERMAL POWER AND SILICA SAND PREPARATION PLANTS

Serkan ÖREN

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Sefa KOCABAŞ

July 2019, 105 pages

Control of leachate in solid waste landfill areas is provided by a layer of impermeable clay. In this study, it is aimed to develop a new liner material with low permeability, which can be an alternative to clay on landfill areas. For this purpose, fly ash of Zonguldak Eren Energy Thermal Power Plant and siliceous sand waste, which is the by-product of Ereğli Borcam Silica Sand production plant, were selected. In the analysis, the permeability value of fly ash was found to be very high and it was observed that the fly ash could not provide the permeability value. In order to reveal the effect of different mixing ratios, silica sand waste, silica sand waste + 10% fly ash mixture, silica sand waste + 20% fly ash mixture, silica sand waste + 30% fly ash samples were prepared. The optimum moisture content of the prepared samples was found. Samples were compressed at maximum dry density and their permeability was measured in the constant head permeability test apparatus. In addition, chemical analyses, compressive strength and consistency limit value tests were performed on samples with appropriate permeability values. When the results of samples evaluated, it was found that the siliceous sand waste

ABSTRACT (continued)

material used in the study gives the lowest permeability value ($1,38 \times 10^{-10}$ m/sec). And it is also found that the other mixtures provide the targeted permeability values and it was determined that the permeability value increases as the fly ash ratio increases in mixture. As the fly ash content of the samples increased, it was observed that the compressive strength increased in both the 1 day and 28 days curing period. It is found that as the amount of fly ash increase in the sample mixture, permeability values increase undesirably. As a result of this study, it was revealed that fly ash and silica sand plant wastes can be reused.

Keywords: Fly ash, Permeability, Impervious soil, Compressive strength, Siliceous sand waste

Science Code: 615.0.00

TEŞEKKÜR

Yazar; tez çalıŐmasının yürütölmesindeki katkılarından dolayı, Tez Danışmanı Dr. Öğr. Üyesi Sefa KOCABAŞ'a, tez çalıŐmalarındaki yardımlarından ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Yılmaz YILDIRIM'a, tez süresince deneylerimde ve araŐtırmalarımnda yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR'a, ArŐ. Gör. Emrah DAĞLI ve ArŐ. Gör. Dilek Cansu BOZACIOĞLU'na, Dr. Öğr. Üyesi Celal Can ÇAKMAKCI'ya, Öğr. Gör. İhsan KAZKONDU'ya, 2015-7330 8182-01 numaralı projeye desteklerinden dolayı Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne deney numunelerinin tedarikinde yardımları olan Eren Enerji Elektrik Üretim A.Ő' nin değerli mühendislerinden Halil GÖNÜL'e ve Eren Enerji Elektrik Üretim A.Ő. Tesis müdürü Murat OKUTUCU'ya, Borcam Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ő' nin değerli mühendislerinden Cevdet ÖZCAN'a kendisine sürekli moral desteği veren ailesine ve kıymetli eŐi Melek ÖREN'e teşekkür eder.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 KONUNUN ÖNEMİ	3
1.1.1 Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Zeminin Önemi.....	4
1.1.2 Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Zemin Özellikleri.....	5
BÖLÜM 2 TERMİK SANTRALLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER	7
2.1 TERMİK SANTRALLERDE YAKMA SİSTEMLERİ.....	8
2.1.1 Pulverize Kömür Yakma Sistemleri.....	9
2.1.2 Akışkan Yatakta Yakma Sistemleri.....	10
2.2 TERMİK SANTRALLERDEN MEYDANA GELEN ENDÜSTRİYEL ATIKLAR.....	12
BÖLÜM 3 KUVARS (SİLİS) KUMU HAZIRLAMA VE KULLANIM ALANLARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER	13

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

3.1 EREĞLİ BORCAM MADENCİLİK TİCARET VE SANAYİ ANONİM ŞİRKETİ KUVARS KUMU HAZIRLAMA TESİSİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	15
BÖLÜM 4 TERMİK SANTRALLERDEN KAYNAKLANAN UÇUCU KÜL VE SİLİS KUMU HAZIRLAMA SANAYİSİ ATIKLARI (SİLİSLİ KUM ATIĞI) KULLANIM ALANLARI	17
4.1 UÇUCU KÜL (FLY ASH) KULLANIM ALANLARI	17
4.1.1 Uçucu Külün Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği.....	18
4.1.2 Uçucu Külün Geçirgenlik (Permeabilite) Katsayısına Etkisi	19
4.2 KUVARS (SİLİS) KUMUNUN KULLANIM ALANLARI	20
4.2.1 Cam Sanayi.....	20
4.2.2 Döküm Sanayi	21
4.2.3 Refrakter Sanayi	22
BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
5.1 NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	26
5.2 ANALİZLER	27
5.2.1 Kimyasal Analizler ve Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	28
5.2.2 Dane Boyut Dağılımı Analizleri (Hidrometre Analizi).....	29
5.2.3 Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleri (Atterberg Limitleri / Kıvam Limitleri) ile Zeminleri Sınıflandırılması	33
5.2.3.1 Likit Limit (W_L veya LL)	35
5.2.3.2 Plastik Limit (W_p veya PL).....	37
5.2.3.3 Plastisite İndisi (IP veya PI) (Plastiklik).....	37
5.2.4 Zemin Sıkıştırma Deneyleri (Standart Proctor Deneyi)	39
5.2.5 Düşen Seviyeli Permeabilite (Geçirimsizlik) Deneyi.....	44
5.2.6 Serbest (Tek Eksenli) Basınç Dayanımının Tayini	48
5.2.7 Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi.....	50

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	55
6.1 KİMYASAL ANALİZ SONUÇLARI.....	55
6.2 DANE BOYUT DAĞILIMI ANALİZLERİ (HİDROMETRE ANALİZİ)	56
6.3 LİKİT LİMİT VE PLASTİK LİMİT DENEYLERİ (ATTERBERG LİMİTLERİ / KIVAM LİMİTLERİ).....	57
6.4 ZEMİN SIKIŞTIRMA DENEYLERİ (STANDART PROCTOR DENEYİ)	58
6.5 DÜŞEN SEVİYELİ PERMEABİLİTE (GEÇİRİMLİLİK) DENEYİ	59
6.6 SERBEST (TEK EKSENLİ) BASINÇ DAYANIMININ TAYİNİ.....	60
6.7 KATILIK DERECELERİ.....	63
BÖLÜM 7 SONUÇLAR.....	65
7.1 ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR.....	69
EK AÇIKLAMALAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	105



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 ZETES 1 ve ZETES 2 santrallerinden görünüm.....	8
Şekil 2.2 Termik santrallerde pulverize kömür yakma sistemleri.....	9
Şekil 2.3 Dolaşımli akışkan yatakta yakma genel çalışma şekli	12
Şekil 3.1 Su kullanımını ve filtre keki oluşum şeması	16
Şekil 4.1 F ve C sınıfı uçucu küllerin permeabilite katsayı değerleri	20
Şekil 5.1 Numunelerin deneylere hazırlanması aşamasını gösteren akım şeması.	25
Şekil 5.2 Hidrometre okuması sırasında oluşan menisküs	31
Şekil 5.3 Hidrometre deneyi yapılışı.....	31
Şekil 5.4 Cassagrande plastisite kartı (TS 1500).....	35
Şekil 5.5 Cassagrande çarpmalı deney cihazı, oluk açma bıçağı, porselen pota.....	36
Şekil 5.6 Karıştırılan numunenin plastik limit hesabı için 3 mm olana kadar yuvarlama işleminin.	38
Şekil 5.7 Sıkıştırma deneyi numunesinin hazırlanması.	41
Şekil 5.8 Sıkıştırma deneyinde kullanılan ekipman (mold).	42
Şekil 5.9 Numune 2, nemlendirme işlemi.	42
Şekil 5.10 Otomatik zemin kompaktörü.	42
Şekil 5.11 Kompaksiyon işlemi tamamlanmış numune.	43
Şekil 5.12 Numunenin mold'dan çıkarılması.....	43
Şekil 5.13 Kompaksiyon yapılan numunenin su içeriğini belirlenmek üzere numuneden örnekler alma işlemi	43
Şekil 5.14 Kompaksiyon yapılmış numunenin örneklerinin 105 °c derece etüvde kurutulması işlemi.	44
Şekil 5.15 Düşen seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği şematik gösterimi.....	46
Şekil 5.16 Havuzda bekletilen kompaksiyon kalıbı (Mold).....	47
Şekil 5.17 Permeabilite deney düzeneği.	48
Şekil 5.18 Permeabilite deney düzeneği ve moldların bağlanılma şekli.....	48
Şekil 5.19 Silindirik olarak hazırlanmış numuneye serbest basınç deneyi uygulaması.....	49
Şekil 5.20 Serbest basınç deneyi tamamlanmış numune örneği.	50
Şekil 5.21 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 5 µm.....	51
Şekil 5.22 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 10 µm.....	51
Şekil 5.23 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 40 µm.....	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.24 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 50 µm.....	52
Şekil 5.25 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 200 µm.....	52
Şekil 5.26 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 1 mm.....	53
Şekil 6.1 Termik santral uçucu külü %100 oranında kullanımı düşen seviyeli permeabilite deneyi.....	59
Şekil A.1 Numune 2 likit limit eğrisi.....	76
Şekil A.2 Numune 3 likit limit deneyi grafiği.....	78
Şekil A.3 Numune 4 likit limit deneyi grafiği.....	79
Şekil A.4 Numune 5 likit limit deneyi grafiği.....	81
Şekil B.1 Numune 2 kompaksiyon grafiği.....	86
Şekil B.2 Numune 3 kompaksiyon grafiği.....	86
Şekil B.3 Numune 4 kompaksiyon grafiği.....	86
Şekil B.4 Numune 5 kompaksiyon grafiği.....	87
Şekil D.1 Numune 2 bir numaralı serbest basınç deneyi.....	92
Şekil D.2 Numune 2 iki numaralı serbest basınç deneyi.....	92
Şekil D.3 Numune 2 üç numaralı serbest basınç deneyi.....	92
Şekil D.4 Numune 3 bir numaralı serbest basınç deneyi.....	93
Şekil D.5 Numune 3 iki numaralı serbest basınç deneyi.....	93
Şekil D.6 Numune 3 üç numaralı serbest basınç deneyi.....	93
Şekil D.7 Numune 4 bir numaralı serbest basınç deneyi.....	94
Şekil D.8 Numune 4 iki numaralı serbest basınç deneyi.....	94
Şekil D.9 Numune 4 üç numaralı serbest basınç deneyi.....	94
Şekil D.10 Numune 5 bir numaralı serbest basınç deneyi.....	95
Şekil D.11 Numune 5 iki numaralı serbest basınç deneyi.....	95
Şekil D.12 Numune 5 üç numaralı serbest basınç deneyi.....	95
Şekil E.1 Numune 2 yirmi sekiz günlük bir numaralı serbest basınç deneyi.....	96
Şekil E.2 Numune 2, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi.....	96
Şekil E.3 Numune 2, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi.....	96
Şekil E.4 Numune 4, yirmi sekiz günlük 1 numaralı serbest basınç deneyi.....	97
Şekil E.5 Numune 4, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi.....	97
Şekil E.6 Numune 4, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi.....	97
Şekil E.7 Numune 4, yirmi sekiz günlük 1 numaralı serbest basınç deneyi.....	98
Şekil E.8 Numune 4, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi.....	98
Şekil E.9 Numune 4, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi.....	98
Şekil E.10 Numune 5, yirmi sekiz günlük 1 numaralı serbest basınç deneyi.....	99
Şekil E.11 Numune 5, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi.....	99
Şekil E.12 Numune 5, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi.....	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Türkiye kuvars kumu rezervleri ve kimyasal özellikleri	13
Çizelge 4.1 Cam tipleri için max. Fe ₂ O ₃ içeriği	21
Çizelge 4.2 Çeşitli kalitelardaki renksiz cam üretiminde kullanılacak olan silis kumunun özellikleri.....	21
Çizelge 4.3 Refrakter sanayisinde kullanılan bileşenleri limit değerleri	22
Çizelge 5.1 Numuneler ve karışım oranları.	26
Çizelge 5.2 Deney programı.....	27
Çizelge 5.3 Türk standardı zemin sınıflandırması TS 1500.....	34
Çizelge 5.4 İnce daneli zeminlerin katılık derecesini gösteren tablo.....	50
Çizelge 6.1 Termik santral uçucu kül örneği, silis cevheri ve silisli kum atığı örnekleri kimyasal analizleri.....	55
Çizelge 6.2 Hidrometre deney okumaları.	56
Çizelge 6.3 Malzemelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri (%).	58
Çizelge 6.4 Malzemelerin optimum su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları.	59
Çizelge 6.5 Permeabilite deney sonuçlarını gösteren tablo (m/sn cinsinden).....	60
Çizelge 6.6 Numunelerin ve karışımların serbest basınç dayanımları.	61
Çizelge 6.7 Numune 3, Numune 4, Numune 5 ortalama serbest basınç dayanımları.	62
Çizelge 6.8 Numune 3, Numune 4, Numune 5 Katılık Dereceleri.....	63
Çizelge A.1 Numune 2 likit limit hesaplamaları.....	75
Çizelge A.2 Numune 2 plastik limit hesaplamaları.....	75
Çizelge A.3 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.	76
Çizelge A.4 Numune 3 likit limit hesaplamaları.....	77
Çizelge A.5 Numune 3 plastik limit hesaplamaları.....	77
Çizelge A.6 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.	77
Çizelge A.7 Numune 4 likit limit hesaplamaları.....	78
Çizelge A.8 Numune 4 plastik limit hesaplamaları.....	79
Çizelge A.9 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.	79
Çizelge A.10 Numune 5 likit limit hesaplamaları.....	80
Çizelge A.11 Numune 5 plastik limit hesaplamaları.....	80
Çizelge A.12 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.	80
Çizelge B.1 Numune 2 yaş birim hacim ağırlığı (YBHA).....	82
Çizelge B.2 Numune 2 kuru birim hacim ağırlığı (KBHA) ve su muhtevası	82
Çizelge B.3 Numune 3 yaş birim hacim ağırlık (YBHA).....	83
Çizelge B.4 Numune 3 kuru birim hacim ağırlık (KBHA) ve su muhtevası	83
Çizelge B.5 Numune 4 yaş birim hacim ağırlık (YBHA).....	84
Çizelge B.6 Numune 4 kuru birim hacim ağırlık (KBHA) ve su muhtevası	84

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge B.7 Numune 5 yaş birim hacim ağırlık (YBHA)	85
Çizelge B.8 Numune 5 kuru birim hacim ağırlık (KBHA) ve su muhtevası	85
Çizelge C.1 Numune 2 permeabilite deney sonuçları	88
Çizelge C.2 Numune 3 permeabilite deney sonuçları	89
Çizelge C.3 Numune 4 permeabilite deney sonuçları	90
Çizelge C.4 Numune 5 permeabilite deney sonuçları	91
Çizelge F.1 Hidrometre deneyinde kullanılan tablo.....	100
Çizelge F.2 Süspansiyon sıcaklık düzeltmesi (Mt)	101
Çizelge F.3 Hidrometre analizinde tane çapının hesaplanmasında kullanılan tane özgül ağırlığına bağlı olarak saptanan katsayı (K).....	102
Çizelge F.4 Düzeltilmiş hidrometre okumalarına karşılık etkin derinlik (L)	103

EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
EK-A Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleri (Atterberg Limitleri / Kıvam Limitleri hesaplamaları	75
EK-B Zemin Sıkıştırma Deneyleri (Standart Proctor Deneyi).....	82
EK-C Düşen seviyeli permeabilite hesaplamaları.....	88
EK-D Serbest Basınç Dayanımı Grafikleri 1 günlük	92
EK-E Serbest Basınç Dayanımı Grafikleri 28 günlük	96
EK-F EK-Fa'da Hidrometre deneyinde kullanılan tablo	100



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

k	: Geçirimsizlik Katsayısı
SO ₂	: Kükürt Dioksit
SO ₃	: Sülfür Trioksit
SiO ₂	: Silisyum Oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir III Oksit
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
Co	: Kobalt Elementi
NO _x	: Azot Oksit
Cr	: Crom Elementi
As	: Arsenik Elementi
P ₂ O ₅	: Fosfor Elementi
K ₂ O	: Potasyum Oksit
KK	: Kızdırma Kaybı
Na ₂ O	: Sodyum Oksit
NaPO ₃	: Sodyum Heksametafosfat
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
CL ^E	: Düşük Plastisiteli Kil
ML ^E	: Düşük Plastisiteli Silt
CI ^E	: Orta Plastisiteli Kil
MI ^E	: Orta Plastisiteli Silt
CH ^E	: Yüksek Plastisiteli (yağlı) Kil
MH ^E	: Yüksek Plastisiteli (elastik) Silt

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

AASHTO	: Karayolları Sınıflandırma Sistemi
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BEÜ	: Bülent Ecevit Üniversitesi
BGD	: Baca Gazı Desülfürizasyon
BS 5930	: İngiliz Standardında Zemin Sınıflandırması
ÇED	: Çevresel Etki Değerlendirmesi Raporu
DENOx	: Azot Oksit Arıtım Ünitesi
EİE	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
ESF	: Elektro Statik Filtre
İp veya PI	: Plastisite İndisi
KBHA	: Kuru Birim Hacim Ağırlığı
LL veya w_L	: Likit Limit
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
OFA	: Over Flow Air
PL veya w_p	: Plastik Limit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
S+A+F	: SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
USCS	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
USDA	: Dane Boyutuna Dayandırılan Sınıflandırma
US EPA	: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Örgütü
YBHA	: Yaş Birim Hacim Ağırlığı
ZETES 1	: Zonguldak Eren Termik Santrali 1. Santral 160 Mw
ZETES 2	: Zonguldak Eren Termik Santrali 2. Santral 1320 Mw
XRF	: X-Ray Fluorescence
PT	: Turba

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Elektrik, insanoğlunun hayatını sürdürebilmesi açısından oldukça önemli bir ihtiyaçtır. Isınmada, aydınlatmada, sanayide, tıpta, otomotiv sektöründe yani hayata dair bütün alanlarda elektriğe olan ihtiyaç yadsınamayacak derecededir. Elektrik ihtiyacı; dünyada sanayinin gelişmesi, ülkelerin ekonomik açıdan güçlenmeleri ve insanların refah düzeyi yüksek bir hayat yaşamak istemeleri gibi sebeplerden dolayı her geçen gün artmaktadır.

Dünyanın bütün ülkeleri elektrik ihtiyacını karşılamak üzere birtakım kaynaklar kullanarak elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. Bunların en önemlileri fosil kaynaklı yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Türkiye'nin elektrik üretim tarihinde en fazla kullanılan kaynaklar su ve linyittir (Özdemir ve Gürbüz 2016). Cumhuriyetin ilk yıllarında linyite dayalı termik santrallerin oranı %97-98 iken, 1950'li yılların ortalarında %94'lere gerilemiştir. Sonraki yıllarda ise hidroelektrik santrallerinin arka arkaya devreye girmesiyle linyite dayalı termik santrallerin oranı daha da azalmıştır (Avcı 2005). 1970'li yıllarda elektrik ihtiyacının artması ve bu yıllarda hidroelektrik santrallerinin yetersiz gelmesi sonucu linyite dayalı termik santrallere yönelme yeniden başlamıştır (Karaca 2001).

Elektrik enerjisi üretmek üzere kullanılan yöntemlerin başında doğalgaz, kömür ve yenilenebilir enerji üretim tesisleri gelmektedir. 2017 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'nin elektrik ihtiyacının %24,5'u doğalgazdan, %22'i kömürden ve %45,5'ini ise yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamaktadır (TÜİK 2017).

Dünya genelinde fosil yakıtlar doğalgaz, petrol ve kömür olarak kabul edilir. On dokuzuncu yüzyıldan bu yana fosil kökenli yakıtlar, üretim teknolojilerinde meydana gelen gelişmelere ve ucuz olmalarına bağlı olarak yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Bunun sonucunda da fosil

yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları karşısında üstün bir konuma gelmiştir. 1973 yılında ortaya çıkan petrol krizi sonucunda, petrol ve kömür egemenliğine dayanan enerji çağı, bir güvensizlik ortamı oluşturmuştur. Bu güvensizlik ortamı sonucunda dünya genelinde yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına karşı yoğun bir ilgi ortaya çıkmıştır. “Enerji Güvenliği” ve “Enerji Çeşitlendirilmesi” kavramları, petrol krizi sonrasında enerji politikalarının belirleyici unsurları olmuştur (Büyükmihçi 2003).

Uzmanların tahminleri, sürekli artan enerji talebine karşılık azalmaya başlayan fosil yakıt rezervlerinin karşılık veremeyeceği yönündedir. Konuyla ilgili araştırmalara göre; dünyadaki petrol ve doğalgaz rezervinin 21. yüzyılın ortalarında, kömürün ise 23. yüzyılda tükeneceği düşünülmektedir. Dünyadaki enerji tüketiminin, fosil yakıtların oluşumundan yaklaşık 300.000 kat daha hızlı gerçekleştiği kabul edilir. Bu durum bir gün içerisinde bin yıllık fosil yakıt oluşumunun tüketildiği anlamına gelir (Yılmaz vd. 2003).

Türkiye 2017 yılı enerji istatistikleri raporunda görüldüğü üzere, her geçen yıl enerji yatırımlarını arttırmaktadır ve bunu artışı sağlayan en önemli faktör olarak termik santraller dikkat çeker.

Termik santrallerin kurulması, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamasının yanında, çevresel birçok sorunu da beraberinde getirir. Bunlar; hava kirliliği, su kirliliği, toprak kirliliği ve katı atıkların durumu olarak sıralanabilir.

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek amacıyla çok yüksek miktarlarda kömür kullanılır. Ortaya çıkan katı atık miktarı ise, kullanılan kömür ile doğru orantılı olarak artar. Termik santrallerde çevresel açıdan çok büyük problemler oluşturan atık kütleleri üç gruba ayrılır:

- Uçucu kül (fly ash)
- Taban külü (bottom ash)
- Baca gazı kükürtsüzleştirme işlemi sonunda atık olarak ortaya çıkan alçıtaşı (gypsum)

Özellikle bu atıklardan uçucu kül ve taban külü, elektrik üretimi sonrasında çok yüksek miktarlarda oluşur. Bundan dolayı mevzuatlar gereğince çevreye zarar vermeden yok edilmeleri gerekliliği elektrik üreticileri açısından büyük sıkıntılar doğurur.

Bu çalışmada, termik santrallerde oluşan katı atıkların ve silis kumu hazırlama tesislerinden kaynaklanan katı atıkların, atık düzenli depolama zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada kullanılmak üzere Zonguldak Çatalağzı bölgesinde bulunan Eren Enerji Elektrik Üretim A.Ş.'nin hâli hazırda bulunan üç santralinden birisi olan Zonguldak Eren Termik Santrali 1'in (ZETES1) uçucu külü kullanılmıştır. Ayrıca Zonguldak ili Ereğli ilçesi Terzi köyü Alacağzı mevkiinde bulunan Borcam Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'de üretim sonucu oluşan silisli kum atığı malzemesi kullanılmıştır. Borcam Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'ne ait teknik uygunluk raporu incelendiğinde, tesiste yılda 95 bin ton silis kumu üretildiği ve tesisin 300 gün boyunca günde 24 saat çalışmakta olduğu anlaşılmaktadır. Yine aynı raporda, üretim sonucunda 67,2 m³/gün silisli kum atığı malzemesi oluştuğu ifade edilmiştir. Söz konusu verilerden hareketle, günlük üretimin yaklaşık %21-22'si oranında atık oluştuğu görülmektedir.

1.1 KONUNUN ÖNEMİ

Türkiye'de ekonomik olarak büyüme eğilimin olması, enerji talebinde artışa; neticesinde de yeni termik santraller kurulması ve planlanmasına neden olmaktadır. Enerji talebindeki bu artışlar, ekonomik ve endüstriyel büyümenin bir göstergesi olmakla beraber, atıkların sebep olduğu çevre kirliliğinin artmasına anlamına da gelir. Enerjiden ve kullanılan ham maddeden tasarrufun yanı sıra enerji ihtiyacının karşılanması aşamasında oluşan atıkların tekrar kullanılabilirliği Türkiye'de güncelliğini koruyan en önemli konuların başında yer alır (Görhan vd. 2008).

Termik santrallerden enerji üretimi Türkiye'de orta ve uzun vadeli enerji üretim politikalarının başında gelir. Katı yakıtların yakıldığı bu ünitelerden meydana gelen kül ve cüruf beraberinde önemli çevre sorunlarını da getirir (Görhan vd. 2008).

Elektrik enerjisi üretebilmek üzere kullanılan yöntemlerin başında kömür, doğalgaz ve hidrolik elektrik üretim tesisleri ilk sıraları alır. 2017 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre ülkemizin elektrik ihtiyacının %24,5'u doğalgaz, %22'i kömür ve %45,5'i yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamaktadır (TÜİK 2017).

TÜİK raporunda görüldüğü üzere 2017 verilerine göre termik santrallerden elektrik üretilmesi enerji üretiminin yaklaşık 4'te 1'lik kısmını oluşturmaktadır. Kömürle çalışan termik santrallerin çalışma prensibi kömürün yüksek sıcaklıklarda yakılması ve elde edilen ısının

mekanik enerjiye çevrilmesi esasına dayanır. Yakıt olarak kullanılan büyük kütlelerdeki kömürün yanması neticesinde atık olarak yüksek miktarlarda kül (uçucu kül + taban külü) ortaya çıkar.

Ülkemizdeki termik santrallerde, her yıl milyonlarca ton katı atık oluşur. Bu katı atıkların ekonomiye yeniden kazandırılması hem ilave gelir sağlanması hem de oluşabilecek çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Türkiye’de her yıl fosil kaynaklı yakıtların yakılmasından kaynaklanan katı atık miktarının 20 milyon tonu bulunduğu tahmin edilmektedir (Güler vd. 2005).

TÜİK verilerine göre; 2014 yılında termik santrallerden 23 milyon ton, 2016 yılında yaklaşık 18 milyon ton uçucu kül oluştuğu görülmektedir. Bu yıllar arasında oluşan uçucu küllerin 2014 yılında yaklaşık %30’unun, 2016 yılında ise sadece %15’inin geri kazanıldığı görülmüştür. Geri kalan atıklar ise kül barajlarında depolanmıştır (TÜİK 2016).

Termik Santrallerden oluşan atıkların bir kısmı yan ürün olarak çeşitli sanayilerde kullanılır. Ancak büyük bir kısmı atık kül barajlarında bertaraf edilir.

Türkiye’deki Borcam sanayisinde kuvars kumu hazırlama ünitelerinin atık sularının arıtılması sonucu oluşan filtre kekinin (silisli kum atığı) toplam üretilen miktarların %21-22’sini oluşturduğu görülür. Oluşan atık miktarlarının fazlalığı nedeniyle bu atıkların geri kazanılması son derece önemli bir konudur.

Termik santrallerin en önemli katı atıklarından olan uçucu kül ile kuvars kumu hazırlama tesislerine ait silisli kum atığının, katı atık düzenli depolama sahalarında zemin geçirimsizliğini sağlamak üzere yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması ile her iki atıkta değerlendirilebilecek ve yan ürün haline dönüştürülebilecektir.

1.1.1 Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Zeminin Önemi

Katı atık depolama alanına giren katı atıklar fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimlere uğrarlar. Bu sahalarda katı faz, sıvı faz ve gaz fazı olarak adlandırılan üç fiziki faz mevcuttur. Klasik depo sahaları, atıkların anaerobik ayrışmasına olanak sağlamalarına rağmen, çevre ve insan sağlığı bakımından olumsuz etkilere sahiptirler. Bu olumsuz etkiler:

- Yüksek konsantrasyonlarda organik kirletici ve patojen ihtiva eden sızıntı suyunun oluşması
- Atıkların çok yavaş bir şekilde ayrışması nedeniyle sahanın uzun yıllar boyunca kontrol edilme gerekliliği gibi sebeplerden ötürü ortaya çıkar (Bilgili 2006).

Bu etkiler, katı atıkların klasik depo sahaları kullanılmasından ziyade düzenli bir şekilde depolanması gerekliliğini doğurmuş ve katı atık düzenli depolama sahalarında atıkların depolanarak bertaraf edilmesine başlanmıştır. 26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Resmî Gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” ise katı atıkların düzenli olarak depolanmasını yasal bir zorunluluk hâline getirmiştir.

İlgili yönetmelikte de belirtildiği üzere, atıkların düzenli olarak depolanmasındaki iki temel unsurdan ilki atıklardan oluşacak sızıntı sularının çevre ve insan sağlığına etkisini önlemek, ikincisi ise katı atıkların biyolojik ayrışması sonucu oluşacak gazın kontrol altına alınmasını sağlamaktır.

1.1.2 Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Zemin Özellikleri

Depo sahalarından oluşan sızıntı sularının önlenmesi, katı atık düzenli depo sahalarının zemininin geçirgenliğinin Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik’te belirtilen kriterler ile uygun olması sayesinde sağlanmaktadır. Zemin geçirgenliği için kullanılacak malzemeler, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik’te “kil ve eşdeğeri bir malzeme” olarak belirtilmektedir. Zemin geçirgenliği için istenen kriterler ise şu şekildedir;

- a) I. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 5 m veya eşdeğeri
 - b) II. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri
 - c) III. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri
- (Resmi Gazete 2010).

Yönetmelikte tehlikeli atıkların depolandığı tesisler “birinci sınıf”, tehlikesiz atıkların depolandığı tesisler “ikinci sınıf” ve inert atıkların depolandığı tesisler “üçüncü sınıf” olarak adlandırılmıştır. “Tehlikeli atık”, “tehlikesiz atık” ve “inert atık” kavramları, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğin 4. Maddesinin “ı” bendinde ve Atık Yönetimi Yönetmeliği’nin 4. Maddesinin “jj” ve “kk” bentlerinde belirtilmiştir. Buna göre:

İnert atık: “Fiziksel, kimyasal veya biyolojik olarak önemli derecede herhangi bir değişime uğramayan, çözünmeyen, yanmayan, fiziksel veya kimyasal olarak reaksiyona girmeyen, biyolojik bozunmaya uğramayan veya temas ettiği maddeleri çevreye veya insan hayatına zarar verecek şekilde etkilemeyen ve toplam sızıntı kabiliyeti ve ekotoksitesisi önemsiz miktarda olan, özellikle yüzeysel su ve yeraltı suyu kirliliği tehlikesi yaratmayan atıklardır” (Resmi Gazete 2015).

Tehlikeli atık: “Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek-3/A’da yer alan tehlikeli özelliklerden birini ya da birden fazlasını taşıyan, Ek-4’te altı haneli atık kodunun yanında yıldız (*) işareti bulunan atıklardır” (Resmi Gazete 2015).

Tehlikesiz atık: “Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek-4 atık listesinde yıldız (*) işareti bulunmayan atıklardır” (Resmi Gazete 2015).

Bu çalışmada, Termik santral atıkları ve Silis kumu üretim tesislerinden kaynaklı atıklardan, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte de belirtilen kil ve eşdeğeri malzemelerin sağladığı geçirgenliği aynı düzeyde karşılayabilecek bir malzemenin geliştirilmesi araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

TERMİK SANTRALLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Isı enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemler “Termik Santral” olarak adlandırılmaktadır. Sistemde ana üniteler olarak kömür kazanı, soğutma sistemi ve türbin jeneratörü bulunur. Yardımcı üniteler ise şunlardır:

- Kömür hazırlama ve besleme,
- Kireçtaşı hazırlama ve besleme,
- Su hazırlama ve arıtma,
- Toz tutma,
- Baca gazı desülfürizasyon,
- Baca gazı azot oksit giderme,
- Kül uzaklaştırma sistemleri,
- Kül depolama alanı,
- Otomasyon ve elektrik sistemler

Termik santrallerde kömür bunkerlerine iletilen kömür, kazan yükü ile orantılı olacak şekilde pulverize kömür değirmenlerine gönderilir. Kömür değirmelerine gelen kömür, boyutları mikron mertebesine gelecek şekilde öğütülür. Değirmenlere hava besleyen birincil hava fanı tarafından beslenen atmosferik hava, hava–hava ısıtıcısından geçerek, kazandan çıkan egzoz havası ile ısıtılır, değirmenlere sızdırmazlık havası ve pulverize kömürü, kazanda bulunan yakıcıya taşıma havası olarak görev yapar, pulverize kömür ve sıcak hava karışımını kazana üflenerek, kazan içerisine gönderir ve yanma sağlanır (ZETES III ÇED Raporu 2012).

