

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNDE POLİSAJ, KİREÇ
ve UÇUCU KÜLÜN KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kurban ÖNTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Seyhan FIRAT

Haziran 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNDE POLİSAJ, KİREÇ
ve UÇUCU KÜLÜN KULLANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ


Kurban ÖNTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ

Bu tez .../ ... /2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Ertan BOL
.....
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Seyhan FIRAT
.....
Üye


Yrd. Doç. Dr. Metin İPEK
.....
Üye

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda yardımlarını esirgemeyen, akademik hayatında edindiği tecrübe ve bilgi birikimiyle tezimin tüm aşamalarında yol gösteren Sn. Doç. Dr. Seyhan FIRAT'a minnet ve şükranlarımı sunarım. Yine çalışmalarım esnasında bana her türlü desteği veren ve çalışmalarımnda emeği olan Arş. Gör. İsa VURAL'a teőekkürü bir borç bilirim. Ayrıca maddi manevi desteğinin her zaman hissettiğim arkadaşlarıma müteőekkirim. Çalışmalarımın başından sonuna kadar bana inanan, destek veren aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvi
SUMMARY	xvii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. ATIK MALZEMELER İLE STABİLİZASYON.....	4
2.1. Kireç	5
2.1.1. Kirecin pişirilmesi işlemi (Kalsinasyon)	8
2.1.2. Kirecin söndürme işlemi	8
2.2. Uçucu Kül.....	11
2.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması	13
2.2.2. Uçucu küllerin özellikleri	16
2.2.3. Termik santrallerde atık uçucu küllerin toplanması	17
2.3. Polisaj	23
2.3.1. Polisajın elde edilmesi	23

2.4. Kaolen Kili	25
2.4.1. Kaolenin oluşumu	26
2.4.2. Kaolen kilinin özellikleri	27
BÖLÜM 3. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	29
3.1. Mekanik Stabilizasyon.....	35
3.2. Kimyasal Stabilizasyon Yöntemleri	38
3.3. Enjeksiyon Teknikleri.....	39
3.4. Katkı Maddeleri ile Stabilizasyon.....	41
3.4.1. Kireç ile stabilizasyon	42
3.4.2. Uçucu kül ile stabilizasyon	46
3.4.3. Mermer tozu ile stabilizasyon	47
3.5. Enjeksiyon	47
3.6. Jet Grouting.....	48
3.7. Fore Kazık ve Mini Kazıklar	49
3.8. Taşkolonlar	50
BÖLÜM 4. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE	
UYGULANAN METODLAR	52
4.1. Malzemelerin Kimyasal Özellikleri	52
4.2. Malzemelerin Mineral Özellikleri	54
4.3. Malzemenin ve Elde Edilen Zeminlerin Kompaksiyon Özellikleri	56
4.4. Zeminlerin Mekanik Özellikleri	57
4.5. Zeminin ve Katı Atıkların Özgül Ağırlıkları	58

4.6. Atıkların Dane Çapı Dağılımı	59
4.7. Atıkların Kıvam Limitleri.....	60
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	62
5.1. Kullanılan Malzemeler	62
5.2. Yapılan Deneyler.....	63
5.2.1. Özgül ağırlık deneyi.....	63
5.2.2. Dane dağılımı belirleme deneyleri.....	66
5.2.2.1. Elek analizi.....	66
5.2.2.2. Dane çapı dağılımının bulunması için yıkamalı eleme metodu	68
5.2.3. Hidrometre metodu	69
5.2.4. Atterberg limitleri deneyleri	73
5.2.4.1. Konipenetrasyon deneyi.....	74
5.2.4.2. Casagrende deneyi.....	76
5.2.4.3. Plastik limit deneyi.....	79
5.2.5. Zemin sıkıştırma deneyleri	80
5.2.5.1. Zeminde kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası bağıntısının 2,5 kilogramlık tokmakla elde edilmesi (standart enerji).....	80
5.2.6. California taşıma oranı tayini (CBR).....	84
5.2.6.1. Numunenin suda bekletilmesi	86
5.3. Deney Sonuçları	89
5.3.1. Özgül ağırlık deneyi sonuçları	90
5.3.1.1. Kullanılan malzemeler için özgül ağırlık analizi	90
5.3.2. Atterberg limitleri deneyleri sonuçları.....	91

5.3.2.1. Kaolen kili casagrande likit limit deneyi.....	91
5.3.2.2. Kaolen kili konipenetrasyon likit limit deneyi.....	92
5.3.2.3. Polisaj likit limit deneyi	94
5.3.2.4. Plastik limit deneyi.....	95
5.3.3. Kompaksiyon deneyi sonuçları.....	96
5.3.4. CBR deneyi sonuçları	97
BÖLÜM 6. SONUÇ ve ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	107
EK-A: EKLER (DENEY SONUÇLARI ve GRAFİKLER).....	111
Ek-1. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları	111
Ek-2. Atterberg Limitleri Sonuçları	123
Ek-3. Sınıflandırma Deneyleri Sonuçları	132
Ek-4. Kompaksiyon Deneyleri Sonuçları.....	142
Ek-5. CBR Deney Sonuçları.....	147
ÖZGEÇMİŞ	160

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

UK	: Uçucu Kül
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
TS	: Türk Standartları
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
EÜAŞ	: Elektrik Üretim A.Ş.
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CBR	: California Taşıma Oranı
C_u	: Üniformaluluk Katsayısı
C_r	: Süreklilik Katsayısı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
γ_k	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
W_{opt}	: Optimum Su İçeriği
MR	: Esneklik Modülü
I_p	: Plastisite İndisi
W_L	: Likit Limit
KK	: Kızdırma Kaybı
C	: Karbon Elementi
H	: Hidrojen Elementi
O	: Oksijen Elementi

S	: Kükürt Elementi
N	: Azot Elementi
Ca	: Kalsiyum Elementi
Al	: Alüminyum Elementi
Na	: Sodyum Elementi
Cu	: Bakır Elementi
c	: Kohezyon
w	: Su Muhtevası

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Yol Altyapısı ve Üstyapısının Bir Tip Enkesitte Görünüşü.....	4
Şekil 2.2.	Kireç taşının SEM görüntüsü.....	7
Şekil 2.3.	Uçucu kül SEM görüntüleri	13
Şekil 2.4.	a) Küresel, Yarı-Köşeli ve Köşeli Çayırhan Uçucu Külü (x2000), b) Küresel ve Yarı Küresel Uçucu Kül (x2500).....	17
Şekil 2.5.	Uçucu külün elektro filtrelerde tutulması	18
Şekil 2.6.	Polisajın Su Havuzlarında Bekletilmesi.....	24
Şekil 2.7.	Polisajın Sudan Arındırılması	24
Şekil 2.8.	Kaolen kili.....	25
Şekil 2.9.	Kaolinit Mineral Grubunun Minerolojik Yapısı	28
Şekil 3.1.	Stabilizasyon yöntemlerinin uygulanabilirliği	34
Şekil 3.2.	Jet enjeksiyonu işlemi	41
Şekil 3.3.	Kirecin Yola Serilmesi.....	44
Şekil 3.4.	Greyder İle Zeminin Düzlenmesi Aşaması.....	45
Şekil 3.5.	Seyitömer Uçucu Kül Termik Santrali	46
Şekil 3.6.	Enjeksiyon Uygulama Aşamaları	48
Şekil 3.7.	Jet grouting kolon imalatı aşamaları	49
Şekil 3.8.	Forekazık imalat aşamaları	50
Şekil 3.9.	Taşkolon imalat işlemi	51
Şekil 4.1.	Ham kaolen kilin SEM fotoğrafı.....	55

Şekil 4.2.	Uçucu Külün Farklı Büyüklüklerde SEM Görüntüleri.....	55
Şekil 4.3.	Zemin sınıflandırması için örnek dane dağılım eğrisi	60
Şekil 4.4.	Kıvam limiteri sonucu zemin sınıflandırılmasına ait plastisite kartı	61
Şekil 5.1.	Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	62
Şekil 5.2.	Özgül Ağırlık Yapım Aşaması.....	66
Şekil 5.3.	Zemin sınıflandırması için örnek dane dağılım eğrisi	67
Şekil 5.4.	Yıkamalı Elek Analizi Yapım Aşaması	69
Şekil 5.5.	Hidrometre Deneyi Yapım Aşaması.....	72
Şekil 5.6.	20 °C'ta Kalibre Edilmiş Hidrometreler İçin Sıcaklık Düzeltmesi Ölçeği	73
Şekil 5.7.	Likit Limit Tayininde Kullanılan Koni Düşürme Cihazı.....	74
Şekil 5.8.	Konipenetrasyon yöntemi ile likit limit deneyi grafiği.....	76
Şekil 5.9.	Numunenin yüzeye paralel olarak serilişi.....	78
Şekil 5.10.	Casagrende yöntemi ile likit limit deneyi grafiği	78
Şekil 5.11.	Plâstik Limitin Belirlenmesi	80
Şekil 5.12.	Standart Kompaksiyon Kalıbı.....	81
Şekil 5.13.	Standart Sıkıştırma Deneyi İçin 2,5 Kg'lık Tokmak Ve Kılavuzu.....	81
Şekil 5.14.	Sıkıştırma işlemi tamamlanmış zemin numunesi	82
Şekil 5.15.	Kompaksiyon deneyi örnek grafiği.....	84
Şekil 5.16.	CBR deney aleti	85
Şekil 5.17.	Taşıma Oranı Deneyi İçin Kalıp	86
Şekil 5.18.	Taşıma Oranı İçin Suda Bekletilen Numunenin Yüzey Hareketini Ölçmeye Yarayan Sacayak ve Ölçüm Düzeni	87
Şekil 5.19.	Numunenin suda bekletilmesi.....	89

Şekil 5.20.	Kaolen kili casagrande deneyi likit limit grafiği.....	92
Şekil 5.21.	Kaolen kiline ait konipenetrasyon likit limit grafiği.....	93
Şekil 5.22.	Polisaj malzemesi için likit limit grafiği.....	94
Şekil 5.23.	Kaolen kilinin plastisite kartındaki yeri ve zemin sınıfı.....	95
Şekil 5.24.	Kompaksiyon Deneyinde γ_k ve Polisaj Katkısının İlişkisi.....	96
Şekil 5.25.	Kompaksiyon Deneyinde Su İçeriği ve Polisaj Katkısının İlişkisi.....	97
Şekil 5.26.	% 10 Polisaj Katkısı ile CBR Deneyi Sonuçları.....	98
Şekil 5.27.	% 15 Polisaj Katkısı ile CBR Deneyi Sonuçları.....	98
Şekil 5.28.	% 20 Polisaj Katkısı ile CBR Deneyi Sonuçları.....	99
Şekil 5.29.	Günlük CBR Değerleri Sonuçları.....	100
Şekil 5.30.	7 Günlük CBR Değerleri Sonuçları.....	100
Şekil 5.31.	14 Günlük CBR Değerleri Sonuçları.....	101
Şekil 5.32.	28 Günlük CBR Değerleri Sonuçları.....	102
Şekil 5.33.	56 Günlük CBR Değerleri Sonuçları.....	102
Şekil A.1.	Kaolen Kili Casagrande Deneyi Grafiği.....	125
Şekil A.2.	Kaolen Kili Konipenetrasyon Deneyi Grafiği.....	128
Şekil A.3.	Polisaj Malzemesi Konipenetrasyon Deneyi Grafiği.....	131
Şekil A.4.	Polisaj Malzemesi 1. Dane Dağılım Grafiği.....	132
Şekil A.5.	Polisaj Malzemesi 2. Dane Dağılım Grafiği.....	134
Şekil A.6.	Polisaj Malzemesi 3. Dane Dağılım Grafiği.....	136
Şekil A.7.	Polisaj Malzemesi 4. Dane Dağılım Grafiği.....	138
Şekil A.8.	Polisaj Malzemesi 5. Dane Dağılım Grafiği.....	140
Şekil A.9.	% 10 Katkılı Kompaksiyon Deneyi Grafiği.....	142

Şekil A.10.	% 15 Katkılı Kompaksiyon Deneyi Grafiği.....	143
Şekil A.11.	% 20 Katkılı Kompaksiyon Deneyi Grafiği.....	144
Şekil A.12.	Sadece Kil Kompaksiyon Deneyi Grafiği.....	145
Şekil A.13.	%10, %15, %20 Katkılı Numunelerin Deneylerinin Grafiği	146
Şekil A.14.	% 10 Polisaj Günlük Numune CBR Grafiği	147
Şekil A.15.	% 10 Polisaj 7 Günlük Numune CBR Grafiği	148
Şekil A.16.	% 10 Polisaj 14 Günlük Numune CBR Grafiği	149
Şekil A.17.	% 10 Polisaj 28 Günlük Numune CBR Grafiği	150
Şekil A.18.	% 10 Polisaj 56 Günlük Numune CBR Grafiği	151
Şekil A.19.	% 15 Polisaj Günlük Numune CBR Grafiği	152
Şekil A.20.	% 15 Polisaj 7 Günlük Numune CBR Grafiği	153
Şekil A.21.	% 15 Polisaj 14 Günlük Numune CBR Grafiği	154
Şekil A.22.	% 15 Polisaj 28 Günlük Numune CBR Grafiği	155
Şekil A.23.	% 15 Polisaj 56 Günlük Numune CBR Grafiği	156
Şekil A.24.	% 20 Polisaj Günlük Numune CBR Grafiği	157
Şekil A.25.	% 20 Polisaj 14 Günlük Numune CBR Grafiği	158
Şekil A.26.	% 20 Polisaj 28 Günlük Numune CBR Grafiği	159

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Kalsiyum Kirecinin Bileşimi	6
Tablo 2.2.	TSE ve ASTM Göre Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri	15
Tablo 2.3.	Seyitömer Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları	16
Tablo 2.4.	Kaolen Mineralinin Kimyasal Analizi.....	27
Tablo 3.1.	Zemin iyileştirme teknikleri ve kullanılma amaçları.....	35
Tablo 3.2.	İnorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması	42
Tablo 4.1.	Kullanılan kaolenin kimyasal analiz sonucu.....	53
Tablo 4.2.	Kaolen kilinin tane boyu dağılımı	53
Tablo 4.3.	Seyitömer Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları	54
Tablo 4.4.	Polisaj malzemesinin kimyasal analiz sonucu	54
Tablo 4.5.	Dolgu malzemesi özellikleri	56
Tablo 4.6.	Numunelerin Deney Sonuçları.....	58
Tablo 4.7.	Özgül ağırlık deneyi için örnek tablo	59
Tablo 5.1.	Kullanılan malzemelerin özgül ağırlık değerleri	90
Tablo 5.2.	Kaolen Kili için Casagrande Deneyi Sonuçları	91
Tablo 5.3.	Kaolen Kili için Konipenetrasyon Deneyi Sonuçları	93
Tablo 5.4.	Polisaj için Konipenetrasyon Deneyi Sonuçları	94
Tablo A.1.	Kaolen Kili Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	111
Tablo A.2.	Kaolen Kiline ait Özgül Ağırlık Değeri.....	113
Tablo A.3.	Kireç Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	114

Tablo A.4.	Kirece ait Özgül Ağırlık Değeri.....	116
Tablo A.5.	Polisaj Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları	117
Tablo A.6.	Polisaja ait Özgül Ağırlık Değeri.....	119
Tablo A.7.	Uçucu Kül Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	120
Tablo A.8.	Uçucu Küle ait Özgül Ağırlık Değeri	122
Tablo A.9.	Kaolen Kili Casagrande Deneyi Likit Limit Sonuçları.....	123
Tablo A.10.	Kaolen Kili Konipenetrasyon Deneyi Likit Limit Sonuçları	126
Tablo A.11.	Polisaj Malzemesi Konipenetrasyon Deneyi Likit Limit Sonuçları	129
Tablo A.12.	Polisaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 1.Deney Sonuçları	132
Tablo A.13.	Polisaj Malzemesi 1.Hidrometre Deneyi Sonuçları.....	133
Tablo A.14.	Polisaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 2.Deney Sonuçları	134
Tablo A.15.	Polisaj Malzemesi 2.Hidrometre Deneyi Sonuçları.....	135
Tablo A.16.	Polisaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 3.Deney Sonuçları	136
Tablo A.17.	Polisaj Malzemesi 3.Hidrometre Deneyi Sonuçları.....	137
Tablo A.18.	Polisaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 4.Deney Sonuçları	138
Tablo A.19.	Polisaj Malzemesi 4.Hidrometre Deneyi Sonuçları.....	139
Tablo A.20.	Polisaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 5.Deney Sonuçları	140
Tablo A.21.	Polisaj Malzemesi 5.Hidrometre Deneyi Sonuçları.....	141
Tablo A.22.	% 10 Polisaj Katkılı Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	142
Tablo A.23.	% 15 Polisaj Katkılı Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	143
Tablo A.24.	% 20 Polisaj Katkılı Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	144
Tablo A.25.	Sadece Kil Kompaksiyon Deneyi Sonuçları.....	145
Tablo A.26.	% 10, %15, %20 Katkılı Numunelerin Deney Sonuçları.....	146

Tablo A.27.	% 10 Polisaj Katkılı Günlük Numune CBR Sonucu	147
Tablo A.28.	% 10 Polisaj Katkılı 7 Günlük Numune CBR Sonucu	148
Tablo A.29.	% 10 Polisaj Katkılı 14 Günlük Numune CBR Sonucu	149
Tablo A.30.	% 10 Polisaj Katkılı 28 Günlük Numune CBR Sonucu	150
Tablo A.31.	% 10 Polisaj Katkılı 56 Günlük Numune CBR Sonucu	151
Tablo A.32.	% 15 Polisaj Katkılı Günlük Numune CBR Sonucu	152
Tablo A.33.	% 15 Polisaj Katkılı 7 Günlük Numune CBR Sonucu	153
Tablo A.34.	% 15 Polisaj Katkılı 14 Günlük Numune CBR Sonucu	154
Tablo A.35.	% 15 Polisaj Katkılı 28 Günlük Numune CBR Sonucu	155
Tablo A.36.	% 15 Polisaj Katkılı 56 Günlük Numune CBR Sonucu	156
Tablo A.37.	% 20 Polisaj Katkılı Günlük Numune CBR Sonucu	157
Tablo A.38.	% 20 Polisaj Katkılı 14 Günlük Numune CBR Sonucu	158
Tablo A.39.	% 20 Polisaj Katkılı 28 Günlük Numune CBR Sonucu	159

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Atık malzemeler, Zemin iyileştirme, Kompaksiyon, CBR Deneyi, Uçucu kül, Polisaj

Zemin iyileştirme, mevcut zeminin boşluk oranının azaltılması, ortamdaki suyun uzaklaştırılması ve zeminin üzerine inşa edilecek yapıyı destekleyecek kapasiteye getirilmesi işlemlerinden oluşur.

Bu çalışmada Seyitömer uçucu külü (UK), yapay granit atığı (polisaj) ve bağlayıcı malzeme olarak kireç kullanılarak, mevcut olan zayıf zeminlerin iyileştirme üzerine etkileri araştırılmıştır. Esas zemin numunesi olarak ele alınan kaolen kiline UK, polisaj ve kireç belirli oranlarda katılarak homojen karışım numuneler oluşturulmuştur. Hazırlanan yapay numunelere kireç ve uçucu kül miktarı %15 oranında sabit tutularak, %10, %15, ve %20 oranlarında polisaj malzemesi ilave edilerek deneyler yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan her malzemenin laboratuvar ortamında özgül ağırlık değerleri, zemin sınıflandırma deneyleri ve kompaksiyon deneyleri (Atterberg limitleri, hidrometre, yıkamalı elek analizi) yapılmıştır. Yapılan kompaksiyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre en iyi sonucu aldığımız zemin numunesi üzerinde California Taşıma Oranı (CBR) deneyi yapılarak elde etmiş olduğumuz yeni zemin numunesinin taşıma kapasitesi bulunmuştur. CBR deneyleri için hazırlanan numuneler 1 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün ve 56 gün sürelerinde sabit nem ve sabit sıcaklığa sabit bir ortamda bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Yapılan tüm deneysel çalışmalar sonucunda kaolen kiline ilave edilen katkı maddeleri ile hazırlanan zemin numunesinin mevcut durumdaki zeminin mukavemet değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir.

ON THE GROUND IMPROVEMENT POLISHING, THE USE OF LIME AND FLY ASH

SUMMARY

Key words: Waste materials, Ground Improvement, Compaction, CBR Test, Fly ash, Polishing.

Ground improvement, reduction of the existing floor space ratio, the removal of water and soil environment will build on the capacity to support the introduction of the structure consists of transactions.

In this study, fly ash from Seyitomer (UK), artificial granite waste (polishing) and using lime as binding material, which is available on the improvement of poor soils were investigated. UK kaolin clay sample are regarded as the main floor, polishing and certain proportions of lime formed by joining a homogeneous mixture samples. The amount of lime and fly ash samples prepared artificially holding constant the rate 10%, 15%, and 20% rates of polishing experiments were made by adding material.

Specific weight, soil classification tests and compaction tests (Atterberg limits, hydrometer, sieving) are done in laboratory for all the materials used in the study. Due to the result of the compaction test, the most proper soil sample is taken and California Bearing Ratio test is done. The soil carrying capacity is found for the new soil sample. The samples are kept with constant moisture and temperature for 1 day, 7 days, 14 days, 28 days, 56 days periods and then the CBR tests are done. Results of the study shows that the soil sample which is prepared with kaolin clay agent increases the soil strength.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İyileştirme zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapısının mekanik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ile dış kuvvetlere dayanıklı hale getirilmesidir. Yer, yapıların oturtulduğu düzlemdir ve inşaat yatırımı sağlam bir zemin üzerine yapılmak istenir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması işlemidir [1].

Son yıllarda endüstriyel katı atıkların giderek artması ve atık bertaraf yöntemlerinin işletmelere büyük maliyetler getirmesi, bu atıkların değişik üretim süreçlerinde geri kazanımını yaygınlaştırmıştır. Özellikle gelişmiş ülkelerde sanayi atıklarının çoğunluğu geri kazanılmaktadır. Atıkların en yaygın kullanım alanlarını ise yol inşaatları oluşturmaktadır. Yol inşaatında en çok kullanılan atıklar; yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kireç, inşaat ve yıkım atıkları, sökülmüş yol kaplamaları, doğal taş işleme tesislerinin atıklarıdır [2].

Genel olarak proje sahalarındaki mevcut zemin özellikleri geoteknik mühendisliği açısından arzu edilen kalitede değildir. Bu durumlarda uygulanacak çözümlerden biri olan katkı maddeleri ile iyileştirme yöntemi sayesinde üzerinde çalışılan zeminlerin kaliteleri önceki elverişsiz durumlara nazaran daha sağlam ve taşıma gücü yüksek olan zeminler haline getirilebilmektedir.

Zemin iyileştirme çalışmaları yapılırken daha çok atık malzemeler ile çalışılmaktadır. Atık malzemelerin kullanımı ile bu malzemelerin hem doğaya sağlık, doğal çevre kirliliği vb. zararlı yönlerinden bir nebze arındırılması sağlanmış olur hem de atık malzeme hangi doğal malzeme yerine kullanılacak ise o malzemenin doğal yapısı bozulmamış olur ve buda çevremizin doğal dengesinin bozulmamasına büyük katkı sağlamış olur.

İyileştirme yaya yolu kaldırımlarında, karayollarında yola altyapı iyileştirmesinde, mimari bir çalışma inşa edilecek herhangi bir zeminin iyileştirilmesinde, havaalanı ve demiryolu altyapılarının iyileştirilmelerinde kullanılabilirlerdir.

Bu çalışmada zemin malzemesi olarak kaolen kili kabul edilmiştir. Bu malzemeye kireç, her termik santralinden kömürün yanması sonucu oluşan atık uçucu kül ve seramik fabrikalarında yapay granit atığı olarak açığa çıkan polisaj malzemesi ilave edilerek elde edilecek yeni bir zeminin yol dolgu tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Kireç ve uçucu kül daha önce çok sayıda çalışmada kullanılmıştır fakat polisaj malzemesi ile ilgili herhangi bir çalışma daha önce yapılmamıştır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin seçilme nedenleri ise uçucu kül (UK)'ün her termik santralinde atık olarak elde edilmesi, polisaj malzemesinin de son yıllarda seramik fabrikalarında sürekli ve büyük hacimlerde atık malzeme olarak elde edilmeye başlanmasıdır. Bu malzemelere ilave olarak ise kireç malzemesi bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde katkı maddeleri ile elde edilen yeni zemin numunesinin zemin güçlendirmesi üzerine etkileri ile beraber yol alt temel yapısının dolgu kısmında kullanılacak malzemeler olabilecekleri de araştırılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde deney aşamasında kullanılan malzemelerin kısa bir özeti ve bu malzemeler ile daha önce yapılmış olan benzer araştırma konularına ve sonuçlarına değinilmiştir.