Over Flow Air (OFA) sistemiyle, kazanda en iyi yanmanın sağlanması ve oluşacak olan NOx emisyonlarının azaltılması sağlanır. NOx emisyonu oluşumunun en aza indirilmesi, yanma sıcaklığı ve alev oyalanma süresi ayarlanarak sağlanmaktadır. Kazandan çıkan baca gazındaki NOx emisyonlarının istenilen sınır değerlerin altında tutulması, baca gazının DeNOx

sisteminden geçirilmesiyle sağlanır. NO_x emisyonlarından arındırılan baca gazı, hava ısıtıcıdan ve arkasında elektrostatik filtreden (ESF) geçmekte, buradan geçerken baca gazı içerisindeki külün %99'u tutulmaktadır. ESF'den geçen ve külden arındırılmış olan baca gazı son olarak, SO₂'den arındırılmak için baca gazı desülfürizasyon (BGD) ünitesinden geçmektedir (ZETES III ÇED Raporu 2012).



Şekil 2.1 ZETES 1 ve ZETES 2 santrallerinden görünüm (ZETES III ÇED Raporu 2012).

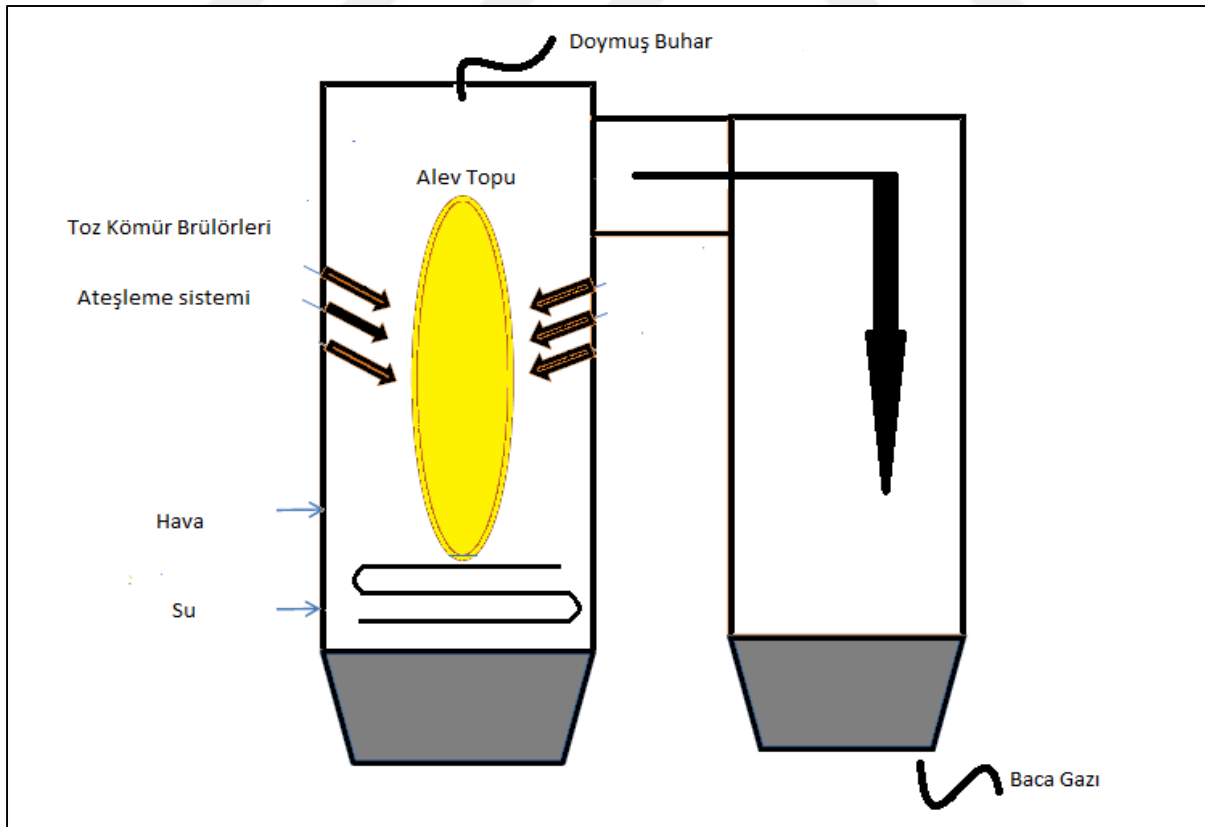
2.1 TERMİK SANTRALLERDE YAKMA SİSTEMLERİ

Kömür yakma, kömürün değişken özellikleri nedeniyle, farklı uygulamalarla gerçekleştirilmektedir. Farklı kömürler için, farklı tane boyutlarında yakma işlemleri önem kazanabilir. Yüksek kül içerikli bir linyit kömürünü değerlendirebilmek için onun öğütülüp yakılması çok daha verimli olabilmektedir. Boyut küçültme işlemi ile linyit kömürü içerisinde daha fazla yanabilen kısım serbest kalır ve yanma sağlanır. Farklı termik santral tasarımlarının bulunmasının nedeni farklı yakıt yakma sistemlerinden dolayıdır. Termik santrallerde temel olarak yakma prensipleri şu şekildedir:

- Pulverize yatakta yakma sistemleri
- Akışkan kömür yakma sistemleri (Akkaya 2013).

2.1.1 Pulverize Kömür Yakma Sistemleri

Pulverize kömür yakma sistemleri, pulverize değirmenlerinde çok ince toz hâline getirilen kömürün kazan içerisine püskürtmesi ile beslenmesinin yapıldığı sistemlerdir. Kazan içerisine beslenen kömürün boyutu, uygun dönen silindirik değirmenler ile 0,075 mm tane boyutunun altına öğütülerek, toz kömür brülörleri ile kazan içerisine beslenecek şekilde hazırlanır. Kömür püskürtülmesi başlangıcında toz kömür brülörü ucundaki uygun püskürtme ünitesinden, LPG yakıtı ile pilot alev oluşturulup, daha sonra sıvı yakıt devresi açılmaktadır. Kazan içerisindeki sıcaklık 900 °C' ye ulaştığında sıvı yakıt püskürtmesi durdurulur ve hazırlanan kömür yukarıda belirtilen boyutlarda kazan içerisine yaklaşık 200 m/sn hız ile püskürtülmesi sağlanır. Sonuçta Şekil 2.2' de gösterilen kazanın orta noktasında bir ateş topu oluşumu sağlanır. Kararlı bir yanma ve kuvvetli bir alevin oluşturulması için, yanma reaksiyonlarında gerekli oksijen miktarı sabit oranlar yasasına göre hesaplanan teorik oksijen miktarından fazla olmalıdır. Aksi durumda tam olarak yanma gerçekleştirilemez. Bu işlem için iki çeşit hava akımı kullanılır. Birinci olarak kömürün taşınması için kullanılan hava, ikinci olarak ise çok daha verimli bir yanmayı mümkün kılan ve gazlaşmanın başladığı noktalar üzerine gönderilen ilave havadır (Akkaya 2013).



Şekil 2.2 Termik santrallerde pulverize kömür yakma sistemleri (Akkaya 2013).

2.1.2 Akışkan Yatakta Yakma Sistemleri

Evsel atıkların yakılarak bertaraf edilmesi için geliştirilen akışkan yataklı yakma teknolojisi, zaman içerisinde “gelecek için temiz enerji” sloganıyla büyük gelişme kaydetmiştir. Söz konusu teknoloji, 1970’li yılların başında geliştirilmesinden bu zamana dek, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kabul görmüştür. Akışkan yataklı yakma teknolojisinin en önemli özelliği kalori değeri düşük, kül ve nem oranı yüksek olan düşük kaliteli yakıtları yakma yeteneği ve verimliliğidir. Ayrıca yakıt esnekliği, düşük emisyon, tehlikeli olmayan yan ürünlerin yeniden kullanılabilmesi ve farklı yakma teknolojilerine sahip sistemlere kolayca uygulanabilir olması diğer önemli avantajlarıdır. Zaman içerisinde akışkan yataklı yakma teknolojilerinde önemli gelişmeler kaydedilmiş ve çeşitlilik sağlanmıştır. Bu çeşitliliği akışkanlaşma koşulları ve basınç mertebelerine göre aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

Akışkan yatakta yakma sistemi, “kömürün çok ince öğütülmesine gerek duyulmadan yakılabilmesi” prensibine dayanan bir yakma sistemidir. Özellikle termik santrallerde sabit bir yüzey üzerindeki püskürtme deliklerinden hava gönderilerek, yüzey üzerindeki akışkan yatak maddelerinin (kireçtaşı, kum vb. taşıyıcı, hava gibi yakıcı ve kırılmış kömür gibi yanıcı maddelerin) birlikte havada asılı kalması sağlanır. Bu sistemlerde yakılacak kömürün kazana besleme boyutu (-25+6) mm’dir.

Kazana hava akımı yardımı ile toz kömür üflenip alttan üflenen hava ile de yatak hareketli tutulmak suretiyle kömürün diğer sistemlere nazaran daha iyi yanması sağlanır. Öte yandan küller, hava akımı yardımıyla sistemden dışarı atılır. Kükürdü yüksek toz kömürler yakıldığı zaman, çevre sorunları bakımından, yanma sonucu çıkan SO₂’yi zararsız hâle getirmek için kazana kömürle birlikte kalker tozu da verilir.

Uygulanan hava akımının hızı arttırıldıkça parçacıklara uygulanan kaldırma kuvveti de arttırılmış olur. Hava akımının arttırılmasına, parçacıklara uygulanan kaldırma kuvveti ile yerçekimi arasında denge oluncaya kadar devam edilir. Denge durumunda ise yukarı doğru akış halindeki havanın içerisinde parçacıklar asılı kalırlar ve akışkan özelliklerini sergilemeye başlarlar. Bu duruma “minimum akışkanlaşma koşulu”, bu aşamadaki havanın hızına ise “minimum akışkanlaşma hızı” denir (Akkaya 2013).

Minimum akışkanlaşma fazından sonra, hava akımının hızı arttırılmasına devam edilirse, yatak içindeki parçacıkların, sıvıların kaynamasına benzer bir formda bulunduğu ve hareket ederek yatağı terk ettiği görülür. Hareket halindeki parçacık-hava karışımının hacmi, sabit yatak hacmine göre hızla artar. Ancak bu artışa rağmen sabit yatak yüzeyi rahatlıkla gözlenebilir.

Eğer uygulanan havanın hızı biraz daha arttırılırsa, kabarcıkların büyüdüğü ve birleşerek büyük boşluklar oluşturduğu gözlenir. Bu duruma “türbülanslı akışkan yatak” denir. Türbülanslı akışkan yatak şartlarında, parçacıklar yüksek katı derişimine sahip ve birbirine bağlı gruplar halinde döngüde dolaşmaya başlarlar ki bu duruma “dolaşımli akışkan yatak” adı verilir (Akkaya 2013).

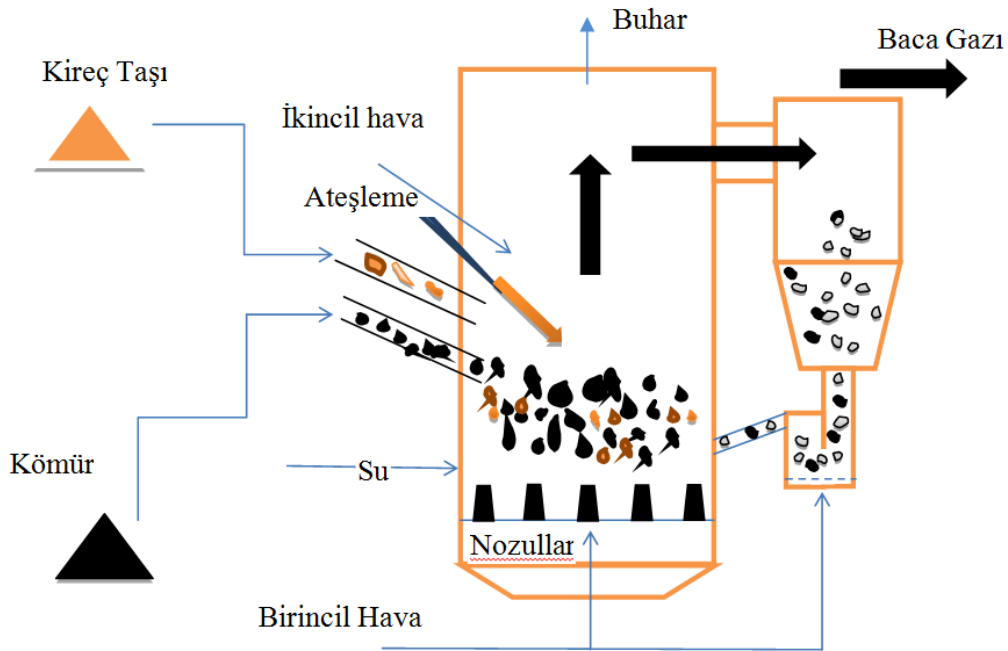
Kırma işlemine tabi tutulduktan sonra istenilen parçacık boyutuna getirilmiş olan yakıt ve kireçtaşı parçacıkları, kazanın yakıcı kısmına gönderilir. Bu parçacıklar, yatağın alt bölümündeki dağıtıcı plakadan yanma odasına doğru yukarı yönde akmakta olan hava akımı içerisinde asılı kalırlar. Minimum akışkanlaşma koşulunun sağlanmasından sonra hava akımının hızı arttırılarak yatak içerisinde kabarcıklar meydana getirilir. Kabarcıkların yatakta dolaşımının sağlanmasıyla, katı yakıt parçacıklarının maksimum şekilde karışımı sağlanır (Akkaya 2013).

Yanma sonrasında meydana gelen küller hava akımıyla sürüklenir. İri tanecikli olanlar siklon bölümünde tutulur ve gerektiğinde yatağa geri gönderilerek yeniden yakma prosesine gönderilir. İnce tanecikli küller ise kazandan sonraki elektrostatik ya da bez filtrelerde tutulur.

Siklonda tutulan ve yatağa geri gönderilen küllerin yeniden yanma prosesine girmesi, yanma ve kükürt tutma verimlilik oranlarını arttırır. Kazan boruları, baca gazlarından en fazla istifade edilecek şekilde yerleştirilmiştir (Akkaya 2013).

Yakıtın tanecik boyutu daha küçük, uygulanan hava akımının hızı ise çok daha yüksektir. Bu sebeplerden dolayı, parçacıklar hava akımıyla rahatlıkla sürüklenerek yatak ve derişimin düşük olduğu bölgeler ayrı olmaksızın yanma işleminin bütün kazan boyunca sürdürülmesi sağlanır. Sisteme yanma havası iki aşamada uygulanır. İlk yanma havası sisteme, yatağın altından yukarıya doğru uygulanır ki bu noktada uygulanan hava miktarı, toplam hava miktarının %60-75'i kadardır. %35-40 oranındaki hava miktarı ise sisteme ilk noktaya göre daha yukarıdaki bir seviyeden uygulanır. Şekil 2.3'te sistemdeki yanma ısısı 800-900 °C arasında bir değerdir. İnce

tanecikler yanma havasıyla birlikte yanma odası çıkışına yerleştirilen siklon kısmında tutulur ve sonrasında yanma odasına geri gönderilerek dolaşım sağlanır (Akkaya 2013).



Şekil 2.3 Dolaşımli akışkan yatakta yakma genel çalışma şekli (Akkaya 2013).

2.2 TERMİK SANTRALLERDEN MEYDANA GELEN ENDÜSTRİYEL ATIKLAR

Termik santrallerde birbirinden farklı yapıda olan çeşitli atıklar meydana gelir. Katı atıklar, sıvı atıklar ve gaz atıklar termik santrallerin atık türlerindedir. Bu atıkların bazıları tekrar değerlendirilebilirken, bazıları ise değerlendirmek mümkün değildir. Bu atıklardan değerlendirilebilen atıkların bir kısmı geri dönüşüm için, bir kısmı enerji eldesi için en büyük kısmı ise endüstride ürün olarak kullanılır. Çalışmanın bu bölümünde ürün olarak kullanılabilen termik santral atıkları değerlendirilmiştir.

Termik santrallerde yakma sonucu oluşan ve ürün olarak kullanılabilen atık maddeler şu şekildedir:

- Küller (uçucu kül ve taban külü)
- Baca gazı kükürtsüzleştirme atıkları (BDG)

BÖLÜM 3

KUVARS (SİLİS) KUMU HAZIRLAMA VE KULLANIM ALANLARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Kuvars kumu (perlit, pomza ve diatomit gibi minerallerle birlikte) yalıtımlı hafif yapı malzemeleri adı altında gruplandırılmaktadır. Kuvars kumu 2 mm'den küçük granit türü kayaların ayrışması sonucu oluşan SiO_2 tanecikleridir. Kuvarsitin öğütülmesi sonucu elde edilebilir ve refraker sanayisinde silika tuğla üretiminde, cam sanayisi ve döküm sanayisinde kullanılmaktadır. SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Co , Cr , P_2O_5 miktarları kullanım alanlarını belirleyen parametrelerdir. Kuvars kumu yer kabuğunda oldukça fazla olmasına karşın, çok az bir miktarı ticari bir öneme sahiptir. Bunun nedeni, firmaların üründe birtakım fiziksel ve kimyasal özellikler aramalarıdır. Teknolojik değişimler neticesinde hammaddede de beklenen özellikler değişiklik göstermektedir. Özellikler fırınlarda, birim alanda çekilen cam miktarının artırılması, kum gibi güç eriyen hammaddelerde ince tane miktarı arttırmaksızın iri tanelerin önemli miktarda azaltılmasını gerektirmiştir. Ayrıca şekillendirme yöntemlerindeki hız artışı da daha homojen camı gerektirmekte ve hammaddelerin kimyasal kompozisyonlarındaki pozitif farklılaşma limitleri giderek daraltmıştır (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere, Türkiye'de kuvars kumu potansiyelinin yaklaşık 730 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Ülkemizdeki başlıca kuvars kumu bölgeleri İstanbul, Tekirdağ, Zonguldak ve Sinop'tur.

Çizelge 3.1 Türkiye kuvars kumu rezervleri ve kimyasal özellikleri (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

Bölge	% SiO_2	% Fe_2O_3	% Al_2O_3	% K_2O	% Na_2O	% CaO	% MgO	K. K	REZERVLER (Ton)
İSTANBUL									
Şile-Avcıkoru	97,23	0,95	1,32	0,14	0,06	0,04	0,07	1,14	200 000 (1)
Şile-Kirazlyatak	96,15	0,6	2,10	0,39	0,07	0,22	0,04	0,3	6 758 692 (2)
Şile-Kızılca	97,17	0,38	1,78	0,22	0,05	0,03	0,03	0,31	160 000 (1+3)
Şile – Kara kiraz	98,2	0,41	0,44	0,31	0,06	0,15	0,05	0,24	-

Çizelge 3.1 (devam ediyor)

Şile TOPLAM	Sofular	Hüseyinli	Doğacanlı	Alacalı	Bozhane				380 000 000
Çatalca- Kabakça	97,13	0,5	1,1	0,40	0,07	0,10	0,06	0,3	330 000 (3)
Çatalca- Akalan	97,40	0,4	0,3	0,59	0,06	0,09	0,07	0,3	390 000 (3)
Çatalca-Yalıköy	99,10	0,11	0,34	0,062	0,01	0,024	0,01	0,11	13 000 000 (1)
Çatalca-Çiftlikköy	97,82	0,6	0,6	0,17	0,01	0,03	0,07	0,3	-
Çatalca-Karatepe	96,34	0,6	1,4	0,39	0,05	0,10	0,05	0,4	-
Çatalca-Elbasan	93,24	0,5	3,6	0,71	0,12	0,07	0,20	1,2	-
Çatalca TOPLAM									16 700 000
Sarıyer	97,4	0,13	1,1	0,18	0,02	0,10	0,04	0,31	960 000 (1+2+3)
Yalova-Elmalık-Torluk	98,81	0,31	1,21	0,12	0,03	0,14	0,05	0,24	1 900 000 (K)
Yalova-Dikimce	99,02	0,11	0,12	0,02	0,23	0,02	0,04	0,42	800 000 (1)
Beykoz (polonezköy+An.Feneri)	-	-	-	-	-	-	-	-	000 000(K) + 60 000 (1)
İstanbul TOPLAM									410 000 000
Tekirdağ-Saray	91,63	0,075	4,44	2,55	0,07	0,05	0,04	0,31	6 338 773 (2)
Zonguldak-Merkez- Kozlu	98,40	0,38	0,72	0,02	0,01	0,02	-	0,25	134 771 875 (1)
Zonguldak-Merkez- Kardeşler	97,84	0,21	0,97	0,01	-	0,06	0,01	0,13	132 500 000 (1)
Sinop	89,95	2,8	4,3	0,58	0,30	0,19	0,60	0,6	37 000 000 (1+3)
TOPLAM									720 610 648

1-Mümkün Rezerv 2-Görünür Rezerv 3-Muhtemel Rezerv K-Kaynak Rezerv

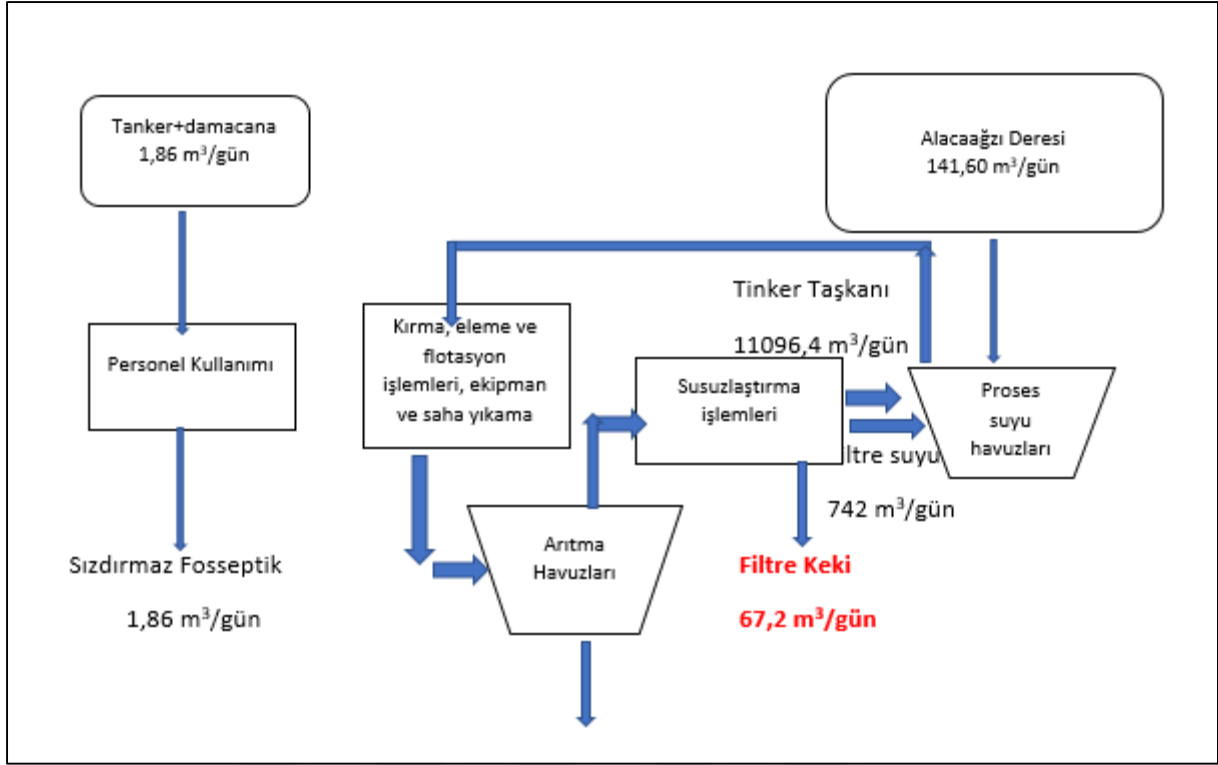
Kurşun ve İpekoğlu (1995), Zonguldak bölgesinde bulunan kuvars kumları oldukça iyi kalitede olduğunu, %98,40 SiO₂, %0,38 Fe₂O₃ içeriğine sahip olduğunu belirtmişler ve bu bölgedeki kuvars kumunun cam-seramik, metalürji refrakter, silika tuğla ve tuğla enstitüsünde kullanılabilir kalitede olduğu tespit etmişlerdir.

3.1 EREĞLİ BORCAM MADENCİLİK TİCARET VE SANAYİ ANONİM ŞİRKETİ KUVARS KUMU HAZIRLAMA TESİSİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Ereğli Borcam Sanayisi Kuvars Kumu Hazırlama Tesisi, Zonguldak ili Karadeniz Ereğli İlçesi Terzi köyü Alacağzı mevkiinde, toplam 85.655 m² toplam alana sahiptir ve yılda yaklaşık 95 bin ton silis kumu üretimi yapmaktadır.

Stok sahasına gelen hammadde (silis kumu cevheri), kalite farklılığı göz önüne alınarak ayrı ayrı stok alanlarında depolanıp stok sahasından gelen kuvarsit kırma eleme tesisine aktarılır. Burada kırma eleme tesisi kapasitesi 60 ton/saattir. Kırma eleme tesisinde istenilen boyutlara getirilen kuvars kumu, bant konveyörlerle öğütme ünitesine aktarılır. Öğütme ünitesinden iki katlı; birinci katı 0,85 mm ve ikinci katı 0,5 mm titreşim elekten yaş olarak kuvars kumu geçirilir. 0,5 mm'den büyük boyutlu kuvars kumu öğütülmek üzere otojen değirmene gönderilir, 0,5 mm'den küçük kuvars kumu pompa haznesine beslenir. Otojen değirmende öğütülen kum ise tekrar 0,5 mm göz açıklığı bulunan titreşim eleğine gönderilir. Tamamı 0,5 mm'ye indirilen kuvars kumu içerisinde 0,1 mm boyutlu kuvars kumunun ayrılması için hidrosiklonlara beslenir. Hidrosiklonlarda ayrılan 0,1 mm boyutlu atık ürün tinkerlere gönderilirken, hidrosiklon altı kondisyon tankına beslenir. Kondisyon tankından malzeme içerisindeki demirli minerallerin ayrılması için flotasyon ünitesine gönderilir. Flotasyon tesisinde dünyada en çok kullanılan köpük flotasyonu uygulanmaktadır. %99 oranında kuvars kumu, yaklaşık %1 oranında demir mineralleri birbirinden ayrılmaktadır. Silis kumu içerisinde kalan, ince taneli ürünü atmak için çamur pompasıyla hidrosiklon ünitesine gönderilir. Tesiste 350 ton kapasiteli 16 adet silo bulunmaktadır. Ürünler bu silolarda stoklanmaktadır (Işık vd. 2016).

Ereğli Borcam Sanayisi silisli kum atığı malzemesi, proste kullanılan proses sularından kaynaklanan filtre kekine verilen isimdir. Sistemde kullanılan proses suları ve oluşan filtre keki (silisli kum atığı) Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Su kullanımı ve filtre keki oluşum şeması (Çizen Serkan Ören) (Işık vd. 2016).

Şekil 3.1'deki su kullanımı ve filtre keki (silisli kum atığı) oluşum şeması incelendiğinde, tesiste günlük $67,2 \text{ m}^3$ silisli kum atığı oluştuğu görülmektedir.

Firmannın Zonguldak Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'ne verdiği Atıksu Arıtma Tesisi Teknik Raporu'nda, Ereğli Borcam Sanayisi atığı olan arıtma çamurlarının (silisli kum atığı) inert atık olduğu ve atıkların Maden Atıkları Yönetmeliği yürürlüğe girene kadar tesis içerisinde depolanacağı belirtilmiştir.

BÖLÜM 4

TERMİK SANTRALLERDEN KAYNAKLANAN UÇUCU KÜL VE SİLİS KUMU HAZIRLAMA SANAYİSİ ATIKLARI (SİLİSLİ KUM ATIĞI) KULLANIM ALANLARI

Termik Santrallerden oluşan uçucu kül ve Silis Kumu Hazırlama Tesislerinden oluşan Atıksu arıtma tesisi filtre keki (silisli kum atığı), bazı sanayi kuruluşlarında hammadde ya da yan ürün olarak kullanılabilir.

4.1 UÇUCU KÜL (FLY ASH) KULLANIM ALANLARI

Termik santrallerde kömür yakılarak elektrik üretilmektedir. Elektrik üretimi esnasında oluşabilecek çevre sorunlarını engellemek için bazı çevreci teknolojiler geliştirilmiş ve bunların kullanılması yasalarla zorunlu hale getirilmiştir.

Termik santrallerde kömürün yakılması sonucu oluşan küllerin atmosfere yayılmasını engellemek üzere Elektrostatik Filtreler (ESF) kullanılmaktadır. ESF’de yüksek voltajda doğru akımla yüklenmiş olan plakalar arasından geçen baca gazının içindeki parçacıklar ESF içerisindeki elektromanyetik alanın gücüyle plakalara doğru yönelir ve bu plakalara çarparak akış yönüne dik ve aşağıya doğru düşüp bunkerlere dolar (ZETES 3 ÇED Raporu 2012).

ESF’lerde tutulan uçucu küllerin puzalonik özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe değişik amaçlarla kullanımı sağlanmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılan uçucu küller termik santrallerin çevresel etkilerini azaltması ve inşaat sektöründe kullanılan doğal malzemenin yerine geçmesi sayesinde doğal malzeme ve enerji tüketiminden kazanç elde edilmesini sağlamaktadır. Endüstriyel atıklar içerisinde en yüksek miktarlarda bulunan uçucu küller, bu liderliğini inşaat sektöründeki kullanım oranında sağlayamamaktadır (Baykal vd. 1993).

Önceki çalışmalar incelendiğinde uçucu küllerin kullanıldığı sanayi alanları aşağıda sıralanmıştır. (Taş vd. 2018, Ünal vd. 2015, Yılmaz 2016, Erdoğan 1993, Intron 1992, Yılmaz 1992, Helmuth 1987, Verma 1998, Toros 1987, İlhan 1995, Erdinç 1995, Ergüt 1994, EİE 1979, Atanur 1971, Hamamcı 1991, Alataş 1996, Özturan 1990, Fincan 1996, Erşan 1996, Martin vd. 1990).

- Uçucu Kül ve Bayburt Taşı ile Zemin Stabilizasyonu
- Yatağan Uçucu Külünün Yapısal Alanda Kullanılabilirliğinin Araştırılması
- Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı
- Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Endüstriyel Atıklarının İnşaat Sektöründe Kullanımı
- Uçucu Küllerin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması
- Uçucu Küllerin Çimento Üretiminde Kullanılması
- Uçucu Küllerin Agrega Olarak Kullanılması
- Uçucu Küllerin Betonda Kullanılması
- Uçucu Küllerin Tuğla Üretiminde Kullanılması
- Uçucu Küllerin Seramik ve Cam Üretiminde Kullanılması
- Uçucu Küllerin Jeoteknik Çalışmalarda Kullanılması
- Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmede Kullanılması
- Uçucu Küllerin Dolgularda Kullanılması

4.1.1 Uçucu Külün Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği

Killi bir zemine %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında uçucu külün ilavesi sonucunda tek eksenli dayanım değerlerinde uçucu külün %25 oranında ilavesi en yüksek dayanımı verdiği göstermektedir (Yılmaz 2016).

Düşük Plastisiteli killi bir zemine kütlece %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranında Soma ve Çatalağzı uçucu külü ilavesinde numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri yapılmış ve deneyler sonucunda kil zeminin dayanım, şişme ve dispersibilite özelliklerinde iyileşmeler olduğu görülmüştür, ayrıca Soma uçucu külünün Çatalağzı uçucu külüne oranla zemin iyileştirmede daha etkili olduğu saptanmıştır (Ünver 2015).

Uçucu küller kireçle birleştiklerinde bağlayıcı özellik kazanan puzolanik özellikli malzemelerdir. Uçucu küller su ve kireç ile karıştırıldıktan sonra zeminlerde dayanım artar.

Dayanım özelliği zaman geçtikçe yavaş yavaş artmaktadır. CaO miktarı yüksek olan uçucu küller, CaO miktarı düşük olan kllere kıyasla daha iyi puzolanik özellik göstermektedir (EİE 1979).

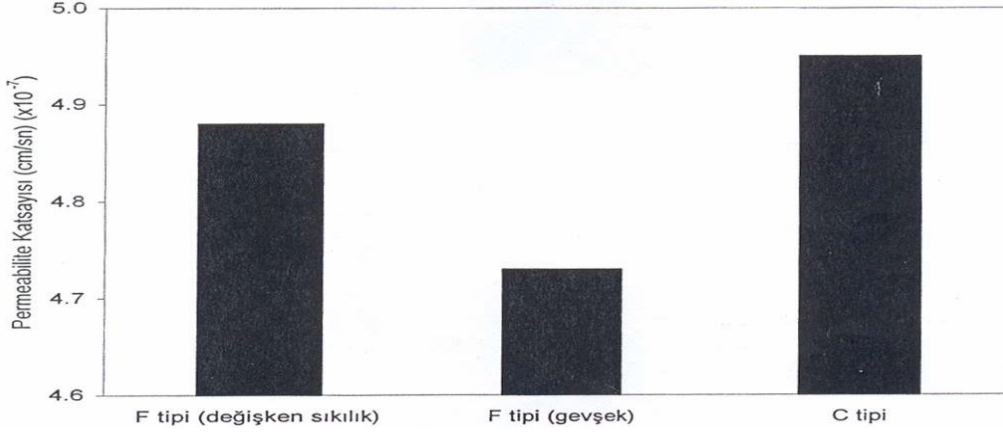
Uçucu küllerin puzolanik özelliklerinde, fiziksel ve kimyasal özellikleri belirleyici rol oynamaktadır. Bu özelliklerde kömürün yakma sisteminden, kömürün yanmadan önceki gtlme boyutuna ve evre kirliliğini azaltması için kömürle harmanlanan katkı maddelerinin de rolü belirleyicidir. Uçucu külde görülen bu farklılıklar puzolanik aktivite ve standart puzolanik aktivite testlerinin yapılmasını engellemektedir. Puzolanik aktiviteye ilaveten linyit kömürünün yakılması sonucu oluşan uçucu küllerde kendi kendine sertleşme özelliği olduğu görülmektedir. Bu küller su ile karıştırılıp kompaksiyona tabi tutulduklarına imentolaşmadan dolayı sertleşmektedirler (Joshi ve Nagaraj 1987).

Prof. Dr. Yıldız Wasti, uçucu küllerin geoteknik özelliklerini incelemiş ve uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine kullanılabileceğini ve yüksek plastisiteli killerin plastisitelerini düşürmede kullanılabileceği sonucuna varmıştır (Wasti 1990).

4.1.2 Uçucu Külün Geçirgenlik (Permeabilite) Katsayısına Etkisi

Prof. Dr. Yıldız Wasti yaptıkları çalışmalarda uçucu küllerin özelliklerine ve miktarına bağlı olarak, yeterli sıkışma ile 10^{-7} cm/sn' den daha düşük permeabiliteler elde edebildiklerini belirtmişlerdir. C tipi uçucu küllerin sertleşme özelliklerinden dolayı, arazi Şartlarında sıkıştırmanın su ile karıştırdıktan sonra hızlı bir Şekilde gerçekleştirilmesi sıkıştırma enerjisi ve su muhtevasının sıkı kontrolü gerekmektedir. Wasti araştırmalarında uçucu küllerin geçirgenliği azaltıcı etkisi nedeniyle, evre geoteknolojisi alanında tehlikeli atık veya p depolama alanlarında sızdırmazlık tabakası olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Wasti 1993).

Şekil 4.1' de Wasti' nin deneysel çalışmaları neticesinde elde ettiği F ve C sınıfı uçucu kllere ait permeabilite katsayıları gösterilmektedir.



Şekil 4.1 F ve C sınıfı uçucu küllerin permeabilite katsayı değerleri (Wasti 1993).

Günel (1996), Seyitömer uçucu külüne %20 oranında Kemberburgaz kilinin karıştırılması sonucunda elde edilen karışımın permeabilite katsayısının $1,8 \times 10^{-7}$ cm/sn olarak hesaplandığını belirtmiştir. Ayrıca elde edilen bu değerın Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Örgütü (US EPA)'nın Katı Atık Depolama Sahalarının zemininde sızdırmaz malzeme olarak kullanılabileceğini de belirtmektedir (Wasti 1993).

4.2 KUVARS (SİLİS) KUMUNUN KULLANIM ALANLARI

Granit türü kayaların ayrışması sonucu oluşan 2 mm'den küçük kuvars (SiO_2) taneciklerine silis kumu denmektedir. Kuvarsitin öğütülmesi ile sentetik olarak elde edilebilir. Silika tuğla üretiminde, Döküm sanayi, Refrakter sanayinde ve Cam sanayinde kullanılmaktadır. Kullanım alanlarını belirleyen parametreler Endüstrilerin gereksinimlerine uygun fiziksel özellikler ve SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Co , Cr , P_2O_5 miktarlarıdır. (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

4.2.1 Cam Sanayi

Cam sanayisinde kullanılacak kumun genel olarak SiO_2 içeriğinin %99' un altında olmaması istenmektedir. Cam sanayisinde önemli olan kıstas safsızlıkların miktarının kararlı olmasıdır. Bu durumun sağlanması halinde %96 SiO_2 içeriği kabul edilebilir. Fe_2O_3 içeriği ise %0,02 – 0,1 arasında değişebilir. Maksimum Fe_2O_3 içeriği Çizelge 4,1'de gösterilmiştir (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

Çizelge 4.1 Cam tipleri için max. Fe₂O₃ içeriği (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

Cam Tipi	Max. Fe ₂ O ₃
Optik Ultraviyole Cam	0,01
İyi Kalitede Kristal Cam	0,15
Kristal Kesme Cam	0,02
Renksiz Cam	0,03
Ampul Tüp Cam	0,05
Ayna	0,10
Pencere Camı	0,20
Adi Kaim Cam	0,50
Yeşil-Siyah Cam	0,50
Yeşil Cam	0,30
Sarı Cam	1,1

Cam sanayisinde kullanılacak olan silis kumunun dane çapının düz camda 1mm – 125 mikron arasında olması, ortalama boyutunun yaklaşık 250 mikron olması istenir. Çeşitli kalitede renksiz cam üretiminde kullanılacak olan kuvars kumunun özellikleri Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Çeşitli kalitelardaki renksiz cam üretiminde kullanılacak olan silis kumunun özellikleri (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

%	Optik Cam	Kaliteli Dekoratif Cam	Cam Kap
SiO ₂	99,5	99,5	98,5
Fe ₂ O ₃	0,08	0,013	0,03
TiO ₂	0,03	-	-
Cr ₂ O ₃	0,002	0,0002	0,0006

4.2.2 Döküm Sanayi

Silis kumunun SiO₂ içeriği %98-99 arasında olması döküm sanayinde istenmektedir. Bu sanayide silis kumunun kullanılmasının önemi silisin ergimiş metalden yayılan basınca dayanması, ayrıca gazların ve buharın geçebileceği kadar geçirgen olmasıdır. Döküm sanayisinde genel olarak Fe₂O₃, CaO ve alkalilerin toplamı %0,6’dan fazla olmaması, kızdırma

kaybının %0,4, tane boyutlarının ise 100-700 mikron arasında ve sinterleşme noktasının da 1500 °C olması istenmektedir (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

4.2.3 Refrakter Sanayi

Silisin iyi bir refrakter özellik gösterebilmesi için 1500 °C' de ısıtılması gerekmektedir. 1500 °C' de kuvars taneleri kristobalit ve tridimite dönüşerek ergime sıcaklığının 1700 °C' ye yükselmesini sağlamaktadır. Refrakter tuğla yapımında ana hammadde kuvarsittir. Bazı uygulamalarda %25'e varan miktarlarda kuvarsit yerine silis kumu da kullanılabilir. Genel kullanım olarak bileşenlerin limit değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

Çizelge 4.3 Refrakter sanayisinde kullanılan bileşenleri limit değerleri

Bileşen	%
SiO ₂	95-99
Fe ₂ O ₃	0,3-1,3
Al ₂ O ₃	0,1-2,8
CaO	0,2-2,4
Na ₂ O+K ₂ O	0,2-1,5

Düşük kaliteli refrakter tuğla yapımında ise, toplam SiO₂ içeriğinin %87-%96 arasında olan kumtaşları kullanılabilir. Refrakter tuğla yapımında kullanılan silis kumunun 1700 °C ateşe dayanıklı olması istenmektedir. Semi-silika refrakter tuğlalar, %78 – 92 SiO₂ içeren kum + kil karışımlarından yapılabilir. Refrakter sanayisinde önemli bir ürün olan silikon karpit, silis kumu ve petrol kokunun elektrik ocaklarında 2400 °C' ye ısıtılması ile elde edilmektedir. Bu alanda kullanılan silis kumunun SiO₂ içeriğinin %99 ve Fe₂O₃, Al₂O₃ içeriklerinin ise %0,1' den az olması istenmektedir (Kurşun ve İpekoğlu 1995).

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Eren Enerji ZETES 1 Termik Santraline ait uçucu kül örnekleri ve Ereğli Borcam Sanayisi silis kumu hazırlama tesisi atığı olan silisli atık kum malzemesinin farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilecek malzemelerin (yönetmelikte belirtilen sınır değerleri sağlayacak) özellikleri sağlanması için deneysel çalışmalar planlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Termik Santrale ait uçucu küller 10'ar kiloluk poşetlerle silo ağzından dolum gerçekleştirilerek deneylerde kullanılmak üzere toplam 20 poşet, silis kumu hazırlama tesisi atığı olan silisli atık kum malzemesi de 25'er kiloluk çuvalar ile toplam 20 çuval olarak deneylerin yapılacağı Bülent Ecevit Üniversitesi inşaat fakültesi zemin mekaniği laboratuvarında muhafaza edilmiştir. Numunelerin temini ve deneylere hazırlanma aşaması Şekil 5.1 de gösterilmiştir.

Zeminde en büyük kuru birim hacim ağırlığını veren su muhtevasının bulunması ile ilgili bir deney olan TS1900-1 şartlarını sağlamak üzere 5 farklı numune hazırlanmış ve numune özellikleri numunelerin hazırlanması Bölüm 5.1'de verilmiştir. Numunelerin hazırlandığı silisli kum atığı malzemesi ve uçucu kül örneklerinin kimyasal analizleri gerçekleştirilmiş ve Bölüm 5.2 1 de analizler açıklanmıştır. Bu analizlerle uçucu küllerin ASTM C 618 ve TS EN 197-1 sınıflandırılmaları hedeflenmiştir.

Toprakların sınıflandırılmasında, üniformluk ve derecelenme katsayılarının belirlenmesinde, zemin mekaniğinde, barajlarda çekirdek ve filtre malzemelerinin seçilmesinde toprakların tane boyutlarının saptanması gerekmekte olup Dane Boyut Dağılımı Analizleri (Hidrometre Analizi) gerçekleştirilmiş ve Bölüm 5.2.2 de verilmiştir.

Zeminlere ait kıvam limitlerinin belirlenmesi Plastiklik veya plastisiteye bağlı olup ince taneli zeminlerin kırılmadan şekil verilebilme özelliğini belirlemek için Likit Limit ve Plastik Limit

Deneyleri (Atterberg Limitleri / Kıvam Limitleri) gerçekleştirilmiş ve deneylerle ilgili bilgiler Bölüm 5.2.3 de verilmiştir.

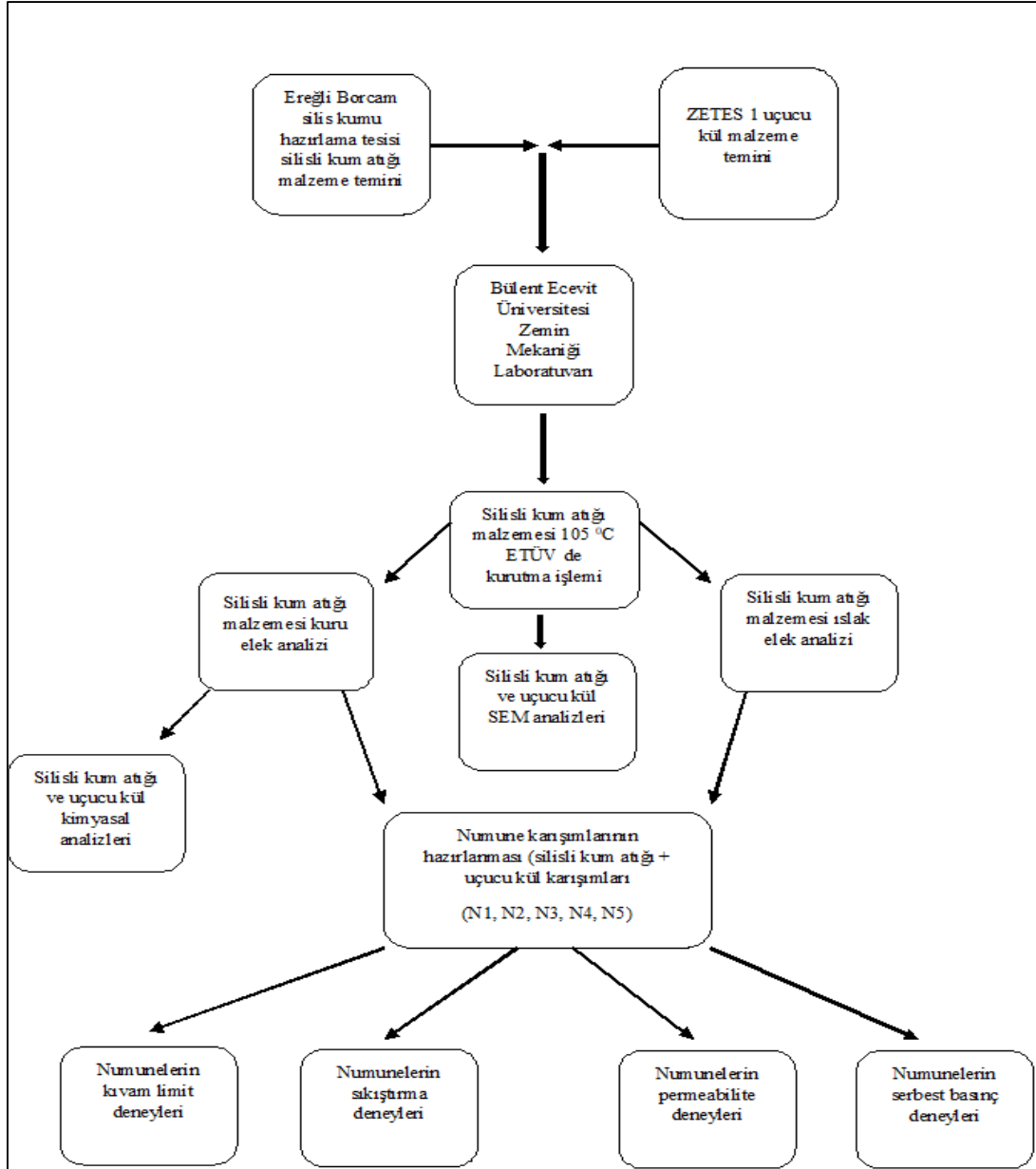
Bölüm 5.2.4 de tanımladığı şekilde zeminde en büyük kuru birim hacim ağırlığını veren su muhtevasının bulunması için Standart Proctor Deneyi (TS1900-1) gerçekleştirilmiştir.

Optimum su muhtevaları belirlenen numunelerin permeabilite katsayılarını belirlemek amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyi gerçekleştirilmiş ve Bölüm 5.2.5 de sunulmuştur.

Serbest (Tek Eksenli) Basınç Dayanımının Tayini temel zeminlerinin üzerine gelecekleri yük karşısında gösterecekleri direnci tanımlamak amacı ile yapılmış ve Bölüm 5.2.6 da verilmiştir.

Örneklerin SEM görüntüleri ile fiziksel özelliklerinin irdelenmesi amaçlanmış ve Bölüm 5.2.7 de verilmiştir.

Bu deneylerle hazırlanan numunelerde malzemelerin karışım oranının belirlenmesi ve en iyi geçirimsizlik katsayısına sahip numunelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 5.1 Numunelerin deneylere hazırlanması aşamasını gösteren akım şeması.

5.1 NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Termik Santralden alınan uçucu kül numunesi kuru halde olduğu için herhangi bir işlem yapılmadan nem almayacak ortamda külün depolaması gerçekleştirilmiştir. Silis kumu hazırlama tesisine ait silisli kum atığı malzemesi ise nemli bir malzeme olarak temin edilmiş ve deneylerde kullanılmak üzere TS 1900-1 Standardı 4.3.6 Notlar Not 2¹ de belirtilen şekilde ve 5.1.1.1 deney 1 (A): Etüvde kurutma metoduna göre 105±5 °C etüvde kurutularak içerisindeki suyun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Su içeriğinden arındırılan silisli kum atığı malzemesi deneysel çalışmalardaki standart boyutları elde etmek ve her bir deney için farklı dane boyutlarını sağlamak üzere elek analizinden geçirilerek istenilen boyutlara getirilmesi sağlanmıştır.

Deneysel çalışmalara uygun hale getirilen atık malzemeler, katı atık düzenli depolama sahalarının zemininde kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılacak olan deneyler için beş farklı numune haline getirilmiştir. Numuneler ve karışım oranları Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Numuneler ve karışım oranları.

Numune No	ZETES 1 Termik Santralİ Uçucu Kül	Silis Kumu Hazırlama Tesisi Silisli Kum Atığı
Numune 1	%100	-
Numune 2	-	%100
Numune 3	%10	%90
Numune 4	%20	%80
Numune 5	%30	%70

Çizelge 5.1 Numuneler ve karışım oranları incelendiğinde; Numune 1 %100 oranında ZETES1 Termik Santrali uçucu külü, Numune 2 %100 oranında Borcam Sanayisi silisli kum atığı malzemesi kullanıldığı, Numune 3, Numune 4 ve Numune 5’te de ZETES 1 Uçucu kül

¹ Bazı zemin numuneleri (105±5) °C sıcaklıklı etüvde kurutulduklarında bu zeminlerin bazı özelliklerinin geri kazanılmayacak biçimde değiştiğinden açıkta kurutulmaları önerilmektedir. Bu değişim pratikte pek çok zemin için önemsizdir. Kıvam limit deneylerinde kullanılacak numunelerin etüvde kurutulmaları gerekmektedir. Açıkta kurutma işlemi numuneler laboratuvarlarda tepsilere serili şekilde 3-4 günde kurutulabilir.

numunesine toplam kütlenin %10, %20 ve %30'u oranında Borcam Sanayisi silisli kum atığı malzemesi karıştırıldığı gösterilmektedir.

5.2 ANALİZLER

Termik Santral uçucu külü ve Silik kumu hazırlama tesisi silisli kum atık malzemelerinden numune alma işlemlerinin ardından kompaksiyon, kıvam limit, permeabilite, serbest basınç, fiziksel özellik (morfoloji), kimyasal analiz çalışmaları, atık malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelenmesi adına Çizelge 5.2'deki deney programı uygulanmıştır.

Çizelge 5.2 Deney programı.

Deney No	Deney Adı
1	Numunelerin Kimyasal Analizleri
2	Dane Çapı Dağılımlarının Bulunması İçin Hidrometre Analizi
3	Likit Limit Tayini (Cassagrande yöntemi), Plastik Limit Tayini ve Plastisite İndisinin Bulunması Tayini
4	Zemin Sıkıştırma Deneyleri (Standart Proctor Deneyi)
5	Düşen Seviyeli Permeabilite (Geçirimsizlik) Deneyi
6	Serbest (Tek eksenli) Basınç Dayanımının Tayini
7	Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi

Termik santral katı atıkları ve silis kumu hazırlama tesisinden kaynaklanan katı atıkların düzenli depolama tesislerinin zemininde kullanılabilecek özellikte olup olmadıkları araştırıldığından, 26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik ve 1999/31/EC sayılı Atık Depolama Sahalarıyla ilgili kanun tasarısında belirtildiği üzere atık depolama zemininde kullanılacak malzemenin bazı özellikleri mevcuttur. Bu özellikler aşağıda listelenmiştir;

- Kullanılacak malzemenin kil veya eşdeğeri malzeme olma özelliği taşıması
- Kullanılacak malzemenin geçirgenlik katsayısı 1.sınıf düzenli depolama sahaları için 1×10^{-9} m/sn. ve en az 5 metre,
- 2. Sınıf düzenli depolama sahası için geçirgenlik katsayısı 1×10^{-9} m/sn. ve en az 1 metre,
- 3. Sınıf düzenli depolama sahaları için ise geçirgenlik katsayısı 1×10^{-7} m/sn. ve en az 1 metre olacak şekilde olması gerekmektedir.

26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik ve 1999/31/EC sayılı Atık Depolama Sahalarıyla İlgili Kanun Tasarısı'na göre katı atık düzenli depolama alanlarının zemininde kullanılacak olan malzemelerin kil veya eşdeğeri bir malzeme ve geçirgenlik katsayısının da (k) 10^{-7} m/sn ile 10^{-9} m/sn arasında olması gerektiği anlaşılmaktadır (Official Journal Of The European Communities L 182/1 1999).

26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik ile birlikte Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı US *Environmental Protection Agency* (US EPA) tarafından yayınlanan akademik çalışmalarda incelenmiş ve serbest basınç dayanımı deneyleri, likit limit ve plastik limit değerleri de incelenmiştir (US EPA 2007).

5.2.1 Kimyasal Analizler ve Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Atık malzemelerin kimyasal özelliklerinin incelenmesi özellikle uçucu küllerin sınıflandırılması ve Silis kumu malzemesinin kullanım alanları belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Termik Santralden alınan uçucu kül ve Silis kumu hazırlama tesisi silisli kum atığı örneklerinin X ışını uyarımlı ışınma yönteminin kullanıldığı XRF (X-Ray Fluorescence) cihazı ile örneklerin bileşiminde bulunan özellikle SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarları öncelikli olmak üzere kireç ve diğer alkali oluşumları %'si belirlenmesi hedeflenmiştir. Uçucu küller, genel olarak kimyasal yapılarına göre sınıflandırılmaktadır. CaO miktarına bağlı sınıflandırma şekli buna örnek gösterilebilir. (Aruntaş 2006). Kimyasal ve mineralojik yapılarına göre sınıflandırma da yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda kullanılan sınıflandırma metotları ise ASTM C 618 ve TS EN 197-1 sınıflandırmalarıdır (Akkaya 2013).

Genel sınıflandırmaya göre uçucu küller;

- CaO miktarı %10' dan az olan düşük kireçli ya da düşük kalsiyumlu uçucu küller,
- CaO miktarı %10' dan fazla olan yüksek kireçli ya da yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak sınıflandırılmaktadır (Akkaya 2013).

Kimyasal ve mineralojik yapılarına göre uçucu küller;

SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarlarının belirli bir % değerinde uçucu külün yapısında bulunması prensibine göre genel bir sınıflandırma metodudur.

- SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 (S+A+F) miktarlarının %70' den fazla olduğu ve köken olarak taş kömürünün yakılması sonucu oluşan siliko aluminöz uçucu küller,

- SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 (S+A+F) miktarlarının %50 ile %70 arasında değiştiği linyit kökenli silika-kalsik grubu uçucu küller,
- %50 ile %70 oranında (S+A+F) içerikli fakat farklı olarak SO_3 ve kireç miktarının nispeten fazla olduğu, linyit kökenli kömürlerin yakılması sonucu oluşan sülfo-kalsik grubu uçucu küller (Aruntaş 2006).

ASTM C 618'e göre sınıflandırmada uçucu küller;

SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarlarına da bağlı olmakla beraber uçucu külün yapısındaki CaO miktarını da esas alan bir Amerikan standardıdır.

- Taş kömüründen elde edilen (S+A+F) içeriği %70' in üzerinde ve CaO oranı %10'un altında olan F sınıfı uçucu küller,
- Yarı bitümlü ya da linyit kömürlerinin yakılması sonucu %50 ile %70 arasında S+A+F içerikli ve CaO oranı %10' un üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir (Aruntaş 2006).

TS EN 197-1'e göre sınıflandırma da ise uçucu küller;

- V sınıfı (silisli) uçucu küller, çoğunlukla puzalonik özelliğe sahip küresel taneciklerden meydana gelen küllerdir. Esas olarak silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)' den oluşur. Bu küllerde reaktif kireç oranı %10'dan az, reaktif silis miktarının da %25' den fazla olması gerekmektedir.
- W sınıfı (kalkersi) uçucu küller, esas olarak Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO' dan oluşan küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO miktarı %10' dan fazla, reaktif silis miktarı ise %25' den fazla olmalıdır (Aruntaş 2006).

5.2.2 Dane Boyut Dağılımı Analizleri (Hidrometre Analizi)

Toprakların sınıflandırılmasında, niformluk ve derecelenme katsayılarının belirlenmesinde, zemin mekaniğinde, barajlarda çekirdek ve filtre malzemelerinin seçilmesinde toprakların tane boyutlarının saptanması önemlidir. Ayrıca, topraktaki tanelerin (akıl, kum, silt, kil) yüzde miktarlarının saptanması; toprak için diğer mühendislik özellikleri hakkında da önemli bilgiler edinilmesini sağlamaktadır. Bu zellikler, hidrolik iletkenlik, porozite, su tutma özellikleri, dayanım özellikleri, vb.dir. Elek zmlmeleri, herhangi bir toprak malzemesinin tane boylarının ve bu değişik boydaki tanelerin ağırlık oranlarını saptamak için yapılan zmlmelere denir. Bu ise, iri elek özümlemesi ve ince elek özümlemesi diye iki aşamada yapılır. Kil ve silt boyu tanelerin saptanması için de yaş özümleme (hidrometre özümlemesi) yapılır. Elek ve hidrometre zmlmeleri sonucunda malzemeyi oluşturan değişik boylardaki

tanelerin ağırlık olarak yüzde miktarları belirlenir ve yarı-logaritmik kâğıdın, logaritmik ekseninde tane boyu, aritmetik ekseninde ise yüzde elek altı ağırlıkları kullanılarak Tane Boyu Dağılım Eğrisi çizilir. Bu eğri ile malzemeyi oluşturan çakıl, kum, kil ve silt miktarları belirlenir, değişik amaçlı kullanımlar için toprak sınıflaması yapılır (Özaydın 2011).

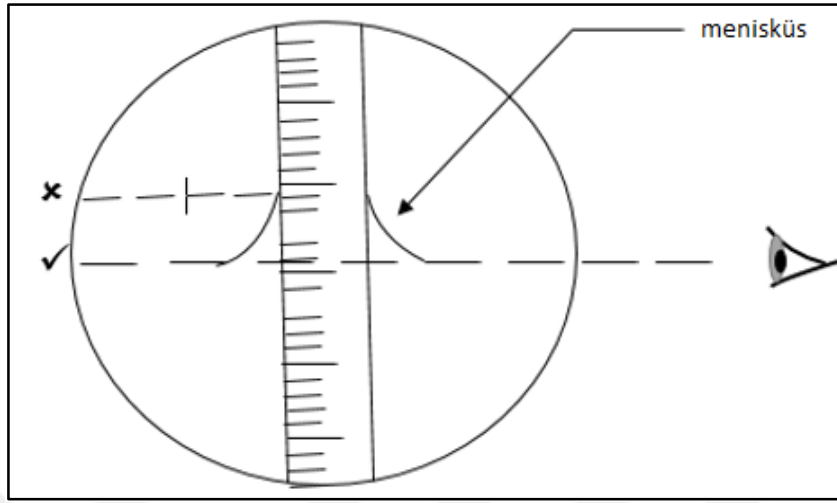
Tane çapı 0,075 mm'den küçük veya 200 no'lu elekten geçen zeminleri eleklerden elemek ve çaplarına göre ayırmak, zemin tanelerinin gözle görülemeyecek kadar küçük olmalarından dolayı mümkün olamamaktadır. Bu tür zeminler için ıslak analiz (Hidrometre, pipet) yapılmaktadır. Hidrometre analizi, bu tür küçük çaplı zeminlerin tane sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Yılmaz vd. 2009).

Hidrometre analizi için numune 200 nolu elekten geçirilir, 50-100 gr elenmiş numune alınır ve %4'lük Sodyum Fosfat (NaPO_3)₆ çözeltisi içerisine dökülür (50 gr için 125 gr çözelti uygundur). Numune bu çözelti içerisinde 16 saat bekletilip kil ve silt boyutundaki tanelerin tamamen ayrışması sağlanmış olur. On altıncı saatin sonunda çözelti karıştırıcı ile karıştırılıp 1000 ml'lik süspansiyon silindire dökülür ve saf su ile 1000 ml'ye tamamlanır. Silindirin ağzı kapatılarak 60 saniye süreyle silindir çalkalanır ve tam süspansiyon haline getirilir. Numune 20 °C'deki sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir (Yılmaz vd. 2009).

Bu işlemlerden sonra; hidrometre, süspansiyon silindirine daldırılarak 30. saniyede ilk okuma yapılır. Okumalar; 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120 ve 240. dakikalar ile 8, 24 ve 48. saatlerde hidrometre okumaları Hidrometre deneyinde kullanılan EK-6a' da ilgili alanlara yazılır. 1, 2, ve 4. dakikalarda yapılan okumalardan sonraki okumalarda hidrometre süspansiyon silindirinden çıkartılarak bir sonraki okumaya kadar saf su dolu mezür içerisinde bekletilir. Hidrometre okumaları yapıldığı zamanlardaki süspansiyon sıcaklıkları da ölçülür ve Hidrometre deneyinde kullanılan EK-6a' deki ilgili sütunlara kaydedilir. Bu şekilde belirli zaman aralıklarında süspansiyon yoğunluk değişimleri ölçülüp, Stokes Yasası'na göre belirli tane boylarında süspansiyonda kalan yüzde miktarları ve bu yüzde miktarına karşılık gelen tane çapları ilgili eşitlikler kullanılarak hesaplanır (Yılmaz vd. 2009).

Hidrometre cihazındaki okumalar, menisküs olayı ile hidrometre cidarı üzerinde yükselen su seviyesinde yapılmalıdır (Şekil 5.2). Bu okuma değeri çizelgeye "ilksel hidrometre okuması (Rh')” olarak kayıt edilir. Gerçek hidrometre okuması (Rh) ise Rh' değerine sıvı seviyesi ile menisküs tepe okuması arasındaki fark (Cm) eklenerek bulunur. Cm değeri, sıvı seviyesi ile

menisküs tepe okuması arasındaki fark olarak gösterilir. Bu değer her hidrometre için sabit olup berrak bir suya hidrometre cihazı konularak kolayca belirlenebilir.



Şekil 5.2 Hidrometre okuması sırasında oluşan menisküs (Çizen: Serkan Ören 2017) (Yılmaz vd. 2009).

Hidrometre deneyinin yapılışı ve hidrometre okumaları Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Hidrometre deneyi yapılışı.

İnce Elek Çözümlemesi

Kırk sekizinci saatin sonunda sedimentasyon silindirindeki numune ve su 200 no'lu eleğe dökülür ve su ile iyice yıkanır. Yıkama işlemi ile kil ve silt boyutundaki çamur 200 no'lu elekten geçerek, 0,075 mm.'den büyük taneler elek üzerinde kalır. Elek üzerindeki numuneler bir kaba alınır ve 110 °C 'deki fırında 24 saat kurutulur, kurutulan numune fırından alınarak

desikatöre alınır ve 15 dakika soğuması beklenir. Fırında kurutulmuş numunenin ağırlığı bulunur, bu işlem ile ayrıca silt ve kil boyutundaki numunenin yüzde miktarı da hesaplanabilir. Kurutulan numune 20, 40, 60, 100, 140 ve 200 nolu eleklerden oluşan elek takımında elenerek her bir eleğin üzerinde kalan numune ağırlıkları tartılarak eleklerden geçen toplan ağırlıkları ile bunların yüzde miktarları da ayrı ayrı belirlenir (Yılmaz, Yıldırım ve Keskin 2009).

Hidrokopik Nem Düzeltme Katsayısı

$$HDK = \frac{FKa}{Hka} \quad (5.1)$$

HDK : Hidroskopik nem düzeltme katsayısı

Fka : Numunenin fırında kurutulmuş ağırlığı (g)

Hka : Numunenin havada kurutulmuş ağırlığı (g)

Hidrometre Çözümlemesi

$$P = \left(\frac{Gs}{Gs-1} \right) * \left(\frac{100}{Wo} \right) * (Rh + Mt - Cd) \quad (5.2)$$

P : Süspansiyonda kalan yüzde

Gs : Deneyde kullanılan zeminin özgül ağırlığı

Wo : Hidrometre çözümü için kullanılan zeminin fırında kurutulmuş ağırlığı (g)

Rh : Düzeltmiş hidrometre okuması

Mt : Süspansiyon sıcaklık düzeltmesi (EK-6b'den)

Cd : Toprağı dağıtıcı madde için kullanılan düzeltme

5.2 eşitliğinde verilen süspansiyonda kalan yüzde miktarının tüm deney numunesini temsil etmesi amacıyla; bulunan yüzde miktarının 10 no'lu elekten geçen numune yüzde miktarına göre hesaplamak gerekmektedir.

Süspansiyonda kalan yüzde miktarına karşılık tane boyutun hesaplanması 5.3 eşitliğine göre hesaplanır.