Doğal zemin ve kullanılan diğer malzemelerin genel özellikleri ve çalışma süresi boyunca laboratuvar ortamında gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmaların neler olduğu üçüncü bölümde kısaca anlatılarak yapılan deneyler birer örnek ile gösterilmiştir.

Dördüncü bölümde zemin iyileştirmesi için kullanılan tüm malzemelerin genel özellikleri, tablo halinde sunulan sonuçlarının yorumları, malzemeler ile yapılan kompaksiyon ve CBR deneyi sonuçları yorumları ile beraber gösterilmiştir. Ayrıca laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bütün deneysel çalışmaların nasıl bir yol

izlenerek yapıldığı ve deney sonucunda elde edilen verilerin hangi hesaplama işlemleri ile sonuçların bulunduğuna dair bilgiler dördüncü bölümde gösterilmiştir.

Beşinci bölümde ise yapılan tüm deneylerden elde edilen sonuçların sunulup değerlendirildiği, çalışmanın amacına ulaşip ulaşmadığı ve mevcut olan zayıf zeminlerin bu çalışmada kullandığımız katkı maddeleri ile hangi derecelerde iyileştirilebileceğinin gösterildiği bölümdür.

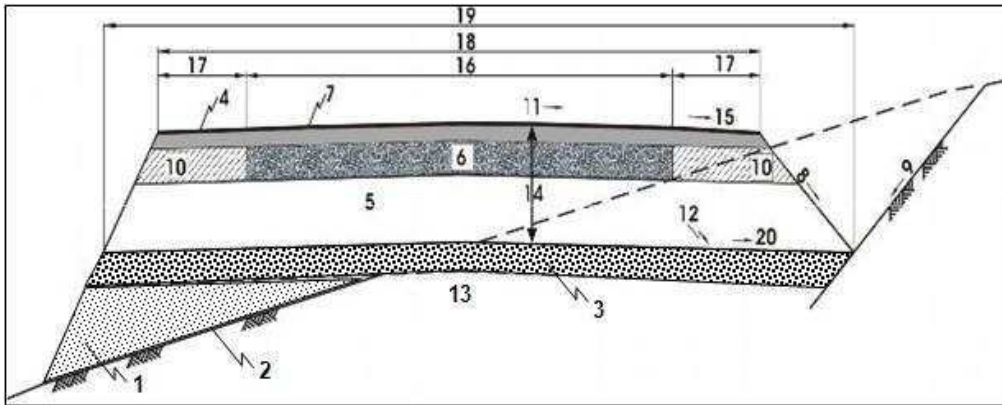
Yapılan çalışmalar elde edilen zeminlerin taşıma gücünün bulunmasına yönelik olarak yapılmaktadır, elde edilen veriler Türk Standartları Enstitüsü (TSE) verilerine uygun olarak ve Karayolları Teknik Şartnamesinin (KTŞ) değerlerine göre yorumlanarak yapılmıştır.

BÖLÜM 2. ATIK MALZEMELER İLE STABİLİZASYON

Kullanılma süresi dolan ve yaşadığımız ortamdan uzaklaştırılması gereken her türlü katı malzemeye katı atık denir. Katı atıklar evde, okulda, hastanede, endüstride, bahçelerde ve daha birçok yerde oluşabilir. Ülkemizde çöp bileşenleri; %68 organik atık, %13 değerlendirilebilir katı atık, %19 diğer atıklardır [2].

Katı atık miktarı ve bileşimi, mevsimlere, bölgelerin coğrafik ve yaşayanların ekonomik ve kültürel seviyelerine göre değişmektedir [2].

Şekil 2.1'de görülen tipik bir yol enkesitinde yol tabakalarının konumları KTŞ'ne göre gösterilmiştir [3].



1-Dolgu	7-Kaplama tabakası	14-Üstyapı proje kalınlığı
2-Doğal zemin	8-Hendek şevi	15-Banket eğimi
3-Üstyapı tabanı (Seçme malzeme)	9-Yarma şevi	16-Trafik şeritleri genişliği
4-Banket kaplaması	10-Banket temeli	17-Banket genişliği
5-Alttemel tabakası	11-Yolun enine eğimi	18-Yol(Platform) genişliği
6-Temel tabakası	12-Tesviye yüzeyi	19-Üstyapı tabanı genişliği
	13-Yol gövdesi taban zemini	20-Taban yüzeyinin enine eğimi

Şekil 2.1. Yol Altyapısı ve Üstyapısının Bir Tip Enkesitte Görünüşü

Üstyapı tabanı (Seçme malzeme) için agrega-zemin karışımı kullanılır ve bunun dışında enkesitteki diğer bölgelerde agrega kullanımına pek sık rastlanmaz fakat gerektiğinde dolgu bölgelerinde de kullanılabilir [3].

Dolgu bölgelerinde esas malzeme olarak zemin numunesi kullanılır ve buna ilave olarak bu çalışmada alttemel tabakası kısmında zemin numunesine ek olarak katı atık malzemeleri olan UK, polisaj ve kireç kullanılmıştır.

Birçok firma altyapı ve yol inşaatlarında killi zemin ile karşılaştığında zemini sağlamlaştırmak için belirli aralıklarla yola agrega sermekte ancak kısa süre içerisinde agrega zemine batmakta ve kil tekrar kapilerite etkisi ile yolun yüzeyine çıkmaktadır. Defalarca agrega serilmesine rağmen çözüm bulunamamakta ve yolda yaşanan olumsuzluklar devam etmektedir. Birçok defa agreganın yola serilme maliyeti ise (agrega maliyeti, iş makineleri kirası, akaryakıt gideri vb.) zemin iyileştirmesinde kullanılan maliyet çok yüksek fiyatlardadır. Bu maliyetlerin önüne geçebilmek için esas zemin numunemize atık malzemeler ilave ettiğimizde hem maliyet açısından daha uygun bir proje elde edilmiş olunur hem de sadece agrega serilmesi ile karşılaşılan agreganın zemine batması, kapilerite etkisi ve yolda oluşan diğer olumsuzlukların önüne bir nebze olsun geçilmiş olunmaktadır [2].

2.1. Kireç

Kireç, kireç taşının çeşitli derecelerde (850-1450°C) pişirilmesi sonucu elde edilen, suyla karıştırıldığında, tipine göre havada veya suda katılaşma özelliği gösteren, beyaz renkli, inorganik esaslı bağlayıcı madde türüdür. Su ile karıştırıldığında, başlangıçta plastik sonra gittikçe taş halinde sertleşen anorganik bir bileşiktir. Kirecin hammaddesi kalker (CaCO_3) ve dolomittir ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$).

Kireç üretimine etki eden faktörler çeşitli olup başlıcaları şunlardır [4]:

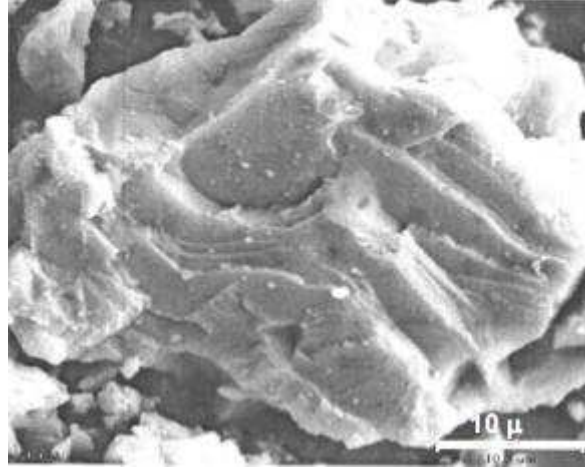
1. Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin saflık derecesi,
2. Üretimde kullanılan yakıt çeşidi,
3. Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin boyutu,
4. Üretimde kullanılan fırın çeşididir.

Katkı maddeleri ile stabilizasyon; stabilizasyonun etkinliği yanında kolayca bulunabilmesi, arazi uygulama kolaylığı ve ekonomik olarak üretim yapılabilmesi gibi pek çok faktörün birleşmesiyle oluşan güçlüklerin aşılması ile uygulanabilir. Katkı maddeleri zemine laboratuarda çok yararlı görünürken arazi uygulamasında etkin karıştırma güçlükleri, yağmur, sıcak gibi çevre koşulları nedeniyle bu olumlu durumu yitirebilirler. Türk Standardına göre kalsiyum kirecinin bileşimini teşkil eden maddeler Tablo 2.1'de görülmektedir [4].

Tablo 2.1. Kalsiyum Kirecinin Bileşimi

Bileşimi teşkil eden maddeler	Kalsiyum kireci (söndürülmüş) S-KK 80 (ağırlıkça %)
CaO,	en az 80
MgO,	< 5
CO ₂ ,	en çok 7
Asitte çözünmeyen maddeler, SiO ₂ dahil,	en çok 1,5
Metal oksitler: AlO ₃ , Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , SiO ₂ dahil,	en çok 1
SO ₃ dahil,	en çok 2

Aşağıda Şekil 2.2'de kireçtaşının yüzeyinin çok küçük bir alanının taranmasıyla elde edilen Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüsü görülmektedir.



Şekil 2.2. Kireç taşının SEM görüntüsü

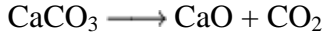
Kireçtaşı pişirilirken sıcaklık 1000°C'yi geçmezse elde edilen kirece çalı kireci adı verilir. Eğer kireçtaşı uzun zaman 1400°C civarında pişirilirse kömür kireci elde edilir. Bu nedenle, halk arasında, çalı kireci kömür kirecine nazaran tercih edilir. Kömür kireçleri geç söndüğü ve dağılmadığı için ulaşım yolu uzun olan iş yerleri için elverişlidir [5].

Bağlayıcı maddelerden en eski bilinen malzeme kireçtir. Eski Babil, Mısır, Finike, Hitit ve Persler tarafından hava kireci yapıda bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Romalılar devrinde su kireci bulunmuş ve su içerisindeki inşaatlarda kullanılmıştır. Bu arada puzolonik kirece (volkanik esaslı, killi, kalkerli toprak) Türkler tarafından tuğla kırıkları (pişmiş kil) öğütülüp karıştırılmış ve Horasan harcı olarak kullanılmıştır. Ayrıca bu tür bağlayıcı Mısır'da Homra, Hindistan'da Surki adıyla bilinmektedir. Bizans'ta ise kireç, sıva fresk tekniği altında uygulanmıştır. Orta çağda, bu sanayide daha fazla bir ilerleme olmamıştır [6].

Kirecin üretiminde iki aşama vardır. Kireçtaşının pişirilmesi ve söndürme işlemi.

2.1.1. Kirecin pişirilmesi işlemi (Kalsinasyon)

Her kimyasal içeriğe sahip malzemeler gibi kireçte kendine özgü bir içeriğe ve dolayısı ile bir kimyasal tepkimeye sahiptir.



Bu reaksiyon sonucunda meydana gelen CaO söndürülmemiş kalsiyum (kalker) kirecidir. CaO, ufak parçalar haline getirilmiş tabii kireç taşının özel fırınlarda 1000⁰C civarında pişirilmesi ile elde edilen ve su ile muamele edilmesi sonucu ısı açığa çıkararak söndürülmüş kalker kireci haline gelebilen bağlayıcı bir malzeme meydana gelmektedir. 2580°C'a doğru erir, elektrik fırınında uçucu duruma gelir. Isıyla bozulmaz. 100 gr kalkerden teorik olarak 56 gr kireç (CaO) elde edilir. Fakat pratikte verim %54'ü geçmez [6].

2.1.2. Kirecin söndürme işlemi

Kireçler CaO halinde kullanılmazlar. Bunların su ile işlem görerek söndürülmeleri gerekir. Kirecin söndürülmesi bir hidratasyon olayıdır. Sönmemiş kirecin üzerine az miktarda su dökülünce bir süre sonra kireç parçasının kabardığı ve yavaş yavaş çatlayarak dağıldığı, aynı zamanda sıcaklık artışı ve buharlaşma görülür [5].

Kirecin söndürülmesi sırasında %100 oranında bir hacim artışı meydana gelir. Kirecin sönerken kabarıp çatlamasının nedeni de budur. Bu nedenle söndürme işlemine önem verilmesi gerekir. Tamamen söndürülmeden yapıda kullanılan kireç, söndürülmesi sırasında yapacağı reaksiyonu kullandığı yerde yaparak, hacim artmasına ve yapıda bazı hasarların oluşmasına neden olur. Bunun olmaması için, kireç taşları en az 15 gün, şantiyede açılan kireç havuzlarında, su ile temas halinde bulundurulmalıdır. Söndürme işlemi sırasında sıcaklık 300-400°C'a kadar çıkabilir. Bu nedenle olayın aksi yönde gelişmesi, yani sönmüş kirecin tekrar su kaybederek CaO haline dönüşmesi mümkündür. Bu nedenle su miktarını iyi ayarlamak suretiyle, sıcaklığın 100°C civarında tutulması sağlanmalıdır. Bunun için de, söndürme işlemi sırasında dökülen suyu yavaş yavaş vermek, bir müddet soğuyup kabarmasını

bekledikten sonra, tekrar su vermek suretiyle söndürme işlemine devam edilmelidir [6].

Söndürme işlemi teknelerde, kireç kuyularında veya fabrikalarda su püskürtülerek yapılır. İlkel bir yöntem olan kireç kuyularında kireç fazla su ile söndürüldüğünden ürün $\text{Ca}(\text{OH})_2 + n \text{H}_2\text{O}$ şeklindedir ve yağlı kireç olarak adlandırılır. Fabrikalarda ise sönmüş kireç sadece $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'dir. İnce toz halinde olup, çimento gibi torbalar içinde satılır. Buna hidrate kireçte denir. Bu tozun özgül ağırlığı 2,20-2,45 g/cm³ aralığında, birim ağırlığı ise 0,60-0,75 g/cm³ arasındadır [6].

Söndürülmemiş kalker kirecinin öğütülerek belirli inceliğe getirilmesi ile söndürülmemiş toz kalsiyum (kalker) kireci, söndürülmemiş dolomit kirecinin öğütülerek belirli inceliğe getirilmesi ile söndürülmemiş toz dolomit kireci elde edilir [6].

Kireç üretiminin hammaddesi kireçtaşıdır. Kireçtaşları yüksek kalsiyum içeren ve magnezyum karbonat esaslı (dolomitik) olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Yüksek kalsiyumlu kireç taşları % 96-99 CaCO_3 içerirler. Kireçtaşlarının kalsinasyonu ile kireç (CaO) elde edilir. CaO biçimindeki kirece sönmemiş kireç de denir [4].

Akyarlı vd. [7] yaptıkları çalışmada killi zeminlerin kireç ile stabilizasyonu araştırmasını yapmışlar ve laboratuvar ortamında yaptıkları deney sonuçlarını birebir olarak yol alt yapısında da uygulayarak sonuçları analiz etmişlerdir. Kireç ile killi zemin üstünde yapılan iyileştirme ile sağlam tabaka elde edilmekte ve alt tabakada bulunan zayıf killi malzeme yolun üstüne tekrar çıkamamaktadır. Kireç stabilizasyonu ile yapılan uygulamada killi malzemenin kimyasal yapısı bozulmakta ve malzeme tekrar eski haline gelememektedir. Kilin su tutma özelliği ve şişme özelliğini kaybetmesi ve tekrar su ile temas ettiğinde kil davranışı göstermemesi kireç stabilizasyonuna büyük avantaj sağlamaktadır. Kireç stabilizasyonu uygulamasının kış aylarında da (yağmurlu ve malzemenin optimum su muhtevasının yüksek olduğu durumlarda) yapılabilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Kireç ile iyileştirme uygulaması ile klasik yöntemle göre %40'lara varan ekonomi sağlanabilmektedir.

Dunlop [8] yaptığı çalışmada kireç ile killi zeminlerin iyileştirilmesine yönelik bir çalışma yapmıştır. Zeminler kireç ile iyileştirildikten sonra 100'ün üstünde CBR oranı ve 0,86 Mpa'nın üzerinde serbest basınç dayanımı vermektedirler. Kil mineralleri içerisinde en çok tepkin (tepki) olan, montmorillonit kil grubudur. Bu gurup killer, yüksek oranda hacim değiştirme potansiyeline sahiptirler. Daha az etkin kil gurubu ise illit, kaolinit grubudur. Kireçle iyileştirmenin etkinliğini açıklayan bir diğer faktör ise sudur. Orjinal zemin, aynı miktarda ve sürede suyla parçalanırken kireçle iyileştirilmiş zemin daha güçlükle parçalanmaktadır. Pratik kireç katkı maddesi ekleme oranı %2den % 8'e kadardır. Bu miktarlarda, zeminin gösterdiği performans, laboratuarda CBR ve üç eksenli testlerle değerlendirilmekte veya ortaya konmaktadır. Bu testlerden önce numunenin 28 gün suda bekletilmesi ve daha sonra teste tabi tutulması arzu edilmektedir.

Yalçın [9] yaptığı çalışmada bentonit kiline kireç ilave ederek oluşan yeni zemin numunesinin şişme ve büzülme özelliklerini incelemiştir. Zemin + kireç karışımında çimentolaşmanın olabilmesi için çimentoya göre daha fazla zamana ihtiyaç vardır. Diğer taraftan çimentolaşmanın daha iyi olabilmesi için zemin + kireç karışımının uygun su muhtevasında ve yoğunlukta çok iyi sıkıştırılması gereklidir. Kireç hem zeminin plastik limitine ve hem de likit limitine etki etmektedir. Zemine kireç ilave edildiğinde likit limit miktarında azalma plastik limit miktarında ise artış meydana gelmektedir. Plastisite indeksi yüksek olan zeminlere az miktarda kireç ilave edilmesiyle plastisite indisinde %50-80 arasında bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Killi zeminlere kireç ilave edildiğinde hacimlerinde azalma meydana gelmektedir. Aynı enerji ile sıkıştırıldığında zemin + kireç karışımı kireçsiz olan orijinal zeminden daha düşük yoğunlukta sıkışmaktadır. Zemine ilave edilen kireç miktarı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığında azalma o oranda fazla olur. Zeminlere kireç ilavesi ile kuru birim hacim ağırlığındaki azalma çoğu zeminlerde ortalama %2,5 civarındadır. Zemin + kireç karışımlarında optimum su muhtevası fazla olmakla birlikte bu karışımlar, kireç ilave edilemeyen zemine oranla daha iyi sıkışabilmektedir. Zemin + kireç karışımları standart proktor enerjisinin üstünde bir enerji ile sıkıştırıldığında yüksek serbest basınç mukavemetine sahip olurlar.

Garaisayev [10] şişen killerin kimyasal yöntemlerle stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmış ve kireç ilavesi ile şişen kilin kıvam limitlerinde değişiklikler meydana geldiğini tespit etmiştir. Bunun sonucunda zemin sınıfı değişmiştir. Zeminin kompaksiyon özelliklerinde de değişiklikler olmuş, kireç kilin işlenebilirliğini artırmıştır. Yapılmış olan serbest basınç deneyleri sonucunda %3 kireç ilavesinin kısa dönem etkilerini oluşturmakla birlikte, uzun dönemde yeterince çimentolaşma oluşturamadığı ve serbest basınç değerlerinde önemli değişikliklere sebep olmadığı görülmüştür. %6 ve %9 oranında kireç ile hazırlanan numunelerde serbest basınç mukavemetinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Tüm kireç ilaveleri için Elastisite Modülü değerlerinde ise önemli miktarda artış oluşmuştur.

Alkaya [11] uçucu kül katkısının dolgu zeminlerin iyileştirilmesine olan etkisini incelediği bir çalışmada kireçle yapılan iyileştirme unsurunun stabilizasyonun başarısını artıran en önemli unsurun zeminde amorf durumda bulunan silikat miktarı aluminat içeriği olduğunu belirtmiştir. Büyük projelerde zeminin hangi yüzde de kirece gereksinimi olduğunu saptamak için en uygun yolun laboratuvar çalışması 7-14 ve 28 gün bekletme süresi dikkate alınarak kireç katkı optimum değeri bulunmaktadır. Çabuk yanıt istenen durumlarda her % 10 kül içeriği için % 1 kireç uygulaması kuralı uygulanabilmektedir.

2.2. Uçucu Kül

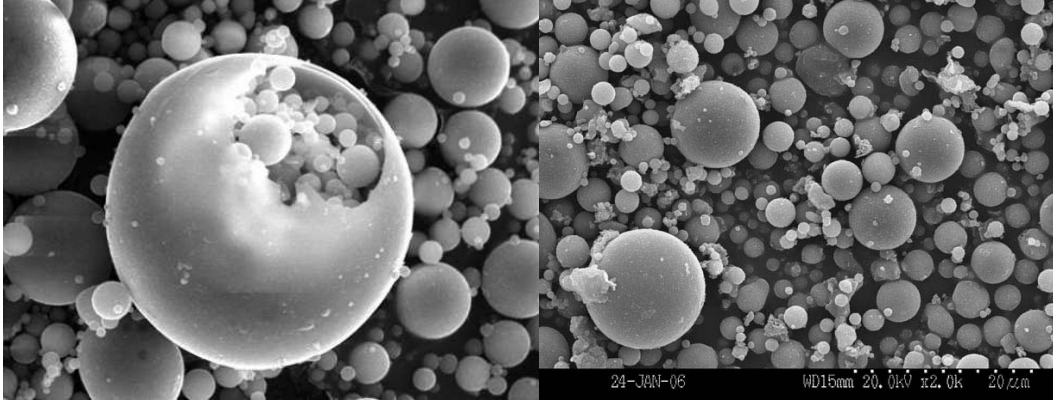
Uçucu kül en yaygın puzolandır. Bu malzeme, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 600 milyon tondur. Türkiye'de kömür yakan 11 enerji santrali bulunmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 13 milyon ton civarındadır [12].

Uçucu kül kavramı 1930'larda elektrik enerjisi endüstrisinin gelişmesi ile yayılmaya başlamıştır. İlk olarak 1937 yılında R.E. Davis, Kaliforniya Üniversitesi'nde uçucu külün betonda kullanımıyla ilgili deneysel sonuçları elde etmiştir. Bu çalışma uçucu kül kullanımının temelini oluşturur. Uçucu küllerin ilk olarak inşaat sektöründe kullanımı ise 1948 yılında, A.B.D.'de Montana'da bulunan Hungry Horse barajında kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. Uçucu kül kullanımının Türkiye'ye gelmesi 1960'ları bulmuştur. Çimento endüstrisinin uçucu külle tanışması ise 1970'lere dayanmaktadır. Uçucu küller, günümüzde inşaat sektörü başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Enerji üretiminde katı yakıt (kömür) kullanımı yöntemlerden biridir. Bir fosil enerji kaynağı olan kömür, Dünya üzerinde yaygın olarak bulunur. Rezerv ve üretim, seviyeleri yönünden diğer fosil yakıtlara göre ömürleri fazladır. Ülkemizde, 2009 yılı itibarıyla kömür üretimi 66,7 milyon ton linyit ve 2,9 milyon ton taşkömürü olmak üzere toplam 69,6 milyon ton olmuştur [14].

Fiyat istikrarı, taşıma, depolama ve kullanım kolaylığı yönünden emniyetli ve güvenilir olması, kullanıcıya arzının ucuzluğu ve sürekliliği gibi özellikleri ile vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Kömür bu konumu ile geçmişte olduğu gibi gelecekte de sürdürülebilir kalkınma ve enerjide güvenilirlik açısından önemli bir role sahip olmaya devam edecektir. Ülkemizde fosil kaynaklar içinde en büyük rezerve sahip olan kaynak kömürdür. Kömür rezervimiz içindeki en büyük pay 12,3 milyar ton ile linyite aittir. Linyit sektöründe faaliyet gösteren kuruluşların başında % 90'lık payla Kamu Kuruluşları olan Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) ve Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) gelmektedir. Linyit rezervlerimizin ağırlıklı olarak düşük ısı değerinde olması, bu kaynaklarımızın daha çok termik santrallerde elektrik üretim amaçlı tüketilmesine olanak sağlamaktadır [15].

Kömür homojen olmayan, kompakt, çoğunlukla bitki parçalarından meydana gelen, tabakalaşma gösteren, içerisinde çoğunlukla C elementi, az miktarlarda H,O,S ve N elementlerinin bulunduğu ama inorganik (kil, silt, iz elementleri gibi) maddelerin de olabildiği, bataklıklarda oluşan, kahverengi ve siyah renk tonlarında, yanabilen, katı fosil organik kütlelerdir.



Şekil 2.3. Uçucu kül SEM görüntüleri

Şekil 2.3'te uçucu küle ait farklı ebatlarda büyütülerek çekilen SEM fotoğrafları görülmektedir.

Uçucu kül tanecikleri elektrostatik filtre ve siklon (merkezkaç tekniği) gibi yöntemlerle yakalanmakta ve doğrudan atmosfere karışmaları engellenmektedir. Bu arada çevre ve havanın kirlenmesi de yeterince önlenmiş olur [15].