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (5.3)$$

D : Süspansiyonda kalan yüzde miktarına karşılık gelen tane boyutu,

K : Deneyde kullanılan örneğin tane özgül ağırlığına bağlı olarak saptanan bir katsayı EK-6c' den okunan değer,

L : Etkin derinlik. Düzeltilmiş hidrometre okumalarına karşılık EK-6d' den okunan değer,

t : Hidrometre okumasının yapıldığı zaman (dk)

5.2.3 Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleri (Atterberg Limitleri / Kıvam Limitleri) ile Zeminleri Sınıflandırılması

Zeminin su içeriğine göre değişik özellikler göstermesi 1911'de İsveçli Atterberg tarafından deneysel olarak tarif edilmiştir. Atterberg limitleri veya kıvam limitleri; Atterberg tarafından sınır su muhtevaları olarak tanımlanmaktadır. Zeminin su içeriğine bağlı bu durumlar, yumuşak, orta sert, sert gibi adlar alırlar. İnce taneli (kohezyonlu) zeminler, su ile yoğurulduklarında plastiklik özelliği gösterirler. Plastiklik veya plastisite, ince taneli zeminlerin kırılmadan şekil verilebilme özelliğini tanımlamaktadır. Bu özellik iri taneli kum, çakıl gibi zeminlerde görülmez. Zemine ait kıvam limitleri belirlenirse zeminin birçok özelliği hakkında bilgi sahibi olunabilir. Ancak, kıvam limit deneylerinde yoğurularak örselenen bir zeminin de zemine ait tüm mekanik özellikleri tam olarak yansıtması beklenmemelidir (Aytekin 2004).

Zeminlerin, İnce (silt, kil) ve iri daneli (kum, çakıl) zeminler olarak sınıflandırılması çok genel bir tanımdır. Mühendislik biliminde daha sistematik, zemin özelliklerinin sayısal değer sınırları belli olan değişmez sınıflandırmalara gerek duyulur. Bu sebepten dolayı çoğu ülkede benzer sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadır (Genç 2008).

Zeminleri sınıflandırması; Dane Boyu Dağılımı, Dane Boyutuna Dayandırılan Sınıflandırma (USDA), Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılma Sistemi (USCS), Türk Standardında Zemin Sınıflandırması (TS 1500), İngiliz Standardında Zemin Sınıflandırması (BS 5930), Karayolları Sınıflandırma Sistemi (AASHTO), kullanılarak yapılabilmektedir (Genç 2008).

Termik Santral uçucu külü ve silis kumu hazırlama tesisi silisli kum atığı örnekleri için yapılan kıvam limit analizlerine göre sınıflandırma yöntemi olarak Türk Standardında Zemin Sınıflandırması (TS 1500) kullanılmıştır.

Türk Standardında Zemin Sınıflandırması (TS 1500)

Zeminlerde 200 numaralı elekten geçen malzeme miktarı %50 den fazla ise ince daneli zemin olarak isimlendirilir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sisteminde, killer için ilk büyük harfi C, siltler için M ve organik zeminler için O oluşturulur. İkinci büyük harf ise plastisite özelliğinden gelir. Likit limit değeri <%50 ise düşük plastisiteyi gösteren L, likit limit değeri >%50 ise yüksek plastisiteyi tanımlayan H harfi ile gösterilmektedir. İnce daneli zeminler Şekil 5.4 Cassagrande plastisite kartına göre simgelenir. Türk standardında, birleştirilmiş zemin sınıflandırmasından farklı olarak ince daneli zeminlerin likit limit değerine göre;

$W_L < 35$	ise CL ve ML
$35 \leq W_L < 50$	ise CI ve MI
$W_L \geq 50$	ise CH ve MH

Simgeleri kullanılır (Genç 2008).

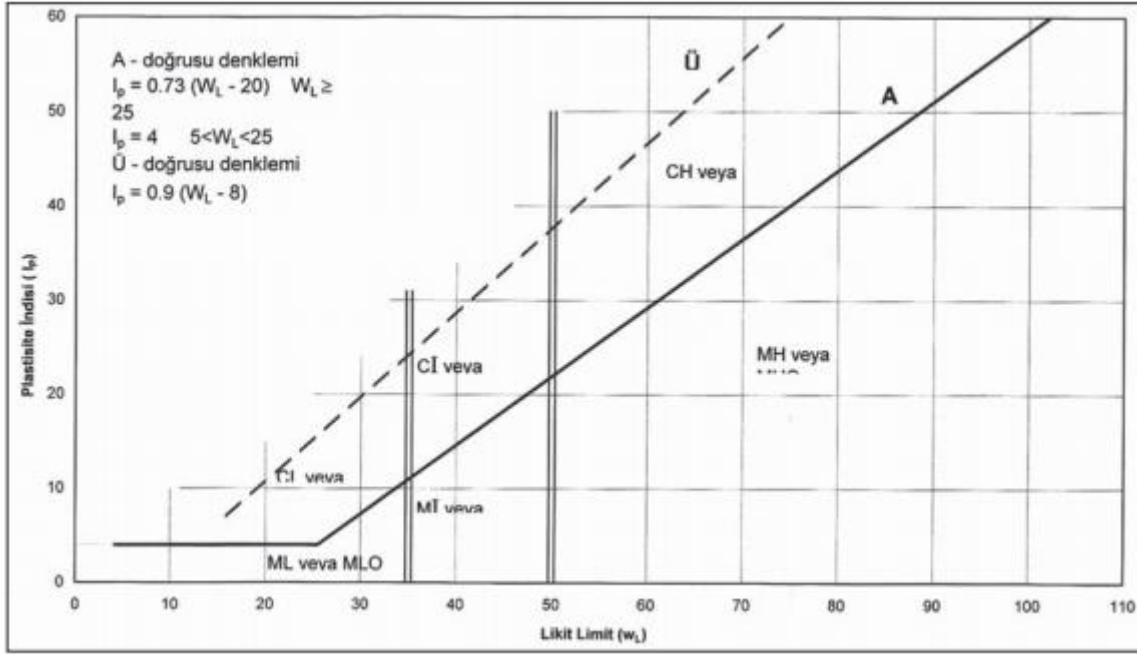
Likit limit ile plastik limit değerleri ölçülemeyen zeminler ile, plastik limitin likit limite eşit olduğu zeminler NP (plastik değil) simgesini almaktadır. Türk Standardı Sınıflandırma Sistemi Çizelge 5.3 Türk Standardı Zemin Sınıflandırması (TS 1500) gösterilmiştir (Genç 2008).

Çizelge 5.3 Türk standardı zemin sınıflandırması TS 1500.

LABORATUVAR DENEYLERİNİ KULLANARAK SİMGELEME KRİTERLERİ	SİMGE	GRUP ADI ^B
İnce Daneli Zeminler (%50 den fazlası 75 µm'den küçük)	Anorganik $I_p \geq 4$ ve "A" doğrusunun üstünde	CL ^E
	Anorganik $I_p \geq 4$ ve "A" doğrusunun altında	ML ^E
	Anorganik I_p "A" doğrusu üstünde veya üzerinde	CI ^E
	Anorganik I_p "A" doğrusu altında	MI ^E
	Anorganik I_p "A" doğrusu üstünde veya üzerinde	CH ^E
	Anorganik I_p "A" doğrusu altında	MH ^E
ORGANİK ZEMİN	Koyu renkli, kokulu, aşırı organik malzeme içeriyor	PT

B: Zemin moloz içeriyorsa grup adına eklenir

E: w_L kurutulmuş / w_L doğal < 0,75 ise "O" terimi eklenir. Örneğin "CLO"



Şekil 5.4 Cassagrande plastisite kartı (TS 1500) (Önalp ve Kılıç 1994).

5.2.3.1 Likit Limit (w_L veya LL)

Likit limit; zeminin kendi ağırlığı altında akabildiği en düşük su içeriğidir diye tanımlanabilir. Bir zemine ait likit limit belirlenirken iki yöntem kullanılabilir. Bunlar; Cassagrande yöntemi ve düşen koni penetrasyon yöntemidir.

Likit limit hesaplanmak istenilen zemin kitlesini temsil edecek miktarda numune alınarak kurutulur. Kurutulan zemin 40 no'lu (0,425 mm) elekten elenir. Numune porselen vb. bir kap içerisine konularak saf su ile kademeli olarak nemlendirilerek karıştırılır (Aytekin 2004).

Cassagrande aletinin taşı içine hazır durumdaki numunedan ıspatula ile bir miktar alınarak tasın içerisine yerleştirilir. Yerleştirme esnasında numunenin içinde hava kabarcıkları kalmamasına özen gösterilir. Tas içerisine yerleştirilen numunenin en kalın kısmı yaklaşık 1 cm olmalıdır. Tas içerisindeki numunenin ortasından standart oluk açma bıçağıyla bir yarık açılır. Cassagrande aletinin kolu saniyede iki defa olacak şekilde çevrilir ve düşüşler sayılır. Bu işlem sırasında numunenin yarık olan kısmının açıklığı 10 mm olması durumunda çevirme işlemi durdurulur ve kuru ve temiz bir spatula yardımıyla kapanmanın olduğu kısımdan bir miktar numune alınır ve bir kaba konulur. 0.01 gr hassasiyetli bir terazide tartılarak kütlesi kaydedilir ve su içeriğinin belirlenmesi için etüve konulur (Aytekin 2004).

Cassagrande aletinin tasında kalan numune tamamen alınarak önceki kabına konulur ve tas tamamen temizlenir ve kurutulur bir sonraki deneye hazır hale getirilir. Kaptaki bulunan numuneye bir miktar daha saf su ilave edilerek iyice karıştırılır ve bir önceki deneyde yapılan işlemler tekrar edilir. Deneyler en az dört defa tekrarlanarak dört tane düşüş sayısı (N) ve bunlara karşılık gelen su içeriği (w) elde edilir. N değerinden iki tanesi 25 ten küçük iki tanesi de 25 ten büyük olmalıdır (Aytekin 2004).

Yapılan araştırmalarda 5.4'teki bağıntı verilmiştir (Mohan and Goel 1959).

$$w_L = w \left(\frac{n}{25} \right)^t \quad (5.4)$$

w : Tek deneye ait su içeriği

w_L : Likit Limit

n : Tek deneydeki vuruş sayısı

t : 0,068 ile 0,121 arasında değişen bir sayı olup, vuruş sayısı 20 ila 30 arasında ise, t:0,1 olarak alınabilir (Önalp ve Kılıç 1994).

Enerji kaynaklı atıkların katı atık düzenli depolama tesislerinin zemininde kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada Cassagrande yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan ekipmanlar Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Cassagrande çarpmalı deney cihazı, oluk açma bıçağı, porselen pota.

5.2.3.2 Plastik Limit (W_p veya PL)

Islak zeminin yoğrulma sırasında yüzeyinde çatlakların belirdiği su içeriği plastik limit olarak tanımlanır. Bir başka tanımla zeminin plastik bir malzemeden yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü su muhtevasıdır. Likit limit deneyinden bir miktar artan zemin, buzlu cam üzerinde avuç içiyle yuvarlanarak belirlenir. Avuç içinde yuvarlama işlemi sırasında 3 mm kalınlığa kadar ufalandığı su muhtevasıdır. Eğer zemin 3 mm'nin altında yuvarlanmaya devam ediyorsa bir miktar kurutma yapılarak deney tekrarlanır (Aytekin 2004).

Zemin çubukları 3 mm çubuklar halinde geldiğinde çatlamlar ve kopmalar başladığı andaki zeminler boş kütlesi (M_t) bilinen bir kap içerisine tartılarak kütlesi (M_{tw}) kaydedilir ve etüve konulur. Bu şekilde en az 3 deney tekrarlanır. Yaklaşık 24 saat etüvde kurutulan numuneler etüvden çıkartılarak tekrar tartılır ve kütlesi (M_{td}) olarak kaydedilir (Aytekin 2004).

5.2.3.3 Plastisite İndisi (IP veya PI) (Plastiklik)

Plastisite indisi, zeminin plastik davranış gösterdiği su muhtevaları aralığının genişliğini gösteren bir parametredir. Likit limit ile plastik limit arasında kalan su muhtevalarında zemin plastik davranış gösterdiği için bu iki limitin farkı plastisite indisini göstermektedir (Özaydın 2011).

Plastisite indisinin hesaplanması 5.6'nolu denklemde gösterilmiştir.

Şekil 5.6'da Karıştırılan numunenin plastik limit hesabı için 3 mm olana kadar yuvarlama işlemi gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Karıştırılan numunenin plastik limit hesabı için 3 mm olana kadar yuvarlama işlemi.

Hesaplamalar:

Zeminlerde likit limit hesabı 25 düşüğe karşılık gelen özel bir su içeriğidir. Bu yöntemle 25 düşüğe karşılık gelen su içeriğini tek bir denemede bulabilmek mümkün olmadığı için en az dört tane düşüş sayısı ve dört tanede su içeriği bulunur. Yatay eksende log (N) ve düşey ekseninde w olacak şekilde işaretlenerek elde edilen dört noktadan geçen en uygun doğru geçirilir. En uygun doğrunun denklemi Excel programında belirlenir.

Plastik limit değerleri ise

$$w_p = \frac{M_{tw} - M_{td}}{M_{td} - M_t} \quad (5.5)$$

w_p : Plastik limit değeri

M_t : Boş kap kütlesi

M_{tw} : Kap + numune kütlesi

M_{td} : 24 saat etüvde kurutulma işleminden sonra kap + numune kütlesi

İle hesaplanır.

Plastisite indisi (I_p veya PI) (Plastiklik) değerleri ise

$$I_p = w_L - w_p \quad (5.6)$$

I_p : Plastisite indisi

w_L : Likit limit değeri

w_p : Plastik limit değeri

İle hesaplanır.

5.2.4 Zemin Sıkıştırma Deneyleri (Standart Proctor Deneyi)

Standart Proctor Deneyi, zeminde en büyük kuru birim hacim ağırlığını veren su muhtevasının bulunması ile ilgili bir deneydir (TS1900-1).

Zemin numunesi hazırlanırken zemine belirli oranlarda su ilave edilerek zeminin nemli olması sağlanır ve sert bir zemin üzerine kompaksiyon silindiri yerleştirilir. Hazırlanan zemin numunesi eşit üç tabaka halinde kompaksiyon silindiri üzerine serilir. Her tabaka 30,5 cm yükseklikten 2,5 kg ağırlığındaki tokmağın serbest düşmesi ile yatayda homojen olarak dağıtılan 25 vuruş ile sıkışması sağlanır. Sıkıştırılma işleminde en üst tabaka serilmeden önce silindirik kompaksiyon kabının üst yakası takılır. Son tabakanın sıkıştırılmasından sonra takılan üst yaka çıkartılır. Sıkıştırılmış halde bulunan son tabakanın kompaksiyon kabından yukarıya taşan kısmının 0,5-1,0 cm arasında olması gerekmektedir. Kompaksiyon kabının üst kısmında kalan fazlalık, bıçak ya da spatula yardımıyla temizlenerek düzgün hale getirilir (Aytekin 2004).

Kompaksiyon kabının üst kısmında bulunan fazlalık iyice temizlendikten sonra yan yüzeylerinin de temizlenmesi sağlanır. Zeminle iyice sıkıştırılması sağlanan kompaksiyon kabı üst yakası takılı olmadan tartılır ve kap + zemin numunesi kütlesi kaydedilir. Sıkıştırılan zemin numunesinin su içeriğinin bulunması amacıyla kompaksiyon kabının içerisindeki zemin numunesinin çıkartılması sağlanır. Çıkartma işlemi için kompaksiyon kabı numune çıkartma aygıtına takılarak kolun çevrilmesi yoluyla malzemenin kaptan çıkartılması sağlanır ve su içeriğinin belirlenmesi için malzemedan örnekler alınır (Aytekin 2004).

Zeminin su içeriğinin belirlenmesi için kompaksiyon kabından çıkartılan zemin numunesi 3-4 parçaya dilimlenerek alt, orta ve üst kısımlarından yaklaşık 100 er gram numune alınarak 105 ±5 °C etüve konulur. Alınan bu parçaların su içeriği ortalaması zemin numunesinin su içeriği olarak kaydedilir (Aytekin 2004).

Zemin numunesi ufalanarak ilgili elekten geçirilir ve su içeriği artırılarak deney tekrarlanır. “En az dört adet olmak üzere değişik su içeriklerinde zemin numuneleri damıtık su karıştırılarak hazırlanır” (Aytekin 2004).

Her bir tekrardan sonra su içeriğinin belirlenmesi için zemin örneğinden numuneler alınır ve etüve konulur. Deneylerin tekrarlanması işlemi kompaksiyon sonucunda tartılan kap +

malzeme kütlesinin ilk deneyde elde edilen kütlede daha az çıkması durumunda sonlandırılır ve yapılan bütün deneylerdeki örnekler etüvde kurutularak hesaplama yapılır.

Hesaplamalar

Her numune için aşağıdaki eşitlikten zeminin yaş birim hacim ağırlığı (ρ_n) hesaplanır.

$$\rho_n = \frac{M_1 M_2}{V} \times 9,81 \text{ (kN/m}^3\text{)} \quad (5.7)$$

Denklemden;

M_1 : kalıp ve tabanın kütlesi (g)

M_2 : Kalıp, tabanı ve tabanı sıkışmış zemin kütlesi, (g)

V : Kalıbın iç hacmi, (cm^3) dir.

Kuru birim hacim ağırlıkları (ρ_k) ise aşağıdaki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$\rho_k = \frac{100\rho_n}{100+W} \text{ (kN/m}^3\text{)} \quad (5.8)$$

Denklemden;

W : Numunelerin su muhtevası, (%) dır.

Deney sonuçlarında elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve bunlara karşılık olan su muhtevası değerleri, bir grafik kâğıdı üzerine işlenerek bulunan noktalar arasından düzgün bir eğri geçirilir. Bulunan bu eğri üzerindeki en büyük değer okunur. Karşılaştırma amacı ile aynı grafik üzerine, sıfır, %5 ve %10 hava boşluğu yüzdelerini gösteren eğriler çizilir. Bu eğrilerin elde edilmesi için;

$$\rho_k = \frac{\left(1 - \frac{V_a}{100}\right)}{\frac{1}{G_s} + \frac{W}{100}} \quad (5.9)$$

Eşitliğinden faydalanılır.

Denklemden;

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

G_s : Zemin danelerinin bağıl yoğunluğu dur (TS 1900-1).

Silisli kum atığı malzemesinin (Numune 2) sıkıştırma deneyine hazırlanma aşaması Şekil 5.7' de gösterilmiştir. Silisli kum atığı numunedan bir miktar alınıp tartımı gerçekleştirilmiştir. Standart proctor deneyinde kullanılacak olan ekipmanın boş ağırlığı hassas terazide Şekil

5.8’de gösterildiği gibi tartılıp kayıt edilmiştir. Tartımı gerçekleştirilen silisli kum atığı malzemesi Şekil 5.9’da gösterildiği gibi tepsiye serilip %5-10-15-20-25 oranlarında su ilavesi gerçekleştirilmiş ve silisli kum atığı malzemesi kompaksiyon deneyi için hazır hale getirilmiştir. Hazır hale getirilen silisli kum atığı numunesinin 5.2.4 Standart proktor deneyinde anlatıldığı gibi molda Şekil 5.10’da gösterilen otomatik zemin kompaktörü ile sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Kompaksiyon deneyi tamamlanan silisli kum atığı numunesi Şekil 5.11’ de görüldüğü gibi üst ve alt tabakası spatula yarımıyla temizlenir ve numune + mold kütlesi tartılarak kayıt edilir. Tartılan silisli kum atığı numunesi Şekil 5.12’de gösterilen çıkartıcıyla mold dan çıkartılır silisli kum atığı malzemesi Şekil 5.13’te gösterildiği gibi parçalara bölünerek numuneyi temsil edecek şekilde içerisinden parçalar tartımları belirli kaplara alınır, kap + numuneler tartılarak değerler kayıt edilir ve numune + kap Şekil 5.14’te gösterildiği gibi 105 ± 5 °C etüve konulur ve su içerikleri belirlenmesi için kurumaya bırakılır.

Kompaksiyon işlemi bitirilen bütün numunelerin kayıt edilen verileri Yaş Birim Hacim Ağırlığı (YBHA), Kuru Birim Hacim Ağırlığı (YBHA) ve su muhtevası, tablolardaki yerlerine konularak hesaplamalar gerçekleştirilir.



Şekil 5.7 Sıkıştırma deneyi numunesinin hazırlanması.



Şekil 5.8 Sıkıştırma deneyinde kullanılan ekipman (mold).



Şekil 5.9 Numune 2, nemlendirme işlemi.



Şekil 5.10 Otomatik zemin kompaktörü.



Şekil 5.11 Kompaksiyon işlemi tamamlanmış numune.



Şekil 5.12 Numunenin mold'dan çıkarılması.



Şekil 5.13 Kompaksiyon yapılan numunenin su içeriğini belirlemek üzere numuneden örnekler alma işlemi



Şekil 5.14 Kompaksiyon yapılmış numunenin örneklerinin 105 °c derece etüvde kurutulması işlemi.

5.2.5 Düşen Seviyeli Permeabilite (Geçirimsizlik) Deneyi

Optimum su muhtevaları belirlenen silisli kum atığı ve silisli kum atığı + termik santral uçucu kül karışımların permeabilite katsayılarını belirlemek amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır.

“H.Darcy (1856), Dijon (Fransa) kasabesindeki içme suyu akım hızının, suyun alındığı seviye ile dağıtıldığı seviye arasındaki kot farkı ve uzaklığın bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir” (Darcy 1856).

Darcy'nin öne sürdüğü ilişkinin formüle edilebilmesi için geçirimsizlik katsayısı (k) ile tanımlanmıştır. Tanıma göre zemin içerisindeki su akımının durumu geçirimsizlik katsayısını ifade etmektedir.

“Suyun zemine giriş noktası ile çıkış noktası arasındaki kot farkı su yükü veya piyezometrik basınç olarak bilinmektedir. Su yükünün iki nokta arasındaki mesafeye oranına da hidrolik eğim adı verilmektedir. Hidrolik eğim ile su yükünü ilişkiendiren bağıntı ise darcy yasası olarak bilinir” (Aytekin 2004).

$$V=ki \quad (5.10)$$

Burada v : akım hızı (m/gün, cm/sn, vb.)
 k : geçirimlilik (permeabilite) katsayısını (m/sn, cm,sn, vb.)
 i : Hidrolik eğim (H/L)
 H : iki nokta arasındaki su yükü (hidrolik yük) (m, cm, vb.)
 L : iki nokta arasındaki mesafe (m, cm, vb.)

Suyun aktığı zeminin en kesiti A ise su debisi (q) şu şekilde belirlenir:

$$vA = kiA \quad (5.11)$$

$$q = kiA \quad (5.12)$$

Suyun akım süresi (t) biliniyorsa A kesitinden akan suyun miktarı (Q) hesaplanır;

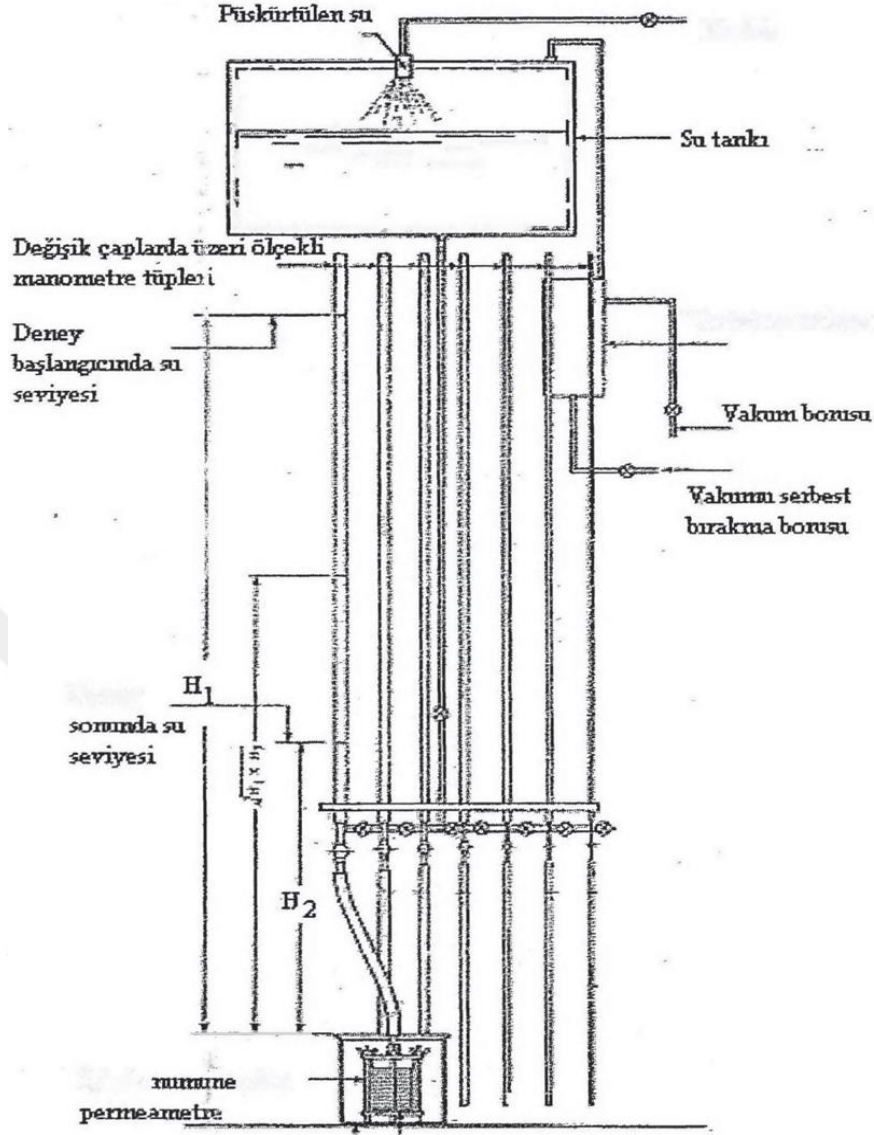
$$q_t = kiAt \quad (5.13)$$

$$Q = kiAt \quad (5.14)$$

Geçirimlilik işlemlerinde su miktarı veya debisi bilinmek istenen parametrelerdir. (5.13) ve (5.14) eşitliklerine bakıldığında geçirimlilik katsayısı haricinde terimler kolaylıkla bulunabilir. Herhangi bir zeminden akacak su miktarının öğrenilebilmesi için o zeminin geçirimlilik katsayısının bilinmesi gereklidir. Geçirimlilik katsayısı arazide zemine su pompalanarak ya da araziden pompalarla su çekilerek bulunabilir, ancak zeminin iri daneli olması durumunda sonuçlar pek başarılı olamayabilir. Zeminlerin geçirimliliği laboratuvarlarda permeametre olarak adlandırılan aygıtlarla bulunabilir (Aytekin 2004).

Laboratuvarlarda iri ve ince daneli zeminler için iki farklı deney uygulanmaktadır. İnce daneli zeminler için düşen seviyeli permeabilite deneyi, iri daneli zeminlerde sabit seviyeli geçirimlilik deneyi uygulanmaktadır (Aytekin 2004).

Silisli kum atığı malzemesi ve termik santralden temin edilen uçucu kül malzemesi çok ince daneli malzemeler olduklarından bu malzemelerde düşen seviyeli permeabilite deneyleri uygulanmıştır. Şekil 5.15'te düşen seviyeli geçirimlilik deney düzeneği şematiği gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Düşen seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği şematik gösterimi (Aytekin 2004).

Sabit seviyeli ve düşen seviyeli deneyler arasında en önemli fark, düşen seviyeli deneyde hidrolik eğim azalırken sabit seviyeli de hidrolik eğim sabit kalmaktadır (Aytekin 2004).

Zaman içerisinde zemin içerisindeki suyun debisi 5.15 nolu eşitlikten hesaplanır.

$$q = vA \quad (5.15)$$

Zemin içerisindeki akım hızını veren ifade ise;

$$v = \frac{-dH}{dt} \quad (5.16)$$

Burada – işareti hidrolik yükün zamanla azaldığının gösterir. Zemin numunesinin en kesit alanı A ve Permeametreden akan suyun debisi q_p ise;

$$q_p = kiA = K \frac{H}{L} A \quad (5.17)$$

dir.

En kesit alanı a olan cam borudan zemine sızan suyun debisi q_s ise;

$$q_s = kiA = vA \quad (5.18)$$

ya da

$$q_s = - \frac{dH}{dt} a \quad (5.19)$$

5.17 ve 5.18 formülünden de görüldüğü üzere;

$$q_p = q_s \quad (5.20)$$

$$- \frac{dH}{dt} a = K \frac{H}{L} A \quad (5.21)$$

Yazılabilir. 5.21 eşitliğinin düzenlenmesi sonrasında;

$$k = - \frac{2.303aL}{A(t_1 - t_0)} - \log_{10} \left(\frac{H_0}{H_1} \right) \quad (5.22)$$

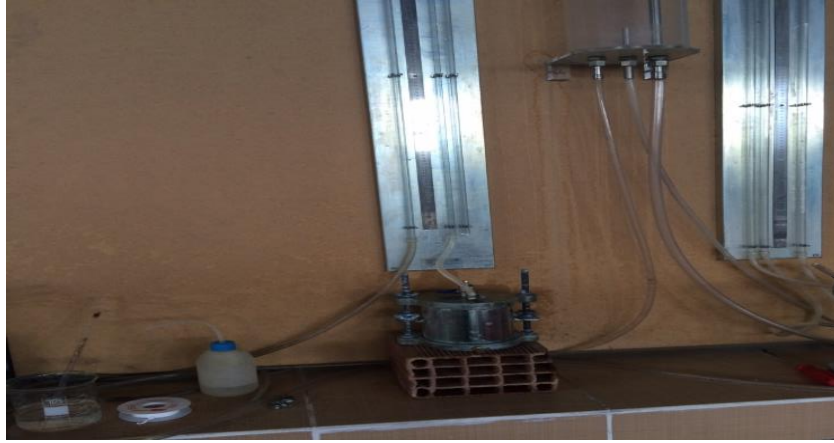
elde edilir.

Maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını veren su muhtevalarını belirlediğimiz malzemeleri tekrar kompaksiyon kalıbında, belirlenen su içeriklerinde sıkıştırılması sağlanır ve kalıp üst yakası takılarak malzeme suya doyması için su havuzlarında bekletilir. Şekil 5.16'da silisli kum atığı malzemesi içerikli havuzda bekletilen kompaksiyon kalıbı gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Havuzda bekletilen kompaksiyon kalıbı (Mold).

Suya doyması sağlanan malzeme sonrasında permeabilite deney düzeneğine bağlanarak sonuçlar alınmaya başlanır. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de deney düzenekleri ve moldların deney düzeneğine bağlanması gösterilmektedir.



Şekil 5.17 Permeabilite deney düzeneği.



Şekil 5.18 Permeabilite deney düzeneği ve moldların bağlanılma şekli.

5.2.6 Serbest (Tek Eksenli) Basınç Dayanımının Tayini

Serbest basınç deneyleri; temel zeminlerinin üzerine gelecekleri yük karşısında gösterecekleri direnci tanımlamak amacı ile yapılır. Deney Şekil 5.19'da gösterildiği gibi silindirik bir zemin numunesine aksenal doğrultuda yüklemeye tabi tutularak gerçekleştirilir. Serbest basınç deneyleri birim boy kısalması ya da gerilme kontrollü olarak iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Basit olduğundan dolayı birim boy kısalması deneyi yaygın olarak kullanılmaktadır. Boy kısalması hızı numunenin sınır taşıma direncini etkileyeceği için deney süresince birim boy kısalması oranı %0,5/dk.-%2/dk. arasında seçilmesi uygun olacaktır. Ayrıca numunenin deney süresince su içeriğinde değişimler olacağından bir deneyin en fazla 10 dk. içerisinde tamamlanması uygun olmaktadır (Aytekin 2004).

Bu deney çalışmasında yapılan analizlerde birim boy kısalma oranı %1 olarak seçilmiştir. Veri kaydetme sıklığı 10 sn olarak seçildiği için 10 dakika sürecek olan bir deneyde yaklaşık 60 veri kullanılmıştır. Deney bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirildiğinden çizelgeler üzerinde

hesaplanmış aksenal gerilme değerleri mevcuttur. Teorik olarak aksenal gerilme değeri hesaplanırken uygulanan yük (P), düzeltilmiş alana (A_c) bölünmektedir. Düzeltilmiş alan denklem 5.23 ile hesaplanmaktadır.

$$A_c = \frac{A_0}{1-\varepsilon} \quad (5.23)$$

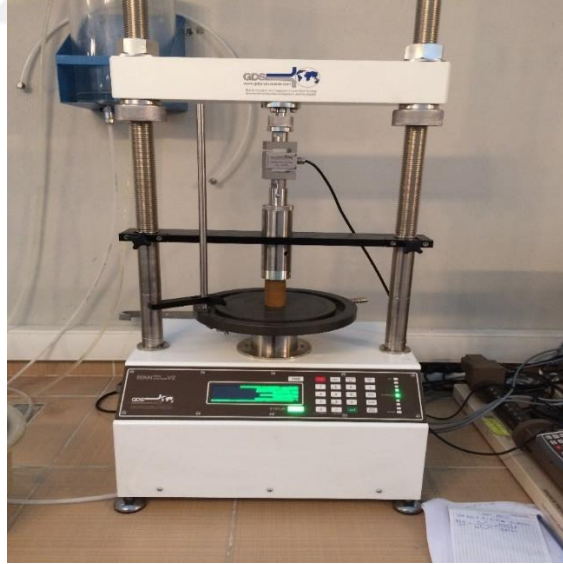
Burada;

A_0 = Düzeltilmemiş numune en-kesit alanı

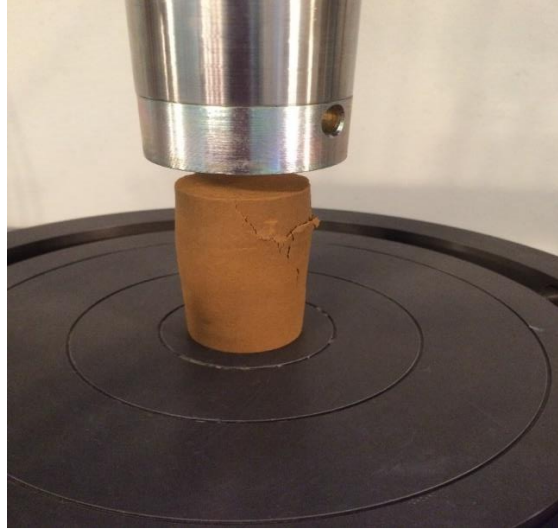
A_c = Düzeltilmiş numune en-kesit alanı

ε = Yüzde birim deformasyon ($\Delta L/L$)

Eksenal gerilmenin y ekseninde ve yüzde birim deformasyon değerlerinin x ekseninde noktalanması sonucunda serbest basınç dayanımı eğrileri oluşmaktadır. Bu eğrilerde aksenal gerilme değerinin en yüksek değeri, ilgili zemine ya da karışıma ait serbest basınç dayanımını vermektedir. Şekiller incelendiğinde serbest basınç dayanımı (q_u) değerlerinin kPa cinsinden verildiği görülmektedir. Kıyas yapılması açısından bulunan değerlerin kg/cm^2 olarak karşılığı da yazılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 5.19 Silindirik olarak hazırlanmış numuneye serbest basınç deneyi uygulaması.



Şekil 5.20 Serbest basınç deneyi tamamlanmış numune örneği.

Çizelge 5.4’ de ince daneli zeminlerin katılık derecesi gösterilmiştir. Silisli kum atığı ve silisli kum atığı + %10, %20 ve %30 oranında karıştırılmış termik santral uçucu kül karışımlarının dereceleri incelenmiştir.

Çizelge 5.4 İnce daneli zeminlerin katılık derecesini gösteren tablo (Özaydın 2011).

Serbest Basınç Mukavemeti kN/m ²	Katılık Derecesi
<25	Çok yumuşak
25 – 50	Yumuşak
50 – 100	Orta katı
100 – 200	Katı
200 – 400	Çok katı
>400	Sert

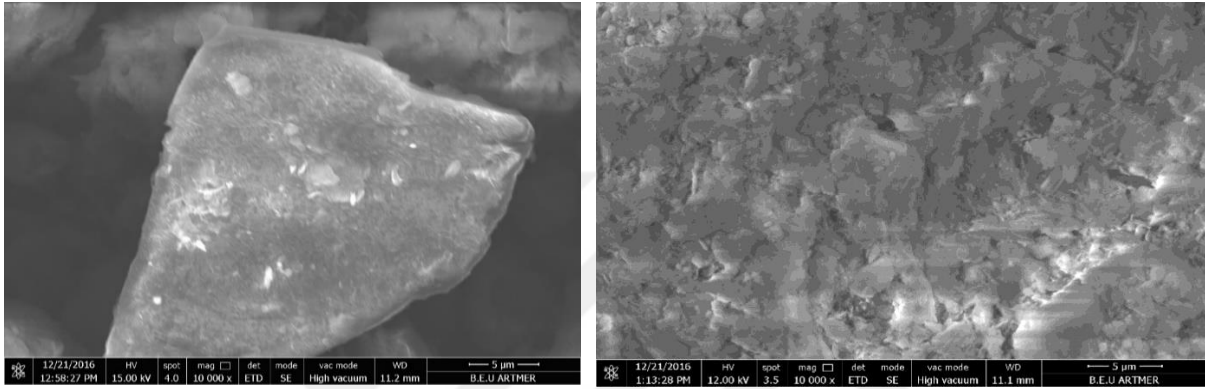
5.2.7 Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) Analizi

Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) aletinde elektron ışını genelde analizi yapılacak malzemenin yüzeyine odaklanmakta bazı elektronlar numuneden saçılmakta ve numunenin farklı bölgeleri bu saçılmanın miktarına bağlı olarak açık veya koyu renk alarak gözükmektedir. İkincil elektronlar ise üç boyutlu imaj şeklinde gözükken numunenin yüzeyinden dışarıya çıkmaktadır (Yılmaz 2000).

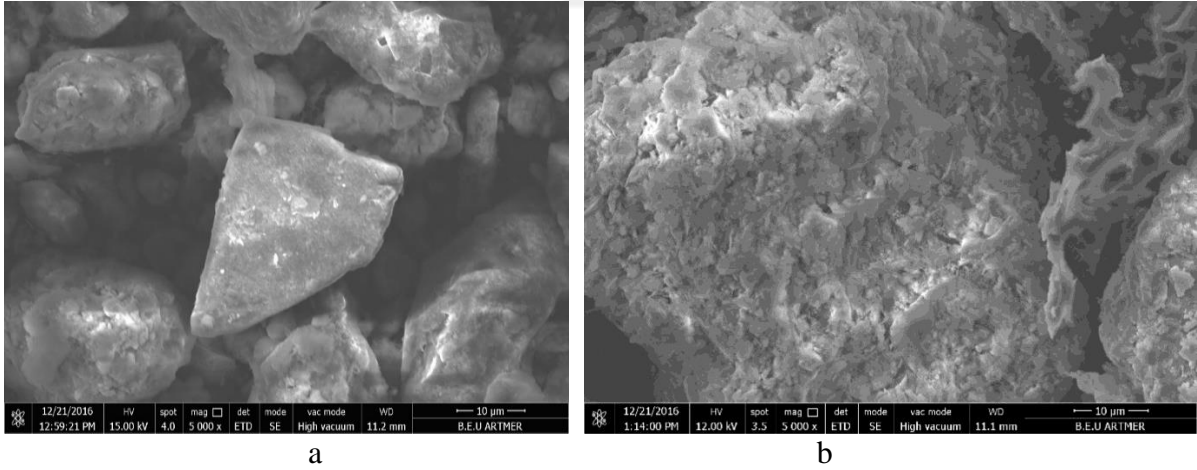
SEM cihazı içerisinde incelenecek olan numunenin içerisinde elektronların geçişini sağlamak için karbon veya altın gibi iletken bir element ile kaplanması gerekmektedir. Kaplanması

tamamlanmış numuneler JEOL LSM-840 Scanning Microscope aleti ile incelenmiştir. Yoğun bir elektron ışınına tutulan numunelerin görüntüsü bilgisayar ve monitör yardımıyla alınmıştır. (Yılmaz 2000).

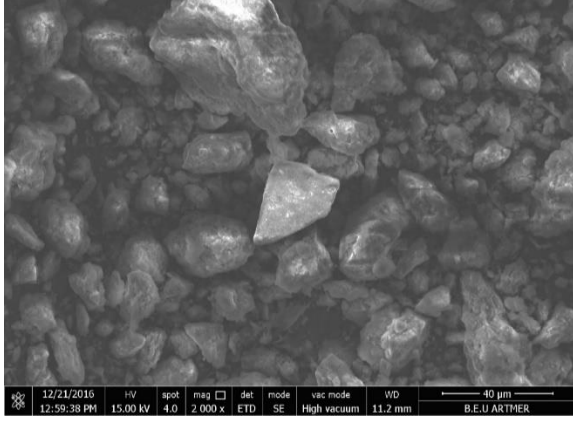
Silisli kum atığı ve termik santral uçucu kül atıklarının SEM görüntüleri, Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30', Şekil 5.31', Şekil 5.32' de gösterilmiştir.



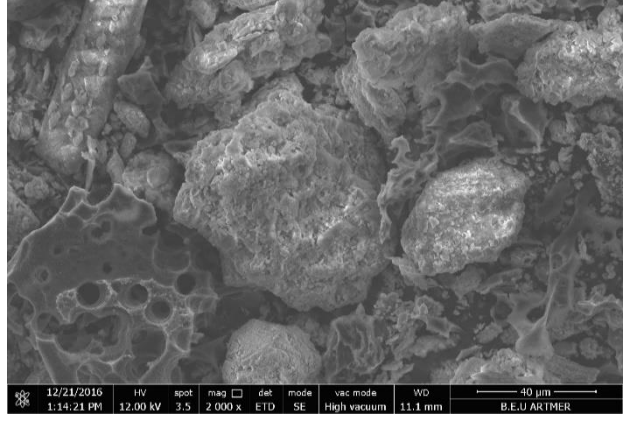
Şekil 5.21 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 5 µm.



Şekil 5.22 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 10 µm.

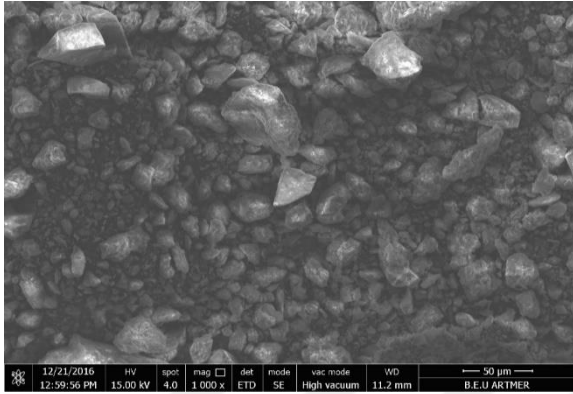


a

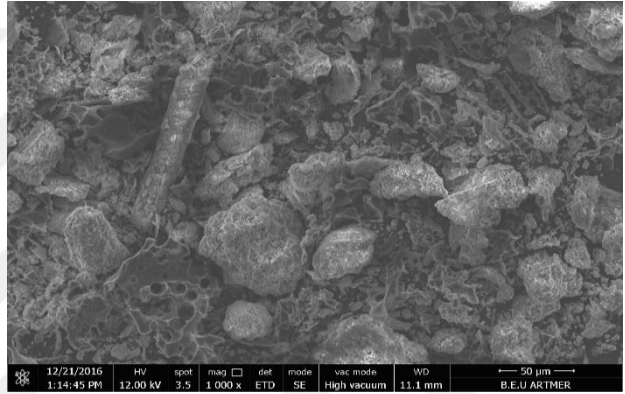


b

Şekil 5.23 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 40 µm.

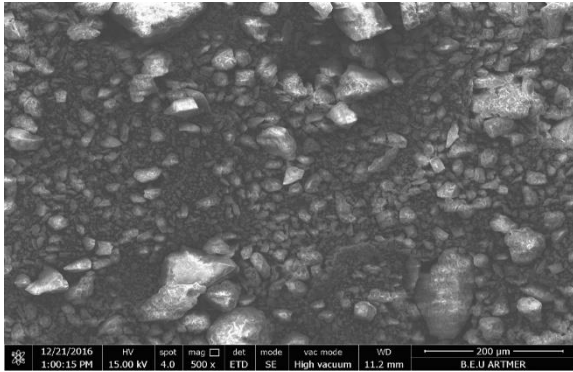


a

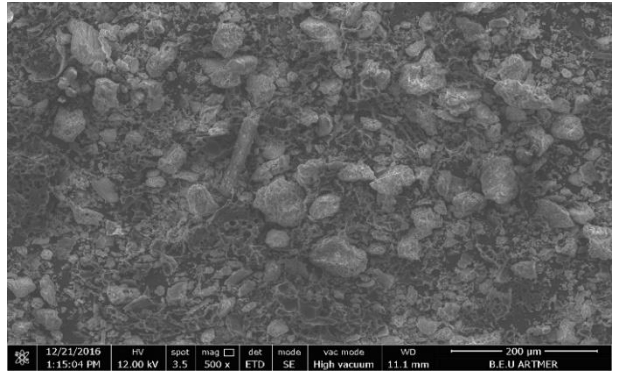


b

Şekil 5.24 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 50 µm.

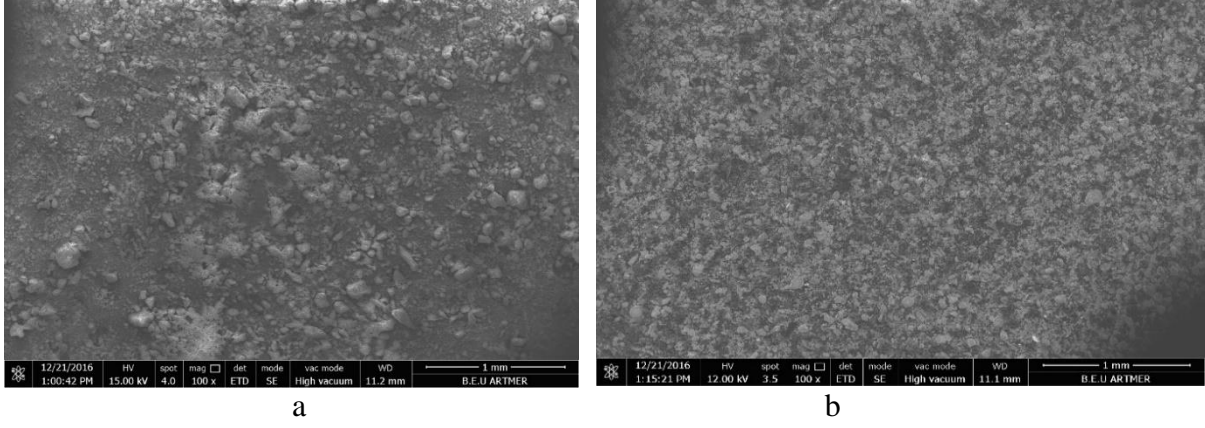


a



b

Şekil 5.25 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 200 µm.



Şekil 5.26 Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) (a) ve uçucu kül (Numune 1) (b) SEM görüntüsü 1 mm

Elde edilen görüntüler incelendiğinde silisli kum atığı malzemesinin daha homojen bir yapıda ve şekilsel olarak daha düzgün olduğu, uçucu kül numunelerinde ise küresel parçacıklar gelişmesi beklenirken daha heterojen bir yapı gözlenmiştir (Tangüler 2015).

Bu yapının desülfürizasyon etkisi ile uçucu kül içerisinde kalsiyum miktarına bağlı olduğu düşünülmektedir Kömür içerisinde bulunan safsızlıklar, Kuvars gibi mineraller ve mineral agregaları sıklıkla yüzey erimesi gösterebilmekte ve oluşan bu dağınık yapı malzemenin fiziksel özelliklerini etkilemektedir (Kutchko and Kim 2006).



BÖLÜM 6

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

6.1 KİMYASAL ANALİZ SONUÇLARI

Çizelge 6.1’de uçucu kül örneği, silis cevheri ve silisli kum atığı örnekleri kimyasal analiz sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Termik santral uçucu kül örneği, silis cevheri ve silisli kum atığı örnekleri kimyasal analizleri.

Bileşen	Örneklerin Kimyasal Bileşimleri (%)		
	Uçucu Kül	Silis Cevheri	Silisli Kum atığı
SiO ₂	56.5736	99,6	88.645
Al ₂ O ₃	23.3906	0,4	5.08
Fe ₂ O ₃	9.1125	-	2.956
CaO	1.7740	-	0.26
MgO	2.0153	-	0.33
Na ₂ O	1.1739	-	0.10
SO ₃	0.9652	-	0.00
TiO ₂	1.2177	-	0.449
K ₂ O	3.3789	-	0.84
K. K	-	-	1.34
P ₂ O ₅	0.3084	-	-
MnO	0.0898	-	-
Toplam	100.00	100.00	100.00

Çizelge 6.1’deki uçucu kül örneği, silis cevheri ve silisli kum atığı örnekleri kimyasal analizleri incelendiğinde SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplam miktarının %70’in üzerinde olduğu görülmektedir.

Bu durumda elde edilen uçucu külün genel olarak ASTM C 618 Standardına göre F sınıfı uçucu kül olduğu değerlendirilebilmektedir (ASTM 1993).

F sınıfı uçucu küller yapısal olarak düşük kireç (CaO) oranına sahip küllerdir. Bu küllerin kireç oranı %10 un altındadır ve yüksek camsı yapıya sahiptirler. Camsı yapı, karışımlarda kullanılan

uçucu küllerin serbest haldeki moleküllerle bağ yapıp, karışımlara ilave bağlayıcı özellikleri kazandırabildiklerinden çok önemli olmaktadır (Akkaya 2013).

6.2 DANE BOYUT DAĞILIMI ANALİZLERİ (HİDROMETRE ANALİZİ)

Hidrometre deneyi silisli kum atığı malzemesine uygulanmış ve hidrometre deney okumaları Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 Hidrometre deney okumaları.

HİDROMETRE DENEYİ											
Proje Adı:		Laboratuvar Çalışması			Deney Tarihi: 26/08/2015						
Proje Yeri:		B.E. Ü			Deneyi Yapan: E. DAĞLI, C. TURHAN, S. ÖREN						
Sondaj No:					Numune No: 1						
Derinlik:					Numune Tanımı: Silisli Kum Atığı						
Özgül Ağırlık (Gs):		2.56									
Hidrometre No:					Rh = [(Gs-1)*Rh1/(Gs)]+Cm						
Menisküs Düzeltmesi:		1			P: D ' den küçük dane yüzdesi						
Dağıtma Maddesi		3.2			P=100*Gs(Rh+Mt-Cd)/[Wb*(Gs-1)]						
Düzeltilmesi (Cd):					L=Efektif Derinlik(cm)						
Sıcaklık Düzeltmesi (Mt):					m=Viskozite						
Deney Sonu Madde Miktarı(Wb):		30									
TARİH	GÜNÜN SAATİ	SICAKLIK °C	SÜRE (dk)	Rh'	R _h	L	m	D (mm)	Mt	Rh+Mt-Cd	%P
26.8.15	10:00	28.1	0.25	30.6	19.65	12.8	8.57	0.0930	1.817	18.26	99.91
26.8.15	10:00	27.9	0.5	30.0	19.28	12.9	8.61	0.0660	1.764	17.84	97.61
26.8.15	10:01	27.9	1	29.0	18.67	13.0	8.61	0.0468	1.764	17.24	94.28
26.8.15	10:02	27.9	2	27.0	17.45	13.1	8.61	0.0333	1.764	16.02	87.61
26.8.15	10:04	27.8	4	20.0	13.19	13.7	8.63	0.0241	1.737	11.72	64.13
26.8.15	10:08	27.9	8	17.0	11.36	14.0	8.61	0.0172	1.764	9.92	54.28
26.8.15	10:15	28.1	15	16.0	10.75	14.1	8.57	0.0126	1.817	9.37	51.24
26.8.15	10:30	28.1	30	15.0	10.14	14.1	8.57	0.0089	1.817	8.76	47.91
26.8.15	11:00	27.9	60	13.5	9.23	14.3	8.61	0.0063	1.764	7.79	42.61
26.8.15	12:00	27.8	120	12.8	8.80	14.3	8.63	0.0045	1.737	7.34	40.13
26.8.15	14:00	27.8	240	12.0	8.31	14.4	8.63	0.0032	1.737	6.85	37.47
26.8.15	18:00	27.5	480	11.5	8.01	14.4	8.69	0.0023	1.658	6.47	35.37
26.8.15	22:00	27.3	720	11.3	7.89	14.4	8.74	0.0019	1.606	6.29	34.42
27.8.15	10:00	27.9	1440	11.0	7.70	14.5	8.61	0.0013	1.764	6.27	34.28

6.3 LİKİT LİMİT VE PLASTİK LİMİT DENEYLERİ (ATTERBERG LİMİTLERİ / KIVAM LİMİTLERİ)

Çizelge 6.3’de silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) için Likit limit, Plastik limit ve Plastisite indisi incelendiği ve Şekil 5.4 Cassagrande Plastisite Kartı (TS 1500) A doğrusu denkleminde çıkan sonuçlar yerine konulduğunda silisli kum atığı malzemesinin likit limit değeri $w_L < 35$ ve A doğrusu denkleminde plastisite indisi $I_P \geq 4$ ve A doğrusunun üzerinde olduğu için silisli kum atığı malzemesinin CL düşük plastisiteli kil özellikli olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3’de silisli kum atığı+%10 uçucu kül malzemesi (Numune 3) için Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi incelendiği ve Şekil 5.4 Cassagrande plastisite kartı (TS 1500) A doğrusu denkleminde çıkan sonuçlar yerine konulduğunda silisli kum atığı malzemesi+%10 uçucu kül malzemesi likit limit değeri $35 \leq w_L < 50$ ve A doğrusu denkleminde plastisite indisi I_P A doğrusu üstünde veya üzerinde olduğu için silisli kum atık malzemesi + % 10 uçucu külü karışımı CI Orta plastisiteli kil özellikli olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3’de silisli kum atık malzemesi + % 20 uçucu külü karışımı (Numune 4) malzemesi için Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi incelendiği ve Şekil 5.4 Cassagrande plastisite kartı (TS 1500) A doğrusu denkleminde çıkan sonuçlar yerine konulduğunda silisli kum atığı malzemesinin likit limit değeri $35 \leq w_L < 50$ ve A doğrusu denkleminde plastisite indisi I_P A doğrusu üstünde veya üzerinde olduğu için silisli kum atık malzemesi + % 20 uçucu külü karışımı CI orta plastisiteli kil özellikli olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3’de silisli kum atık malzemesi + % 30 uçucu külü karışımı (Numune 5) malzemesi için Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi incelendiği ve Şekil 5.4 Cassagrande plastisite kartı (TS 1500) A doğrusu denkleminde çıkan sonuçlar yerine konulduğunda silisli kum atığı malzemesinin likit limit değeri $35 \leq w_L < 50$ ve A doğrusu denkleminde plastisite indisi I_P A doğrusu üstünde veya üzerinde olduğu için silisli kum atık malzemesi + % 30 uçucu külü karışımı CI orta plastisiteli kil özellikli olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3 Malzemelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri (%).

Malzeme	Likit Limit (w_L veya LL)	Plastik Limit (w_p veya PL)	Plastisite İndisi (I_p veya PI)
Numune 2	27	18	9
Numune 3	36	14	22
Numune 4	44	15	29
Numune 5	40	18	22

6.4 ZEMİN SIKIŞTIRMA DENEYLERİ (STANDART PROCTOR DENEYİ)

Zemin sıkıştırma deneyinde su içeriği ile kuru birim hacim ağırlık arasında 3. Dereceden fonksiyona uygun bir grafik eğrisi bulunmaktadır. Buradaki fonksiyonun türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde bulunacak olan x değeri optimum su içeriğini temsil etmektedir. Buradan bulunan x değeri türevi alınmamış fonksiyonda yerine konulduğunda bulunacak olan y değeri ise maksimum kuru birim hacim ağırlığını vermektedir.

Silisli kum atığı (Numune 2) malzemesine yapılan standart proctor deneyi sonucunda malzemenin maksimum kuru birim hacim ağırlığını veren su içeriğinin Excel programında hesaplanması sonucunda %18,18 olduğu anlaşılmaktadır. Standart proctor deneyi silisli kum atığı + %10 kül karışımı (Numune 3) için tekrarlanmış ve su içerikleri belirlenmiştir.

Silisli kum atığı+%10 uçucu kül malzemesine yapılan standart proctor deneyi sonucunda malzemenin maksimum kuru birim hacim ağırlığını veren su içeriğinin Excel programında hesaplanması sonucunda %16,64 olduğu anlaşılmaktadır. Standart proctor deneyi silisli kum atığı + %20 uçucu kül karışımı (Numune 4) için tekrarlanmış ve su içerikleri belirlenmiştir.

Silisli kum atığı+%20 uçucu kül malzemesine yapılan standart proctor deneyi sonucunda malzemenin maksimum kuru birim hacim ağırlığını veren su içeriğinin Excel programında hesaplanması sonucunda %20,62 olduğu anlaşılmaktadır. Standart proctor deneyi silisli kum atığı + %30 uçucu kül karışımı için tekrarlanmış ve su içerikleri belirlenmiştir.

Silisli kum atığı + %30 uçucu kül karışımı (Numune 5) malzemesine yapılan standart proctor deneyi sonucunda malzemenin maksimum kuru birim hacim ağırlığını veren su içeriğinin Excel programında hesaplanması sonucunda %20,23 olduğu anlaşılmaktadır.

Silisli atık kum malzemesi ve silisli kum atığı+%10, %20 ve %30 uçucu kül karışımların standart proctor deneyine göre çıkan maksimum kuru hacim ağırlıkları ve su içerikleri Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.4 Malzemelerin optimum su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları.

	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5
W_{opt} (%)	18.18	16.64	20.62	20.23
ρ_{kmax}	1.68	1.69	1.64	1.49

6.5 DÜŞEN SEVİYELİ PERMEABİLİTE (GEÇİRİMLİLİK) DENEYİ

Termik santral uçucu külü %100 oranında ön deneylere tabi tutulmuş ve uçucu kül örneğinin tek başına araştırması yapılacak olan geçirgenlik katsayısını (k) sağlayamayacağı kanaatine varılmıştır ve Termik santral uçucu külü %100 oranında kullanılarak deneyler gerçekleştirilmemiştir Şekil 6.1'de Termik santrali uçucu kül örneğinin düşen seviyeli permeabilite cihazında geçirgenliğine bakılmış ve malzemenin %100 oranında kullanılması durumunda geçirgenliğinin oldukça yüksek olduğu, düşen seviyeli permeabilite deneyinin çok kısa sürede tamamlandığı gözlenmiştir.



Şekil 6.1 Termik santral uçucu külü %100 oranında kullanımı düşen seviyeli permeabilite deneyi.

Silisli kum atığı malzemesi (Numune 2) sonuçları, silisli kum atığı + %10 uçucu kül karışımı (Numune 3) sonuçları, silisli kum atığı + %20 uçucu kül karışımı (Numune 4) sonuçları ve

silisli kum atığı + %30 uçucu kül karışımı (Numune 5) sonuçları Çizelge 6.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.5 Permeabilite deney sonuçlarını gösteren tablo (m/sn cinsinden).

	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5
Permeabilite k:	$1,38 \times 10^{-10}$ m/sn	$3,64 \times 10^{-9}$ m/sn	$2,15 \times 10^{-9}$ m/sn	$6,73 \times 10^{-9}$ m/sn

Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelikte belirtilen ve istenen, düzenli depolama sahalarının zemininde kullanılacak olan malzemenin geçirgenlik değerlerinin 10^{-7} ile 10^{-9} m/sn arasında olması gerekliliği Çizelge 6.5’de görüldüğü üzere hazırlanan bütün malzemeler için sağlanmaktadır.

6.6 SERBEST (TEK EKSENLİ) BASINÇ DAYANIMININ TAYİNİ

Eksenel gerilmenin y ekseninde ve yüzde birim deformasyon değerlerinin x ekseninde noktalanması sonucunda serbest basınç dayanımı eğrileri oluşmaktadır. Bu eğrilerde eksenel gerilme değerinin en yüksek değeri, ilgili zemine ya da karışıma ait serbest basınç dayanımını vermektedir. Ek-4’te verilen şekiller incelendiğinde serbest basınç dayanımı (q_u) değerlerinin kPa cinsinden verildiği görülmektedir. Kıyas yapılması açısından bulunan değerlerin kg/cm^2 olarak karşılığı da yazılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Silisli kum atığı ve silisli kum atığı + %10, %20 ve %30 oranında karıştırılmış uçucu kül karışımlarının serbest basınç dayanımları tayini her bir numune için TS 1900 standardında belirtildiği üzere 3’ er kere tekrarlanmıştır.

Bilgisayar okuması sonuçları kPa olduğundan bu değerleri kg/cm^2 olarak çevirdiğimizde malzemenin kg/cm^2 cinsinden serbest basınç dayanımlarını belirleyebiliriz.

Silisli kum atığı 1 nolu malzeme serbest basınç değeri hesaplaması

$$258,1737kPa = 258173,7Pa = 258173,7 \frac{N}{m^2} * \frac{Kg_f}{9.8 * N} * \frac{m^2}{(100cm)^2}$$

$$258,1737kPa = 2,634 \frac{Kg_f}{cm^2} \text{ Olarak bulunmuştur.}$$

Silisli kum atığı ve diğer numunelerin 1 günlük kür süresi ve 28 günlük kür sürelerindeki serbest basınç değeri sayısal sonuçları EK-4 ve EK-5’te verilmiştir.

Silisli kum atığı ve silisli kum atığı + %10, %20 ve %30 oranında karıştırılmış termik santral uçucu kül karışımlarının serbest basınç dayanımları tayini 38 mm çapındaki numunelerle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Çizelge 6.6’da gösterilmektedir.

Çizelge 6.6 Numunelerin ve karışımların serbest basınç dayanımları.

Numune	1 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (Kg/cm ²)	1 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)	28 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (Kg/cm ²)	28 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)
Numune 2 Deney 1	2,63	258,17	2,14	209,64
Numune 2 Deney 2	2,54	248,59	2,99	292,86
Numune 2 Deney 3	1,75	171,31	2,71	265,21
Numune 3 Deney 1	2,92	285,68	7,49	733,63
Numune 3 Deney 2	3,02	296,24	8,46	828,73
Numune 3 Deney 3	4,64	454,46	8,04	788,08
Numune 4 Deney 1	3,36	328,85	8,90	872,35
Numune 4 Deney 2	3,68	360,63	14,75	1445,07
Numune 4 Deney 3	3,74	366,41	10,88	1066,36
Numune 5 Deney 1	4,49	439,77	22,05	2160,74
Numune 5 Deney 2	4,09	401,30	23,68	2320,37
Numune 5 Deney 3	3,32	325,40	23,01	2255,16

Silisli kum atığı (Numune 2) ve silisli kum atığı + %10, %20 ve %30 oranında karıştırılmış termik santrali uçucu kül karışımlarının (Numune3, Numune 4, Numune 5) serbest basınç dayanımları tayini her bir numune için 3’ er kere tekrarlanmış ve örneklerin ortalama serbest basınç dayanımları Çizelge 6.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.7 Numune3, Numune 4, Numune 5 ortalama serbest basınç dayanımları.

	1 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	1 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm²)	28 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (kN/m²)	28 günlük kürde Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm²)
Numune 2	226,02	2,3	255,90	2,61
Numune 3	345,46	3,52	783,46	7,99
Numune 4	351,96	3,59	1127,93	11,50
Numune 5	388,82	3,96	2245,42	22,89



6.7 KATILIK DERECELERİ

Hazırlanan numunelerin katılık dereceleri Çizelge 6.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.8 Numune3, Numune 4, Numune 5 Katılık Dereceleri.

	1 günlük kürede Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)	Katılık Derecesi	28 günlük kürede Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)	Katılık Derecesi
Numune 2	226,02	Çok Katı	255,90	Çok Katı
Numune 3	345,46	Çok Katı	783,46	Sert
Numune 4	351,96	Çok Katı	1127,93	Sert
Numune 5	388,82	Çok Katı	2245,42	Sert



BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada, ZETES 1 termik santraline ait uçucu kül ve Ereğli Borcam sanayine ait silis kumu hazırlama tesisi atığı olan silisli kum atığı malzemelerinin kimyasal özellikleri belirlenmiş ve uçucu kül ASTM C 618 sınıflandırmasına göre F sınıfı olarak belirlenmiştir. Bu sınıftaki uçucu küller yeterli sıkıştırma seviyelerinde düşük permeabilite değerleri göstermektedir.

Her iki malzeme farklı oranlarda (Silisli kum atığı, silisli kum atığı +%10 uçucu kül, silisli kum atığı +%20 uçucu kül, silisli kum atığı +%30 uçucu kül) (Numune2, Numune 3, Numune 4, Numune 5) karıştırılmış Zeminde en büyük kuru birim hacim ağırlığını veren su muhtevası, (Wopt, %) sırası ile 18.18, 16.64, 20.62 ve 20,23 olarak bulunmuştur.

Silisli kum atığı örneğinde hidrometre analizi gerçekleştirilmiş, malzemenin dane çaplarına bakılmış ve silisli kum atığı malzemesinin dane boyutları bakımından kil toprağına yakın dane çaplarında olduğu bulunmuştur.