TS EN 450-1'e göre uçucu kül, kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip, esas olarak Al_2O_3 ve SiO_2 'den oluşan taneciklerdir. Uçucu kül pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarından toplanır [16].

2.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO , SO_3 , alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranında bulunmaktadır [17].

Termik santrallerde yakıt olarak, ülke kaynaklarına göre taş kömürü veya linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu yüzden uçucu küller orijinlerine göre iki ana gruba ayrılırlar;

- a) Taş kömürü uçucu külleri
- b) Linyit kömürü uçucu külleri.

Kimyasal yapıları bakımından ise uçucu küller 4 ana sınıfa ayırmak mümkündür.

1) Süikat-Alümina esaslı uçucu küller: Bunlar taş kömürü uçucu külleridir. Yapılarının büyük kısmını kuvars (SiO_2) ve bir miktar alümina (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Bu uçucu küller normal sıcaklıkta ve hidrolik bağlayıcı gibi priz yaparlar.

2) Silikat-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarındaki ana oksitler kuvars (SiO_2) ve kalsit'tir (CaCO_3). Fakat kalsit miktarı oldukça yüksektir.

3) Sülfür-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarının büyük bir bölümünü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsit'ten (CaCO_3) meydana gelmiştir. Bu sınıfa genellikle linyit kömürü uçucu külleri girmektedir.

4) Sınıflandırılmayan uçucu küller: Termik santrallerde ki yanma sisteminin homojen olmamasından dolayı belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal yapıları sürekli değişebilmektedir [18].

Uçucu küller, gözenekli veya dolu camsı küresel taneler ile yanmamış mineralleri içeren süngerimsi ve köşeli aglomere tanelerden meydana gelir.

Genellikle bir uçucu külden SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO , Na_2O , K_2O ve TiO_2 gibi oksitlerin hemen hemen tamamına rastlanmaktadır. Ancak bu oksitlerin küldenki yüzdeleri külün tipine bağlı olarak değişmektedir. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri TSE ve ASTM'ye göre sınıflandırılmış şekilde aşağıda Tablo 2.2'de gösterilmiştir [18]:

Tablo 2.2. TSE ve ASTM Göre Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Bileşik	% Ağırlıkça	Kimyasal Bileşik	F % Ağırlıkça	C % Ağırlıkça
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	70 (Min)	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	70 (Min)	50 (Min)
MgO	5 (Max)	MgO	0	0
SO ₃	5 (Max)	SO ₃	5 (Max)	5 (Max)
Nem	3 (Max)	Nem	3 (Max)	3 (Max)
Kızdırma kaybı	10 (Max)	Kızdırma kaybı	12 (Max)	6 (Max)
TSE		ASTM		

Aynı zamanda uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır.

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO > %10 olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılır. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğine de sahiptirler [19].

2.2.2. Uçucu küllerin özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır.

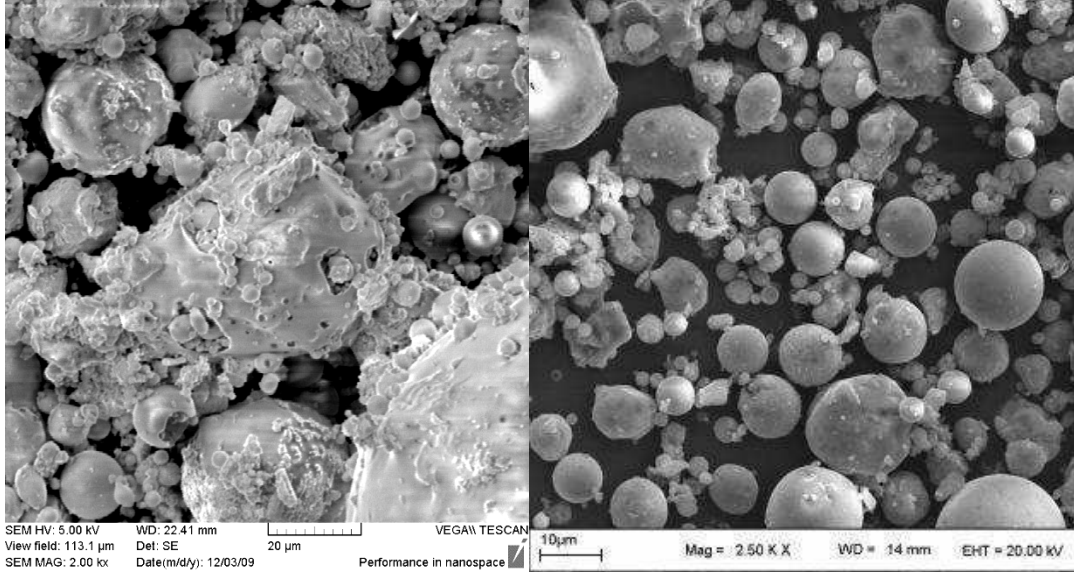
Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, diğerleri SO_3 , MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir [20].

Aşağıda Tablo 2.3'te Kütahya Seyitömer uçucu kül termik santralinden alınan UK numunesinin kimyasal analiz sonucu görülmektedir.

Tablo 2.3. Seyitömer Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

Numune Adı	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	S+A+F	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	KK
Seyitömer Uçucu kül	54,49	20,58	9,27	84,34	4,26	4,48	0,52	2,01	0,65	3,01

Uçucu külün mineralojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirt) alçıtaşı, karbonatlar (Ca, Mg, Fe) ve proses koşullarına (kömür hazırlama ve yanma gibi) bağlıdır. Uçucu küllerin mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere camsı (kristalsız) ve kristal yapıli bileşenlerden oluşmaktadır. Uçucu külde büyüklükleri $0.5 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$ arasında değişen hem camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekli ve büyüklük açısından farklılıkları uçucu külün tipinden kaynaklanmaktadır. Camsı küresel şekilli tanecikler içi boşluksuz küresel yapılar, boşluklu küreler, büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar, yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıklar bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir [21].



Şekil 2.4. a) Küresel, Yarı-Köşeli ve Köşeli Çayırhan Uçucu Külü (x2000), b) Küresel ve Yarı Küresel Uçucu Kül (x2500)

Şekil 2.4'te farklı yüzeylere sahip uçucu küllere ait SEM fotoğrafı çekimleri yer almaktadır.

Uçucu küllerin arasına bir manyetik sokulduğunda, bir miktar uçucu kül mıknatısa yapışır. Mıknatıs bir hava akımına tutularak manyetik olmadığı halde yapışan taneler uzaklaştırılır. Bu deney birkaç defa yapıldıktan sonra uçucu küllerin %25'inin mıknatısta kaldığı görülür. %7.7 Fe_2O_3 içeren bir uçucu külden, mıknatısa yapışan kısım yaklaşık %6.8 olmaktadır. Kimyasal analizde; mıknatısta tutulan kısmın yaklaşık %63'ünün Fe_2O_3 olduğu, mıknatısa yapışmayan kısımdaki Fe_2O_3 miktarının ise %4 olduğu tespit edilmiştir [18].

2.2.3. Termik santrallerde atık uçucu küllerin toplanması

Termik santraller ile elektrik üretiminde yanma işlemi sonucunda oluşan atık küller; kömür cinsine, kül oranına, kimyasal yapısına, kazanlara yükleme programına ve kül temizleme işlemleriyle kazan tipine bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir. Termik santrallerde, toz ve parça kömürler takılmaktadır. Toz kömür yakan termik santrallerde 0.09 mm tane boyutunda öğütülmüş kömürler kullanılır. Parça kömürler

ızgaralı kazanlarda yakılmakta olup, oluşan küllerin %1-5'i uçucu küllerdir. Toz Kömürlerin kullanılmasında ise bu oran %80'lere ulaşmaktadır. Uçucu kül yanma sonucu ortaya çıkan gazlardan elektrostatik yöntemlerle filtre edilen mikron büyüklüğünde granüler malzemelerdir. Yakılan linyit kömürlerinden geriye ağırlıkça % 23 civarında uçucu kül kalmaktadır [22].

Uçucu küllerin toplanmasında elektro filtreler, siklonlar, nemlendirme, ultrasonik çöktürme, filtreler, kontrol prosesleri gibi yöntemler kullanılmaktadır. Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri, elektro filtre ve siklonlardır. Uçucu küllerin tane boyutunun büyük olduğu durumlarda siklon gibi mekanik tutucular, küçük olduğu durumlarda ise elektro filtreler kullanılır. Nemlendirme yönteminde su ile ıslatılarak çöktürülmesi esasına dayanır. Ancak yöntemin çok su tüketmesi ve toplanan küllerin değerlendirilememesi ve yüksek maliyeti nedeniyle pek kullanılmamaktadır. Filtreler, ultrasonik çöktürme ve kontrol prosesleri ile 1µm tane boyutuna kadar uçucu küller yakalanabilmektedir. Bacadan kaçan kül miktarı azaldığı için çevre kirliliğini azaltan bu yöntemlerin yatırımı ve işletme maliyeti çok yüksektir [23].

Aşağıdaki Şekil 2.5'te Uçucu küllerin elektro filtrelerde toplanması yöntemi ile biriktirilmesi sistemine ait resim görülmektedir.



Şekil 2.5. Uçucu külün elektro filtrelerde tutulması

Alataş [13], Afşin–Elbistan Termik Santrali uçucu külünün yol stabilizasyonunda çeşitli malzemelerle birlikte kullanımı üzerine bir araştırma yapmıştır. Sonuçta, Afşin – Elbistan Termik Santrali uçucu külünün, yol stabilizasyonunda, diğer esas bağlayıcılarla birlikte kullanılabilceği belirtmiştir. Böylece hem diğer bağlayıcıların daha az kullanılmasına imkan vererek, bu malzemelerden tasarruf sağlanacağı hem de uçucu külün kullanım alanının genişleyeceği sonucuna varmıştır.

Arora vd. [24] yaptıkları çalışmada zemin-çimento ve zemin-kireç karışımı kullanılmış yol temel tabakasının F sınıfı uçucu kül ile stabilizasyonu araştırılmış, zemin-katkı karışımları üzerinde serbest basınç, CBR ve esneklik modülü (MR) deneyleri yapmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre karışımların dayanımı yüksek oranda kür süresi, sıkıştırma enerjisi, çimento ve su içeriğine bağlıdır. Zemin-kireç- uçucu kül iyileştirmesinde yol temel tabakası için yeterli dayanım sağlanmamıştır. Çimento ile işlem görmüş karışımların donma-çözünme çevirimleri sonrasında fazla aşınma gözlenmemiştir. Granüler zeminleri, özellikle yol katmanı yapımında doğru modelleme imkânı veren toplu gerilme (bulk stress) ölçümü esneklik modülünün (MR) kuvvetli bir fonksiyonudur. Bu faktörlerin çoğu imal edilecek yol tabaka kalınlıklarına etki eder. Kendinden çimentolanma özelliği olmayan (not self-cementing) F sınıfı uçucu küller zemin stabilizasyonunda tek başına kullanılamazlar. Çimento, kireç ve uçucu küle hazırlanarak zemine katılan stabilizasyon katkısı genellikle puzolanik stabilizasyon karışımı olarak adlandırılır. F sınıfı uçucu küle hazırlanan puzolanik stabilizasyon karışımlarına reaksiyon başlatmak veya hızlandırmak için kireç veya çimento ilave edilmesi gerekir. Büyük miktarda uçucu kül kullanarak atığı ortadan kaldırma potansiyeli bulunan uçucu kül-zemin stabilizeli çevre dostu yolların dayanım ve durabilitesini hedeflenen seviyeye çıkarmak için yapılacak işlem basit sıkıştırma değildir.

Digioia vd. [25] yaptıkları benzer bir çalışmayı Pennsylvania uçucu küllerine uygulamışlar, Deneyler sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlığının 12.3-14.3 kN/m, optimum su içeriğinin %19-29 arasında olduğunu, çok gevşek küllerin yüksek sıkışabilirlik, sıkı küllerin düşük sıkışabilirlik gösterdiğini bununla birlikte uçucu külün sıkışabilirliğinin numunenin ilk sıkılığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda tane çapı dağılımı, su içeriği ve puzolanik özellik sıkışabilirliği

etkileyen faktörler olduğunu ortaya koymuş, uçucu küllerin yaklaşık kohezyonlu bir zeminle aynı sıkışabilirliğe sahip olduğunu ancak daha geçirgen oldukları için kil zeminlerden daha çabuk konsolide olabildiklerini, bu sayede uçucu kül dolguları üzerinde inşa edilen yapıların oturmasının büyük kısmının inşa aşamasında meydana gelmesini sağladığını, uçucu külün kayma mukavemetinin içsel sürtünme açısından ve ıslak küilde bulunan suyun yüzeysel geriliminden oluşan kohezyondan oluştuğunu, kayma mukavemetinin uçucu külün çimentolaşma özelliğinden dolayı zamanla artış gösterdiği ve bu artışın uçucu küilde bulunan serbest kireç oranıyla değiştiğine değinmişlerdir.

Tan vd. [12] yaptıkları çalışmada, Kemberburgaz kiline ($W_1=\%40$, $w=\%19.3$, $I_p=21.7$, CL) %20 uçucu kül ilavesinin mukavemet karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve üç eksenli basınç deneylerinde bir günlük kür neticesinde dahi kayma direncinde önemli bir artış meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Yılmaz vd. [26] yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu külü farklı oranlarda değişik iki tip kil ile karıştırmış ve bu karışım oranlarının, killerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Uçucu kül katkısının % 10-20 arasında bir oranda olması durumunda dayanım değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Kür süresinin de dayanımı arttırdığı ve mekanik özelliklerde iyileşme sağlandığı saptanmıştır. Sonuç olarak uçucu küllerin zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Baykal vd. [27] yaptıkları çalışma sonucu uçucu külün silt boyutunda olması sebebiyle kompaksiyonun su muhtevasına aşırı hassasiyet gösterdiğini bulmuşlardır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yeni bir yöntemle, sıkıştırma suyunun katı fazda, kazanç olarak daha yüksek miktarlarda katılmasıyla uçucu külün hidrasyon ısısı düşürülmüş, reaksiyon süresi uzatılmıştır. Böylece çimento minerallerinin daha kolay büyüyebileceği bir ortam yaratılmaktadır. Deney sırasında kırılan numunelerin, SEM ve XRD cihazları ile mikroyapı ve kompozisyonları incelenmiş, mikroyapıdaki değişiklikler ile mühendislik özelliklerindeki değişimler açıklanmıştır. Karla sıkıştırılan numunelerde, suyla sıkıştırılan numunelerde gözlenen tomasit minerali yerine, daha yüksek atomik su içeren etrenjit (etringit) minerali saptanmıştır.

Aytekin vd [20] yaptıkları uçucu küllerin killi zeminler üzerindeki etkileri konusundaki çalışmasında Afşin-Elbistan Termik Santrali'nin uçucu külünün zemin ıslahında kullanılabilirliğini deneysel çalışmalarla araştırarak, elde edilen sonuçlar ışığında ülke ekonomisine ve çevre dengesinin korunmasına katkıda bulunulabileceğini tespit etmişlerdir. Çalışmada, zeminin kuru ağırlığının % 10 ve % 20'si oranında uçucu kül ilave edilerek hazırlanan yapay zemine sınıflama ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, zemine uçucu kül ilavesinin zeminin ıslahında kullanılabilirliği saptanmıştır. Zemine uçucu kül katkısı maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini azaltmakta, optimum su muhtevasında ise artış meydana getirmektedir. Kuru birim hacim ağırlık kompaksiyon enerjisi ile arttırılabilmektedir. Uçucu kül katkısı zeminin kompaksiyon özelliklerini değiştirmektedir.

Cömert vd. [2] yaptıkları çalışmada, F sınıfı uçucu kül ve çimento ile stabilize edilen zeminlerin CBR yüzdeleri üzerinde, taze ve 28 günlük kür sürelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada iki ana matris vardır. Matrislerden biri kil-kireç, diğeri kil-bentonit-kireç'tir. Farklı yüzdelerde matris-katkı karışımları hazırlanmış ve sıkıştırma sonunda kür edilmiştir. Karışımlar üzerinde ıslak CBR deneyleri yapılmıştır. Bu sonuçlardan taşıma oranları 28 gün kür sonunda ilk gün deneylerine göre, uçucu küle işlem gören karışımların % 4- % 160 daha yüksek, çimento ile işlem görmüş matrislerin çoğunda ise % 50'ye varan düşüş belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, puzolanik reaksiyon içeren zemin stabilizasyonlarında, CBR deneyinin 28 gün kür edilmiş örnekler üzerinde yapılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Şenol vd. [28] Kangal termik santrali atığı olan C sınıfı uçucu kül ve polipropilen elyaflarla stabilize edilmesi durumunda Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)'nın değişimi izlenmiştir. Kullanılan zemin örneğine sınıflandırma deneyleri yapılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiş, sonra, uçucu kül-zemin-polipropilen elyaf çeşitli karışım serilerinde hazırlanarak standart sıkıştırma deneyi ile belirlenen optimum su muhtevasında sıkıştırılmış örneklerde CBR değerleri tespit edilmiştir. Çalışmada yumuşak zemin, C sınıfı uçucu kül ve iki tip polipropilen elyaf

kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarından yumuşak zeminlerin direncinin arttığı ve geoteknik parametrelerinde gelişme olduğu gözlenmiştir.

Alkaya [11] yaptığı çalışmasında uçucu küllerin zemin iyileştirilmesinde kullanılmasının incelenmesi başlığı altında bir çalışma yapmıştır. Termik santrallerde ortaya çıkan uçucu kül miktarının çok büyük boyutlara ulaşması ile uçucu külü, atık olarak nitelendirerek depolamak yerine, yan ürün olarak değerlendirebilmenin yollarını aramak zorunluluk haline gelmiştir. Uçucu külün özelliklerinin, zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanımına olanak sağlanması ile nitelikleri yetersiz zeminin ekonomik olarak iyileştirmede kullanılması ve diğer kullanım alanları belirlenerek kullanımın artırılması depolanma ile oluşan çevre sorunlarını azaltmanın yanında termik santralin etkinliğini arttıracaktır. Dolgu olarak kullanılan zeminlerin iyileştirilmesinde uçucu kül kullanılması uzun yıllardır dünyada araştırma konusu olmuş, ülkemizde yerel bazı uygulamaların var olmasına rağmen yaygınlaşma sağlanamamıştır. Çalışmada, ülkemizdeki uçucu küllerin özellikleri; şimdiye kadar yapılan çalışmalardan derlenerek, zemin iyileştirme, dolgular ve diğer zemin yapılarında kullanımının artmasının sağlanması amaçlanmıştır. Böylelikle daha az çimento veya diğer katkı maddeleri kullanılarak ilk olarak ülke ekonomisine fayda sağlanacaktır. Doğal malzemelerin daha az kullanılması ile daha az doğa tahribi sağlanacak ve çevre sorunlarının çözümüne katkı sağlayacaktır.

Lee vd. [29] F sınıfı uçucu kül-kireç karışımı elastik modülünün, katkısız F sınıfı uçucu kül değerinden yüksek ve plastik deformasyonun ise daha düşük olduğunu göstermişlerdir. F sınıfı uçucu kül-kireç karışımında, uygun dayanım artışı için F sınıfı uçucu kül ve kirecin miktarını doğru ölçmek önemlidir. Bu gibi durumlarda, plastisite indeks yöntemi, katkı maddelerinin gerçek miktarlarını ölçmek için kullanılabilir. Hâlihazırda, stabilizasyonda kullanılan F sınıfı uçucu kül-kireç karışımında kullanmak amacıyla tespit edilmiş sabit bir kireç-uçucu kül yüzdesi yoktur. Bu araştırma zeminin % 15'lik kireç ve ağırlığının 1/3'ü oranında uçucu kül ile stabilize edildiğinde, CBR değerinde % 4'den % 20'ye ve serbest basınç dayanımında 0.3 MPa'dan 0.68 MPa'ya varan bir artışa olanak sağladığını göstermiştir.

Yurdumuzda uçucu kül, geçmişte maliyetlerin yüksek oluşu nedeniyle katkı olarak çok kullanılamamıştır. Günümüzde taşıma ve ayrıştırma maliyeti azalmış, çimento ve beton üretiminde uçucu kül tüketim miktarları artırmıştır. Geoteknik mühendisliği uçucu külün birçok yöntemle zemine stabilatör olarak katılabileceği uygulamalara sahiptir. Geoteknik alanının uçucu kül kullanım miktarı arttırmada büyük ilerleme göstereceği düşünülmüş ancak özellikle zemin stabilizasyonunda beklenen olmamıştır. Türkiye, birçok bölgesinde termik santral bulunan ve yenilerinin kurulması düşünülen gelişen ve yerli kaynaklı enerjiye ihtiyacı artan bir ekonomiye sahiptir. Ülkemizdeki termik santral ve yerleri şöyledir: Çan, Çanakkale; Orhaneli, Bursa; Soma, Manisa; Seyitömer ve Tunçbilek, Kütahya; Çatalağzı, Zonguldak; Yatağan, Kemerköy ve Yeniköy, Muğla; Kangal, Sivas; Afşin-Elbistan B, Kahramanmaraş. Termik santrallerin Türkiye'deki bu dağılımı taşıma ve ayrıştırma maliyetlerini azaltırken enerji ihtiyacının artması yakılan kömür ve üretilen atık miktarını da arttırmaktadır. Dolayısıyla daha fazla uçucu kül tüketecek yöntemlere ve farklı kullanım alanlarına ihtiyaç duyulacaktır [21].

2.3. Polisaj

Polisaj daha çok yapay granit atığı olarak bilinmektedir. Sanayi sektöründen elde edilen bir tür atık malzemedir. Yapay granit üretimi yapan her fabrikadan çıkabilen bir malzeme olmasından çevreye büyük zarar verebilecek bir malzemedir.

2.3.1. Polisajın elde edilmesi

Üretilen yapay granitlerin suyla kesimi sırasında su ile karışarak yere inen ve ordan da bant sistemi yardımı ile toplama havuzlarına aktarılmaktadır.



Şekil 2.6. Polisağın Su Havuzlarında Bekletilmesi

Şekil 2.6’da kalıp halinde üretilen yapay granitlerin kesim işlemi sırasında su ile beraber toplama havuzlarına alınan polisağ atığının toplandığı birim görülmektedir.

Su havuzunda döner sistemler yardımı ile suyla beraber karıştırılan polisağ atığı buradan filtreleme birimlerine aktarılmaktadır.



Şekil 2.7. Polisağın Sudan Arındırılması

Toplama havuzlarında sulu halde biriken polisağ atığının filtreleme yöntemi ile sudan arındırılma işlemi Şekil 2.7’de görülmektedir.

Filtreler yardımı ile suda iyice arındırılan malzeme filtreler arasında ıslak biçimde belirli bir süre bekleyip, alt kısımda hazırlanmış olan atık havuzuna kendiliğinden düşmektedir. Burada da hergün aynı işlemler tekrarlandığı için yüksek miktarlarda atık malzeme elde edilmektedir.

2.4. Kaolen Kili

Kilin saf olması halinde rengi beyaz olur ve kaolen adını alır. Kaolen kiline aynı zamanda kaolin'de denilmektedir. Kaolin adı, "yüksek dağ" anlamındaki Çince K'ao ling sözcüklerinden gelir ve Çin'in Kaolin bölgesinde bulunduğu için bu adı aldığı bilinmektedir. Kaolin Dünyaca ünlü Çin porselenlerinin yapı maddesidir. Kaolin Çin'den kaynaklandığı için, çeşitli Avrupa ülkelerinde Çin çamuru ya da Çin kili olarak adlandırılır. Kaolin porselen, seramik ve çini yapımında da kullanılmaktadır. Türkiye'de arı kil (saf) olarak da bilinir [7].

Kaolin ya da kaolen, Şekil 2.8'dede görüldüğü gibi granit kayalardan elde edilen beyaz ve yumuşak bir kil türüdür. Oluşum itibariyle feldspat içeren granitik veya volkanik kayaların feldspatlarının altere olarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. Ana kayaç içindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözümlenür tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu Al_2O_3 içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç kaoliniti oluşturur [7].



Şekil 2.8. Kaolen kili

Kaolinit minerali, seramik yapımında ısıtıldığında 200°C'nin altında higroskopik suyunu bırakır. 500-600°C'de kimyasal formüldeki bağıl suyunu bırakarak metakaolinite dönüşür.

Kaolenlerde esas yapıcı eleman alüminyum silikattır. Bunun azalması halinde, bileşime az miktarda demir, kükürt veya potasyum karışır. Potasyumun varlığı, ortamda bir miktar alunitin (K_2O) varlığı demektir ki bu durumda ısı işlemlerde ateş kaybının artmasına yol açtığı için istenmemektedir. Buna rağmen asıl istenmeyenler ise demir ve kükürttür. Kükürt ateş kaybını arttırmakla birlikte demir ile beraber hem seramiğin rengini bozmakta, hem de ısı işlemlerde başka istenmeyen kimyasal değişmelere yol açmaktadır [30].