Zemine ait kıvam limitlerinin belirlenmesi Plastiklik veya plastisiteye bağlı olup ince taneli zeminlerin kırılmadan şekil verilebilme özelliğini belirlemek için Likit Limit ve Plastik Limit Deneyle (Atterberg Limitleri / Kıvam Limitleri) gerçekleştirilmiştir. Silisli kum atığı malzemesi kütlece %10 ve %20 oranında ZETES 1 santrali uçucu külü karışımında elde edilen plastisite indisi değerinin arttığı, kütlece %30 ZETES 1 santrali uçucu külü karışımında ise plastisite indisi değerinin tekrar düştüğü görülmüştür. Plastisite indisindeki düşme kütlece %30 uçucu kül karışımli silisli kum atığı malzemesinin Likit limit değerinde düşüş, plastik limit değerinde de yükseliş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum uçucu külün belli bir orandan sonra silisli kum atığı malzemesinde akışkanlığı arttırdığını göstermektedir. Dört farklı numune (Numune2, Numune 3, Numune 4, Numune 5) için gerçekleştirilen plastisite indisi değerleri incelendiğinde Plastisite İndisi (PI) değerlerin $PI < 50$ olduğu saptanmıştır. Bu değer, düzenli

depolama tesisi geçirimsiz tabakalarında kullanılacak olan malzemeler için plastisite indisinin (PI)<50 olması koşulunu sağladığı görülmüştür.

Malzemelerin permeabilite katsayılarını belirlemek amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyi gerçekleştirilmiş ve permeabilite analiz sonuçlarında 4 farklı numune için bulunan permeabilite değerleri, sırası ile Permeabilite (k) değerleri silisli kum atığı (Numune 2) için $1,38 \times 10^{-10}$ m/sn, silisli kum atığı + %10 uçucu kül karışımı (Numune 3) için $3,64 \times 10^{-9}$ m/sn, silisli kum atığı + %20 uçucu kül karışımı (Numune 4) için $2,15 \times 10^{-9}$ m/sn, silisli kum atığı + %30 uçucu kül karışımı (Numune 5) için $6,73 \times 10^{-9}$ m/sn bulunmuştur. Bütün malzemelerin US EPA ve Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte de belirttiği atık düzenli depolama tesisleri için gerekli permeabilite katsayısı değerlerini sağladığı görülmüştür. En yüksek geçirimsizlik katsayısı değerinin silisli kum atığı malzemesi ile sağlandığı ve silisli kum atığının ZETES 1 santrali uçucu külü ile karışım oranı arttıkça geçirimsizlik katsayısının azaldığı görülmüştür.

Malzemeler için gerçekleştirilen serbest basınç analizinde çıkan sonuçların 2 kg/cm^2 olması koşulunun bütün malzemelerde sağlandığı görülmüştür. Ayrıca Silisli kum atığı malzemesi ile karışımı sağlanan uçucu külün oranının arttıkça (%10, %20 ve %30) hem 1 günlük kür süresinde hem de 28 günlük kür süresinde serbest basınç dayanımı değerinin arttığı görülmüştür.

7.1 ÖNERİLER

Termik santraller yüksek miktarlara katı atık oluşturduklarından dolayı atıkların bertarafı işletmeler için yüksek maliyetli bir süreçtir. Çevresel açıdan bakıldığında ise atık bertaraf yöntemlerinde piramidinin son basamağını oluşturan düzenli depolama yöntemi seçeneği yerine alternatif yöntemlerin araştırılması gerekliliği doğmaktadır. Bu çalışmada termik santral kaynaklı katı atıkların ve silis kumu hazırlama tesislerinden kaynaklanan atıkların kimyasal ve fiziksel özellikleri incelenmiş ve çeşitli sektörlerde yeniden kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle kimyasal analiz sonuçlarına göre F sınıfındaki uçucu küller yeterli sıkıştırma ile düşük permeabilite değerlerini sağlayarak, başta katı atık düzenli depolama tesisleri zemininde sızdırmazlık malzemesi olmak üzere, çeşitli dolgu işlemlerinde de kullanılabilmesi bulunmuştur.

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik'te atık depolama sahalarında kullanılması gereken kil veya eşdeğeri bir malzemedeki aranacak geçirgenlik katsayısı değerini silis kumu hazırlama tesisi kaynaklı silisli kum atığı malzemesi ve uçucu külle karışımları (%10 uçucu kül, %20 uçucu kül, %30 uçucu kül) karşılamaktadır. Bu malzemeler yeni kurulacak atık düzenli depolama sahalarında veya ihtiyaç duyulan geçirimsiz zemin özelliklerini sağlamakta kullanılabilir, bir atığın yeniden kullanımı sağlanacaktır.

Silis kumu hazırlama tesisi atık malzemesi %30'un üzerinde kül karışımları yapılarak kıvım limit değerleri, serbest basınç değerleri ve şişme değerleri incelenerek en yüksek serbest basınç değerleri incelenebilir, aynı şekilde yüksek kül karışımlarında PI değerlerindeki değişimler incelenerek numunelerin plastiklik özellikleri detaylandırılabilir ve şişme deneyleri yapılarak zeminde kullanılması halinde numunelerin şişme potansiyeli incelenebilir.

Silis kumu hazırlama tesisi atık malzemesi ile uçucu kül karışımı oranı arttıkça (%10, %20, %30) serbest basınç değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Serbest basınç dayanımı değeri yüksek zemin veya hem plastiklik özelliği olan hem de serbest basınç dayanım değeri yüksek olan malzeme kullanımını gerekli olan çeşitli sektörlerde uçucu kül ve silis kumu üretim tesisi atık malzemesi belirli oranlarda karışımı sağlanarak sektörde ana veya yardımcı ürün olarak kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- Akkaya B** (2013) Eren Enerji Termik Santrali Uçucu Küllerinin Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 3-9/ 84 s.
- Alataş T** (1996) Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, *Doktora Tezi*, Fırat Ün. Fen Bilimleri Enst. Elâzığ, 146 s.
- Aruntaş H Y** (2006) Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1): 193-203 s.
- ASTM** (1993) ASTM C 618-93 Standard Specification for Fly Ash and Raw or Claimed Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.02: 310-312 s.
- Atanur A** (1971) Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması, *Bayındırlık Bak., KGM. Yayınları*, Ankara, 219 s.
- Avcı S** (2005), “Türkiye’de Termik Santraller ve Çevresel Etkileri”, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü, *Coğrafya Dergisi*, 13: 1- 26 s.
- Aytekin M** (Ed) (2004) *DeneySEL Zemin Mekaniği, Genişletilmiş 2. Baskı*, ISBN: 975-523-028-9, Teknik Yayın Evi, Ankara, 83-197 s.
- Baykal G, Özturan T, Savaş M, Ramadan K** (1993) Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Müh. Odası, 18-19 Kasım 1993, Ankara Şubesi, 89-102 s.
- Bilgili M S** (2006) Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Atıkların Aerobik ve Anaerobik Ayrışması Üzerine Sızıntı Suyu Geri Devrinin Etkileri, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 188 s.
- Büyükmhçı M. Kemal** (2003) Yenilenebilir Enerji Kaynakları Avrupa Birliği Ülkelerindeki Uygulamalar ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Tarafından Hazırlanmakta Olan Kanun Tasarısı Taslağı Çerçevesinde Planlanan Önlemler, *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, TMMOB, 3-4 Ekim 2003 Kayseri, 15-22 s.
- Çınar Mühendislik Müşavirlik A.Ş** (2012) *Zonguldak Eren Termik Santrali (ZETES III) Çevresel Etki Değerlendirme Raporu*, Ankara Mayıs 2012, 150-174 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Darcy H** (1856) *Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon*, Dalmont, Paris, France.
- Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü** (1979) Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri, *E.İ.E Genel Yayın Direktörlüğü*, Ankara.
- Erdinç M** (1995) Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirimsizliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 100 s.
- Erdoğan T Y** (1993) Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu*, Ankara 1-8 s.
- Ergüt Ş** (1994) Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Sinterleşme Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 67 s.
- Erşan H** (1996) Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 75 s.
- Fincan P** (1996) Flowable Fiil Applications in Civil Engineering, *Yüksek Lisans Tezi*, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst, İstanbul, 152 s.
- Genç D** (2008) *Zemin Mekaniği ve Temeller*, Jeoloji Mühendisleri Odası, Yayın No:100, ISBN: 978-9944-89-555-2, Ankara, 133-144 s.
- Görhan, G, Kahraman E, Başpınar S ve Demir İ** (2008) Uçucu Kül Bölüm 1: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2: 85-94 s.
- Güler G, Güler E, İpekoğlu Ü ve Mordoğan H** (2005) Uçucu Küllerin Kullanım Alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, 9-12 Haziran 2005, İzmir.
- Günel R.G** (1996) Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 76 s.
- Gürbüz M, Özdemir Y** (2016), Afşin-Elbistan termik santrallerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin mesafe tabanlı algı analizi, *Türk Coğrafya Dergisi*, 43 s.
- Hamamcı R.B** (1991) Effect of Rubber, Carbon Black and Fly Ash on Physical Properties of Pavements, *Yüksek Lisans Tezi*, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., İstanbul, 123 s.
- Helmuth K** (1987) *Fly Ash in Cement Concrete*, Portland Cement Association, İllinois, 135 s.
- Işık M vd.** (2016) Kuvars (Silis) Kumu Hazırlama Tesisinin Proses Sularının Tekrar Kullanılabilirliği, *Teknik Uygunluk Raporu*, Eylül, 2-15 s.
- Intro** (1992) *Fly Ash as Addition to Concrete Inst. for Mat. And Env. Research*, A.A Balkema, Rotterdam 99 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- İlhan T** (1995) Sülfo Kalsik ve Siliko Kalsik Uçucu Küller İyileştirme ve Rolkritlerde Kullanımı, *Yüksek Lisans tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Joshi R C and Nagaraj T S** (1987) Fly Ash Utilization for Soil Stabilization, *Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks*, Eds. Balusubramaniam et al., Balkema Rotterdam.77-93 s.
- Karaca A** (2001) “Afşin-Elbistan Termik Santrali Emisyonlarının Çevre Topraklarının Fiziksel, Kimyasal ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Etkileri”, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (1): 95-10.
- Kurşun İ ve İpekoğlu B** (1995) Türkiye’de Kuvars Kumu Potansiyeline Genel Bir Bakış. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 21-22 Nisan 1995, İzmir.
- Kutchko G and Kim G** (2006) Fly ash characterization by SEM–EDS, US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 626 Cochran Mill Road, P.O. Box 10940, Pittsburgh, PA 15236, United States Received 27 October 2005; received in revised form 2 May 2006; accepted 13 May 2006 Available online 15 June 2006, 2537-2544 p.
- Martin J, Collins R, Browning J and Biehl F J** (1990) Properties and Use of Fly Ashes For Embankments, *Journal of Energy Engineering*, 16 (2): 71-86
- Mohan D K and Goel R K** (1959) *Correspondence*, Geotechnique, 9(3): London.
- Official Journal Of The European Communities** (1999) *Council Directive 1999/31/EC*, L 182/1, 26 April 1999.
- Önalp A ve Kılıç C** (1994) Doğu Karadeniz Killerinde Likit Limitin Tek Nokta Yöntemiyle Bulunması, *ZMTM 5.Ulusal Kongresi*, Ankara, 155-160 s.
- Önalp A** (2004) Zeminlerin Sınıflandırılması ve TS1500/2000’in Tanıtımı, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 430: 28.
- Özaydın K** (Ed) (2011) *Zemin Mekaniği*, Y.0029, ISBN: 978-975-511-145-X, Birsen Yayınevi, İstanbul, 16-25 s.
- Özturan T** (1990) Uçucu Kül- Çimento Bulamaçlarının Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması, *ZMTM 3. Ulusal Kongresi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul. 373-386 s.
- Peindel R D, Janardharam R and Burns F** (1992a) Evaluation of Flowable Fly Ash Backfill, Part I: Static Loading, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 118: 449-463.
- Peindel R D, Janardharam R and Burns F** (1992b) Evaluation of Flowable Fly Ash Backfill, Part II: Static Loading, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 118: 464-474.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Resmî Gazete** (2010) Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. Sayı: 27533, Adres: <http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr>, Ziyaret tarihi: 12.06.2017.
- Resmî Gazete** (2015) Atık Yönetimi Yönetmeliği. Sayı: 29314 Adres: <http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr>, Ziyaret tarihi: 25.07.2017.
- Tangüler A** (2015) Characterization of Fly Ashes From Thermal Power Plants in Turkey, *Degree of Master of Science*, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University 25-69 p.
- Taş M, Fidan D ve Yılmaz F** (2018) Uçucu Kül ve Bayburt Taşı ile Zemin Stabilizasyonu, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1): Bayburt.
- Toros H** (1987) Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi olarak Kullanılması, *Yük. Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 117 s.
- TS EN 197-1** (2002) *Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, TSE, Ankara.
- TS 1900-1** (2006) *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, ICS 93.020, 60 s.
- Türkiye İstatistik Kurumu** (2016) Enerji Kaynaklarına Göre Elektrik Enerjisi Üretimi ve Payları. Adres: www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1578, Ziyaret tarihi: 23.07.2017
- Türkiye İstatistik Kurumu** (2017) *Enerji Kaynaklarına Göre Elektrik Enerjisi Üretimi ve Payları*. www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=157, Ziyaret tarihi: 15.08.2018.
- Türkiye İstatistik Kurumu** (2016) *Termik Santral Su, Atıksu ve Atık İstatistikleri*. http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1019 Ziyaret tarihi: 10.09.2018
- Türker P, Erdoğan B, Katnaş F ve Yeğınobalı A** (2009) Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Temmuz, Ankara
- Tütünlü F ve Atalay Ü** (2001) *Utilization Of Fly Ash İn Manufacturing Of Building Bricks. International Ash Utilization Symposium*. <http://whocares.caer.uky.edu/wasp/AshSymposium/AshLibraryAgenda.asp>, Ziyaret tarihi: 24.09.2016.
- US EPA** (2007) Guidelines, Environmental management of landfill facilities, January, 30-48 s.
- Ünal O, Güçlüer K ve Öz V** (2015) Yatağan Uçucu Külünün Yapısal Alanda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, AKÜ FEMÜBİD 15 (2015) 025601 (1-7).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ünver E** (2015) Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 116-117 s.
- Yılmaz F** (2016) Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı, *ISEM 2016 3rd International Symposium on Environment and Morality, 4-6 November 2016*, Alanya 1175-1180 s.
- Yılmaz I, Yıldırım M ve Keskin İ** (2009) *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Problemler*, ISBN: 978-975-523-043-6, Teknik Yayın Evi, Ankara, 18-23 s.
- Yılmaz İ, İlbaş M ve Su Ş** (2003) “Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi”, *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, TMMOB, 3-4 Ekim 2003, Kayseri, 399-401 s.
- Yılmaz Ş** (1992) Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Verma C L, Handa S K, Jain S K and Yadav R K** (1998) “Techno-commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India”, *Construction and Building Materials*, 12 (6-7): 341-346.
- Wasti Y** (1990) Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanım Olanakları, *İMO, Teknik Dergi*, 1: 177-178.
- Wasti Y** (1993) Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı: *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, (1993) Ankara, *Bildiriler Kitabı*, 37 – 44 s.



EK AÇIKLAMALAR

EK-A Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleri (Atterberg Limitleri / Kıvam Limitleri hesaplamaları)

Çizelge A.1 Numune 2 likit limit hesaplamaları.

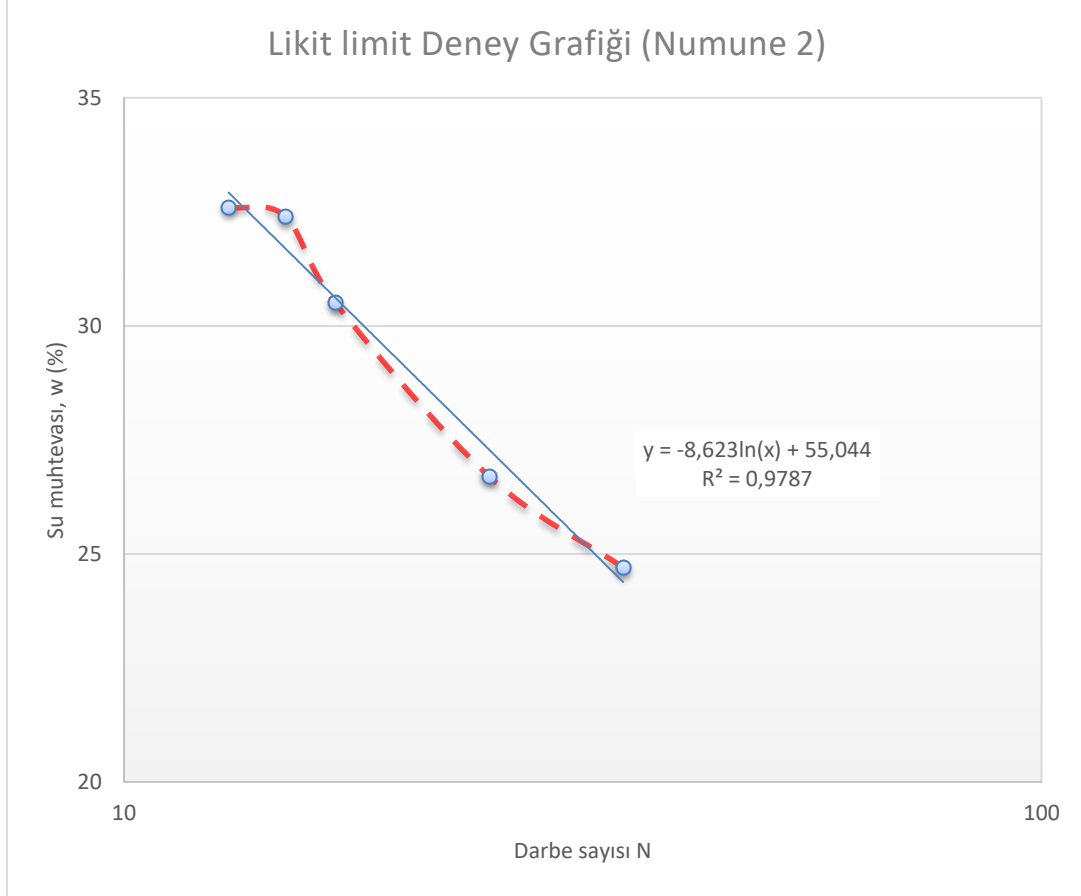
LİKİT LİMİT DENEYİ					
Kap No	1	2	3	4	5
Kabın Kütlesi (g)	45.305	49.225	48.505	44.415	48.909
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	58.648	63.885	62.594	60.152	65.207
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	56.004	60.798	59.303	56.305	62.708
Suyun Kütlesi (g)	2.644	3.087	3.291	3.847	4,499
Kuru Zemin Kütlesi (g)	10.699	11.573	10.798	11.89	13.803
Su İçeriği (%)	24.71	26.67	30.48	32.35	32.59
Darbe Sayısı	35	25	17	15	13

Çizelge A.2 Numune 2 plastik limit hesaplamaları.

PLASTİK LİMİT	
Kap No	K1
Kabın Kütlesi (g)	22.5
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	31.364
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	30.027
Suyun Kütlesi (g)	1.337
Kuru Zemin Kütlesi (g)	7.527
Su İçeriği (%)	17.76
Plastik Limit	18

Çizelge A.3 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.

Likit Limit (w_L veya LL)	Plastik Limit (w_p veya PL)	Plastisite İndisi (I_p veya PI)
27	18	9



Şekil A.1 Numune 2 likit limit eğrisi.

Çizelge A.4 Numune 3 likit limit hesaplamaları.

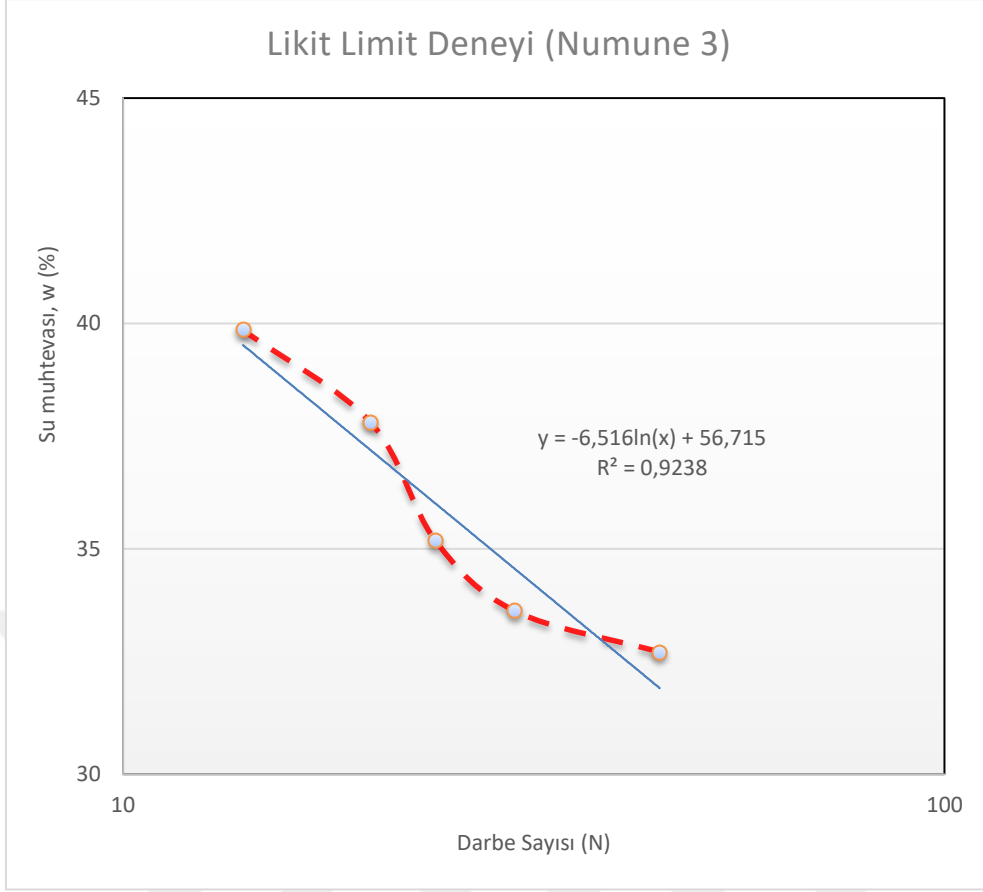
LİKİT LİMİT DENEYİ					
Kap No	1	2	3	4	5
Kabın Kütlesi (g)	45.3	49.2	48.5	44.4	48.9
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	59.5	64.7	63.1	60.8	68.2
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	56	60.8	59.3	56.3	62.7
Suyun Kütlesi (g)	3.5	3.9	3.8	4.5	5.5
Kuru Zemin Kütlesi (g)	10.7	11.6	10.8	11.9	13.8
Su İçeriği (%)	32.71	33.62	35.19	37.82	39.86
Darbe Sayısı	45	30	24	20	14

Çizelge A.5 Numune 3 plastik limit hesaplamaları.

PLASTİK LİMİT	
Kap No	K2
Kabın Kütlesi (g)	22.1
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	36.3
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	33.2
Suyun Kütlesi (g)	3.1
Kuru Zemin Kütlesi (g)	11.1
Su İçeriği (%)	27.93
Plastik Limit	13.96

Çizelge A.6 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.

Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
36	14	22



Şekil A.2 Numune 3 likit limit deneyi grafiği.

Çizelge A.7 Numune 4 likit limit hesaplamaları.

LİKİT LİMİT DENEYİ

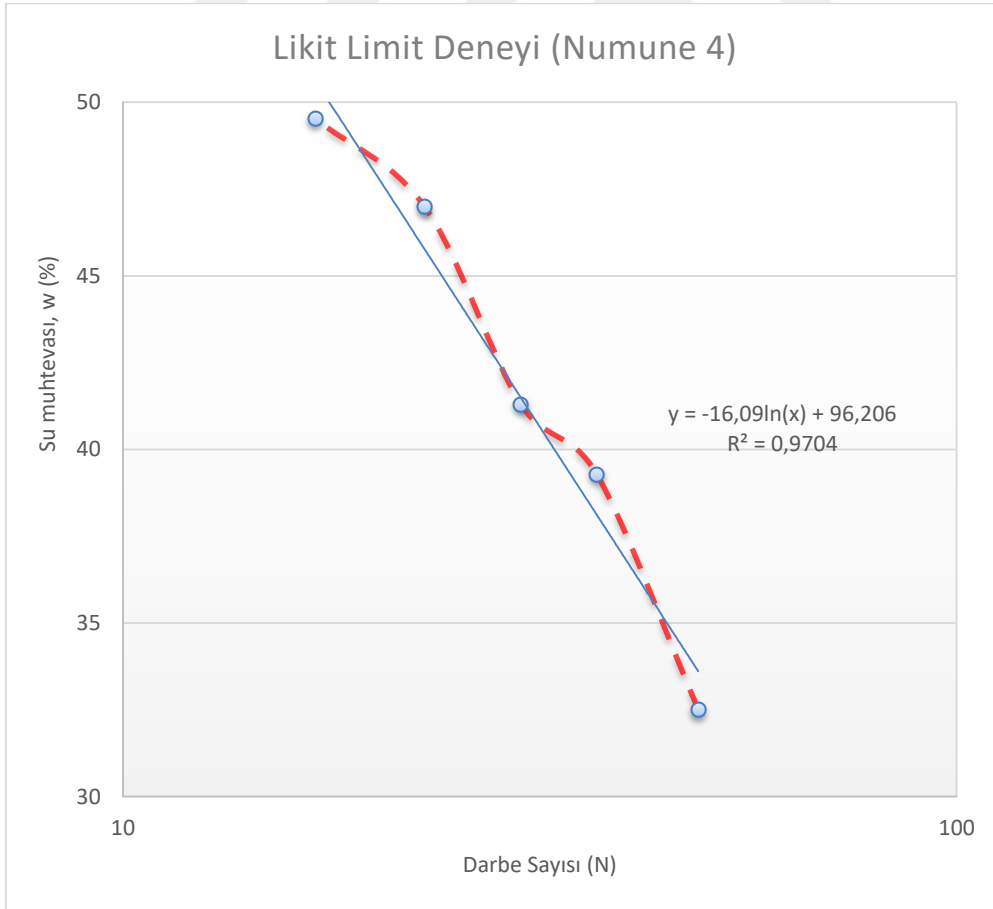
Kap No	1	2	3	4	5
Kabın Kütlesi (g)	51.7	54	46.2	53.3	48.9
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	67.6	69.6	59.2	68	64.9
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	63.7	65.2	55.4	63.3	59.6
Suyun Kütlesi (g)	3.9	4.4	3.8	4.7	5.3
Kuru Zemin Kütlesi (g)	12	11.2	9.2	10	10.7
Su İçeriği (%)	32.50	39.29	41.30	47.00	49.53
Darbe Sayısı	49	37	30	23	17

Çizelge A.8 Numune 4 plastik limit hesaplamaları.

PLASTİK LİMİT	
Kap No	K3
Kabın Kütlesi (g)	22.3
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	32.3
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	30
Suyun Kütlesi (g)	2.3
Kuru Zemin Kütlesi (g)	7.7
Su İçeriği (%)	29.87
Plastik Limit	14.94

Çizelge A.9 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.

Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
44	15	29



Şekil A.3 Numune 4 likit limit deneyi grafiği.

Çizelge A.10 Numune 5 likit limit hesaplamaları.

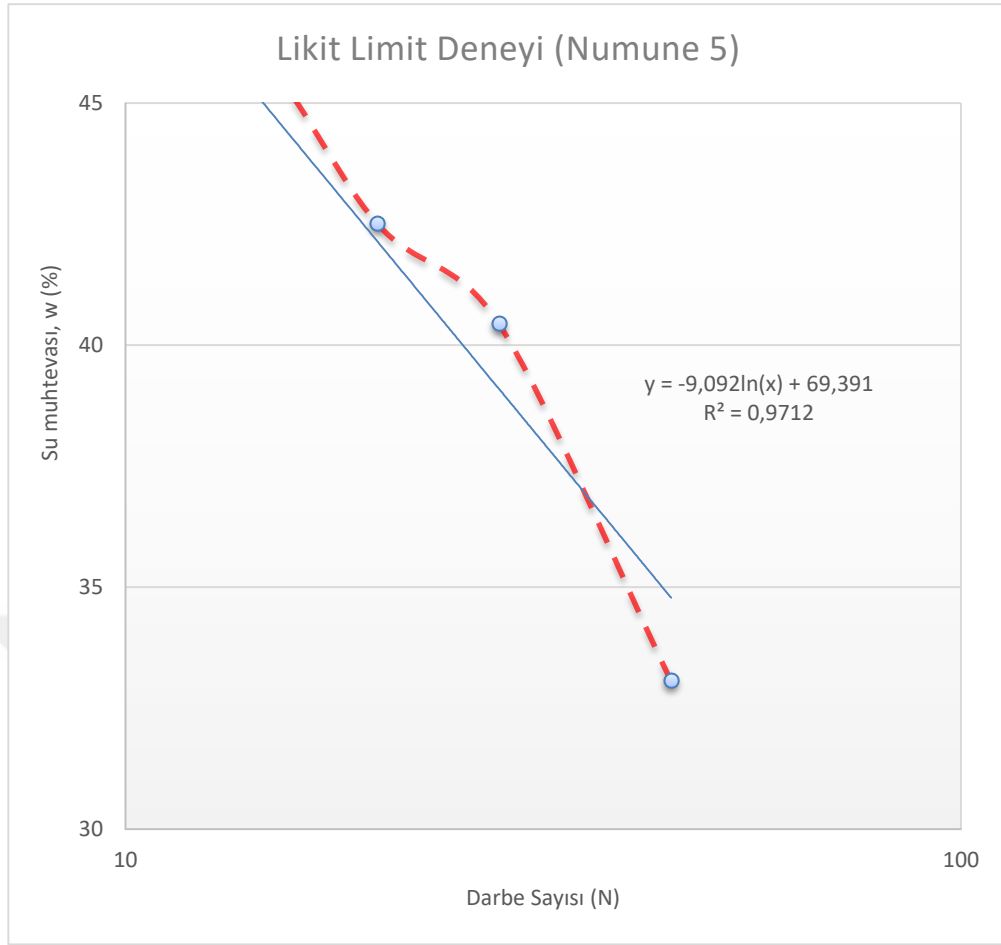
LİKİT LİMİT DENEYİ					
Kap No	1	2	3	4	5
Kabın Kütlesi (g)	22.5	17.3	17.1	14.4	22.5
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	39	36.4	35.2	29.4	38.8
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	34.9	30.9	29.8	24.6	33.1
Suyun Kütlesi (g)	4.1	5.5	5.4	4.8	5.7
Kuru Zemin Kütlesi (g)	12.4	13.6	12.7	10.2	10.6
Su İçeriği (%)	33.06	40.44	42.52	47.06	53.77
Darbe Sayısı	45	28	20	13	5

Çizelge A.11 Numune 5 plastik limit hesaplamaları.

PLASTİK LİMİT	
Kap No	K4
Kabın Kütlesi (g)	22.8
Kap + Yaş Zemin Kütlesi (g)	34.9
Kap + Kuru Zemin Kütlesi (g)	31.7
Suyun Kütlesi (g)	3.2
Kuru Zemin Kütlesi (g)	8.9
Su İçeriği (%)	35.96
Plastik Limit	17.98

Çizelge A.12 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi.

Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
40	18	22



Şekil A.4 Numune 5 likit limit deneyi grafiği

EK-B Zemin Sıkıştırma Deneyleri (Standart Proctor Deneyi)**Çizelge B.1 Numune 2 yaş birim hacim ağırlığı (YBHA)**

Yaş birim hacim ağırlık (Numune 2)					
Deney No	1(%5 su)	2(%10 su)	3(%15 su)	4(%20 su)	5(%25 su)
Kalıp yüksekliği (mm)	116.73	116.73	116.73	116.73	116.73
Kalıp çapı (mm)	101	101	101	101	101
Kalıp ağırlığı (g)	3296.9	3296.9	3296.9	3296.9	3296.9
Kalıp hacmi (cm³)	935.22	935.22	935.22	935.22	935.22
Yaş zemin + kalıp (g)	4798.8	4943.3	5044.3	5201.5	5126
Yaş zemin (g/cm³)	1501.9	1646.4	1747.4	1904.6	1829.1
YBHA (ρ_n)	1.61	1.76	1.87	2.04	1.96

Çizelge B.2 Numune 2 kuru birim hacim ağırlığı (KBHA) ve su muhtevası

Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık					
Deney No	1	2	3	4	5
Kap no	A1	A2	A3	A4	A5
Kap ağırlığı	51.7	54	50.3	53.3	52.2
Yaş numune + kap (g)	136.65	146.53	142.9	156.6	165.8
Kuru numune + kap (g)	132.6	138.4	130.8	139.9	143.9
Suyun ağırlığı (g)	4.05	8.13	12.1	16.7	21.9
Kuru numune ağırlığı (g)	80.9	84.4	80.5	86.6	91.7
Su içeriği, w (%)	5.01	9.63	15.03	19.28	23.88
KBHA (ρ_k) (g/cm³)	1.53	1.61	1.62	1.71	1.58

Çizelge B.3 Numune 3 yaş birim hacim ağırlık (YBHA)

Yaş birim hacim ağırlık (Numune 3)						
Deney No	1(%4 su)	2(%8 su)	3(%12 su)	4(%16 su)	5(%20 su)	6(%24 su)
Kalıp yüksekliği (mm)	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
Kalıp çapı (mm)	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5
Kalıp ağırlığı (g)	3874.2	3874.2	3874.2	3874.2	3874.2	3874.2
Kalıp hacmi (cm³)	945.07	945.07	945.07	945.07	945.07	945.07
Yaş zemin + kalıp (g)	5296.6	5393.7	5510.2	5635.5	5741.7	5745.6
Yaş zemin (g/cm³)	1422.4	1519.5	1636	1761.3	1867.5	1871.4
YBHA (ρ_n)	1.505	1.608	1.731	1.864	1.976	1.980

Çizelge B.4 Numune 3 kuru birim hacim ağırlık (KBHA) ve su muhtevası

Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık						
Deney No	1	2	3	4	5	6
Kap no	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Kap ağırlığı	22.5	22.6	22.3	22.1	22.7	23.1
Yaş numune + kap (g)	45.9	50.1	62.8	65.1	72	75.2
Kuru numune + kap (g)	45.2	48.7	59.2	60.2	65.2	66.6
Suyun ağırlığı (g)	0.7	1.4	3.6	4.9	6.8	8.6
Kuru numune ağırlığı (g)	22.7	26.1	36.9	38.1	42.5	43.5
Su içeriği, w (%)	3.08	5.36	9.76	12.86	16.00	19.77
KBHA (ρ_k) (g/cm³)	1.46	1.53	1.58	1.65	1.70	1.65

Çizelge B.5 Numune 4 yaş birim hacim ağırlık (YBHA)

Yaş birim hacim ağırlık (Numune 4)						
Deney No	1(%5 su)	2(%10 su)	3(%15 su)	4(%20 su)	5(%25 su)	6(%30 su)
Kalıp yüksekliği (mm)	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
Kalıp çapı (mm)	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5
Kalıp ağırlığı (g)	3876.9	3876.9	3876.9	3876.9	3876.9	3876.9
Kalıp hacmi (cm³)	945.07	945.07	945.07	945.07	945.07	945.07
Yaş zemin + kalıp (g)	5155.2	5339.5	5469.8	5595.2	5681	5623.1
Yaş zemin (g/cm³)	1278.3	1462.6	1592.9	1718.3	1804.1	1746.2
YBHA (ρ_n)	1.35	1.55	1.69	1.82	1.91	1.8

Çizelge B.6 Numune 4 kuru birim hacim ağırlık (KBHA) ve su muhtevası

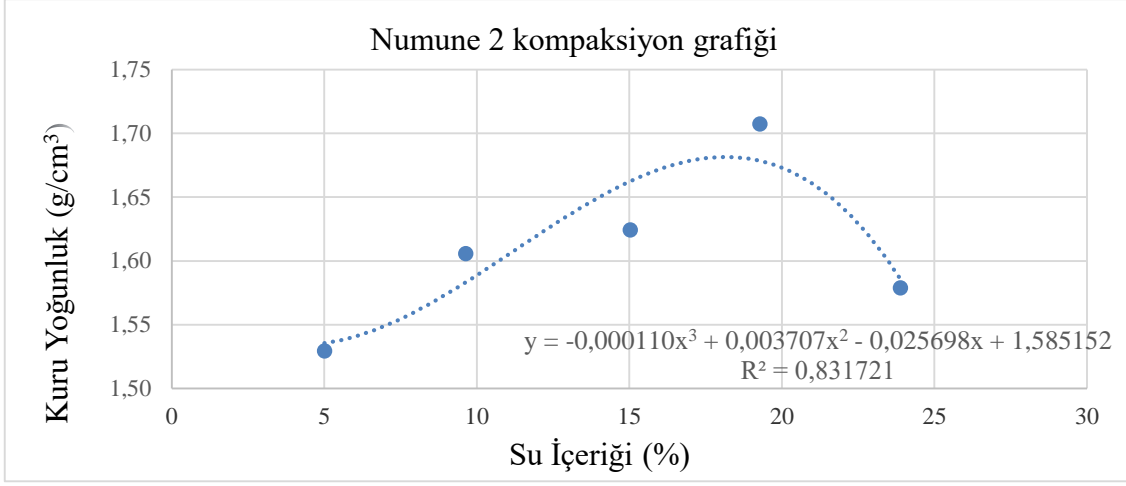
Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık						
Deney No	1	2	3	4	5	6
Kap no	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Kap ağırlığı	22.4	22	22.3	21.6	22.1	22.5
Yaş numune + kap (g)	62.1	65.8	64.7	78.6	76.1	70.2
Kuru numune + kap (g)	60.3	62.6	59.7	71.5	67.8	59.7
Suyun ağırlığı (g)	1.8	3.2	5	7.1	8.3	10.5
Kuru numune ağırlığı (g)	37.9	40.6	37.4	49.9	45.7	37.2
Su içeriği, w (%)	4.75	7.88	13.37	14.23	18.16	28.23
KBHA (ρ_k) (g/cm³)	1.29	1.43	1.49	1.59	1.62	1.44

Çizelge B.7 Numune 5 yaş birim hacim ağırlık (YBHA)

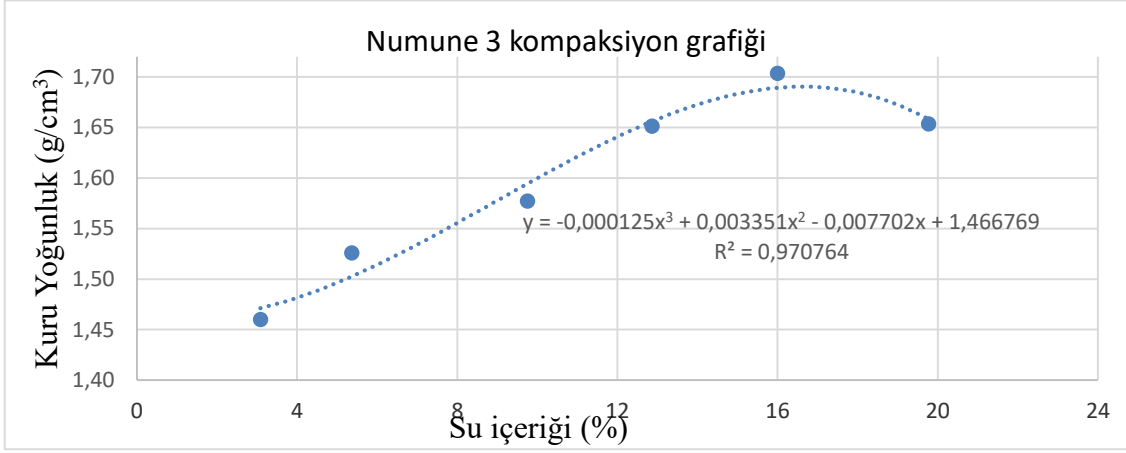
Deney No	Yaş birim hacim ağırlık (Numune 5)						
	1(%5su)	2(%10su)	3(%15su)	4(%20su)	5(%25su)	6(%30su)	7(%35su)
Kalıp yüksekliği (mm)	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8	116.8
Kalıp çapı (mm)	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5
Kalıp ağırlığı (g)	3876.9	3876.9	3876.9	3876.9	3876.9	3876.9	3876.9
Kalıp hacmi (cm ³)	945.07	945.07	945.07	945.07	945.07	945.07	945.07
Yaş zemin + kalıp (g)	4995.5	5256.4	5361.4	5479.2	5610.2	5608.2	5577.6
Yaş zemin (g/cm ³)	1118.6	1379.5	1484.5	1602.3	1733.3	1731.3	1700.7
YBHA (ρ_n)	1.184	1.460	1.571	1.695	1.834	1.832	1.800

Çizelge B.8 Numune 5 kuru birim hacim ağırlık (KBHA) ve su muhtevası

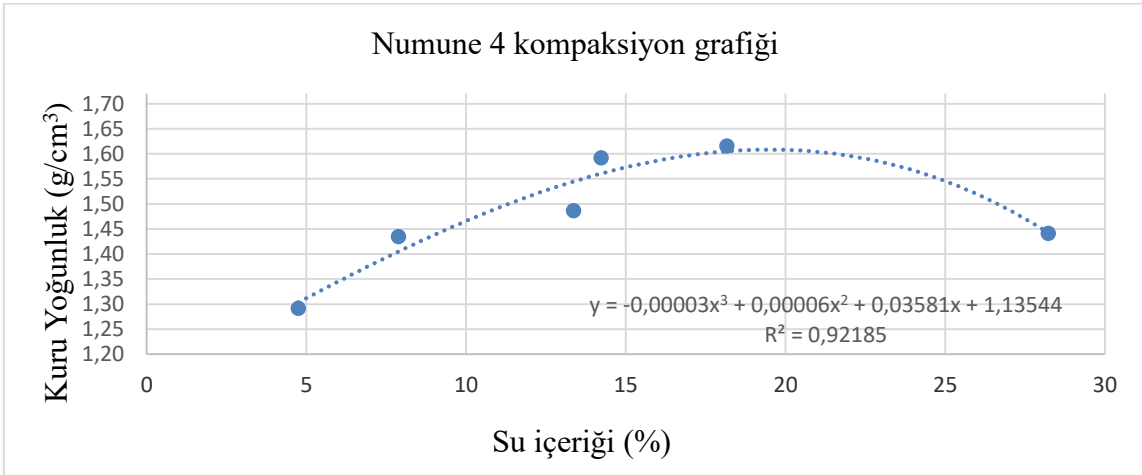
Deney No	Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık						
	1	2	3	4	5	6	7
Kap no	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Kap ağırlığı	48.3	56.6	46.2	51.7	53.9	50.3	58.1
Yaş numune + kap (g)	77.5	90.5	80	91.3	99.6	98.6	109
Kuru numune + kap (g)	76.5	88	76.3	85.6	91.5	88.6	96.9
Suyun ağırlığı (g)	1	2.5	3.7	5.7	8.1	10	12.1
Kuru numune ağırlığı (g)	28.2	31.4	30.1	33.9	37.6	38.3	38.8
Su içeriği, w (%)	3.55	7.96	12.29	16.81	21.54	26.11	31.19
KBHA (ρ_k) (g/cm ³)	1.14	1.35	1.40	1.45	1.51	1.45	1.37



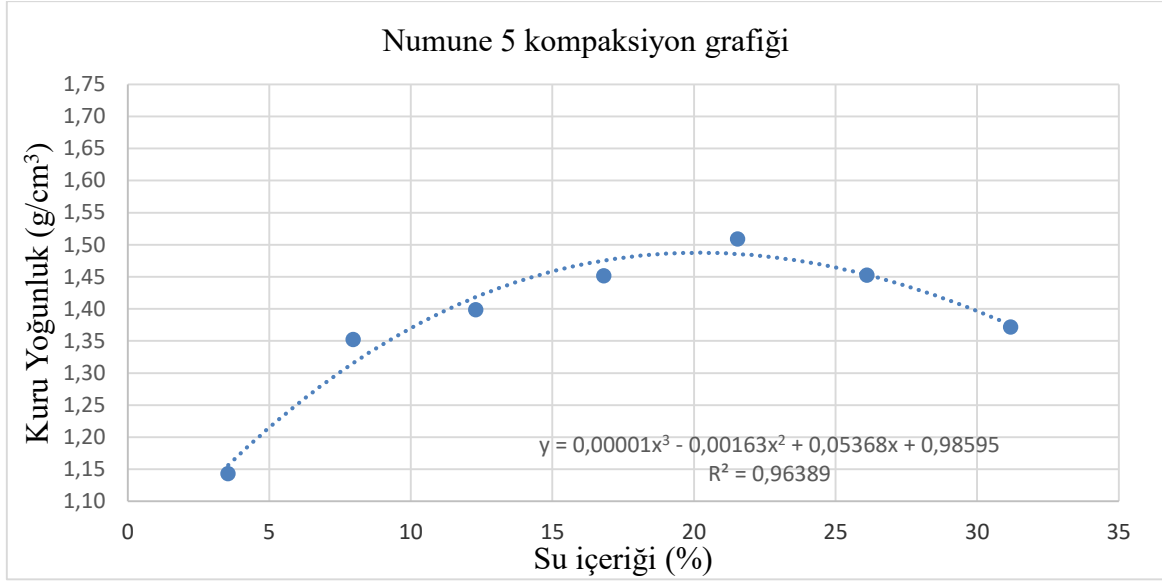
Şekil B.1 Numune 2 kompaksiyon grafiği



Şekil B.2 Numune 3 kompaksiyon grafiği



Şekil B.3 Numune 4 kompaksiyon grafiği



Şekil B.4 Numune 5 kompaksiyon grafiği

EK-C Düşen seviyeli permeabilite hesaplamaları

Çizelge C.1 Numune 2 permeabilite deney sonuçları

DÜŞEN SEVİYELİ PERMEAMETRE DENEYİ						
Deney Tarihi 25/05/2016						
Numune No 1						
Özgül Ağırlık G_1 = 2.55						
Numune Yüksekliği H = 11.68 cm						
Numune Çapı D = 10.14 cm						
Cam Boru Çapı d_2 = 0.35 cm						
Başlangıç Yüksekliği h_0 = 100.00 cm						
Zaman (dakika)	Su yüksekliği (cm)	Sıcaklık (°C)	Permeabilite (cm/s)	Permeabilite 20°C (cm/s)	Ortalama yükseklik (cm)	
t	h_t	T_e	k_T	k		
60	99.4	18	2.33E-08	2.44E-08	5.16	
120	99.3	18	1.36E-08	1.43E-08	0.27	
960	96.8	18	7.86E-09	8.25E-09	0.00	
1680	94.5	18	7.81E-09	8.20E-09	0.00	
Ortalama Permeabilite k_{ta} = 1.31E-08 cm/s						
Ortalama permeabilite k = 1.38E-08 cm/sn						

Çizelge C.2 Numune 3 permeabilite deney sonuçları

DÜŞEN SEVİYELİ PERMEAMETRE DENEYİ

Deney Tarihi:	25/05/2016
Numune No	2
Özgül Ağırlık $G_s =$	2.38
Numune Yüksekliği $H =$	11.68 cm
Numune Çapı $D =$	10.14 cm
Cam Boru Çapı $d_s =$	0.35 cm
Başlangıç Yüksekliği $h_0 =$	100.00 cm

Zaman (dakika)	Su yüksekliği (cm)	Sıcaklık (°C)	Permeabilite (cm/s)	Permeabilite 20°C (cm/s)	Ortalama Yükseklik (cm)
t	h_t	T_e	k_T	k	
13	98.6	18	2.52E-07	2.64E-07	98.08
21	97.5	18	2.80E-07	2.94E-07	96.91
144	82.2	18	3.16E-07	3.32E-07	80.65
890	25.1	18	3.60E-07	3.78E-07	26.46
1360	4.6	18	5.25E-07	5.52E-07	13.11
			Ortalama Permeabilite $k_{fa} =$	3.46E-07	cm/sn
			Ortalama Permeabilite $k =$	3.64E-07	cm/sn

Çizelge C.3 Numune 4 permeabilite deney sonuçları

DÜŞEN SEVİYELİ PERMEAMETRE DENEYİ

Deney Tarihi:	25/05/2016
Numune No	3
Özgül Ağırlık $G_s =$	2.45
Numune Yüksekliği $H =$	11.68 cm
Numune Çapı $D =$	10.14 cm
Cam Boru Çapı $d_s =$	0.35 cm
Başlangıç Yüksekliği $h_0 =$	100.00 cm

Zaman (dakika)	Su yüksekliği (cm)	Sıcaklık (°C)	Permeabilite (cm/s)	Permeabilite 20°C (cm/s)	Ortalama Yükseklik (cm)
t	h_t	T_e	k_T	k	
7	99.7	18	9.95E-08	1.05E-07	99.39
26	97.2	18	2.53E-07	2.66E-07	97.73
58	94.1	18	2.43E-07	2.55E-07	95.02
106	90.5	18	2.18E-07	2.29E-07	91.08
1162	36.4	18	2.02E-07	2.12E-07	35.92
1447	27.8	18	2.05E-07	2.16E-07	27.94
1568	24.3	18	2.09E-07	2.20E-07	25.12

Ortalama Permeabilite $k_{Ta} =$ 2.04E-07 cm/sn

Ortalama Permeabilite $k =$ 2.15E-07 cm/sn

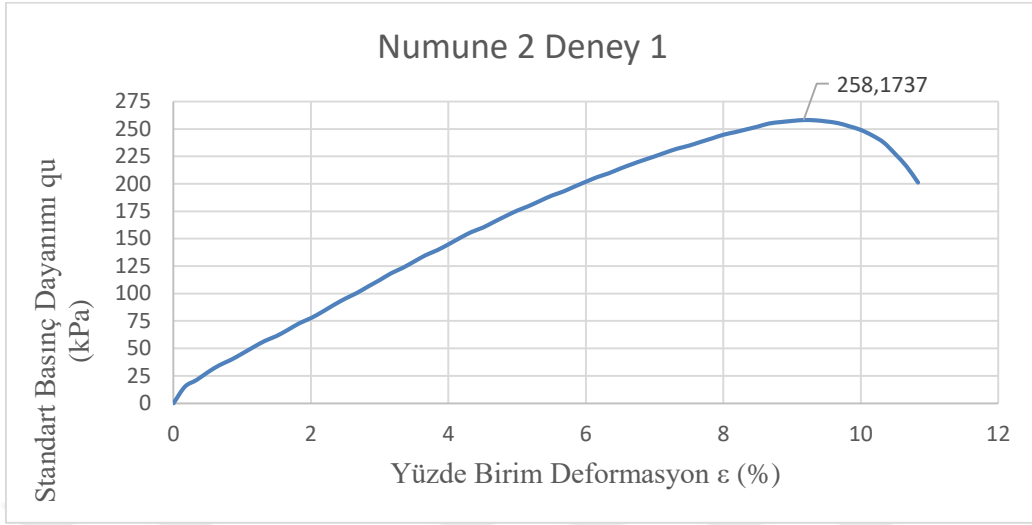
Çizelge C.4 Numune 5 permeabilite deney sonuçları

DÜŞEN SEVİYELİ PERMEAMETRE DENEYİ

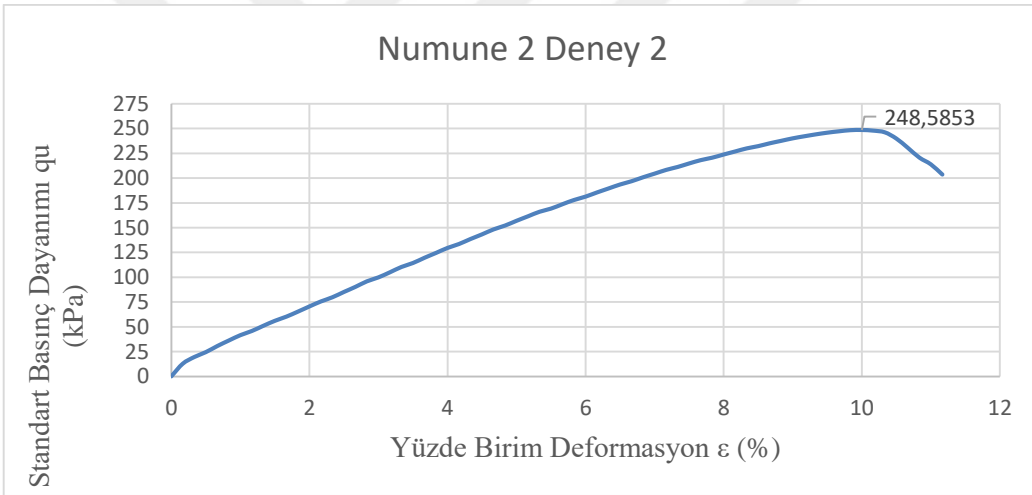
Deney Tarihi:	25/05/2016
Numune No	4
Özgül Ağırlık $G_s =$	2.50
Numune Yüksekliği $H =$	11.68 cm
Numune Çapı $D =$	10.14 cm
Cam Boru Çapı $d_s =$	0.55 cm
Başlangıç Yüksekliği $h_0 =$	100.00 cm

Zaman (dakika)	Su yüksekliği (cm)	Sıcaklık (°C)	Permeabilite (cm/s)		Ortalama Yükseklik (cm)
			k_T	Permeabilite 20°C (cm/s) k	
23	96.7	18	8.36E-07	8.78E-07	97.46
71	91.8	18	6.90E-07	7.25E-07	92.37
1127	33.9	18	5.50E-07	5.78E-07	28.36
1412	25.1	18	5.61E-07	5.89E-07	20.62
1533	22	18	5.66E-07	5.94E-07	18.01
			Ortalama Permeabilite $k_{Ta} =$	6.40E-07	cm/s
			Ortalama Permeabilite $k =$	6.73E-07	cm/s

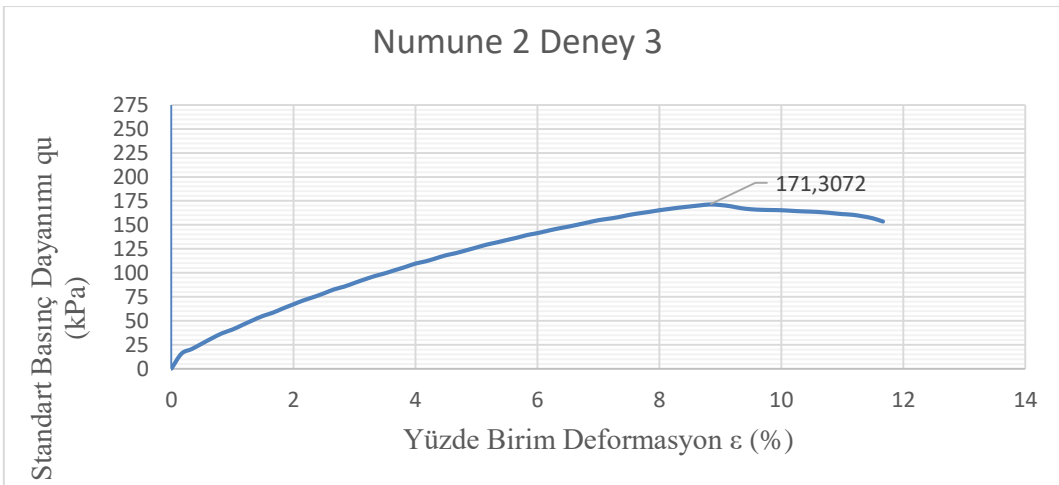
EK-D Serbest Basınç Dayanımı Grafikleri 1 günlük



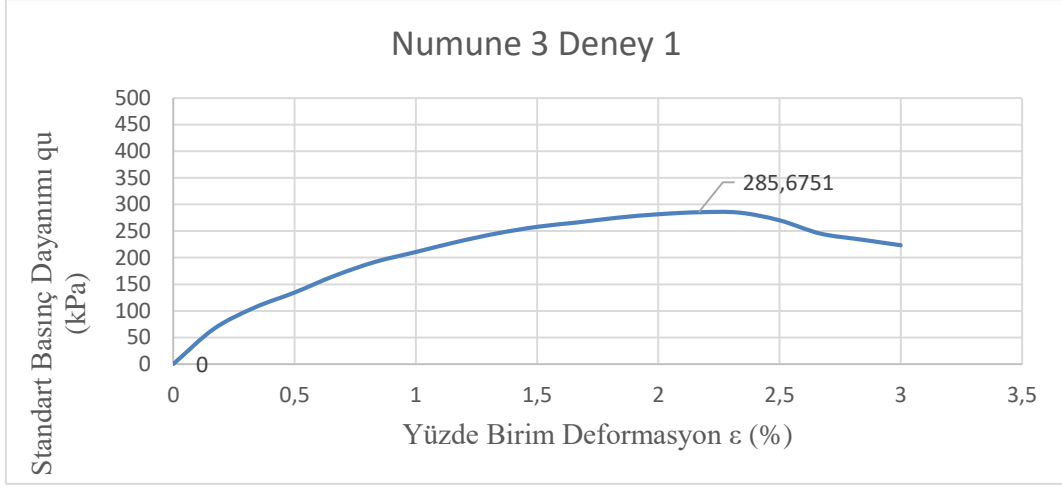
Şekil D.1 Numune 2 bir numaralı serbest basınç deneyi



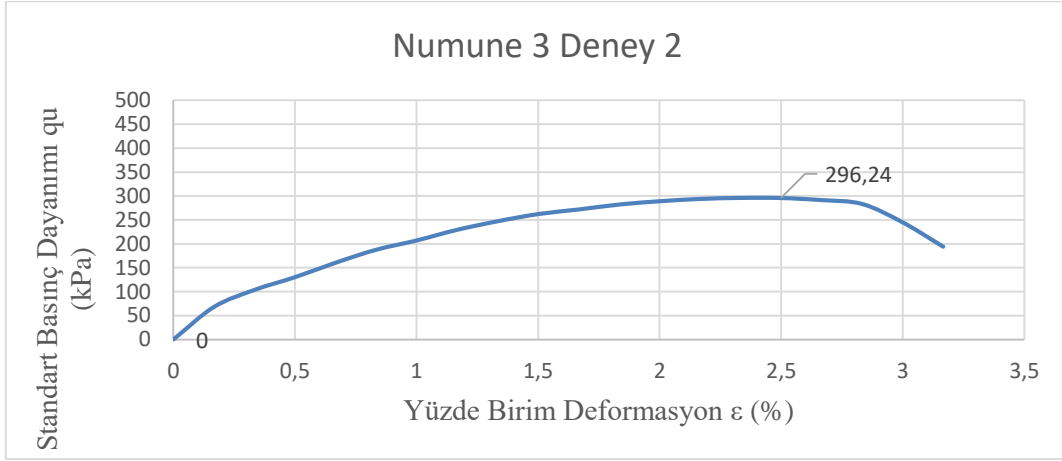
Şekil D.2 Numune 2 iki numaralı serbest basınç deneyi



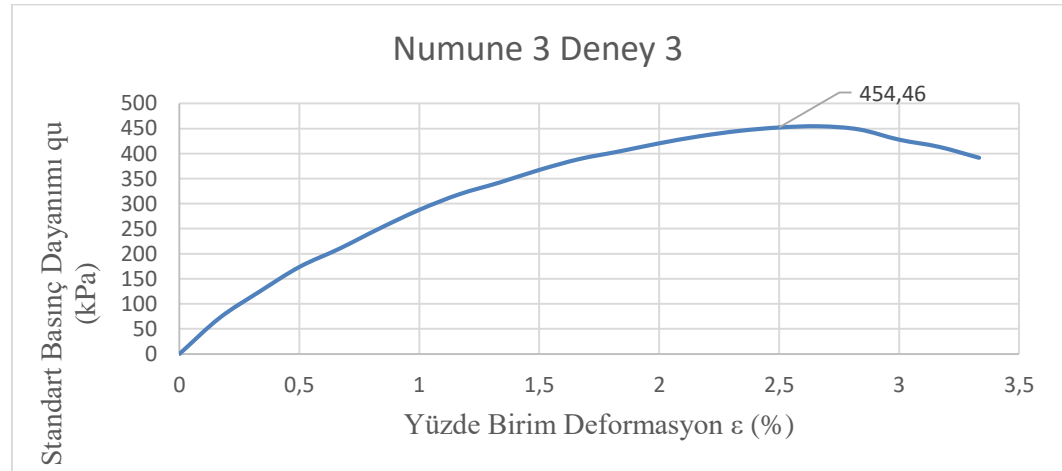
Şekil D.3 Numune 2 üç numaralı serbest basınç deneyi



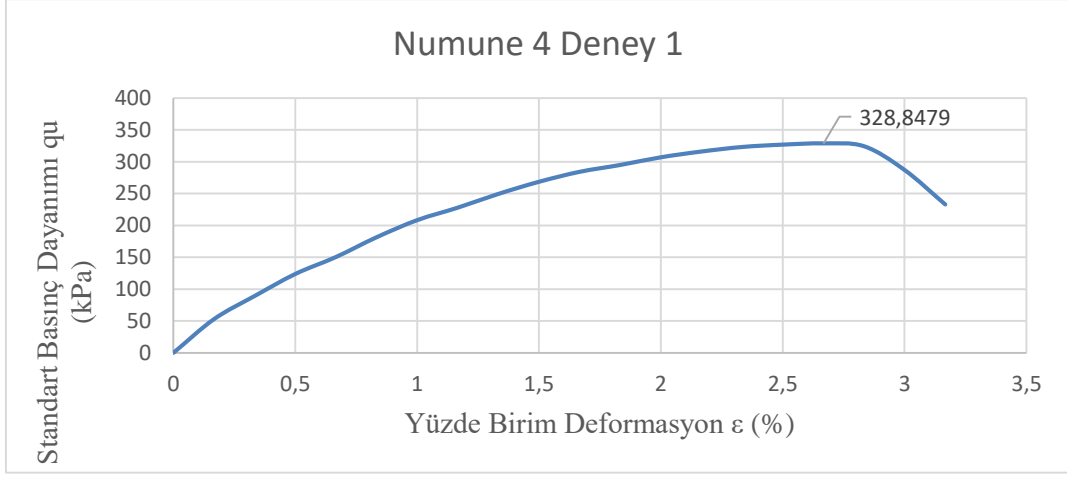
Şekil D.4 Numune 3 bir numaralı serbest basınç deneyi



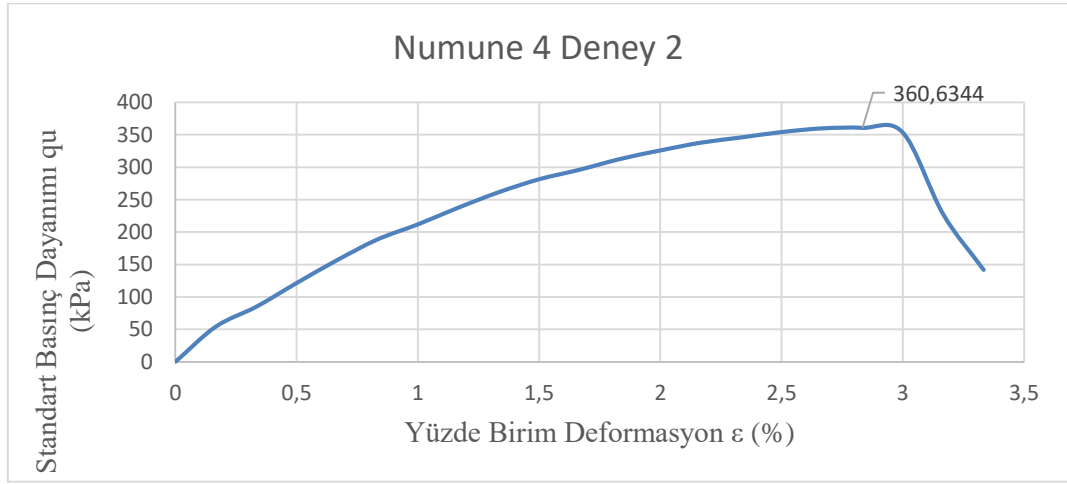
Şekil D.5 Numune 3 iki numaralı serbest basınç deneyi



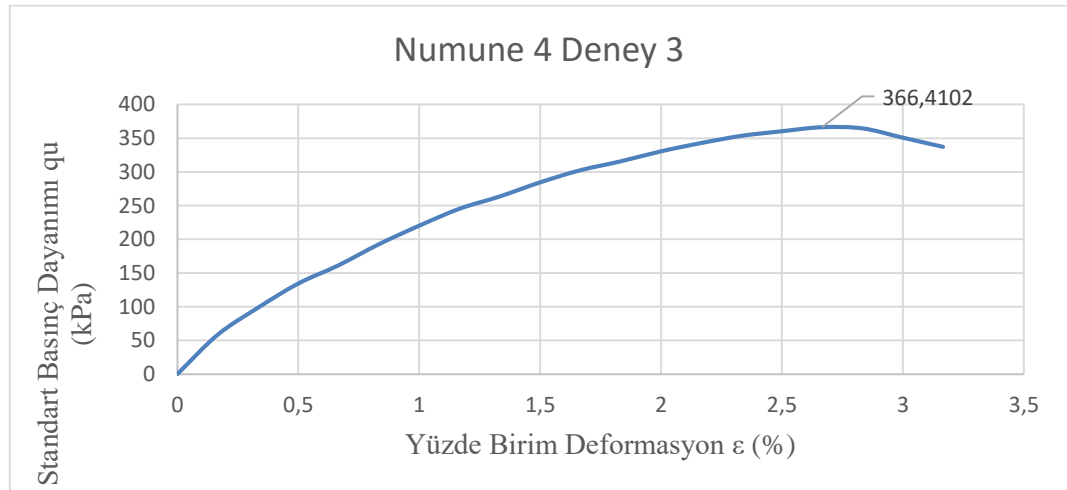
Şekil D.6 Numune 3 üç numaralı serbest basınç deneyi