2.4.1. Kaolenin oluşumu

Kaolin oluşumu tabiatta en yaygın olan ve genellikle bir arada bulunan Si-Al-Fe elementlerinin birbirlerinden ayrılmasına bağlıdır. Kaolin, içinde hidratlı alüminyum silikat ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) bulunan kaolinitten oluşmuş, beyaz, yumuşak bir kildir. Bununla birlikte, doğal halde, genellikle alüminyumun yerini almış bir miktar demir, titanyum ve alkalilerle birlikte bulunur. Kaolin granitin ve erimiş kaya kütlelerinin soğumasıyla oluşan diğer volkanik kayaların doğal bozunması sonucu ortaya çıkar. Bu taşların kile dönüşmesi, çeşitli yollarla gerçekleşmektedir; ama başlıcaları hidrotermal dönüşüm ve süperjenik aşınma etkisiyle olanlardır. Hidrotermal dönüşüm, sıcak asitli volkanik çözeltilerin, yerkabuğunu zorlayıp yüzeye çıktığı yerlerde, alkali yapıdaki feldispatlarla karşılaşarak, onları kaoline dönüştürmesi olayıdır. Feldispatlar, alüminyum, silisyum ve oksijenin, potasyum, sodyum, kalsiyum ve baryumla birleşmesiyle ortaya çıkan, kayaç oluşturuca önemli mineral gruplarından biridir. Süperjenik aşınma etkisiyse, karbonik asit ve toprak asitleri içeren yeryüzü sularının, kayaların üstlerinden süzülerek feldspatı kaolinleştirmesidir [20].

2.4.2. Kaolen kilinin özellikleri

Kaolenin kimyasal analizi, tane boyut dağılımı ve mineralojik bileşimi Tablo 2.4'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre, Al_2O_3 oranının %37,63 olduğu, $2\mu m$ 'den küçük tane oranının ise %16,30 olduğu tespit edilmiştir [7].

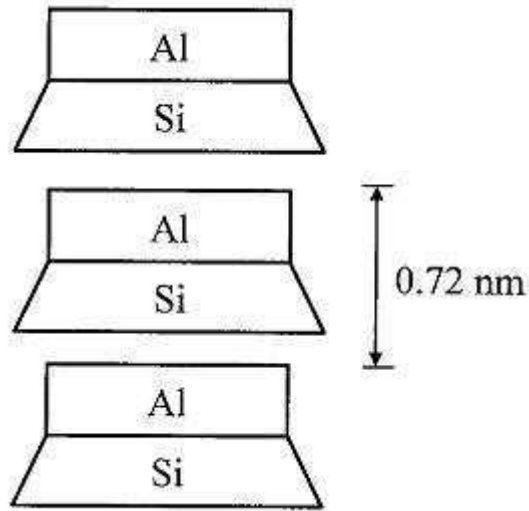
Tablo 2.4'te kullanılan kaolen kilinin kimyasal analiz sonucu verilmiştir.

Tablo 2.4. Kaolen Mineralinin Kimyasal Analizi

Numune Adı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	KK
Kaolen Numunesi	45,65	37,63	0,73	0,3	0,27	0,62	2,4	0,13	11,91

Bir kaolende plastisite indisi ne kadar yüksekse o kadar plastik denilmektedir. Elde edilen likit limit değerleri ile plastik limitlerin birbirinden çıkarılması ile plastiklik indisi bulunmaktadır. Bu değer bize kaolenin plastik formdan akıcı hale geçtiği, yani kolayca çalışılabilir aralığın elde edildiği su miktarı %'sini verir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Na_2SO_4 ilavesi artırıldıkça kaolenin plastisite indisi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir [7].

Kaolinitin mineralojik yapısında tabakalar arasındaki kuvvetli hidrojen bağları suyun tabakalar arasına girip şişme oluşturmamasını engellemektedir. Doğada sık olarak rastlanan kaolinit minerallerinin suya eğilimi az olup su ile karşılaştıklarında büyük oranda hacim değişimine sahip olmazlar. Bu minerallerin şişme ve plastik özellikleri düşüktür. Şekil 2.9'da kaolinit mineral grubunun mineralojik yapısı görülmektedir.



Şekil 2.9. Kaolinit Mineral Grubunun Minerolojik Yapısı

Bu bölümde kullanılan malzemeler hakkında kısa bir literatür taramasına yer verilmiştir. Literatür özetinde malzemelerin elde edilmiş aşamaları, oluşumları ve Türkiye'deki durumları hakkında bilgiler kısaca gösterilerek akademik alanda bu malzemeler ile çalışılmış konulara değinilerek bu çalışmalardan yazarın hangi sonuçlara vardığını gösteren bilgilerde sunulmuştur. Çalışmada kullanılacak olan malzemeler temin edildikten sonra deneysel çalışmalara yardımcı olması amacı ile tüm malzemelerin kimyasal analizleri yaptırılmış ve sonuçları bu bölümde gösterilmiştir.

BÖLÜM 3. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Mühendislik yapılarında temel sistemleri, zeminde oturma, taşıma kapasitesinde ve deprem gibi doğal afetlerde sıvılaşma problemi olmaması durumunda genellikle yüzeysel temeller kullanılarak çözüm aranmaktadır. Oturmalar büyük veya stabilite açısından yeterli güvenlik olmadığı takdirde derin temel tasarımına veya zemin iyileştirmesine başvurulur [20].

Karşılaşılan zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilir. Zemin özelliklerinin projeye uygun hale getirmek zemin iyileştirme kavramının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Zemin iyileştirmeleri derin temel sistemlerinden daha ekonomik olması ve istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin atılarak yerine daha uygun zeminlerin kullanılması ise teknolojik ve ekonomik nedenlerden dolayı çoğu zaman uygun olmaması, problemlili zeminlerde alternatif olarak zemin iyileştirme yöntemlerini gündeme getirmiştir. Venedik kentinde yapılan yapılar ve İstanbul'daki Haydarpaşa Tren istasyonu ahşap kazıklar üzerine oturtulmuştur. Çin'de M.Ö. 600 yıllarında zemin içine açılan kuyular sönmemiş kireçle doldurularak, eski Roma'da karayolu yapımında killi zeminleri puzolan ve kireçle stabilize edilerek zemin iyileştirilmiştir [20].

Günümüzde insan nüfusunun ve buna paralel olarak barınma ihtiyacının artması, yapıların büyümesi ve yapı yüklerinin artmasına sebep olmuştur. Bu durumda sadece sağlam zeminler değil problemlili zeminler üzerinde de yapı inşası kaçınılmaz hale gelmiştir. 1970'den beri alternatif olarak uygulanan zemin iyileştirme yöntemleri bu tarz zeminlerin ıslahında çözüm oluşturmuştur. Özellikle son yıllarda gelişen teknolojiyle zeminler iyileştirilerek, zemindeki oturma problemi ortadan kalkmakta, taşıma kapasitesi arttırılmakta ve deprem sırasında sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler sağlamlaştırılmaktadır [28].

Yapılması amaçlanan inşaat veya tesisin bulunduğu yerdeki zemin her zaman yapıyı taşıyacak (temel) veya yapıyı oluşturacak (yol gövdesi) mühendislik özelliklerini taşımayabilir. Zeminler zayıf; ileri derecede sıkışabilir nitelikte veya mühendislik ya da ekonomik bakış açısından yüksek derecede geçirgen olabilirler. Bu durumda yapılacak inşaatın yerinin değiştirilmesi düşünülebilir. Fakat yapı veya yolun yerini çoğu zaman geoteknikten başka şartlar belirlemekte ve mühendis yapıyı gösterilen yerde imal durumunda kalmaktadır. Bunun için uygun çözümlerden biri, yapının temelini zemindeki geoteknik şartlara göre ayarlamaktır. Diğer çözüm, zeminin stabilize edilmesi yani zeminin iyileştirilmesi, bu şekilde mühendislik özelliklerinin düzeltilmesidir. İkisi arasında en ekonomik olanı genellikle ikinci seçenektir [28].

Zemin stabilizasyon yöntemleri genelde zeminin birden fazla özelliğini iyileştirmektedir. Bu nedenle bu yöntemleri belirli tek bir sınıflandırma sistemi içinde ve maddeler altında toplamak uygun olmayabilir. Ancak en genel haliyle stabilizasyon yöntemleri mekanik, ısıl ve kimyasal stabilizasyon olarak üçe ayrılmaktadır. Bunlardan ekonomik ve uygulaması kolay olan kireç, uçucu kül, çimento gibi katkı malzemeleriyle yapılan kimyasal stabilizasyon yöntemleri bütün dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında kimyasal reaksiyon içermeyen sadece dane şekli ve dane boyutu avantajı ile mekanik stabilizasyonda ocak ve taş tozların kullanımı da tercih edilmeye başlanmıştır. Karıştırma anında mekanik stabilizasyon, bir süre geçtikten sonra da kimyasal stabilizasyon özelliği gösterme olasılığı olan mermer tozu gibi, dünyada ortaya çıktığı ülkelerde çevre sorunu yaratan malzemelerin de kullanımı, kolaylığı ve ekonomik sebeplerden artmaktadır [28].

İnsanların yaşantısını derinden etkileyen deprem gerçeği, son derece önemli olan yaşam ortamlarının güvenli oluşturulmasını gerektirmektedir. Deprem-Zemin-Yapı arasındaki üçlü ilişki özellikle zemin teknolojisinin doğru uygulanması ile olumlu sonuç verebilir. Çünkü [2];

1. Deprem özellikleri; Deprem yeri, zamanı vb. gibi özellikleri önceden tam olarak bilinemediğinden deprem anında insan herhangi bir şey yapamaz.

2. Zeminin özellikleri; İnsan yerleşim yerini dikkatle seçer veya zemini iyileştirerek ortamını dayanıklı hale getirebilir,
3. Yapının özellikleri; Depremi dikkate alan, bilimin gereklerine uygun yapılar ile can ve mal kaybını önleyebilir.

Yıkıcı etkileri ile istenmeyen deprem, önemsememe, ihmal ve bilgisizliği affetmiyor, tedbir alınmaz ise faturası ağır oluyor. Göz ile görülmeyen, zeminin içinin tanınması için mutlaka araştırılması gerekir. Bu araştırma; jeolojik ve jeofizik etütler ve zeminlerden sondaj ile alınan numunelerin deneye tabi tutulması ve laboratuvar deneylerinden belirlenen jeoteknik parametrelerin elde edilmesini kapsamaktadır. Zeminin kimliği olan bu parametrelere göre, bozuk-zayıf-kötü-gevşek diye anılan sorunlu bölümlere bazı iyileştirme yöntemleri uygulanabilir. Bu sayede bozuk zemini duraylı kazabilmek veya üzerine yapı tarzı bir şeyler yüklemek mümkün olabilir. Zemin parametreleri, yerleştirilecek yapının proje yükü ve depremsellik durumuna göre, ideal zemin iyileştirme yöntemi seçilir. Uygulama sonrasında, sıkılık, dayanım, geçirimsizlik, süreklilik, yükleme- çekme gibi testler ile kontrol çalışmalarına tabi tutularak, iyileştirme başarısı izlenir. Uzun zamandır uygulanan konsolidasyon-yerdeğiştirme esaslı vibrasyonlu sıkıştırma, taşkolon enjeksiyon, kontrollü kazı-dolgu, dinamik sıkıştırma, vibrobeton kolon, ağaç/prekast kazık-forekazık gibi bilinen klasik yöntemlere son yıllarda daha ekonomik ve çabuk yapılabilen jet grouting gibi iyileştirme yöntemleri de katılmıştır. Taşıma gücünün artırılması için diğer bir yöntem zeminin kurutulmasıdır. Bilinen pompaj ile drenaj- kurutma işleri, son yıllarda fitil dren, well point gibi yeraltısu seviyesi değiştirme işlemlerini de kullanılmaya başlanılmıştır. Yanal geçirimsizlik için ise, jet grouting perdesi ve kesişen kazık uygulaması seriliği ve güvenilirliği ile tercih edilmektedir. Teknik gerekçelerin yanı sıra, iyileştirilecek zeminin bulunduğu ortamın boyutu, üzerindeki yapının önemi, yerdeğiştirme (mobilizasyon) maliyeti, kullanılacak malzemelerin temin koşulları, işin süresi ve maliyeti gibi diğer faktörler ve işverenin tutumu seçilecek iyileştirme yöntemini belirler. Yanlış yönlendirme sonucu yetersiz iyileştirilen zeminin problemi çözmediği olmuştur, o zaman hukuki-tekni bilirkışı yorumu ile tekrar ilave işler veya yeni bir yöntemle iyileştirilme sağlanmış fakat çok daha pahalıya mal olduğu görülmüştür. Bu konuda en sağlıklı yol, zeminin çok iyi araştırılması ve değişik yöntemlerin fizibilitesini iyi yorumlamak, hatta tasarım-

projelendirme sürecinde uzman katılımı-denetimi sağlamak ve nihayet uygulamada kontrolü elden bırakmamak son derece önemlidir. Kısaca, zayıf zeminin iyileştirilmesi ile amaç; taşıma gücünün artırılması, duraylılığın sağlanması zemin büyütmesi ve sıvılaşmayı kapsayan deprem yüklerine karşı sağlamlaştırma, zeminin kurutulması, korozyon ve erozyonun önlenmesi gibi sayılabilir. Sürekli gelişen zemin teknolojileri kaliteli, güvenli ve ekonomik çözümleri alt yapı sektörüne dolayısıyla insanlara sunmaktadır. Önemli olan doğru teknoloji ile yeterli uygulamayı sağlamaktır [2].

Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Mekanik stabilizasyon yöntemleri:

- a) Derin kompaksiyon
 1. Patlatmayla sıkıştırma
 2. Kompaksiyon enjeksiyonu
 3. Sondalı titreşim teknikleri
 4. Ağır tokmakla sıkıştırma
- b) Ön yükleme ile stabilizasyon
 1. Ön konsolidasyon
 2. Drenaj ve drenlerle konsolidasyon
- c) Ortamın donatılandırılması
 1. Taş kolonlar
 2. Kompaksiyon kazıkları
 3. Ankraj ve çivileme tekniği
 4. Kök kazıkları
 5. Kireç kuyularıyla stabilizasyon
 6. Donatılı zemin (çelik, alüminyum, plastik vb.)

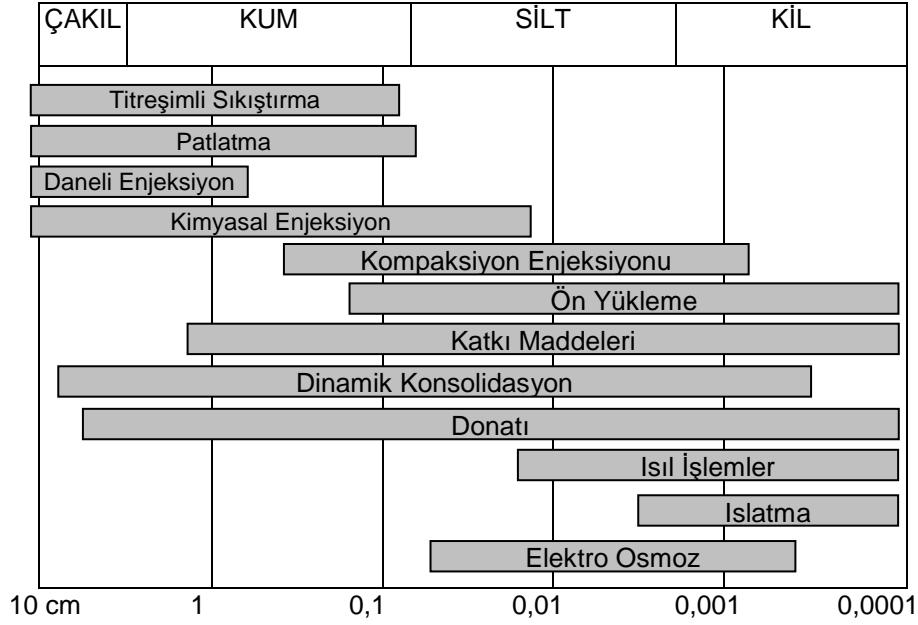
Isıl işlemlerle stabilizasyon yöntemleri:

- a) Dondurma yöntemleri
- b) Yüksek sıcaklıkta stabilizasyon

Kimyasal stabilizasyon yöntemleri:

- a) Enjeksiyon teknikleri
 - 1) Daneli enjeksiyonu
 - 2) Kimyasal karışım enjeksiyonu
 - 3) Jet enjeksiyonu
- b) Katkı maddeleri ile stabilizasyon
 - 1) İnorganik stabilizasyon
 - a) Çimento
 - b) Kireç
 - c) Bitüm
 - d) Uçucu kül
 - e) Alçı
 - 2) Organik stabilizasyon
 - a) Organik polimerler
 - b) Biyolojik yöntemler

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi dane çapı ile stabilizasyon arasında önemli bir ilişki vardır. Çakıl ve kumlar için geçerli teknikler, ince daneli zeminlerde beklenen başarıyı sağlamamaktadır. Bunun en önemli nedeni olarak killerde yüzeysel kuvvetlerin etkin ve permeabilitenin düşük olması gösterilmektedir [2].



Şekil 3.1. Stabilizasyon yöntemlerinin uygulanabilirliği

Stabilizasyon yönteminin seçiminde zemin dane çapı çok önemli bir göstergedir. Ayrıca mekanik ve/veya kimyasal etkilerin de göz önünde tutulması önemlidir.

Her iyileştirme yöntemi zeminin farklı bir parametresini daha iyi hale getirmek için uygulanmaktadır. Zeminin hangi özellikleri değiştirilecek ya da iyileştirilecekse uygulanacak yöntem buna göre seçilmelidir. İyileştirme yöntemlerinin zemin cinsi ve özellikleri ile ilgili olduğu göz önünde tutulmalıdır. Ayrıca iyileştirme metotlarının uygunluğu önceden araştırılmalıdır. Zemin cinsine ve yapılacak yapının zeminde meydana getireceği gerilme artışlarına göre uygun metodun seçimi ekonomi ve zaman açısından önem taşımaktadır [2].

Tablo 3.1. Zemin iyileştirme teknikleri ve kullanılma amaçları

UYGULANAN YÖNTEM	ZEMİN TÜRÜ		ZEMİN İYİLEŞTİRME AMACI				
	Daneli	Kohezyonlu	Taşıma Gücü	Oturma Kontrolü	Stabilite	Çevresel Sebepler	Sıvılaşma
Vibrokompaksiyon	X		X	X			X
Kum Sık. Kazıkları	X		X	X			X
Komp. Kazıkları	X		X	X			X
Dinamik Komp.	X		X	X		X	X
Patlatma	X		X				X
Ön Yükleme		X	X	X			
Düşey drenler		X	X	X			
Isıtma		X		X			
Soğutma	X	X				X	
Geosentetikler		X	X	X			
Mini Kazıklar	X	X	X	X			
Fore Kazıklar	X	X	X		X		
Zemin Çivileri	X	X			X		
Donatılı Zemin	X					X	
Derin Karıştırma	X	X	X	X	X	X	X
Taş Kolonlar		X	X	X	X		X
Permeasyon Enj.	X		X	X	X	X	
Çatlatma Enj.		X	X	X		X	
Komp. Enj.	X	X	X	X			X
Jet Enj.	X	X	X	X	X	X	X

Tablo 3.1’de değişik zemin türleri için uygulanabilecek zemin iyileştirme yöntemleri ve bu zeminin ne sebepten dolayı iyileştirmeye ihtiyaç duyduğunu anlatan bir tablo gösterilmiştir.

3.1. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon iki veya daha fazla farklı zeminin uygun oranlarda karıştırılarak istenilen şartları sağlayan bir zemin haline dönüştürülmesidir. Yoğunlaştırma veya mekanik stabilizasyon anlamına gelen kompaksiyon ile yük altında kalıcı deformasyon yapmayan stabil bir zemin elde edilmiş olur. Zeminin karıştırılması yolda, sabit veya hareketli bir plentte veya malzeme ocağında yapılır

ve karışım yola serilerek standart yöntemlerle sıkıştırılır. Mekanik stabilizasyondan amaç granülometrinin düzeltilmesi, Likit limit (W_L) veya Plastisite indeksinin (I_P) azaltılması, dren kabiliyetinin artırılması, mukavemet ve durabilitenin artırılması, uzun dönemli oturmaların ve don duyarlılığının azaltılması, kapileritenin azaltılması, değişen su içeriği ile taşıma gücünün azalmasının önlenmesi ve uzun dönemli durabilitenin artırılması olarak sayılabilir. Aslında mekanik stabilizasyon ince daneli zeminlere belli oranda granüler malzeme (agrega) katarak zeminin özelliklerini ıslah etmektir. Bu nedenle mekanik stabilizasyon granüler stabilizasyon olarak ta adlandırılabilir. Zeminin kaba kısmının miktarı ile gradasyonu ve ince kısmının plastisitesi düzenlenmektedir. Zemindeki maksimum dane boyutunun çok büyük olması veya ince malzemenin fazla olması durumunda karışım hazırlıklarında zorluklar yaşanır. Zeminde kil miktarının fazla olması halinde danelerin birbirine tutunması ve plastisite artmaktadır. İnce içeriği fazla zemine bir başka zemin veya düşük plastiseli bir granüler malzeme karıştırarak uygun zeminler elde edilebilmesi için karışımın homojen olması esastır. Plastisitesi yüksek zeminlerin kuru iken ufalanmalarının zor olması nedeniyle başka zeminle karıştırılması sıkıntı yaratmaktadır. Bu sebeple yolda zeminlerin karıştırılmasında özel araçlar (Disk Tırmık, Disk Pulluk, Pulverizer vb.) ile zemin toprakları ezilerek parçalanmalıdır. Zemin karıştırmada karışım miktarları için belli bir prosedür ve/veya bir yöntem geliştirilmemiştir. Değişik tip zeminlerin değişik oranlarda deneme karışımları yapılmalı ve laboratuvar deneyleri ile özellikleri inceleyerek karar verilmelidir. Kilin yarısından fazlasını oluşturduğu zeminlerin mühendislik özelliklerini (taşıma gücü, serbest basınç dayanımı, geçirgenlik vb.) iyileştirmek için mekanik stabilizasyon amacıyla kum-çakıl gibi tabii, kırma taş gibi üretilen ve üretim artığı granüler malzemeler de tespit edilen oranda karıştırılarak ıslah edilmektedir. Elde edilen karışımın dane çapı dağılımı ile ince kısmının plastiklik özellikleri mekanik stabilizasyonun başarısında en etkin rol oynamaktadır. Bilindiği gibi dane çapı dağılımı zeminin yoğunluğu, permabilitesi, stabilitesi, su tutma yeteneği, vb. üzerinde etkin bir rol oynar. Granülometri eğrisinin sürekli olması halinde en yoğun zemin elde edilebilmekte ve segragasyon (ayrışma) azalmakta, işlenebilirlik artmaktadır [20].

İstenilen gradasyonu elde etmek için iki veya daha fazla zemini karıştırmak gerekir. Karıştırılan zeminlerin oranlarını saptamak için

- a) Deneme- yanılma yöntemi
- b) Grafik yöntemi
- c) Denklem çözüm yöntemi

kullanılabilir. Bu yöntemler beton veya yol üstyapı malzemelerinde kullanılan agregaların gradasyon ayarlamaları (yani hangi agrega gruplarından hangi oranlarda karıştırılacağı) için kullanılan yöntemler ile aynıdır. Mekanik stabilizasyon ile ıslah edilen zeminlerin kaba kısmı hacimsel stabilite ve sürtünme açısından sorumlu iken ince kısmı ise karışımın kohezyonundan yani kaba daneleri birbirine bağlayıcı olmasından sorumludur. Bilindiği gibi zeminlerin kayma mukavemeti $\tau=c+\sigma \tan\phi$ ile belirlenir. Burada kohezyon (c) tamamen ince malzemenin özelliğine bağlıdır. Bağlayıcı olan ince kısım kaba danelerin etrafını sararak ve/veya bu daneler arasında köprü görevi görerek zeminin kaba kısmının (yani granüler malzemenin) rijitliğini ve stabilitesini sağlamaktadır. Ancak ince kısım sahip olduğu kohezyon ile bir miktar mukavemet artışına neden olması bir avantaj sağlarken plastiklik özelliği ile de olumsuz etkilerinin olmaması gerekir. Dolayısıyla stabilite için karışımın IP değeri düşük olmalıdır. Çünkü zeminin ince kısmı granüler daneler arasındaki boşlukları doldurduğu gibi granüler daneler arasında bir bağ görevi görerek karışımı mukavemet artışı ile stabilize etmektedir. Ancak zeminin kuruması halinde büzülme ve ıslak halde ise şişme (kabarma), aşırı su içeriğinde taşıma gücünde azalmalar, zeminin su tutma (emme) potansiyelinin artması, vb. olumsuz etkiler meydana geliyorsa ince kısmının I_p değeri sınırlandırılmalıdır. Bu nedenle mekanik stabilizasyon yapılan zeminlerin No. 200'den geçen kısımları % 15'den fazla olmamalıdır. Ayrıca I_p ve W_L değerleri şartnamelerle kısıtlanmıştır. Örneğin Karayolu Teknik Şartnamesinde (KTŞ) dolgularda kullanılacak dolgu malzemesinin $W_L < 60$ ve $I_p < 35$ olma şartı getirilmiştir [2].

3.2. Kimyasal Stabilizasyon Yöntemleri

Zeminin olumsuz etkilerini gidermek yada zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla zemine puzolanik vb. özelliğe sahip maddeler katarak kimyasal reaksiyon sonucu oluşan zemin ıslahına kimyasal stabilizasyon denir. Yaygın olarak kullanılan kimyasal stabilizasyon maddeleri portland çimentosu, kireç, asfalt, kalsiyum klorür, sodyum klorür ve selüloz atıklarıdır. Çimento, kireç, uçucu kül gibi malzemeler, daneler arasındaki bağı kuvvetlendirmek ve aralarındaki boşlukları doldurmak suretiyle zemini iyileştirmektedir. Bu malzemeler zemine enjekte edilebilir veya zeminle karıştırılabilir. Enjeksiyon teknikleri, zeminin dane yapısının sağlam kalmasına yardımcı olmak amacıyla kimyasal maddelerin zeminin boşluklarına veya zemindeki çatlaklara enjekte edilmesini kapsamaktadır. Burada amaç değişik viskoziteli şerbetlerin zeminin mevcut çatlaklarına enjekte edilmesini sağlamaktır [2].

Katkı malzemeleriyle stabilizasyonda, katkı malzemesi zemine ilave edilmekte ve zeminin partikül yapısı değiştirilmektedir. Karıştırma işlemi ya mekanik olarak (zeminle birlikte karıştırma şeklinde) veya hidrolik olarak (jet enjeksiyonu şeklinde) yapılmaktadır. Katkı maddeleriyle ve jet enjeksiyon yöntemlerinin ikisinde de üniform bir zemin-katkı karışımı oluşturulmaktadır. Kolonları örtüştürmek suretiyle yeraltında duvarlar veya diyaframlar inşa edilebilmektedir [20].

Kimyasal stabilizasyon işleminde kimyasal maddeler zeminle karıştırılır veya zemin içine enjekte edilir. Toprak barajlar ve karayolu dolguları toprak yapılarda zeminin mühendislik malzemesi olarak kullanılır. Yapının kendisinin zeminden oluşması halinde kompaksiyon ve stabilizasyon çok önemlidir. Zeminlerin dolgu inşasında gelişigüzel yığılması halinde dolgu stabilitesi çok düşük; oturmalar da büyük olacaktır. 1930'lara kadar kara ve demiryolu dolguları damperli kamyon veya vagonlardan boşaltma şeklinde inşa ediliyordu. Bu dolguları sıkıştırma (kompaksiyon) veya yoğunluğunu arttırmada çok az enerji kullanıldığı için kalın olmayan dolgulara bile yenilmeler meydana gelmekteydi. Gölet seddesi gibi toprak yapıların tarihçesi insanlık kadar eskidir. Bu yapılar antik Çin veya Hindistan'da sırtında sepetle toprak taşıyan insanlar tarafından inşa edilmiştir. Boşaltılan toprak

malzemesi üzerinde işçilerin yürüme sırasında sedde malzemesi sıkışmış ve dayanımı artmıştır. Zeminlerin sıkıştırılmasında bazı ülkelerde filler bile kullanılmışsa da sonucun o kadar da iyi olmadığı gözlenmiştir [17].

Katkılarla kimyasal stabilizasyonda en yaygın çalışılan malzeme kireç, çimento ve uçucu küldür. Kireç; orta, ince ve çok ince daneli zeminlerle reaksiyona girerek plastisitenin düşmesine, işlenebilirliğin artmasına, şişmenin azalmasına ve mukavemetin artmasına neden olmaktadır. Zemin sınıfı CH, CL, MH, ML, ML-CL, SC, SM-SC, SM, GC, GM-GC, GM olan ve silt, kil içeren ince gradasyonlu zeminler kireçle stabilize edilerek ıslah edilmeleri mümkündür. Yani kireç stabilizasyonu genel olarak killi zeminlere uygulanan bir metottür. Çimento; genel olarak I_p değeri 30'dan az olan zeminler ile No. 4 elekten (4.75 mm) geçen kısmı % 45 den fazla olan kaba gradasyonlu granüler zeminlerde etkili bir stabilizör olarak kullanılır. Uçucu kül ve kireç; I_p değeri 25'den fazla olmayan kaba veya orta boyutlu danelere sahip zeminlerde etkili bir stabilizör görevi üstlenmektedir. Uçucu kül; kaba gradasyonlu zeminlere (GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, SC veya bunların karışımı) etkin bir stabilizör olarak katılır ve işlevi yüksek bir malzemedir. Ayrıca kireç-çimento, kireç-asfalt ve kireç-çimento-uçucu kül kombinasyonları da stabilizör olarak kullanılmaktadır. Zemine katılan kireç işlenebilirliği artırırken plastisiteyi düşürür. Daha sonra katılan çimento ise zeminin mukavemetini hızla artırır [2].

3.3. Enjeksiyon Teknikleri

Bu gurubun en çok uygulanan yöntemleri Daneli, Kimyasal karışım ve Jet enjeksiyonudur. Daneli enjeksiyon, zemin yapısını bozmayacak şekilde düşük viskoziteli bir şerbetin zemine verilmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu işlemde, daneli şerbetler (çimento, uçucu kül, bentonit, mikro-çimento gibi) veya kimyasal enjeksiyon maddeleri (silikat, lignin jöleleri, fenolik ve akrilik reçineler gibi) kullanılmaktadır. Daneli enjeksiyonda zemin dane çapı çok önemlidir. Çakıl ve kum gibi iri gözenekli zeminlerde, viskoz çimento şerbetleri de dahil olmak üzere hemen her çeşit enjeksiyon maddesi kullanılabilir. Kimyasal enjeksiyon maddelerinin viskozitesi daneli şerbetlere göre daha düşüktür. Ancak mikro-çimentolu şerbetlerin viskozitesi, kimyasal enjeksiyon maddelerinin viskozitesi kadar düşük olabilir. Bu

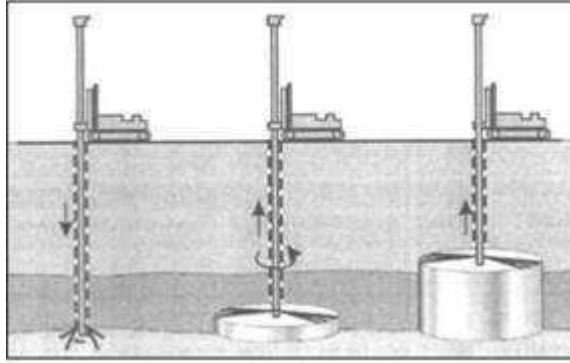
nedence ince kumlarda kullanımı daha uygundur. Zeminde kil, silt, gibi ince daneli malzemenin varlığı dane enjeksiyonunu etkilemekte ve tesiri önemli ölçüde azalmaktadır [20].

Daneli enjeksiyon, iki ana mekanizma ile zemin iyileştirmesi sağlamaktadır. Birincisi, şerbetin münferit zemin taneleri arasındaki teması güçlendirme eğiliminde olması ve bu şekilde enjeksiyon yapılmayan zemine göre iskelet yapısı daha kuvvetli ve daha rijit olan bir zemin oluşturulmasıdır. Diğeri de, enjeksiyon maddesinin zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurması ve bu şekilde tekrarlı yükleme sırasında oluşacak sıkışma veya aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu azaltılmaktadır. Daneli enjeksiyon ile iyileştirilen zeminlerin kayma dayanımı 345 ile 2070 kPa arasında değişmektedir [12].

Kimyasal karışım enjeksiyonu işleminde sıvı enjeksiyon maddesi zeminde çatlak oluşturacak basınç altında kontrollü şekilde zemine uygulanır. Burada amaç, enjeksiyon maddesinin zemin partikülleri arasındaki küçük boşluklarda akmasını sağlamak olmadığından, nispeten viskoz (ve kuvvetli) çimento şerbetleri kullanılabilir. Teorik olarak ilk çatlakların küçük asal gerilme düzlemlerine paralel olması beklenir. Fakat, gözlemler bunların daha çok zayıf tabakalanma düzlemlerini takip ettiğini göstermektedir. İyileştirme için ilk şerbetin verilmesinden sonra, tekrarlanan kimyasal karışım enjeksiyonu, zemini değişik düzlemler boyunca çatlattırır. Sonuçta, birbirini kesen enjeksiyon mercceklerinden oluşan üç boyutlu bir ağ ortaya çıkar. Zeminde bir miktar sıkışma meydana gelmektedir. Ancak iyileştirmenin ana mekanizmasına uygun olan rijitlik ve mukavemet artışı sağlanmasıdır. Bu da zemin kütleğinde enjeksiyon maddesinin katılmış mercceklerinden ileri gelmektedir [2].

Şekil 3.2'de görülen Jet enjeksiyonunda zemin, önceden açılmış bir sondaj kuyusunda, yüksek basınç altında yatay olarak enjekte edilen çimento şerbeti ile karıştırılır. Şerbetin değişik yönlerde yerleştirilmesi için enjeksiyon deliği (nozzle) döndürülür. Karıştırma işlemine yardımcı olması bakımından sadece hava veya hava ile su enjekte edilebilir. Jet enjeksiyonu kuyunun tabanında başlar ve geride nispeten üniform bir zemin-çimento karışımı bırakarak yukarı doğru yavaş yavaş çekilerek

zemin içinde kolonlar oluşturulur. Jet enjeksiyonu her türlü inorganik zemine ve istenen derinlikte uygulanabilmektedir [16].



Şekil 3.2. Jet enjeksiyonu işlemi

3.4. Katkı Maddeleri ile Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon gurubuna da giren katkı malzemeleri ile stabilizasyon yönteminde kireç, çimento, bitüm ve uçucu kül gibi ortama eklenen inorganik veya organik maddeler ile yapılmaktadır. Bu yöntemle zemin içerisinde mikro ve makro daneler arasındaki bağlar oluşturmak ve kuvvetlendirmek yolu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi esasına dayanmaktadır. Günümüzde biyolojik yöntemlerle de zemin iyileştirilebilmektedir [2].

Elektrik santrallerinin yan ürünü olan uçucu kül başarılı bir dolgu malzemesi ve kireçle zemin stabilizasyonunda puzolanik reaksiyonu hızlandıran bir katkı malzemesidir. Geçmişte sayılı termik santral bulunması ve taşıma maliyetinin yüksekliği nedeniyle uçucu kül kullanımı tercih edilmiyordu. Günümüzde maliyetlerin azalması ve ülke genelinde termik santrallerin yayılması ile bu kullanım sahası genişlemektedir. Tablo 2.8’de İnorganik ve organik katkı malzemelerinin üstünlük ve sakıncaları gösterilmektedir [2].

Özellikle ince daneli (kil-silt) zeminlerde kireç gibi bir katkının stabilizasyonda olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Kireç, genel olarak zeminin plastisitesini azaltmakta, ortamın pH değerini yükselmekte (bazik hale çevirir) ve oluşan puzolanik reaksiyon sonucu bir çeşit çimentolaşma ile dayanım artmasına yol

açmaktadır. Bu malzemeler dane aralarındaki boşlukları doldurur ve bağı kuvvetlendirmek suretiyle zemini iyileştirmektedir [12].

Tablo 3.2. İnorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması

Metot	Üstünlük ve Sakıncaları
İnorganik Esaslı (kireç, çimento, uçucu kül, kil vs.)	Malzemeler kolayca temin edilebildiğinden uygulama alanı oldukça geniştir.
	Maliyeti düşüktür.
	İlave edilen malzemeler kimyasal olarak zehirli değildir.
	Stabilizasyon işlemleri kolaydır ve çok özel aletler ve malzemeler gerekmez.
	Hem fiziksel, hem kimyasal olarak uzun süreli stabilitesi çok iyidir.
	Ultraviyole ve radyasyon tehlikeleri yoktur.
	Stabilize edilmiş malzemenin permeabilitesi düşer, mukavemeti artar.
	İyi bir mekanik ve yapısal karakteristik gösterir.
Organik Esaslı (organik polimerler, biyolojik yöntemler vs.)	15 yıldır yapılan işlemlerde başarı sağlanmış ve iyi bir bilgi birikimi elde edilmiştir.
	Yüksek bir fiyatı vardır.
	Çok düşük bir Permeabilite elde edilir.
	Birçok atık için uygulanabilir.
	Ultraviyole ışınlarının önlemede tam başarılı sayılmaz.
	Mikroorganizmalar için elverişli değildir.
	Uzun süreli stabilite sağlayamaz.
	İnorganik sistemlere göre uygulanması çok zor ve özel aletler gerekir.
Bazı sistem bileşenleri için tehlikelidir.	

3.4.1. Kireç ile stabilizasyon

İnce daneli zeminlerde kireç karıştırılması, zeminin plastisitesinin azalmasına, ayrıca kil mineralleri ile kireç arasında ortaya çıkan puzolanik reaksiyon sonucu meydana gelen bir çeşit çimentolanma nedeni ile zeminin mukavemetinin artmasına yol açmaktadır. Söz konusu kimyasal reaksiyonlar çevre koşullarının etkisi (nemlilik ve ısı gibi) altında zamana bağlı olarak geliştiği için zeminin mukavemeti de zamanla artmaktadır. Kireç ile stabilizasyon yöntemi özellikle karayolları ve hava meydanları alt yapıları için uzun zamandır başarı ile uygulanmaktadır. Toprak dolgular, kayan şevler, köprü ve istinat duvarları arka dolguları ve temel altı zemin iyileştirmesi için de yaygın olarak kullanılır. Bu uygulamanın başarı derecesini belirleyen etkenlerin en önemlileri; zeminin mineralojik yapısı, ortamın ısı ve nemlilik derecesi, ilave edilecek bağlayıcı malzemenin tipi ve miktarı, uygulama yöntemi, katkı malzemesi

tip ve oranları, kür süreleri ve ekonomik kaygılar olarak sıralanabilir. Ayrıca katkıli zemin üzerinde yük ve zaman etkisi, zeminde meydana gelebilecek iyileşmenin yönü ve miktarını belirleyecektir. Belirli bir zemin cinsinde meydana gelecek iyileşmenin hangi parametrelerde ve hangi miktarlarda olacağını tayin edilmesi önemlidir [5].

Genel olarak, kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, kabarma potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve dayanıklılığın artmasını sağlamaktadır. Ayrıca, plastisitenin azalmasına yol açtığı için arazi çalışma koşullarının iyileşmesi sonucunu doğurmaktadır [5].

Kireç stabilizasyonunda; zemine kuru ağırlığının %5-10'u oranında kireç katılır. Kireç stabilizasyonu daha yaygın olarak kohezyonlu zeminlerde kullanılır ve daneler arasında bağlar oluşturur, zeminin plastisitesi indisini azaltır. Katılacak kireç miktarı, serbest basınç deneyi ile belirlenir [6].

Zeminlere uygulanacak kireç stabilizasyonu ile yollar düşük maliyetler ile kolayca ve hızlı bir şekilde yapılabilir. Uygulamada basit tarım aletlerinden faydalanılabilmesi ağır iş makinelerinin temin edilemeyeceği yerlerde de çalışmaların yapılabilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.3'de iş makineleri ile yola kireç serilmesi aşaması görülmektedir. Bu aşamadan sonra zemine su ilavesi yapılarak kireç ile suyun hidratasyona girmesi beklenir.

Kireç stabilizasyonu ile yapılan uygulamada killi malzemenin kimyasal yapısı bozulmakta ve malzeme tekrar eski haline gelememektedir. Kilin su tutma özelliği ve şişme özelliğini kaybetmesi ve tekrar su ile temas ettiğinde kil davranışı göstermemesi kireç stabilizasyonuna büyük avantaj sağlamaktadır [6].



Şekil 3.3. Kirecin Yola Serilmesi

Bir çok firma altyapı ve yol inşaatlarında killi zemin ile karşılaştığında zemini sağlamlaştırmak için belirli aralıklarla yola agrega sermekte ancak kısa süre içerisinde agrega zemine batmakta ve kil tekrar kapilarite etkisi ile yolun yüzeyine çıkmaktadır. Defalarca agrega serilmesine rağmen çözüm bulunamamakta ve yolda yaşanan olumsuzluklar devam etmektedir. Birçok defa agreganın yola serilme maliyeti ise (agrega maliyeti, iş makineleri kirası, akaryakıt gideri...) zemin iyileştirmesinde kullanılan kireç maliyetinin çok üzerinde oluşmaktadır. Kireç ile killi zemin üstünde yapılan iyileştirme ile sağlam tabaka elde edilmekte ve alt tabakada bulunan zayıf killi malzeme yolun üstüne tekrar çıkamamaktadır [7].

Dolgu tabakalarında ve alt temel malzemesi olarak kullanılması planlanan zeminlerin yüksek miktarda kil içermeleri nedeni ile kullanılmadığı durumlarda şartnamelere göre dolgu ya da alttemel malzemesi olarak kullanılma sınırının çok az altında kaldığı için (likit limit, plastik limit ve yoğunluk değerlerinden kaynaklı) kullanılmayan malzemelerde düşük kireç ilaveleri ile zemin kullanılabilir dolgumalzemesi haline dönüştürülebilmektedir [6].

Bu tip zeminlerde klasik yöntem uygulandığı zaman zayıf zeminin kaldırılması (iş makinesi kirası, akaryakıt gideri, işçi gideri), başka bir bölgeye nakliyesi (nakliye ücreti, boşaltma, depolama giderleri), ariyet ocağından malzeme alınması (iş makinesi kirası, akaryakıt gideri, işçi gideri), nakliyesi (nakliye ücreti, boşaltma

giderleri), serilmesi (iş makinesi kirası, akaryakıt gideri, işçi gideri) işlemler yüksek maliyetlere neden olduğu gibi iş bitim tarihlerini de geciktirmektedir. Kireç stabilizasyonu uygulamasının kış aylarında da (yağmurlu ve malzemenin optimum su muhtevasının yüksek olduğu durumlarda) yapılabilmesi büyük avantaj sağlamaktadır [7].

Kireç ile iyileştirme uygulaması ile klasik yöntemle göre %40'lara varan ekonomi sağlanabilmektedir.

Kireç stabilizasyonu uygulaması için gerekli kireç miktarı zemindeki malzemenin kil oranına göre değişmekle beraber 1 ton malzemenin kireç ile iyileştirilmesi için yaklaşık 18-30 kg kireç yeterli olmaktadır. Uygulama kış şartlarında da yapılabilmektedir. Uygulama sonrası malzemenin taşıma gücü yükselmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü ile Ankara Bala ayrımı – Kulu ayrımı bölünmüş yolunda yapılan çalışmalarda kuru CBR değerlerinde 8 kat, yaş CBR değerlerinde 34 kata varan artışlar gözlemlenmiştir. Kalıcı deformasyon değerleri yaklaşık 8 kat azalma göstermiştir [7].

Kireç katkısı yapılmış zeminin sıkıştırma aşamaları ağır iş makineleri ile yapılmaktadır. Aşağıdaki şekilde kireç katkılı bir zeminin sıkıştırma işlemine tabi tutulduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Greyder İle Zeminin Düzlenmesi Aşaması

3.4.2. Uçucu kül ile stabilizasyon

Üretim yan ürünü olarak ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 13 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Türkiye’de çimento üretiminin 25 milyon ton civarında olduğu göz önüne alındığında, uçucu külün depolanması, saklanması veya atılmasının çevreye ve kamuya verdiği zararların önemi ortaya çıkmaktadır. Uçucu küller; kimyasal ve fiziksel özelliklerinin verdiği imkânlar nedeni ile çeşitli dünya ülkelerinde sanayide, teknikte ve inşaat endüstrisinde kullanılmaktadır. Uçucu küllerin bu şekilde kullanımı, endüstride daha ekonomik uygulamalara ulaşılması imkânı verecektir. Uçucu küllerin Türkiye’de yıllık tüketimi ise üretimin %1’inden daha az seviyededir. Termik santrallerde enerji üretmek için yakıt olarak kullanılan kömürden, değişik özelliklerde kül ve cüruf, katı atık yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. İleri teknolojiye sahip olan santrallerde, pulverize durumda yakılan kömürden arta kalan % 12-% 15 kadar külün büyük bir kısmını çok ince taneli kül oluşturur. Baca gazları ile birlikte çekilen ve filtrelerde tutulan çok ince taneli kül, uçucu nitelikli olduğundan "uçucu kül" olarak anılır [11].

Çalışmada kullanılan uçucu külün alındığı Kütahya Seyitömer termik santrali Şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.5. Seyitömer Uçucu Kül Termik Santrali

3.4.3. Mermer tozu ile stabilizasyon

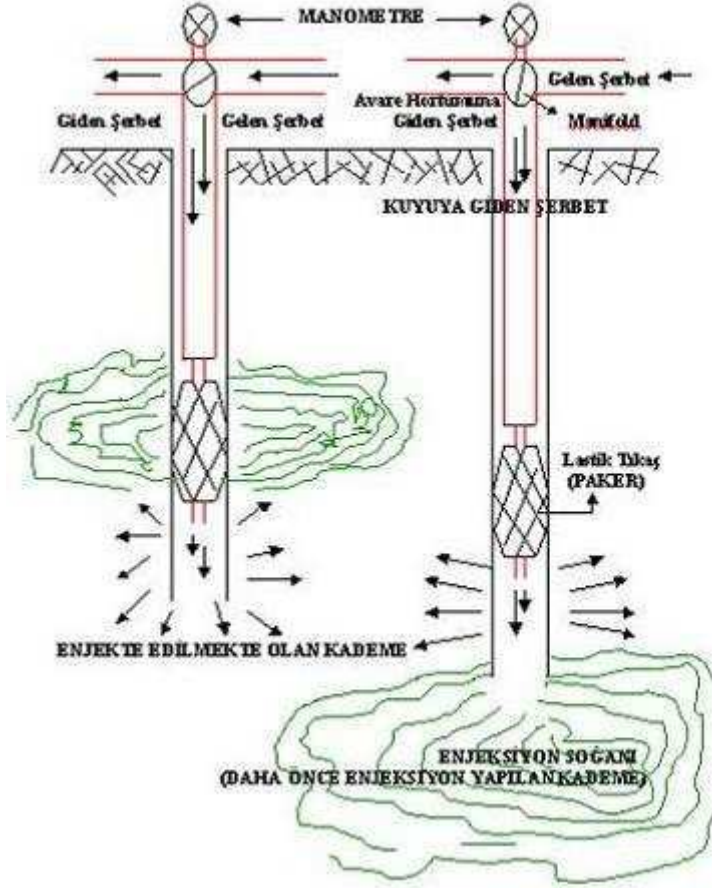
Yol inşaatı ve zemin iyileştirmesinde mermer toz atıklarının çamur halinde büyük hacimde kullanılabilceği bir alandır. Bu alandaki kullanım, diğler alanlardakine oranla çok daha fazla olacaktır. Bu durum yol ve zemin inşaatındaki uygulanabilirliğı üzerine araştırmaların yoğunlaşmasına neden olmaktadır.

Yol inşaatında değerlendirilebilirliğı ile ilgili farklı çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan biri; kırmızı çöl kumlarının stabilizasyonunda kullanılmış ve verimi artırdığı gözlemlenmiştir. Genellikle kullanılabilirliğini test etmek için Atterberg limit, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), basınç, Proctor gibi testler uygulanmıştır. Bir diğler uygulamada ise; kaplama tabakası için asfalt içerisine mermer toz atıklarının filler malzemesi olarak karıştırılmış ve Őehir içi yollarda kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir [2].