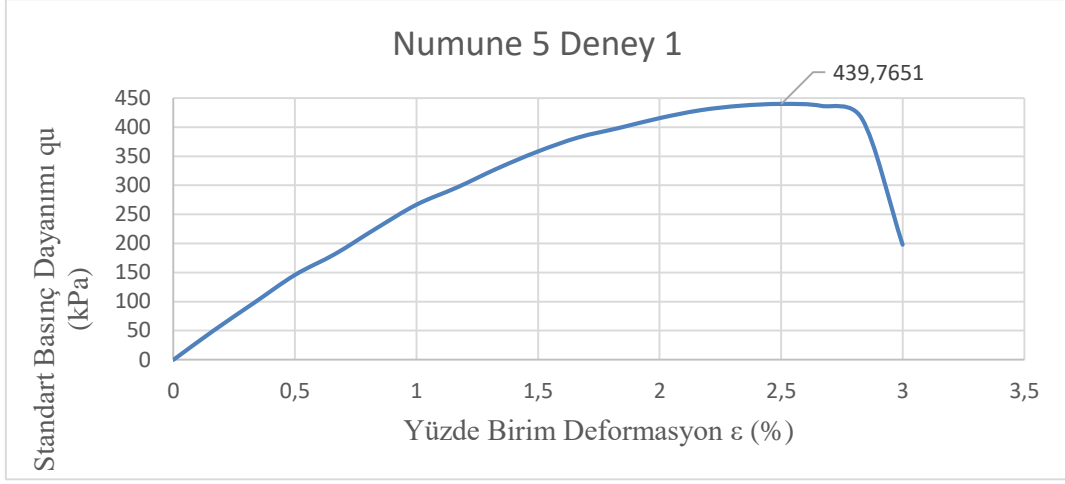
Şekil D.7 Numune 4 bir numaralı serbest basınç deneyi



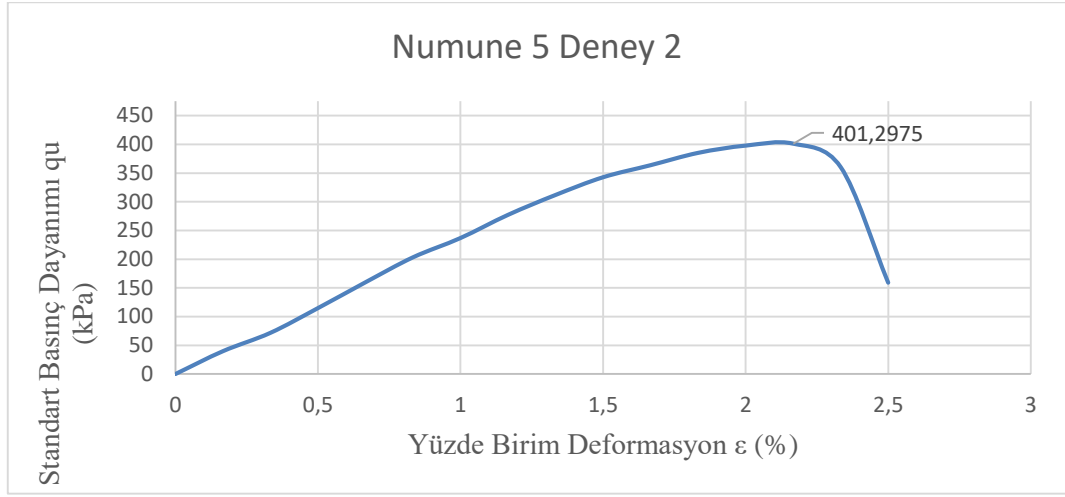
Şekil D.8 Numune 4 iki numaralı serbest basınç deneyi



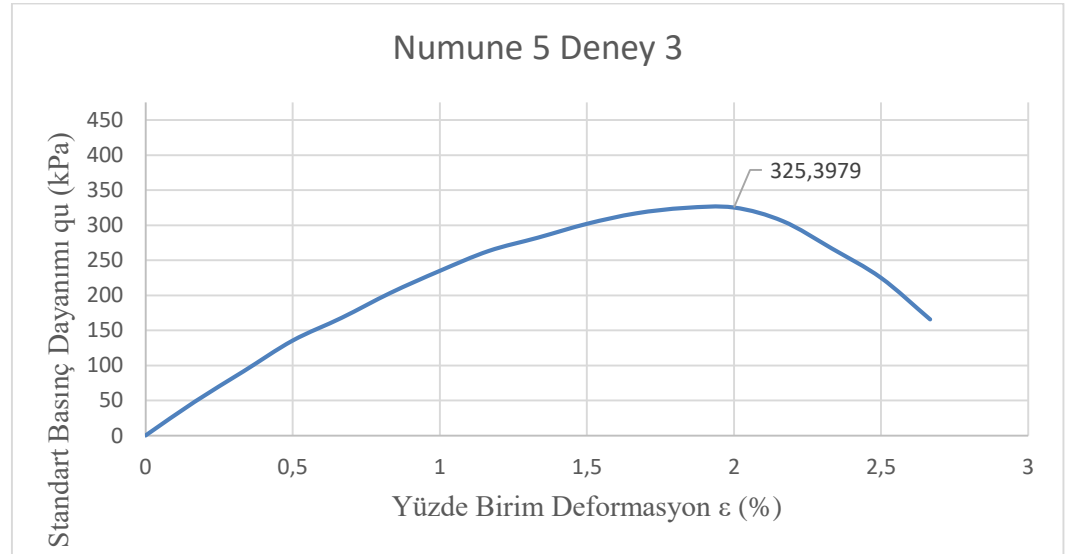
Şekil D.9 Numune 4 üç numaralı serbest basınç deneyi



Şekil D.10 Numune 5 bir numaralı serbest basınç deneyi

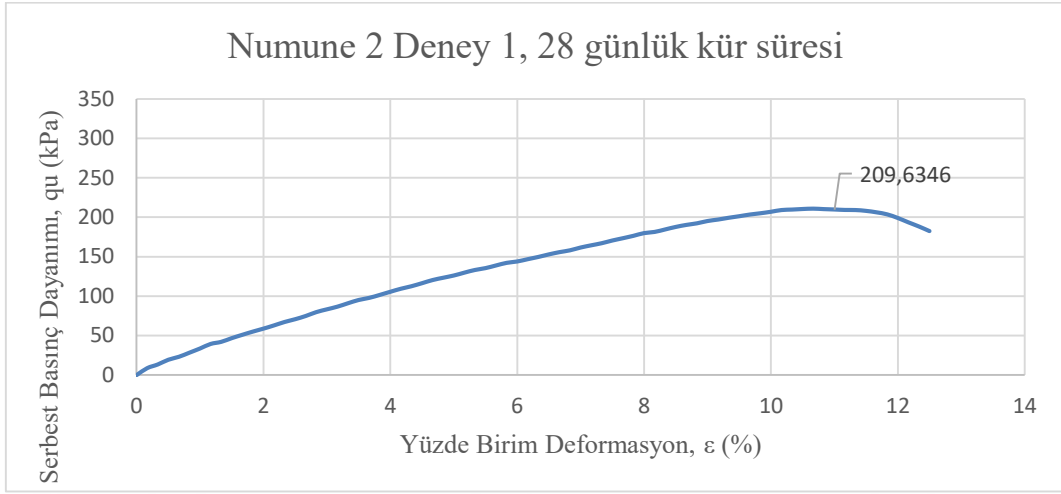


Şekil D.11 Numune 5 iki numaralı serbest basınç deneyi

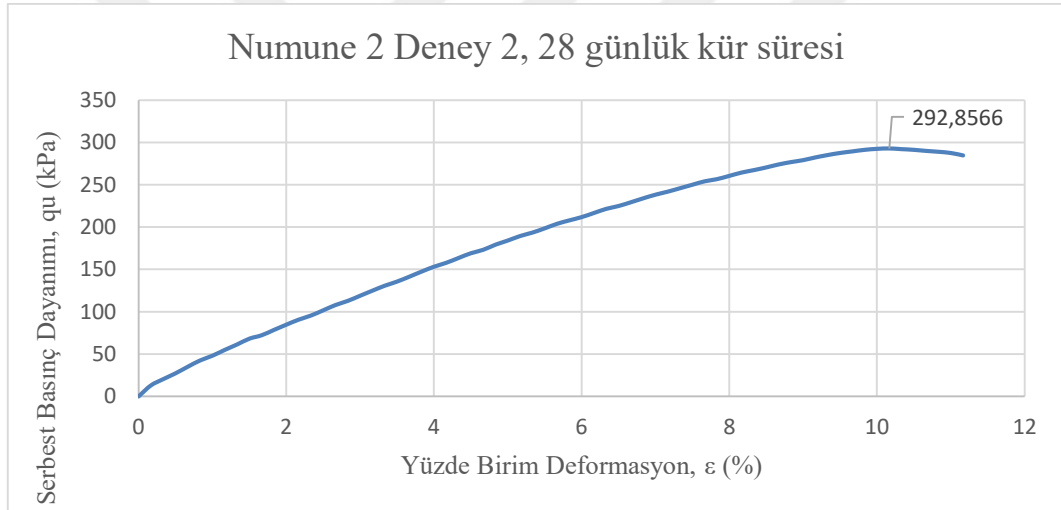


Şekil D.12 Numune 5 üç numaralı serbest basınç deneyi

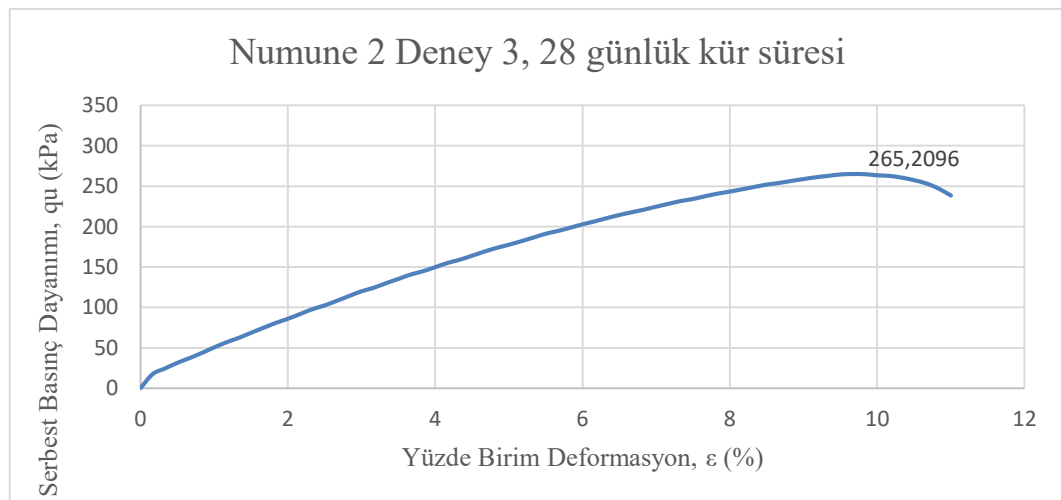
EK-E Serbest Basınç Dayanımı Grafikleri 28 günlük



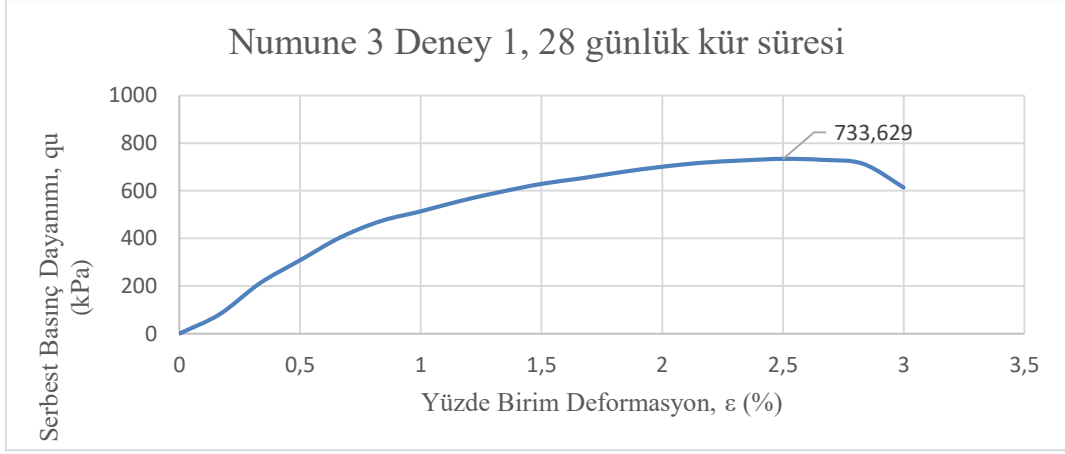
Şekil E.1 Numune 2 yirmi sekiz günlük bir numaralı serbest basınç deneyi



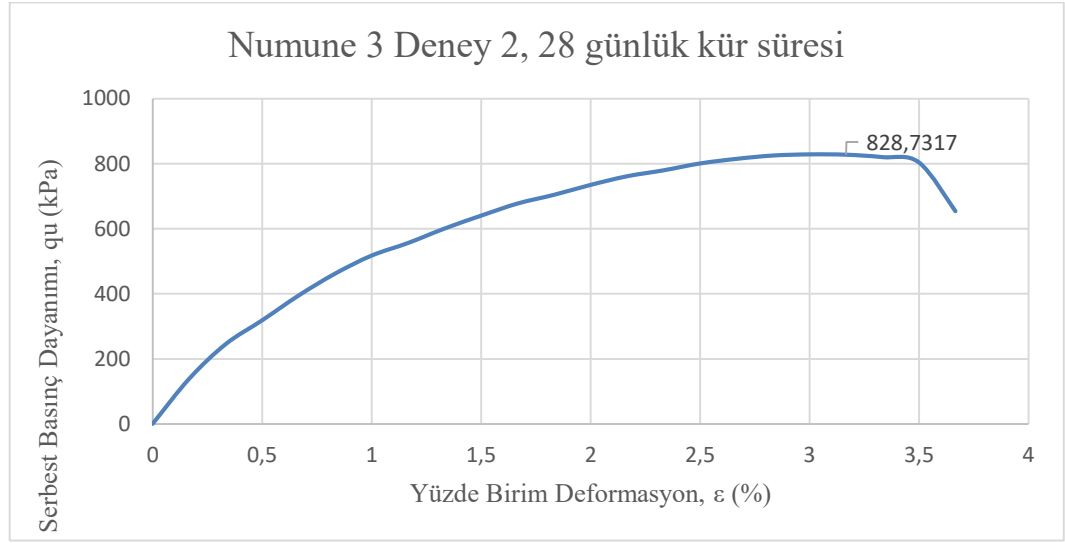
Şekil E.2 Numune 2, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi



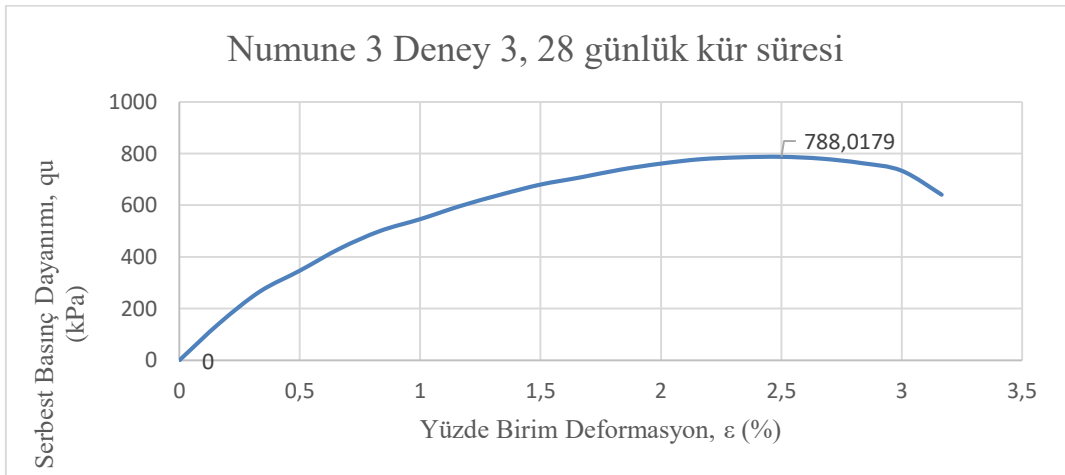
Şekil E.3 Numune 2, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi



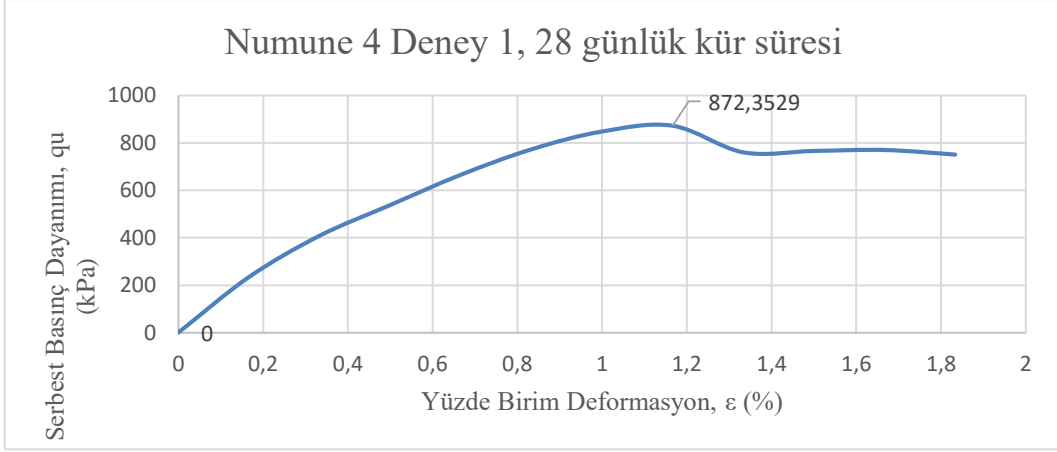
Şekil E.4 Numune 4, yirmi sekiz günlük 1 numaralı serbest basınç deneyi



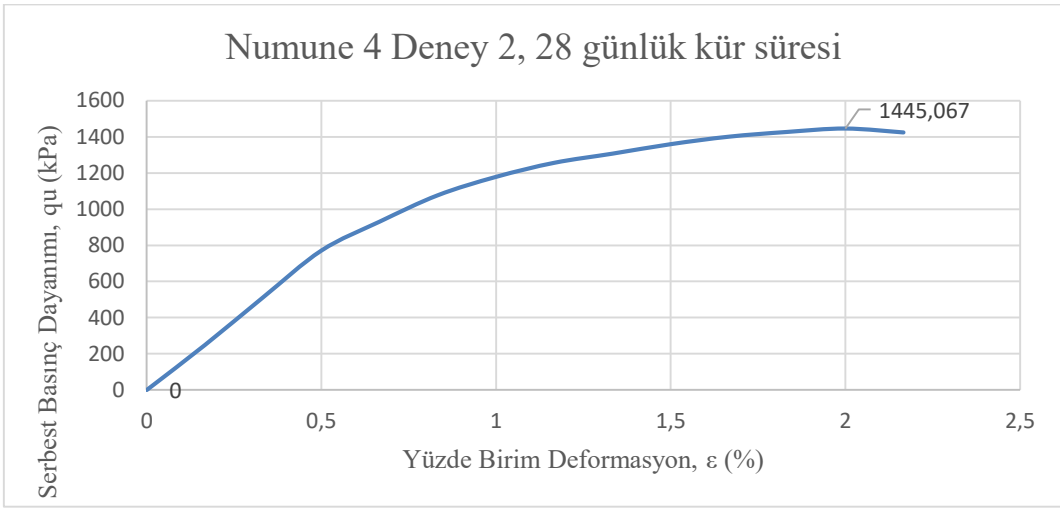
Şekil E.5 Numune 4, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi



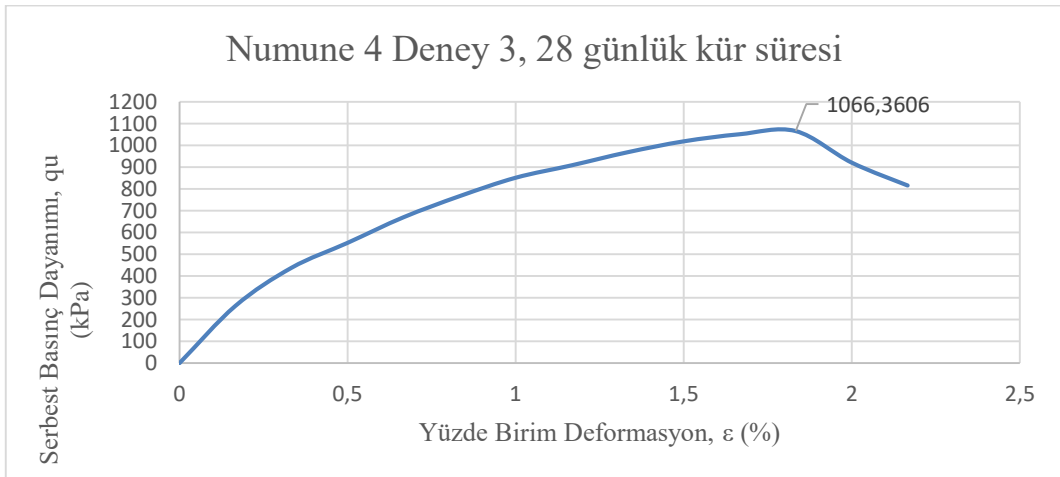
Şekil E.6 Numune 4, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi



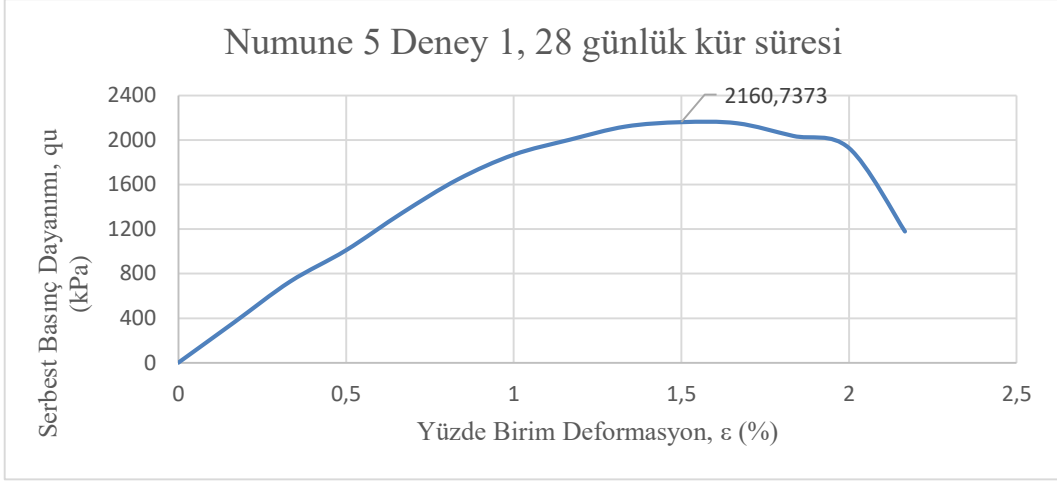
Şekil E.7 Numune 4, yirmi sekiz günlük 1 numaralı serbest basınç deneyi



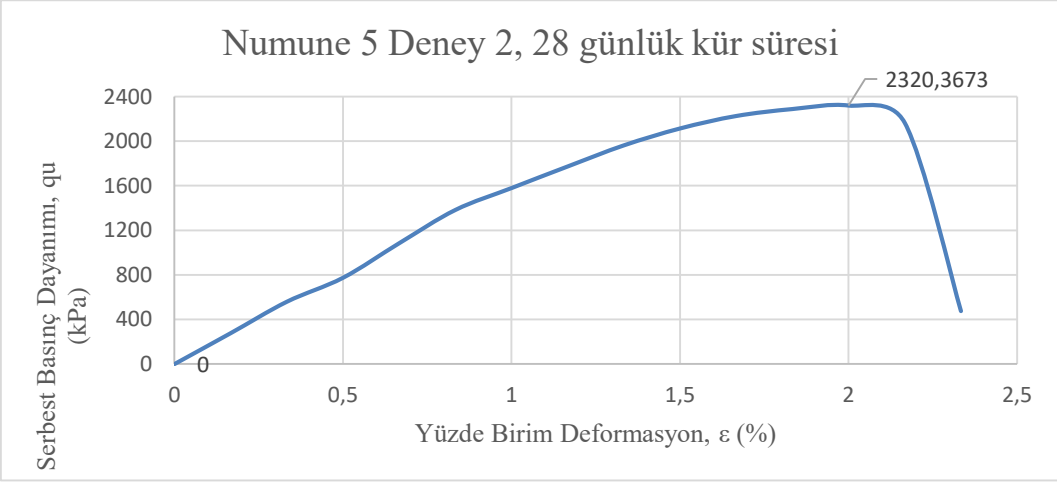
Şekil E.8 Numune 4, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi



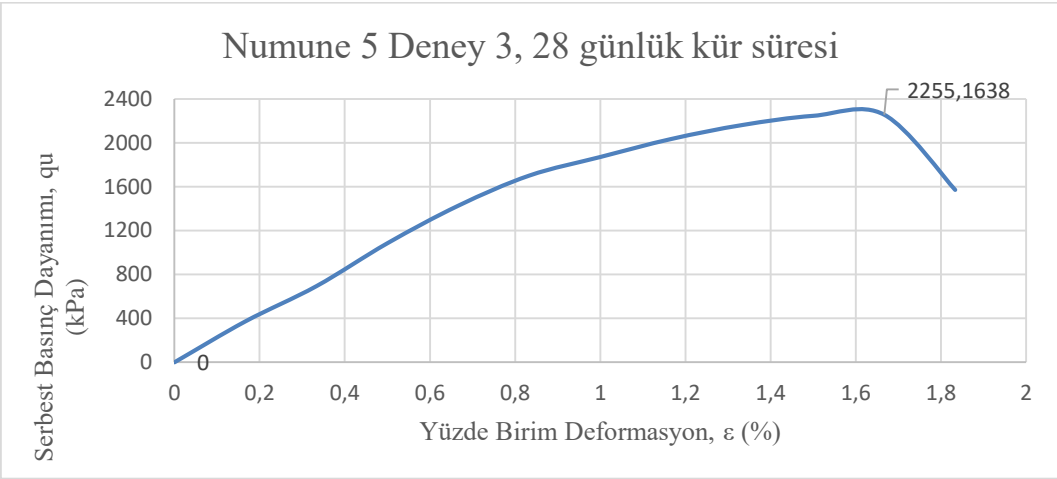
Şekil E.9 Numune 4, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi



Şekil E.10 Numune 5, yirmi sekiz günlük 1 numaralı serbest basınç deneyi



Şekil E.11 Numune 5, yirmi sekiz günlük 2 numaralı serbest basınç deneyi



Şekil E.12 Numune 5, yirmi sekiz günlük 3 numaralı serbest basınç deneyi

EK-F EK-Fa'da Hidrometre deneyinde kullanılan tablo, EK-Fb'de süspansiyon sıcaklık düzeltmesi (Mt), EK-Fc'de Hidrometre analizinde tane çapının hesaplanmasında kullanılan tane özgül ağırlığına bağlı olarak saptanan katsayı (K), EK-Fd'de Düzeltilmiş hidrometre okumalarına karşılık etkin derinlik (L) Gösterilmektedir.

Çizelge F.1 Hidrometre deneyinde kullanılan tablo (Yılmaz vd. 2009).

HİDROMETRE DENEYİ VERİ FORMU

Numune No:

Deneyi Yapan:

Hidrometre No:

Tarih:

Menisküs Düzeltmesi (Cm):

Özgül Ağırlık (Gs):

Deneye Sokulan Numune Kütlesi:

Dağıtıcı Madde için Kullanılan Düzeltme (Cd):

Çökeltme Silindiri No:

$$P = \left(\frac{Gs}{Gs - 1} \right) * \left(\frac{100}{Wo} \right) * (Rh + Mt - Cd)$$

Tarih	Zaman	Sıcaklık °C	Geçen Süre (dk)	Rh'	Rh=Rh'+Cm	K (Çizelge X.2'den)	Etkin Derinlik L	D	Sıcaklık Düzeltmesi Mt	Rh+Mt-Cd	P (%)
			½								
			1								
			2								
			3								
			8								
			15								
			30								
			60								
			120								
			240								
			480								
			1785								

Çizelge F.2 Süspansiyon sıcaklık düzeltmesi (Mt) (Yılmaz vd. 2009).

Derece (°C)	Derece (°F)	Düzeltilme Faktörü	Derece (°C)	Derece (°F)	Düzeltilme Faktörü
14.0	57.2	-0.9	24.0	75.2	0.8
14.5	58.1	-0.8	24.5	76.1	0.9
15.0	59.0	-0.8	25.0	77.0	1.0
15.5	59.9	-0.7	25.5	77.9	1.1
16.0	60.8	-0.6	26.0	78.8	1.3
16.5	61.7	-0.6	26.5	79.7	1.4
17.0	62.6	-0.5	27.0	80.6	1.5
17.5	63.5	-0.4	27.5	81.5	1.6
18.0	64.4	-0.4	28.0	82.4	1.8
18.5	65.3	-0.3	28.5	83.3	1.9
19.0	66.2	-0.2	29.0	84.2	2.1
19.5	67.1	-0.1	29.5	85.1	2.2
20.0	68.0	0.0	30.0	86.0	2.3
20.5	68.9	0.1	30.5	86.9	2.5
21.0	69.8	0.2	31.0	87.8	2.6
21.5	70.7	0.3	31.5	88.7	2.8
22.0	71.6	0.4	32.0	89.6	2.9
22.5	72.5	0.5	32.5	90.5	3.0
23.0	73.4	0.6	33.0	91.4	3.2
23.5	74.3	0.7	33.5	92.3	3.3
			34.0	93.2	3.5

Çizelge F.3 Hidrometre analizinde tane çapının hesaplanmasında kullanılan tane özgül ağırlığına bağlı olarak saptanan katsayı (K) (Yılmaz vd. 2009).

Toprak Tanelerinin Özgül Ağırlığı									
Sıcaklık (°C)	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374	0.01356
17	0.01511	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356	0.01338
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339	0.01321
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323	0.01305
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307	0.01289
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291	0.01273
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276	0.01258
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01274	0.01261	0.01243
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246	0.01229
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232	0.01215
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218	0.01201
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204	0.01188
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191	0.01175
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178	0.01162
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01165	0.01149

Çizelge F.4 Düzeltilmiş hidrometre okumalarına karşılık etkin derinlik (L) (Yılmaz vd. 2009).

Hidrometre 151 H			Hidrometre 152 H		
Düzeltilmiş Hidrometre Okuması	Etkin Derinlik L (cm)	Düzeltilmiş Hidrometre Okuması	Etkin Derinlik L (cm)	Düzeltilmiş Hidrometre Okuması	Etkin Derinlik L (cm)
1.000	16.3	0	16.3	-	-
1.001	16.0	1	16.1	31	11.2
1.002	15.8	2	16.0	32	11.1
1.003	15.5	3	15.8	33	10.9
1.004	15.2	4	15.6	34	10.7
1.005	15.0	5	15.5	35	10.6
1.006	14.7	6	15.3	36	10.4
1.007	14.4	7	15.2	37	10.2
1.008	14.2	8	15.0	38	10.1
1.009	13.9	9	14.8	39	9.9
1.010	13.7	10	14.7	40	9.7
1.011	13.4	11	14.5	41	9.6
1.012	13.1	12	14.3	42	9.4
1.013	12.9	13	14.2	43	9.2
1.014	12.6	14	14.0	44	9.1
1.015	12.3	15	13.8	45	8.9
1.016	12.1	16	13.7	46	8.8
1.017	11.8	17	13.5	47	8.6
1.018	11.5	18	13.3	48	8.4
1.019	11.3	19	13.2	49	8.3
1.020	11.0	20	13.0	50	8.1
1.021	10.7	21	12.9	51	7.9
1.022	10.5	22	12.7	52	7.8
1.023	10.2	23	12.5	53	7.6
1.024	10.0	24	12.4	54	7.4
1.025	9.7	25	12.2	55	7.3
1.026	9.4	26	12.0	56	7.1
1.027	9.2	27	11.9	57	7.0
1.028	8.9	28	11.7	58	6.8
1.029	8.6	29	11.5	59	6.6
1.030	8.4	30	11.4	60	6.5



ÖZGEÇMİŞ

Serkan ÖREN, 1984 Yılında Zonguldak' ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Zonguldak'ta tamamlamıştır. 2004 yılında Atatürk Üniversitesinde Çevre mühendisliği eğitimine başlamış ve 2009 yılında bu öğrenimini tamamlamıştır. 2009-2012 yılı arasında çeşitli özel sektör tecrübeleri olmuş ve 2012 yılının 6. ayında Bülent Ecevit Üniversitesi Devre Meslek Yüksekokulunda Öğretim görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2013 yılında Çevre mühendisliği programında Bülent Ecevit Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Devrek Meslek Yüksekokulunda Öğretim görevlisi görevine halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres : Fatih Mah. Çırağan Sok. Çırağan Apt. B Blok K:7 D:32
Kozlu/ ZONGULDAK

Tel :(+90) 506 300 33 29

E-posta : serkan.oren@hotmail.com