3.5. Enjeksiyon

En eski ve en çok kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerindendir. Daha çok taneli zeminlerde uygulanır. Kimyasal veya bentonit-çimento enjeksiyonu olarak genellikle örtü enjeksiyonu Şeklinde uygulanır. İyi tasarım ve sıkı kontrollü uygulama ile zemin iyileştirmesi başarılıdır. Geçirimsizlik içinde çok yararlanılan bu uygulama, insan gücü katılımının en fazla olduğu yorucu fakat ekonomik bir zemin iyileştirme yöntemidir. Projede belirlenen yere, teknik bilgiler vasıtasıyla hazırlanan enjeksiyon karışımı basılır. Bunun için; ilk olarak delici makine ile açılan kuyu içine bırakılan tij+matkap ucundan zemine enjeksiyon karışımı basılır. Projeye göre tatbik noktası üzerinde kuyuya packer yerleştirilerek, enjeksiyon karışımının zemine girmesi sağlanır. Zemin enjeksiyon karışımına doyunca, packer daha yukarı alınarak enjeksiyon karışımının daha üst seviyelere verilmesi sağlanabilir. Su/çimento oranı 3/1 gibi ince karışım olarak başlanabilir, sonra 1/1 ve 1/3 gibi kaba karışıma gerekirse kum ilave edilerek, zeminin dolmasına gayret edilir. Bahsedilen tek kademeli packerli aşağıdan yukarıya metodunun yanı sıra çift packerli uygulama da yapılabilir. Yukarıdan aşağıya kademeli yöntemle zemini iyileştirerek daha derinlere inmek mümkündür. Zeminin doymasına enjeksiyon refüsü denir ve karışım geri

dönerek, enjeksiyon istasyonuna alınır. İnce karışım ile başlayarak kaba karışıma geçmek, refüden sonra da ince karışım tatbiki ile enjeksiyonu tamamlamak tercih edilir. Şekil.3.6'da enjeksiyon uygulama aşamaları verilmiştir [6].



Şekil 3.6. Enjeksiyon Uygulama Aşamaları

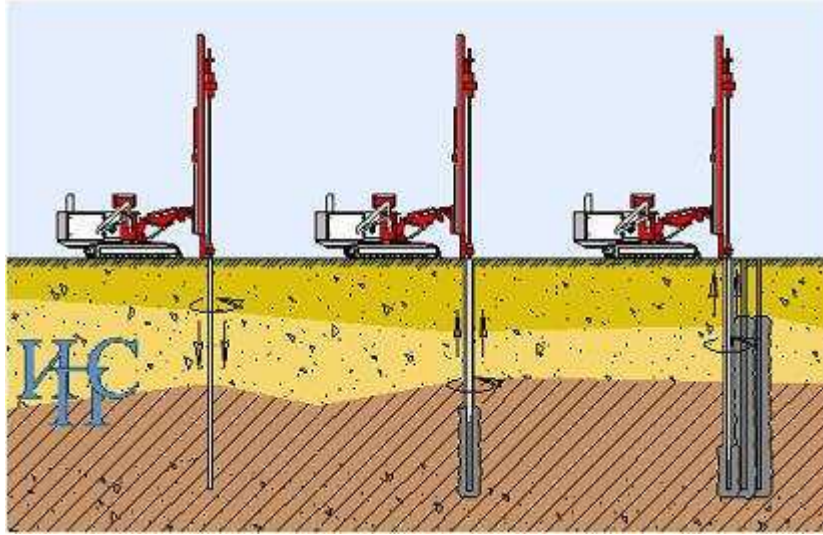
3.6. Jet Grouting

Killi zeminde konsolidasyon, siltli-kumlu-çakıllı zeminlerde iyileştirme sağlayan 300-500 bar gibi yüksek basınçlı çimento enjeksiyonunun zemine tatbiki ile jet grouting kolonu oluşturulabilir. Jet grouting işlemi iki safhadan oluşmaktadır:

a) Delme işlemi; \varnothing 10 cm kalınlığındaki delici ekipmanı makine gücü ve basınçlı su yardımı ile emine-proje kotuna kadar sokmaktır. Bunun için döner delgi sistemi ile kil matkabı, üç konili matkaplar ve dayanıklı tijler kullanılmaktadır.

b) Enjeksiyon Uygulaması; Delgi tamamlandığında 1/1 'lik karışımdan oluşan çimento şerbeti oldukça yüksek basınç (300-500 bar) ile zemine verilirken, delici

takımın zaman ayarlayıcı (timer) yardımı ile dönerek yukarıya doğru çekilmesinden ibarettir. Böylece yüksek hızlı enjeksiyon karışımı zemini yırtarak, dairesel bir kolonun zeminde oluşmasını sağlar. Çimento ve zeminin karışmasından oluşan soilcrete olarak adlandırılan nispeten yüksek dayanımlı bu kolon, aynı zamanda zeminin sıkıştırılarak konsolide olması da sağlar. Şekil 3.7’de jet grouting kolonu imalat aşamaları verilmiştir [6].



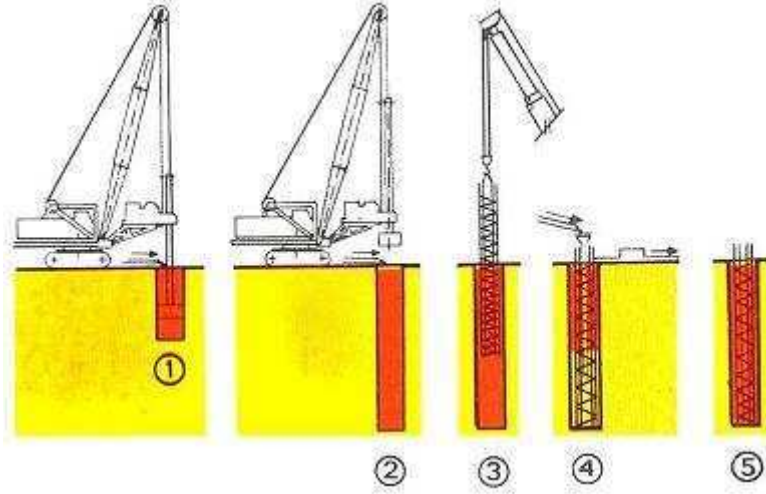
Şekil 3.7. Jet grouting kolonu imalatı aşamaları

3.7. Fore Kazık ve Mini Kazıklar

Forekazıklar, kendini tutabilen ve tutamayan zeminlerde, temelin sismik hareketlerden etkilenmesini önlemek için imal edilen geniş çaplı yerinde dökme kazıklardır. Deprem sırasında oluşacak temel hareketini azaltmanın en etkin yöntemlerinden biri olan ve derin temel olarak tanımlanan forekazıklar kolon şeklindeki donatılı beton elemanlarından oluşur. Forekazıklar; delgi teknikleri kullanılarak zeminde oluşturulan Ø65-150 cm çap aralığındaki deliğin içerisine donatı yerleştirilerek betonla doldurulması ile imal edilen kazıklardır. Şekil 2.16’da fore kazıklar, zeminde yanal ötelenme ve buna bağlı olarak komşu zeminde sıkışma yaratmayan kazıklardır [6].

Minikazıklar, Ø15-35 cm çaplarındaki küçük çaplı kazıklardır. Minikazık imalatında, genellikle forekazıklar gibi önce delme işlemi yapılır. Daha sonra deliğe donatı indirilir, deliğe kırma taş dökülür ve çimento enjeksiyonu yapılır. Böylece, kazık

yerinde imal edilmiş olur [6]. Şekil 3.8 Fore kazık kolon imalatının yapılış aşamalarını gösteren bir şekildir.



Şekil 3.8. Forekazık imalat aşamaları

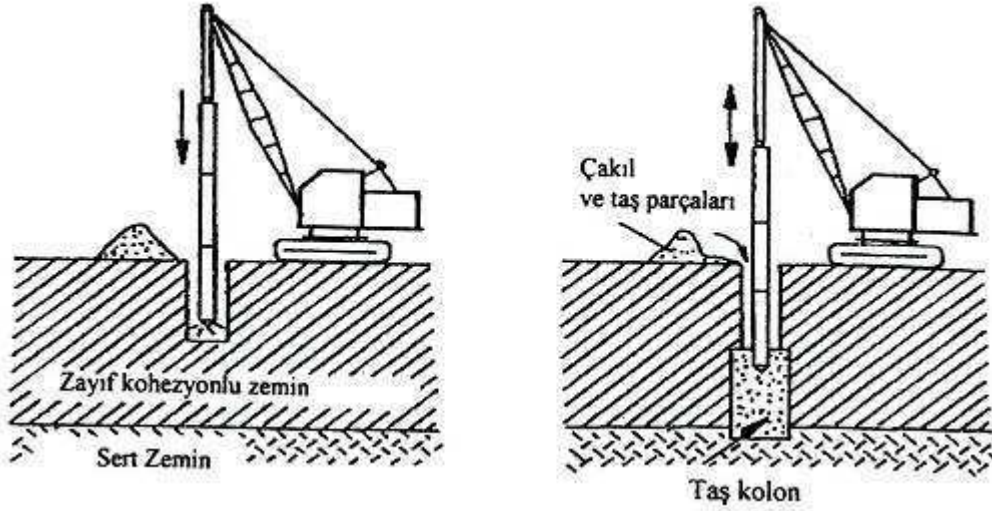
1. Bentonit bulamacı koruması altında delgi
2. Bentonit blamacı ile sıvanmış kazık kuyusunun bitirilmesi
3. Bentonit bulamaçlı kuyuya donatının indirilmesi
4. Bentonit bulamaçlı kuyuya beton dökülmesi, bulamacın kuyu dışarısına atılması
5. Bitmiş kazık

3.8. Taşkolonlar

Taşkolonlar, genellikle yumuşak ve orta yumuşak killi zeminlerde kullanılmaktadır. Bu yöntemin amacı, zemin üzerine gelen yükleri taşkolon ile zeminin ortaklaşa taşımasıdır. Taşkolonlar, hem taşıma gücüne hem de oturmanın azalmasına katkıda bulunurlar. Ayrıca, düşey dren gibi çalışıp oturma hızlarını artırırlar. Kohezyonu az, fakat ince taneli (killi-siltli) zeminlerde sıvılaşmaya karşı da önerilmektedir. Alüvyon ve değişken zeminlerde vibrokompaksiyon ile birlikte uygulanmaktadır. Taş malzeme, zemin içerisine dik olarak, 0,6-1,0. m çapında ve 20 metreye kadar derinliklere çeşitli yöntemlerle yerleştirilir ve sıkıştırılır. Genel olarak 20-75 mm arası kırma taş malzeme yaygın olarak kullanılmasına karşın, doğal kaba çakıl agrega veya kum-çakıl karışımları da kullanılmaktadır. Yumuşak killerde boru çakma ve doldurarak çekme yöntemi uygulanmaktadır. Diğer zeminlerde ise genel

olarak tonaj yöntemi uygulanmakta olup, kolonların ucunun sert zemine girmesi istenmektedir [6].

Şekil 3.9’da taş kolon imalatının uygulama safhaları görülmektedir.



Şekil 3.9. Taşkolon imalat işlemi

Bu bölümde zemin iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Zemin çeşitlerine göre hangi zemin iyileştirme yönteminin daha uygun olabileceği konusu üzerinde durulmuştur. Kireç, uçucu kül ve mermer tozu gibi atıklar ile yapılan iyileştirme çalışmaları sonucu zemindeki değişimlerin neler olabileceği konusuna da yer verilmiştir. Jet grout, fore kazık ve taşkolon gibi zeminin farklı özellikleri iyileştiren çalışmalar konusunda da bilgilere yer verilmiştir.

Zemin iyileştirme çalışmalarının hangi amaçlar sonucunda yapılması gerektiğine ve zeminlerde iyileştirme çalışması yapılırken KTŞ'nin değerlerine bağlı kalınması gerektiği konusuna değinilmiştir.

BÖLÜM 4. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE UYGULANAN METODLAR

Bu çalışmada kullanılan kaolen zemin numunesi Ankara Kalaçlar firmasından temin edilmiştir. Zemin numunesi alınan firmadan numunenin kimyasal analizi sonucu da alınmıştır. Bu malzemeye ek olarak kullanılacak malzemeler atık malzemeler olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer malzemeler ise kireç, Seyitömer uçucu kül ve polisaj (yapay granit atığı) dır. Kireç malzemesi Nuh Çimento firmasından temin edilmiş olup özgül ağırlık değeri laboratuvar deneyleri sonucu elde edilmiştir. Uçucu kül de Kütahya Seyitömer Bölgesinden alınan C sınıfı uçucu kül olup özgül ağırlık değeri yine çalışma esnasında tespit edilmiştir. Polisaj malzemesi ise Bilecik Akgün Seramik fabrikasından temin edilmiş olup bu atık malzemenin de kimyasal analizi Bilecik Matel firması tarafından yapılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak ise kireç kullanılmıştır. Kullanılacak katık atıklardan uçucu kül her yıl elde edilen atık miktarı giderek artan bir termik santral atığıdır. Kullanılan diğer atık malzeme ise son yıllarda piyasaya giren ve polisaj adı ile bilinen yapay granit atığıdır. Seramik fabrikalarında katı atık depolama alanlarında büyük hacimlerde bulunmaktadır.

4.1. Malzemelerin Kimyasal Özellikleri

Kaolenin kimyasal analizi, tane boyut dağılımı ve mineralojik bileşimi Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, Al_2O_3 oranının %37,63 olduğu, $2\mu m$ ’den küçük tane oranının ise %16,30 olduğu tespit edilmiştir [7].

Tablo 4.1’de çalışmada kullanılan zemin numunesinin kimyasal analiz sonucu Tablo 4.2’de ise kilin tane boyut dağılımı değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan kaolenin kimyasal analiz sonucu

Numune Adı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	KK
Kaolen Numunesi	45,65	37,63	0,73	0,3	0,27	0,62	2,4	0,13	11,91

Tablo 4.2. Kaolen kilinin tane boyu dağılımı

>20 μm	2 μm - 20 μm	<2 μm
6,23	77,47	16,30

Bir kaolende plastisite indisi ne kadar yüksekse o kadar plastik denilmektedir. Elde edilen likit limit değerleri ile plastik limitlerin birbirinden çıkarılması ile plastiklik indisi bulunmaktadır. Bu değer bize kaolenin plastik formdan akıcı hale geçtiği, yani kolayca çalışılabilir aralığın elde edildiği su miktarı %'sini verir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Na₂SO₄ ilavesi artırıldıkça kaolenin plastisite indisi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir [9].

Yaklaşık 100 birim katmanın üst üste istiflenmesiyle kaolinit partikülleri ve bu partiküllerinde gelişigüzel dağılarak bir araya gelmesiyle kaolinit minerali oluşur. Kaolinit mineralinin tüm özelliklerini gösteren en küçük kristale "birim hücre" adı verilir ve (OH)₈Al₄Si₄O₁₀ şeklinde gösterilir [10].

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO olup, diğerleri SO₃, MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir [12].

Uçucu külün mineralojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirt alçıtaşı, karbonatlar (Ca, Mg, Fe) ve proses koşullarına (kömür hazırlama ve yanma gibi) bağlıdır. Uçucu küllerin mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere camsı (kristalsız) ve kristal yapılu bileşenlerden oluşmaktadır [13].

Kütahya Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz verileri Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Seyitömer Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

Numune Adı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S+A+F	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
Seyitömer Uçucu kül	54,49	20,58	9,27	84,34	4,26	4,48	0,52	2,01	0,65	3,01

Katı atık olarak kullanılan yapay granit atığı polisaj malzemesinin kimyasal analizi Matel firması tarafından yapılmıştır. Tablo 4.4.'te polisaj malzemesinin kimyasal özellikleri verilmiştir.

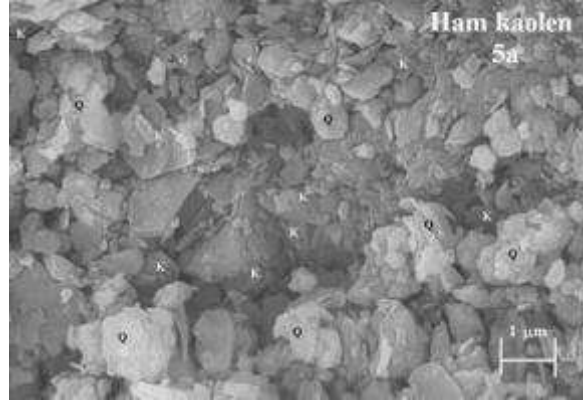
Tablo 4.4. Polisaj malzemesinin kimyasal analiz sonucu

Numune Adı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	SO ₃	K.K.	TOPLAM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Polisaj Malzemesi	64,454	20,571	0,548	0,598	1,973	2,699	5,132	0,996	0,016	0,133	2,880	100,000

Granit malzemeleri elmas uçlarla suyla birleşerek kesilirler ve su ile beraber granitin toz atıkları da çökeltme havuzlarında toplanırlar. Çökeltme havuzlarında bekletilen atık malzemeler bu aşamadan sonra filtreleme yöntemi ile sudan arındırılarak katı atık toplama sahalarına alınırlar ve burada tutulurlar.

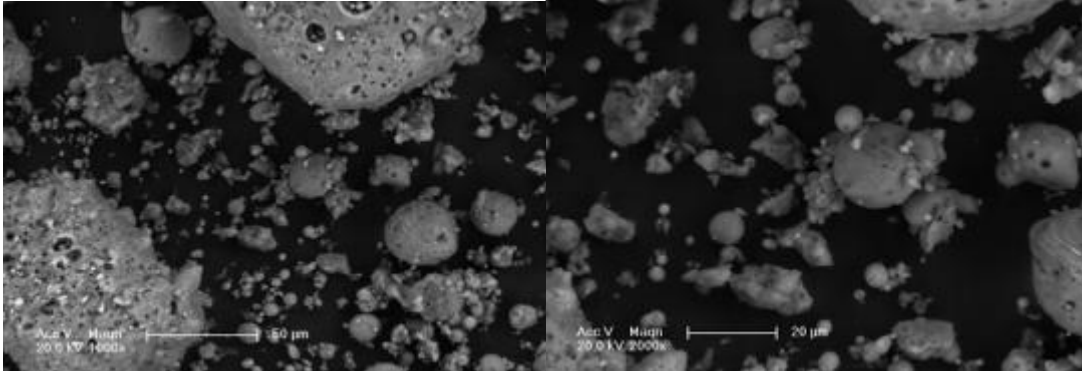
4.2. Malzemelerin Mineral Özellikleri

Kil mineralleri çok karmaşık bir yapıya sahip olduklarından sınıflandırılmalarına ait tek bir sistem mevcut değildir. Fakat kil minerallerinin mühendislik özellikleri (su tutma/emme kabiliyeti, sıkışabilirlik, şişme/büzülme potansiyeli vb.) açısından sınıflandırılmaları ve özellikleri genel bir kabul görmektedir [31].



Şekil 4.1. Ham kaolen kilin SEM fotoğrafı

Şekil 4.1’de kam kaolen kiline ait bir SEM fotoğrafı görülmektedir. Ham kaolen, kuvars ve kaolinit minerallerinden oluşmaktadır. Kaolinit 3 µm çapında ve altı köşeli plakalar (plate) şeklindedir. Kaolenin içeriğindeki farklı kristal yapılar ve kaolinit plakalarının yüzey alanları kaolenin yüzey alanını artırmaktadır [26].



Şekil 4.2. Uçucu Külün Farklı Büyüklüklerde SEM Görüntüleri

Şekil 4.2’deki SEM analizi uçucu küllerin arasındaki yapısal farklılıkları belirtmektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılan mikroyapı incelemeleri, partikül boyutunun artmasıyla homojen bir dağılım sağlandığını göstermiş düşük boyutlu partiküllerin, partikül topaklanmasına neden olduklarını ortaya çıkarmıştır [32].

4.3. Malzemenin ve Elde Edilen Zeminlerin Kompaksiyon Özellikleri

Zeminlerin kompaksiyon deneyleri TS 1900-2/2006 [33]'e göre yapılmıştır. Standart (Proktor) enerjide tespit edilen optimum su içerikleri (w_{opt}) ve kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) laboratuvar deneyleri sonucu elde edilmiştir. Elde edilen değer sonuçlar kısmında tablo halinde verilmiştir. γ_{kmax} değerleri (KTŞ)'ye göre (Standart enerjide, $\gamma_{kmax} \geq 14.23 \text{ kN/m}^3$) bu zeminlerin yol dolgusunda kullanılabilir olduğunu göstermektedir [3].

Kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen zemin numunesinin kuru birim hacim ağırlık değeri KTŞ'nin verilerine göre değerlendirilmiştir.

Yol altyapılarında dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzemeleri KTŞ verilerine göre değerlendirilmektedir. Dolgu yapımına uygun olmayan malzemeler gerektiğinde kimyasal ve mekanik stabilizasyon işlemleri ile özellikleri iyileştirilerek ve/veya özel yapım teknikleri uygulanarak kullanılabilir duruma getirilebilirler.

Tablo 4.5 Yol altyapılarında kullanılacak malzemelerin özelliklerini göstermektedir.

Tablo 4.5. Dolgu malzemesi özellikleri

DENEY	ŞARTNAME LİMİTİ	DENEY STANDARDI
Likit Limit (LL), %	≤ 60	TS 1900 AASHTO T - 89
Plastisite İndeksi (PI), %	≤ 35	TS 1900 AASHTO T - 90
Maks. Kuru Birim Ağırlık (Standart Proctor)	$\geq 1,45 \text{ t/m}^3$	TS 1900 AASHTO T - 99
<p>PI ≤ 6 ve CBR > 10 olan doğal cüruf lar ve tüflerde bu şart aranmayacaktır. Dolgu yüksekliğinin 5 m'yi geçmesi halinde cüruf ve tüflerin kullanılabilmesi için "Araştırma Raporu" gereklidir.</p>		

Hazırlanan zemin numuneleri sırası ile teknik özellikleri belirlendikten sonra önceden belirlenen karışım oranlarında karıştırılarak yeni zemin numuneleri elde edilir ve yeni zemin numunesi ile zeminin kuru birim hacim ağırlık değeri bulunur [3].

4.4. Zeminlerin Mekanik Özellikleri

Yolun temel ve alt temel tabakalarında kullanılacak zeminlerin özelliklerinin belirlenmesinde taşıma gücü ve mukavemet tespiti önemlidir. Öncelikle suda bekletilmiş (ıslak) CBR olmak üzere mekanik özellikler CBR ve serbest basınç dayanımı deneyleriyle belirlenir. Bir süre suda bekletilerek su emdirilen zeminin ıslak CBR değeri mekanik özellikler içinde zeminlerin en kötü şartlar altındaki taşıma gücünün tespiti için araştırmalarda ve uygulamadaki karayolu şartnamelerinde çok tercih edilen bir metodudur [3].

Bu çalışmada kullanılan zeminlere laboratuarda uygulanan ıslak ve kuru CBR deneyleri TS 1900-2/2006 [33]'e göre yapılmıştır. Bu deney sonuçları ve CBR şişme yüzdeleri Tablo 4.6'da verilmiştir. KTŞ "Dolgular" kısmında dolguda kullanılacak zeminin ıslak (yaş) CBR oranının alt sınırı % 8 olarak verilmiş, "Kireç İle Zemin Stabilizasyonu" kısmında yaş CBR % < 10 veya CBR şişme % si ≥ 3 olan zemin/malzemeler için stabilizasyon-iyileştirme yapılması uygun bulunmuştur. Zeminlerin yaş CBR değeri için deney öncesi 96 saat sürdürülen su emdirme sırasında şişme miktarları ölçülmüştür. Bunlardan hesaplanan şişme yüzdelerinde KTŞ dolguda kullanılabilir şişme sınırı olan % 2 aşılmamıştır.

Tablo 4.6. Numunelerin Deney Sonuçları

Özellikler	Kür Süreleri									
	Günlük		7 Günlük		14 Günlük		28 Günlük		56 Günlük	
	Batma		Batma		Batma		Batma		Batma	
	2.5 mm	5 mm	2.5 mm	5 mm	2.5 mm	5 mm	2.5 mm	5 mm	2.5 mm	5 mm
Kuru CBR(%)	1.45	1.73	3.54	4.04	9.03	9.15	12.13	15.02	12.45	16.76
Yaş CBR (%)	4.49	4.54	7.87	9.13	13.91	17.3	14.28	16.96	16.26	20.49
CBR Şişmesi	0.001 mm		0.003 mm		0.01 mm		0.013 mm		0.014 mm	

KTŞ “Kireç İle Zemin Stabilizasyonu” kısmında dolguda kullanılacak stabilize edilmiş zemin/malzeme'nin yaş CBR % ≥ 15 olması istenmiştir. Buna göre yaş CBR'ı 9 ve 9'dan düşük olan Günlük, 7 Günlük ve 14 Günlük kür süreleri sonunda elde edilen zeminlerin dolguda kullanılamayacağı, CBR'ı 12, 15 ve daha yüksek olan diğer zemin numuneleri ise dolguda kullanılabilir ancak bazı değerlerin sınırda olması nedeniyle zemin kullanımına devam edilirken CBR deneyinin sıkça tekrarlanması gerekmektedir. Bunun yerine sınırda olan zeminlerin de güvenli tarafta kalması için iyileştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

4.5. Zeminin ve Katı Atıkların Özgül Ağırlıkları

Deneylerde kullanılan atıkların özgül ağırlığı TS 1900-1/2006 [33]'e göre tespit edilmiştir. Sonuçlar ise deney sonuçları bölümünde tablolar halinde gösterilmiştir.

Bu çalışmada yapılan her deney 5 deneme sonunda elde edilen tüm verilerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Özgül ağırlıklar tipik uçucu küllerde beklendiği gibi diğer atıklardan düşük (1.83) bulunmuştur. Yeni bir katı atık malzeme olan polisaj malzemesinin özgül ağırlık değeri ise 2.49 olarak bulunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda kirecin özgül ağırlık değeri ise 2.41 olarak bulunmuştur. En sonunda da kaolen kilinin özgül ağırlık değeri ise 2.57 olarak bulunmuştur. Özgül ağırlık G_s formülü ile gösterilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$G_s = \frac{M_s}{M_s + M_{pw} - M_{pws}} * K$$

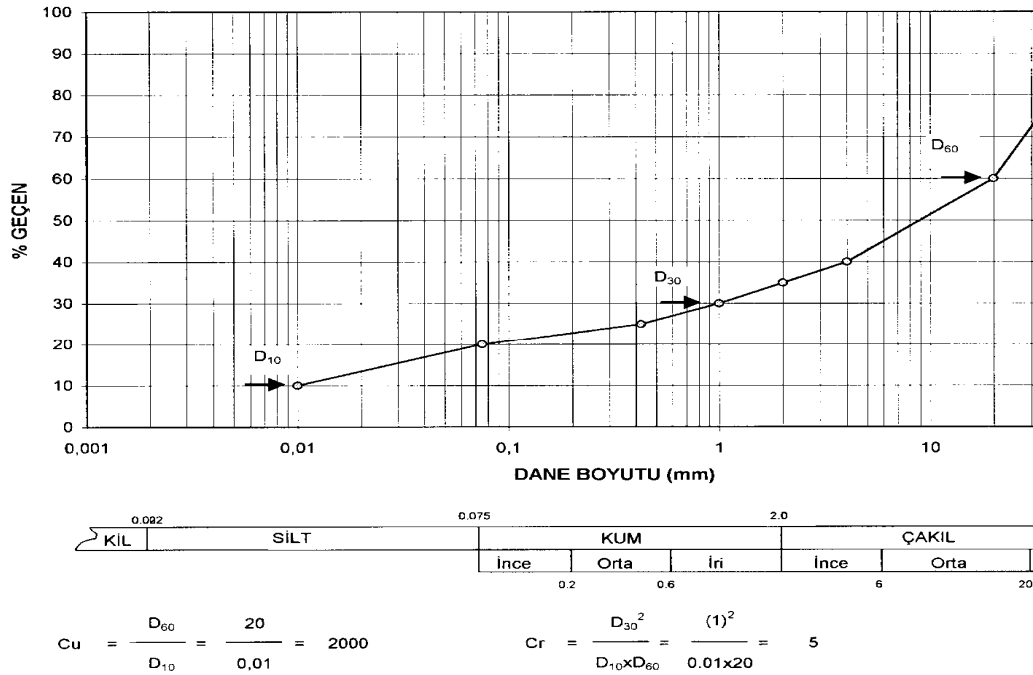
Tablo 4.7. Özgül ağırlık deneyi için örnek tablo

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	1	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kireç	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	20,5 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.9981	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	117.02
Piknometre + Numune ağırlığı (M _{ps})	gr	163.84
Piknometre + Numune + Su ağırlığı (M _{pws})	gr	646.89
Piknometre + Su ağırlığı (M _{pw})	gr	619.06
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı (M _s)	gr	46.82
Özgül Ağırlık Hesaplama (G_s)	gr/cm ³	2.461

Numunelere uygulanan özgül ağırlık deneyleri sonucunda bulunan değerler yukarıdaki denklemde yerlerine konularak numunelere ait olan özgül ağırlık değerleri hesaplanmıştır ve Tablo 4.7'de görüldüğü gibi bulunan değerler gösterilmiştir.

4.6. Atıkların Dane Çapı Dağılımı

Kullanılan zemin numunesi ile birlikte uçucu kül ve yapay granit atığı polisaj malzemesinin de dane çapı dağılımı deneyleri yapılmıştır ve sonuçları da deney sonuçları bölümünde grafik ve tablolar halinde gösterilmiştir.

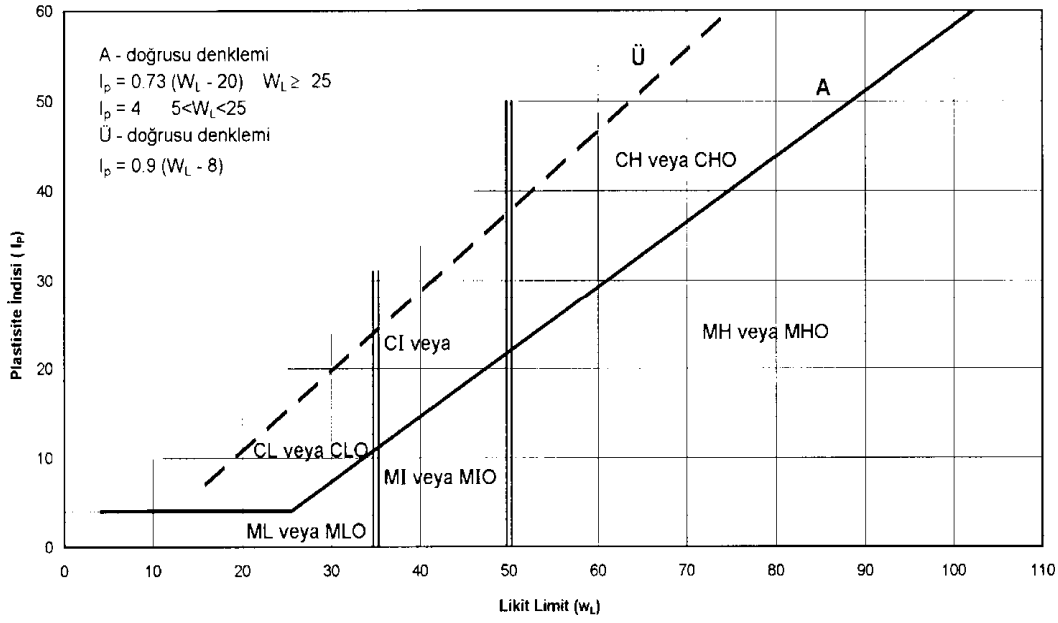


Şekil 4.3. Zemin sınıflandırması için örnek dane dağılım eğrisi

Numunelere uygulanan hidrometre ve elek analizi deneyleri sonucunda elde edilen sayısal verilerle Şekil 4.3'de görüldüğü gibi o numuneye ait dane dağılım eğrisi çizilmektedir. Çizilen bu dane dağılım eğrisinden uniformluluk katsayısı ve süreklilik katsayıları değerleri hesaplanarak numunenin zemin sınıflandırılması yapılmaktadır.

4.7. Atıkların Kıvam Limitleri

Kullanılan malzemeler sınıflandırılırken TS 1500/2000 [34]'e göre Atterberg limitleri kullanılmaktadır. Bu nedenle atıkların sınıfını (plastisite kartındaki yerini) tespit ederken kıvam limitleri tespit edilmiştir. Laboratuarda yapılan likit ve plastik limit deneyleri için TS 1900-1/2006 [35] standardı uygulanmıştır. Kil içeriği % 13'ten az olan numunelerin likit limit değerleri düşen koni cihazı ile belirlenir [32].



Şekil 4.4. Kıvam limitleri sonucu zemin sınıflandırılmasına ait plastisite kartı

Kıvam limiti deneyleri sonucunda bulunan W_L ve PI değerleri Şekil 4.4'te görülen plastisite kartında yerine konularak zemin sınıfı belirlenir. Zemin sınıflandırılması yapılırken kartın üzerinde gösterilen sınırlamalara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bir zemin numunesinin Ü eğrisi üzerinde çıkması imkansızdır. Böyle bir durum ile karşılaşıldığı zaman deneyin tekrar edilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde çalışma da kullanılan malzemelerin genel olarak tüm özelliklerinden bahsedilmiştir. Her malzemeye ayrı ayrı kimyasal analiz yaptırılmış ve bölümde sonuçları sunulmuştur. Kullanılan malzemelerin hangi zemin sınıfına ait olduğunu belirlemek için hangi deneylerin yapılması gerektiği konusundaki bilgilere değinilmiştir.

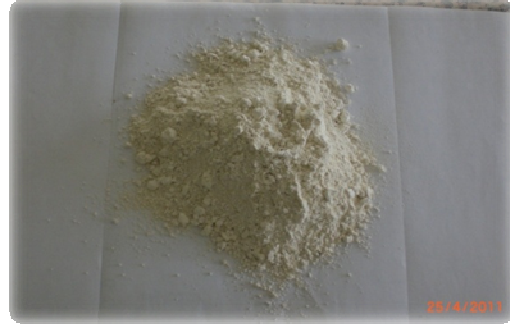
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

5.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışmada kullanılan Kaolen kili Ankara Kalaçlar firmasından, uçucu kül Kütahya Seyitömer termik santralinden, polisaj Bilecik Akgün Seramik fabrikasından ve kireç olarak ise Nuh kireç kullanılmıştır.



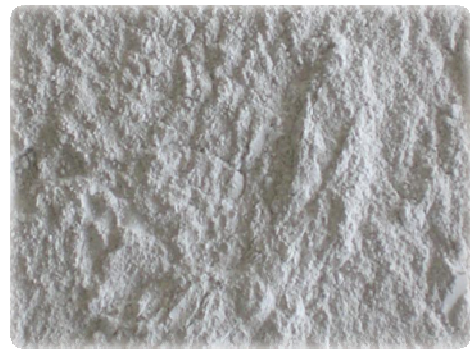
Polisaj



Kaolen kili



Uçucu Kül



Kireç

Şekil 5.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

5.2. Yapılan Deneyler

Çalışmada yapılan deneylerin her birinden 5 deneme yapılmış ve bu 5 deneyin ortalaması alınarak deney verileri elde edilmiştir.

Yapılan tüm deneyler TS 1900-1/2006 [35] ve TS 1900-2/2006 [33] standartlarına uyularak yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar;

1. Özgül Ağırlık
2. Su muhtevası
3. Yıkamalı elek analizi
4. Hidrometre deneyi
5. Likit limit
6. Plastik limit
7. Standart kompaksiyon
8. California taşıma oranı (Kürlü ve Kürsüz CBR)

5.2.1. Özgül ağırlık deneyi

Zeminin özgül ağırlığı (bağlı yoğunluk) indeks (fiziksel) özelliklerinden olup dane birim hacim ağırlığının, suyun birim hacmine oranıdır. Özgül ağırlık deneyi ince daneli zeminlerde uygulanır ve TS 1900-1/2006 [35]'e göre aşağıdaki gibi yapılır.

Bu deney, ince daneli zeminlerde danelerin bağlı yoğunluğunun tayini için uygulanır. Bu deney, elekten geçecek biçimde öğütülmesi şartıyla orta ve iri danelere de uygulanabilir [35].

Hacim şişesi, sıcaklığı $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ olan etüvde kurutulur, desikatörde soğutulur ve 0,001 gram doğrulukla tartılır. Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilmiş malzemeden en az 400 g alınır ve gerekirse 4,75 mm'lik elekten geçecek biçimde öğütülür. Bu malzeme yaklaşık 250 g numune elde edilene kadar çeyrekleme metoduyla küçültülür. Elde edilen numune, sıcaklığı $(105 \pm$

5) °C olan bir etüvde kurutulur. Su muhtevası deneyinde anlatıldığı şekilde, oda sıcaklığına kadar soğutulur. En az 10 g kütledeki zemin numunesi bağıl yoğunluk şişesine aktarılır. Şişe, içerisindeki zemin ve kapağı ile birlikte 0,001 g doğrulukla tartılır. Zeminin etüvde kurutulması işlemi sonucunda hidrasyon suyunda meydana gelecek kayıplardan ötürü danelerin bağıl yoğunluğunda değişme olabileceğinden kuşkulanıyorsa, zemin doğal durumunda denenmeli ve kullanılan numunenin kütlesi deneyin sonunda zemini, sıcaklığı 80 °C'u aşmayan bir etüvde ve gerekirse 24 saatten daha uzun bir süre kurutularak ölçülmelidir. Ancak deney, sıkıştırma deneyinde hava boşlukları yüzdesinin hesabı için yapılıyorsa (105 ± 5) °C sıcaklıklı etüv kullanılmalıdır. Hacim şişesi içindeki numuneyi ancak örtecek miktarda, havası alınmış damıtık su eklenir, bazı zeminler (numunenin, suda eriyebilen tuzlar içeren zeminler) için su yerine gazyağı veya alkol kullanılabilir. Bunlardan herhangi biri kullanıldığında, durum deney raporunda belirtilmeli ve sıvının deneyde kullanılan belirli sıcaklıkta yoğunluğunu ölçmek için ayrı bir deney yapılmalıdır. Hacim şişesi, içerisindeki zemin numunesi ve suyla, (üzerinde kapağı bulunmaksızın), vakum desikatörüne konur ve emme uygulanarak yavaşça 760 mm eşdeğer cıva basıncına düşürülür. Bu işlem sırasında, zemin içindeki hava kabarcıklarının şiddetli köpürmeye yol açmamasına özen gösterilmelidir. Bu yapılmazsa, karışımdan sıçrayan ufak damlacıklar hacim şişesinin ağzından çevreye saçılarak malzeme kaybına yol açar. Hacim şişesi, numuneden hava çıkışı durana kadar desikatörde bekletilir. Vakum kaldırılır ve desikatörün kapağı açılır. Hacim şişesinin içindeki numune, cam çubuk ile özenle karıştırılır veya hacim şişesi çalkalanır. Spatülün hacim şişesinden çıkarılmasından önce, üzerine yapışmış olan zemin danecikleri, birkaç damla havası alınmış damıtık suyla yıkanır. Desikatörün kapağı kapatılır ve yeniden vakum uygulanır.

Numune, hava kabarcıklarından arındırılana kadar son iki işlem yenilenir.

Hacim şişesi, desikatörden çıkarılır ve havası alınmış damıtık su ya da deney sıvısı eklenerek işaret çizgisine kadar doldurulur. Kapağı kapatıldıktan sonra, boyun seviyesine kadar su banyosu içine batırılır ve yaklaşık olarak 1 saat süreyle banyonun sıcaklığına (20 ± 1) °C erişene kadar bekletilir. Hacim şişesi içerisindeki sıvıda gözle görülür bir azalma olursa, kapak çıkarılır ve hacim şişesi işaret çizgisine kadar

doldurup kılcal borusundan taşacak kadar havası alınmış damıtık su ya da sıvı eklendikten sonra kapak yeniden kapatılır. Hacim şişesi banyo içerisine konur ve banyonun sıcaklığına yeniden erişene kadar bekletilir. Hacim şişesinin içindeki suda yine azalma oluyorsa, hacim şişesinin işaret çizgisine kadar dolması sağlanana kadar bu işlem tekrarlanır.

Kapağı kapalı durumdaki hacim şişesi banyodan çıkartılır ve dış yüzeyi iyice kurulandıktan sonra 0,01 g doğrulukla tartılır.

Hacim şişesinin içindekiler boşaltılır, hacim şişesi temizlenir ve havası alınmış damıtık su veya deney sıvısı ile işaret çizgisine kadar doldurulur, kapağı kapatılır ve su banyosunda 1 saat süreyle veya banyonun deney için seçilmiş sıcaklığına erişene kadar bekletilir. Hacim şişesinin içerisindeki suda (deney sıvısında) gözle görülür bir azalma olursa, kapak çıkarılır ve hacim şişesini dolduracak kadar havası alınmış damıtık su eklendikten sonra kapak yeniden kapatılır. Hacim şişesi banyo içerisine konur ve banyonun belirli sıcaklığına yeniden erişmesine kadar bekletilir. Hacim şişesinin içindeki suda (deney sıvısında) yine azalma oluyorsa, hacim şişesinin işaret çizgisine kadar dolması sağlanana kadar bu işlem tekrarlanır. Son olarak, hacim şişesi banyodan çıkarılır ve dış yüzeyi iyice kurulandıktan sonra 0,01 doğrulukla tartılır.

Yukarıdaki işlemler, aynı zeminden alınan ikinci numune üzerinde tekrarlanır ve böylece iki bağıl yoğunluk değeri elde edilmiş olur. Zeminlerin pek çoğu, aynı büyüklükteki ortalama zemin danesinden daha ağır veya daha hafif daneler içerir. Böyle danelerin çok olduğu zeminlerde, özenle yapılan bağıl yoğunluk deneyleri farklı sonuç verir. Bu gibi durumlarda, iyi bir ortalama değer elde etmek için deneyin birçok defa tekrarı gerekebilir.

Çalışmada kaolen, polisaj, uçucu kül ve kireç malzemelerinin her birinden 5'er tane olmak üzere toplam 20 adet özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Elde edilen değerlerin ortalaması, zemin danelerinin bağıl yoğunluğu olarak kabul edilir ve $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ sıcaklık için en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak verilir. Değerler arasındaki fark 0,03'ten büyük çıkmışsa, deney tekrarlanır. [35].



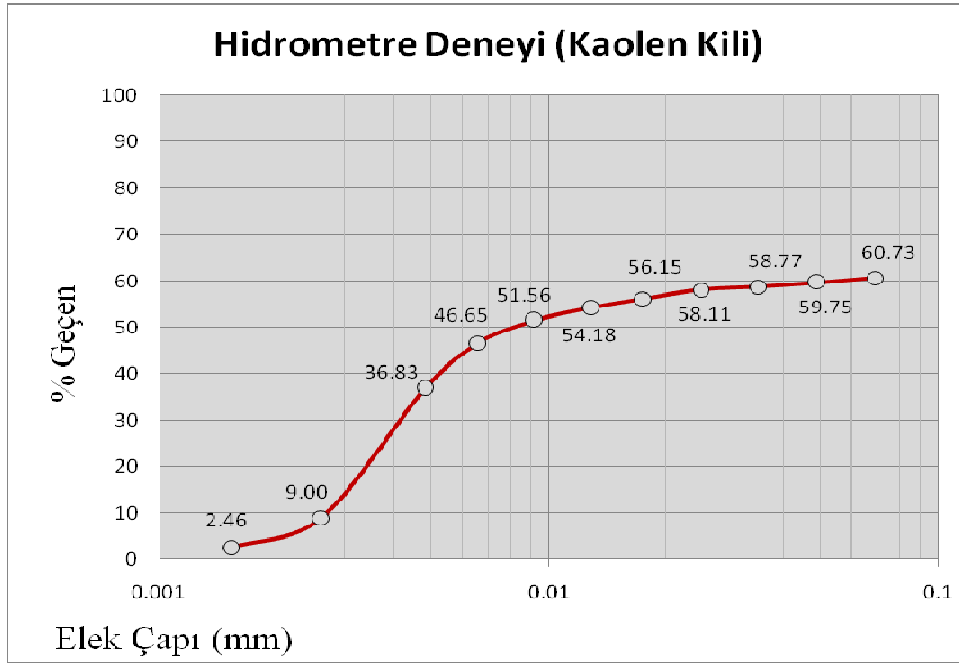
Şekil 5.2. Özgül Ağırlık Yapım Aşaması

Özgül ağırlık deneyinin yapılışında birden fazla piknometre çeşidi kullanılabilir. İnce taneli zeminlerin özgül ağırlık değerlerini bulabilmek için daha çok 250 ml ve 500 ml'lik piknometreler kullanılmaktadır. Bu çalışmada da ince taneli zeminler kullanıldığı için Şekil 5.2'de görüldüğü gibi 500 ml'lik piknometreler kullanılarak malzemelerin özgül ağırlık değerleri bulunmuştur.

5.2.2. Dane dağılımı belirleme deneyleri

5.2.2.1. Elek analizi

Deneylerde kullanılan malzemelerin dane dağılımı TS 1900-1/2006 [35]'e göre yıkamalı eleme metodu ile belirlenmiş olup TS 1900-1/2006 [35] ve TS 1500/2000 [34]'e uyularak uyularak her bir malzemenin zemin sınıflandırılması yapılmıştır.



Şekil 5.3. Zemin sınıflandırması için örnek dane dağılım eğrisi

Şekil 5.3'deki dane dağılımı eğrisi çizildikten sonra kritik çaplar D_{10} , D_{30} ve D_{60} eğriden okunur. Efektif çap D_{10} , % 10 düşey eksen değerinden çıkılan yatay doğrunun dane çapı dağılımı eğrisini kestiği noktanın yatay eksenindeki karşılık değeridir. Benzer biçimde D_{30} ve D_{60} değerlerini bulmak için % geçenin % 30 ve % 60 düşey eksen değerlerinden çıkılan yatay doğruların eğriyi kestiği noktalar bulunduktan sonra dane çapı eksenine çizilen düşey doğrulardan D_{30} ve D_{60} okunur. Buradan dane dağılımı kriterleri:

Üniformluk katsayısı, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Süreklilik katsayısı, $C_r = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$ eşitlikleriyle hesaplanır.

Bulunan sonuca göre zeminin ince taneli veya iri taneli olmasına bağlı olarak sınıflandırılması yapılır.

5.2.2.2. Dane apı dağılımlarının bulunması için yıkamalı eleme metodu

Bu metot, bir zeminde, ince kum ve daha iri boyuttaki malzemenin dane çapı dağılımlarının tayini ile ilgili olup, zemindeki kil ve siltin toplam miktarı da (inceler), bu deney sonuçlarından hesaplanabilir [35].

Toplam numune kütlesi esas alınarak, her elekte kalan malzeme miktarı, 75 µm elekten ise geçen miktarı hesaplanır ve yüzdeleri bulunur. Başlangıçtaki numune eyrekleme metoduyla azaltılmışsa, bu hesaplamalarda dikkate alınmalıdır [35].

Deneyde kullanılacak eleklerin göz açıklıkları, deneye tâbi tutulan zemindeki dane boyutlarını yeterli bir biçimde kapsmalıdır. Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak temsili numune elde edilir ve etüvde kurutulur. Numune içinde iri zemin daneleri bulunuyorsa, üzerindeki ince malzemedan temizlenene kadar tel ve benzeri sert bir fırça ile fırçalanır. Temizlenen bu iri daneler yumuşak yapılı ise temizleme işlemi sırasında kendi yapılarından parça kopmamasına özen gösterilmelidir. Etüvde kurumuş malzeme 0,01 g doğrulukla tartılır ve bulunan değer kaydedilir. Geniş bir tepsi içine serilir veya bir kova içine konur ve su ile örtülür. Numuneyi örtmekte kullanılan suyun her bir litresi için 2 g sodyum heksametafosfat katılır ve zeminin tamamen ıslanmasını sağlamak için kabın içindekiler iyice karıştırılır [35].

Numune son bir kez karıştırıldıktan sonra bulanık su, yavaşça şekil 5.4'de görüldüğü gibi 75 µm'lik eleğin üzerine aktarılır. İri danelerin 75 µm'lik eleğe zarar vermemesi için 75 µm'lik eleğin üzerine daha büyük göz açıklıklı ve kalın telli başka bir elek (425 µm veya 2 mm gibi) konularak iri danelerin bu eleğin altına geçmesi önlenir. Eleklerden herhangi birinin aşırı yüklenmemesine dikkat edilmelidir. 75 µm'lik elek üzerinde kalan malzeme hiçbir zaman 150 gramı aşmamalıdır. Numuneye yeniden su katılır. Bulanık su, 75 µm elekten geçirilip atılır. Bu yıkama işlemi, 75 µm elekten geçen su duru hale gelinceye kadar sürdürülür. Eleklerden kalan malzemenin tamamı tepsilere veya porselen potalara boşaltılır ve (105 ± 5) °C sıcaklıklı etüvde kurumaya bırakılır.

Etüvde kurutulanan malzeme uygun bir elek serisinden elenir. Eleme mekanik sarsma cihazıyla yapılıyorsa sarsma süresi en az 10 dakika olmalıdır. Her elekte kalan miktar tartılır ve elde edilen kütleler kaydedilir. 75 µm'lik elekten geçen malzemenin miktarı, deneyde kullanılan eleklerde kalan malzeme kütlelerinin toplamının, başlangıçta kaydedilen toplam kütleden çıkarılmasıyla elde edilir [35].



Şekil 5.4. Yıkamalı Elek Analizi Yapım Aşaması

5.2.3. Hidrometre metodu

Bu metot, bir zeminde, iri kum boyutunda ve daha ince danelerin dane çapı dağılımının bulunması ile ilgilidir. Numune 75 µm'lik elekten elenmesi durumunda, deney, elde edilen bu numune üzerinde de yapılabilir [35].

Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilen havada kurutulmuş numuneden, yarılama metoduyla, her biri yaklaşık olarak 50 g - 100 g kütlelerinde iki numune elde edilir. Deney için gerekli zemin miktarı zeminin türüne bağlı olarak değişir; örneğin, killi zeminler için 50 g kumlu zeminler için 100 g numune kullanılır. Numunelerden birinin su muhtevası (w) ölçülür. Diğer numune, 0,01 g doğrulukla tartılır ve geniş ağızlı konik şişeye konur. Üzerine 150 ml hidrojen peroksit çözeltisi eklenir, birkaç dakika süreyle cam çubukla hafifçe karıştırılır ve şişenin ağzı cam kapakla örtüldükten sonra ertesi güne kadar bekletilir. Bekletilmiş karışım hafif ateşte ısıtılır. Bu sırada, köpürüp taşma olmamasına özen gösterilmeli ve karışım sık sık karıştırılmalıdır. Şiddetli köpürme kesilir kesilmez, karışım

kaynatılarak hacmi 50 ml'ye düşürülür. Organik madde yüzdesi yüksek olan zeminlerde oksidasyonun tamamlanabilmesi için ek hidrojen peroksit kullanılması gerekebilir [35].

Porselen pota 0,01 g duyarlıkla tartılır ve konik şişedeki karışım bu potaya aktarılır. Bu işlem sırasında olabildiğinde az damıtık su kullanılmalıdır. Pota, içindekilerle birlikte etüve konur ve (105 ± 5) °C'ta kurutulur. Bundan sonra pota, içindekilerle birlikte desikatöre konur ve soğumaya bırakılır. Soğuyan numune, pota ile birlikte 0,01 g duyarlıkla tartılır. Bu tartı sonucundan kap kütlesinin çıkarılmasıyla numunenin ön işlemler sonundaki kütlesi elde edilir. Organik madde yüzdesi düşük (% 2'den az olan) zeminlerde, yukarıdaki işlemlerin uygulanması gerekmez, dağıtma maddesi katılarak deney sürdürülür [35].

Porselen potanın içindeki numuneye 100 ml sodyum heksametafosfat çözeltisi katılır ve karışım hafif ateşte 10 dakika kadar ısıtılır. Bazı zeminde, dağıtıcı etkili olamadığından karışımda floklarına sonucu dağıtma sağlanamayabilir. Bu durumda dağıtıcı miktarını arttırmak gerekebilir. Karışım, pisetten damıtık su fişkırtılarak, içinde tel kafes bulunan karıştırma kabına aktarılır. Bu işlem sırasında kullanılan su miktarı 150 ml'yi aşmamalıdır. Zemin süspansiyonu bundan sonra 15 dakika süreyle mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılır. Süspansiyon vakit geçirmeden, alt kap üzerine oturtulmuş 75 µm 'lik eleğe aktarılır. Karıştırma kabına ve tel kafese yapışmış bütün süspansiyon kalıntılarının damıtık su ile yıkanarak tamamen eleğe aktarılmasına özen gösterilmelidir. Eleğe aktarılan zemin, pisetten damıtık su fişkırtılarak yıkanır. Bu işlemler sırasında kullanılan damıtık suyun miktarı 500 ml'yi aşmamalıdır. 75 µm 'lik elekten geçmiş olan süspansiyon, 1000 ml'lik mezüre aktarılır ve damıtık su eklenerek tam 1000 ml'ye tamamlanır. Bu süspansiyon, bundan sonra, aşağıda anlatılan çöktürme analizi için kullanılır [35].

75 µm 'lik eleğin üzerinde kalan malzeme, bir porselen potaya aktarılır ve (105 ± 5) °C sıcaklıklı bir etüve kurutulur. Kuruduktan sonra, bu malzeme 4,75 mm'lik, 600 µm, 200 µm ve 75 µm 'lik eleklerden oluşan elek dizisinden elenir. Eleme sonunda, bu elekler üzerinde kalan malzeme ayrı ayrı tartılır ve kütleleri kaydedilir [35].

Mezürün ağzı lâstik bir tıpa ile kapatılır ve homojen bir süspansiyon oluşana kadar sert bir biçimde çalkalanır, en sonunda baş aşağı çevrilir. Çalkalama işlemi durdurulur durdurulmaz mezür, şekil 5.5'deki gibi düz bir yüzey üzerine oturtulur ve kronometre çalıştırılır. Hidrometre yüzme durumunun az altına gelene kadar süspansiyona daldırılır ve serbestçe yüzmeye bırakılır. Kronometreye bakılarak 0.5, 1, 2 ve 4'üncü dakikalarda hidrometre okumaları alınır. Bundan sonra hidrometre, yavaşça süspansiyondan çıkarılır, damıtık suyla yıkanır ve zemin süspansiyonu ile aynı sıcaklıkta tutulan damıtık su dolu diğer bir mezür içinde bekletilir [35].

Kronometre 8. dakikaya yaklaşırken (yaklaşık olarak 15 saniye kala) hidrometre yeniden süspansiyona daldırılır ve hidrometre okuması alınıp kaydedilir. Okuma alındıktan sonra hidrometre çıkarılır, yıkanır ve damıtık su içine konur. Aynı biçimde, 15, 30, 60, 120, 480 dakikalarda hidrometre okumaları alınır [35].

Bundan sonra, iki gün süreyle günde 1 veya 2 kez okuma alınır ve bu okumalara karşılık olan çökme süreleri tam olarak kaydedilir. Hidrometrenin her okumadan önce süspansiyona daldırılması ve okumadan sonra da çıkarılması sırasında süspansiyonun çalkalatmamasına özen gösterilmelidir. Hidrometrenin süspansiyona daldırılması ve süspansiyondan alınması işlemlerinin her biri, 10 saniyelik bir süre içinde yapılmalıdır. Süspansiyonun titreşim etkisine uğraması önlenmelidir [35].

Su banyosunun kullanılmadığı deneylerde süspansiyonun sıcaklığı, ilk 15 dakikada bir kez ve daha sonraki her okumadan sonra ölçülüp kaydedilir. Sıcaklık en az 0,5 °C duyarlılıkla okunmalıdır. Mezürün asimetrik olarak ısı alması ya da kaybetmesi önlenmelidir. Ayrıca, ortam sıcaklığının 2 °C'tan fazla değişmemesi deneyin sonuçlarını daha güvenilir hale getirir [35].



Şekil 5.5. Hidrometre Deneyi Yapım Aşaması

Eşdeğer dane çapı (D), Stokes Kanunu ile aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{\mu}{\rho_s - \rho_w}} \sqrt{\frac{H_R}{t}}$$

Burada;

μ Suyun viskozitesi,

ρ_s Numunenin yoğunluğu,

ρ_w Suyun yoğunluğu,

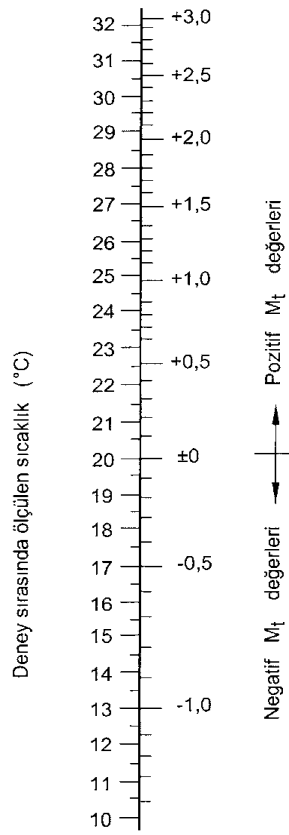
H_R Hidrometre kalibrasyon eğrisinden alınan değer, "t" zamandır.

Sıcaklık düzeltmesi, sıcaklık düzeltmesi ölçeğinden (Şekil 5.6) elde edilir. Ön işlemler sonunda elde edilen numune kütlesi esas alınarak, ilgili eşdeğer dane çapından daha küçük danelerin yüzdesi (p), aşağıdaki, eşitlikten hesaplanır:

$$\%P = \frac{G_s}{M_s * (G_s - 1)} * P_{200} * 1000 * (R - 1)$$

Burada;

- %P Ön işlemler sonunda numunenin geçen yüzdesi, (%),
 G_s Zemin danelerinin özgül ağırlığı,
 M_s Kuru numune ağırlığı
P200 200 nolu elekten kısmın yüzdelik dilimi
R Düzeltme uygulanmış hidrometre okuması



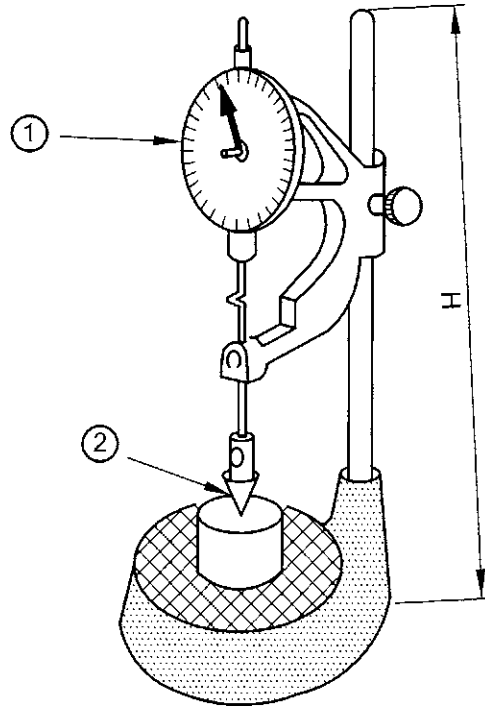
Şekil 5.6. 20 °C'ta Kalibre Edilmiş Hidrometreler İçin Sıcaklık Düzeltmesi Ölçeği

5.2.4. Atterberg limitleri deneyleri

Zeminin ince kısmının özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerdir. Bu deney zeminin 425 μm altı kısmına uygulanır. TS 1900-1/2006 [35]'e göre zeminin Atterberg limitleri casegrande, konipenetrasyon ve plastik limit deneyleriyle belirlenir.

5.2.4.1. Konipenetrasyon deneyi

Bu deney zeminin likit limitini belirlemek amacıyla 80 gr ağırlığındaki koninin kendi ağırlığıyla numunenin hemen üzerinden serbest düşme yaparak 5 saniye içerisinde yaptığı batmanın (penetrasyon) belirlenmesiyle alakalıdır. Şekil 5.7'deki sivri ucun zemin numunesine batması ile deneyi yapılmakta olan numunenin likit limit değeri belirlenmiş olur. En az üç nokta olacak şekilde, üç deney yapılır ve yapılan deneylerin en az biri 20 mm den az batma değeri vermeli veya en az biri 20 mm den fazla penetrasyon vermelidir. Deney sonucunda elde edilen değerler ile çizilen su muhtevası- batma (doğrusal) grafiği üzerinde 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası likit limit değerini ifade eder [35].



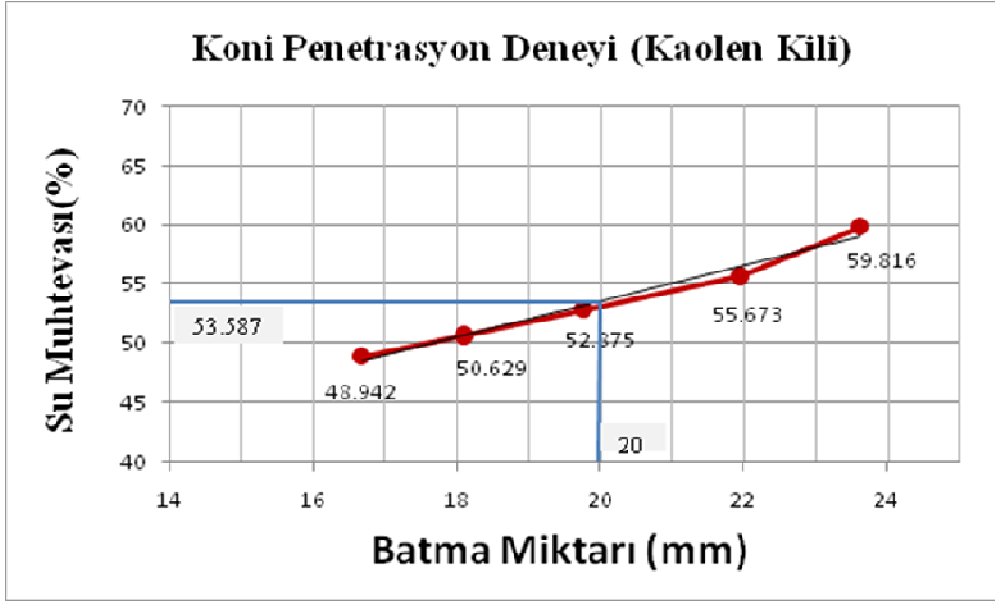
Şekil 5.7. Likit Limit Tayininde Kullanılan Koni Düşürme Cihazı

Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak 425 μm 'lik elekten geçirilen 200 g kadar numune alınır ve 425 μm 'lik elekten geçen kısım yüzdesi kaydedilir. Numune cam plâkanın üstüne veya porselen potaya konur; damıtık su katılarak, homojen bir hamur durumuna gelene kadar, palet bıçağıyla iyice karıştırılır. Sonra bu karışım, suyun, numunenin her yanına yayılmasını sağlamak amacıyla, hava geçirmez bir kap içerisinde 24 saat süreyle desikatörde oda

sıcaklığında bekletilir. Başlangıç su muhtevasının likit limitten düşük olması gerekir. Numune ertesi gün desikatörden alınarak en az 10 dakika süre ile tekrar karıştırılır. Bazı ağır killerde yoğurma 40 dakikaya çıkabilir [35].

Hazırlanan numune metal deney kabına sıkıca yerleştirildikten sonra yüzeyi çelik cetvelle tesviye edilir ve penetrometre tabanına konulur. Koni, zeminin yüzeyini belirsizce çizecek seviyeye indirilir ve komparatör saatinin sıfır okuması alınır. Sonra düğmeye 5 ± 1 saniye süre ile basılır. Süre sonunda son mikrometre okuması yapılır. İki okuma arasındaki fark koni penetrasyonudur. Koni kaldırılıp dikkatle temizlenir. Kaba biraz daha çamur eklenerek yüzeyi yine düzlendikten sonra yukarıdaki işlem tekrarlanır. Bu ikinci penetrasyon değerinin, ilk değerden farkı 0,5 mm ile 1 mm arasında çıkarsa, bir üçüncü deney yapılır. Değerlerdeki farklılık 1 mm dolayında kalırsa 10 g kadar bir su muhtevası numunesi koni deliği civarından alınır ve su muhtevası ölçülür. Bu su muhtevasına karşılık üç penetrasyon değerinin ortalaması kaydedilir. Fark 1 mm'den fazla ise numune kap dışına alınarak, tekrar karıştırıldıktan sonra deney bu su muhtevası için tekrarlanır [35].

Yukarıda anlatılan işlemler numuneye su eklenerek en az üç kez ve değişik su muhtevalarında yapılır. Bu su muhtevaları penetrasyon değerlerinin 15 mm ile 25 mm arasında değişeceği biçimde ayarlanmalıdır. Kural olarak deney, kurudan ıslak karışıma doğru yürütülür ve koni ile deney kabı her denemeden sonra temizlenir. Su muhtevası ve koni penetrasyonu değerleri bir koordinat eksenine, her deneme için su muhtevası yüzde olarak yatay eksene, penetrasyon değeri de düşey eksene işaretlenir. Noktalardan geçirilecek en uygun doğrudan akış eğrisi elde edilir. 20 mm penetrasyona karşılık olan su muhtevası, zeminin likit limiti olarak tayin edilir ve % olarak en yakın 0,1 hanesine yuvarlatılarak verilir. Deneyde penetrometre kullanıldığı, 425 μm 'lik elekten geçen malzeme yüzdesi, ayrıca zeminin rutubet durumu (doğal, havada kurutulmuş, bilinmiyor) kaydedilmelidir [35].



Şekil 5.8. Konipenetrasyon yöntemi ile likit limit deneyi grafiği

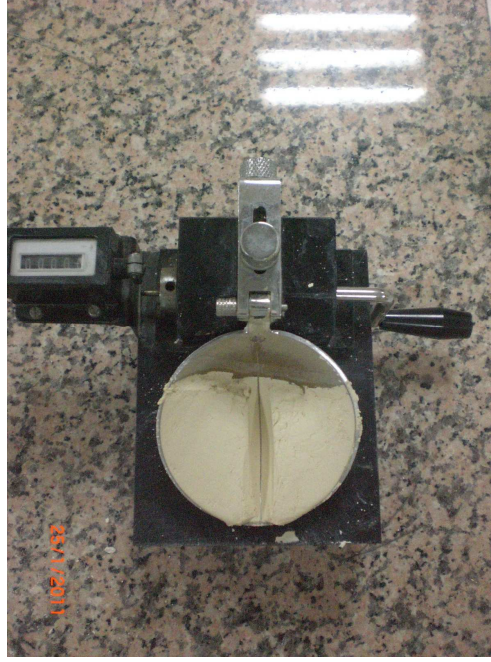
Konipenetrasyon cihazı ile yapılan deney sonucunda bulunan değerler ile hesaplanan su muhtevaları ve likit limit sınır şartı olan 20 mm batma miktarına göre Şekil 5.8'deki deney formuna likit limit grafiği çizilir.

5.2.4.2. Casagrande deneyi

Bu deney likit limitin belirlenmesi için zeminden alınan temsili numunenin casegrande aletinde düşüş yaptırılması ile belirlenmesiyle alakalıdır. Bu deney, açıkta kurutulmuş zeminin likit limitinin bulunması ile ilgili olup, doğal durumlarındaki numunelere de uygulanabilir.

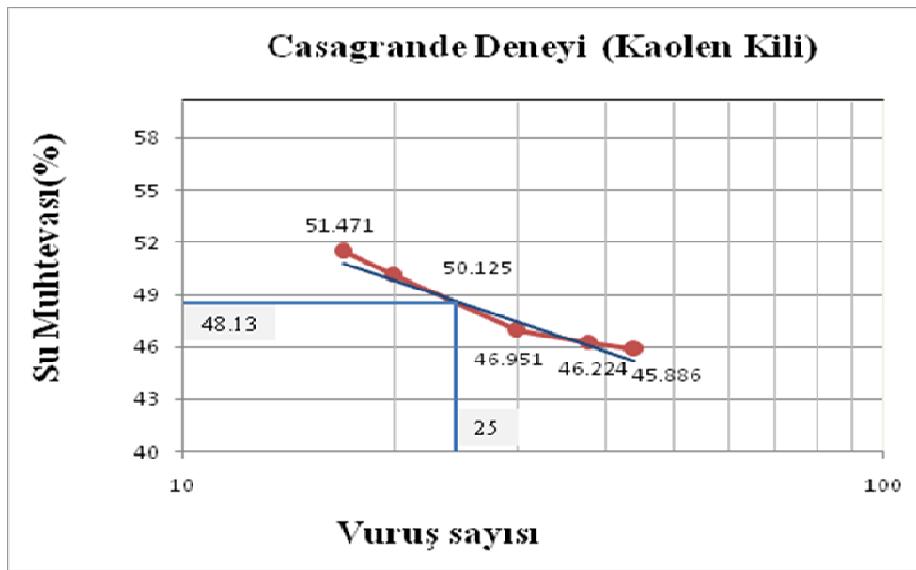
Likit limit cihazının, her deneyden önce temiz, kuru ve iyi çalışır durumda olup olmadığı denetlenmeli, pirinç kabın serbestçe düşebilmesine ve menteşede yan oynamaların gereğinden çok olmamasına özen gösterilmelidir. Oluk açma bıçağı da temiz ve kuru olmalıdır. Deney sırasında likit limit cihazı kabının kaldırılacağı yükseklik, kap, en yüksek durumuna getirildiği zaman, 1 cm kalınlığındaki master ölçeğin kap ile taban arasından kılı kılına geçebileceği biçimde ayarlanmalıdır. Deneyde kullanılacak numunenin başlangıç su muhtevasının likit limitten düşük olması gerekir [35].

Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak 425 µm'lik elekten geçirilen yaklaşık 200 g numune alınır. 425 µm'lik elekten geçen miktar toplam zemin numunesine bölünür 425 µm'lik elekten geçen yüzde bulunur. Numune cam plâkanın üstüne veya porselen potaya konur; damıtık su katılarak, homojen bir hamur durumuna gelene kadar, palet bıçağıyla iyice karıştırılır. Sonra bu karışım, suyun numunenin her yanına yayılmasını sağlamak amacıyla, hava geçirmez bir kap içerisinde 24 saat süreyle oda sıcaklığında desikatörde bekletilir. Başlangıç su muhtevasının likit limitten düşük olması gerekir. Numune kaptan çıkarılır ve en az 10 dakika süreyle yeniden karıştırılır. Bazı zeminlerde güvenilir sonuçlar alınabilmesi için deneye başlamadan önce numunenin 40 dakikaya kadar uzayabilen bir süre boyunca sürekli olarak karıştırılması gerekebilir. Elde edilen zemin-su karışımından bir miktar alınarak likit limit cihazının kabı içine konur (bu sırada kap tabana oturur konumda olmalıdır), şekil 5.9'daki gibi yüzeyi tabana paralel olarak düzlenir ve oluk açma bıçağı, menteşenin ortasından geçen çap boyunca kap içinde hareket ettirilerek, numune ikiye bölünür. Bıçağın hareketi sırasında bıçak, kap yüzeyine dik tutulmalı, bıçağın keskin ucu hareket yönüne bakmalıdır. Böylece numunenin ortasında 'V' kesitli bir oluk açılmış olur. Krank kolu saniyede 2 devirlik bir hızla çevrilerek, iki yanda kalan zemin, oluğun dip kısmında 13 mm boyunca birbirine değene kadar, kap kaldırılıp düşürülür. Değmenin sağlandığı kesimin uzunluğu, oluk açma bıçağının ucuyla veya bir cetvelle ölçülür. Oluktaki bu kapanmayı sağlayan düşüş sayısı kaydedilir. Bazı zeminlerde oluk, zemindeki akma yoluyla kapanacağına, zeminin kap yüzeyi boyunca kayması yoluyla kapanma eğilimindedir. Bu gibi durumlarda, elde edilen sonuca güvenilmemeli ve zeminde akma görülene kadar deney tekrarlanmalıdır. Birkaç kez su eklenmesine karşın yine kayma oluyorsa, deneyin bu zeminde uygulanamadığı sonucuna varılır ve deney raporunda likit limitin ölçülemediği belirtilir [35].



Şekil 5.9. Numunenin yüzeye paralel olarak serilişi

Her denemede elde edilen su muhtevasına karşı düşüş sayısı, yarı logaritmik bir grafik kâğıdı üzerine işaretlenir (Şekil 5.10). Bu işlem için su muhtevası değerleri aritmetik düşey eksende, düşüş sayısı ise logaritmik olarak yatay eksene işaretlenmelidir. Elde edilen noktalardan geçen en iyi doğru çizilir. Elde edilen 'akış doğrusu' üzerinde 25 düşüş karşısındaki su muhtevası zeminin likit limitini verir [35].



Şekil 5.10. Casagrande yöntemi ile likit limit deneyi grafiği

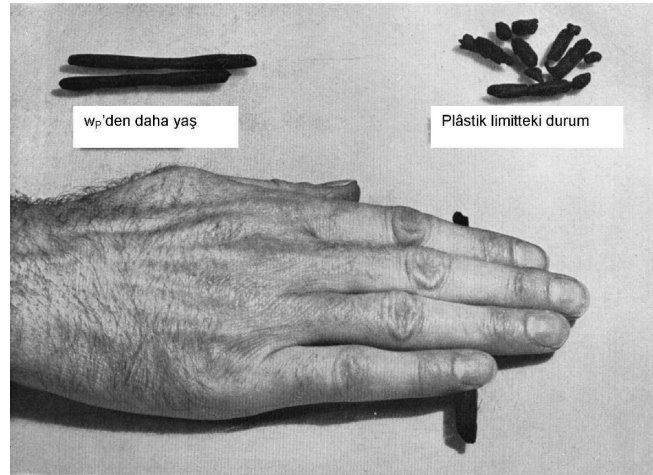
5.2.4.3. Plastik limit deneyi

Plastik limit zeminin kendi ağırlığı üzerinde durabildiği maksimum su muhtevası veya akıcı halde olabildiği minimum su muhtevasıdır. Plastik limit deneyi cam bir yüzey üzerinde (3 mm çubuk olacak şekilde) zeminin yüzeyinde çatlamlar meydana gelinceye kadar el içiyle yuvarlanmasıyla yapılır. Bu deney, zeminin henüz plâstik kıvamda bulunduğu, en düşük su muhtevasının ölçülmesi ile ilgilidir [35].

Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilmiş ve likit limit deneyi için hazırlanmış olup 425 μm 'lik elekten geçen malzemedan yaklaşık 20 g numune alınır. Zeminin 425 μm elekten geçen kısmının yüzdesi kaydedilir. Numune homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alabilecek kadar plâstik olana kadar, cam plâka üzerinde, damıtık su ile iyice karıştırılıp yoğrulur. Böylece hazırlanmış numune yaklaşık olarak iki eşit parçaya bölünür. Bunlara yeniden top biçimi verildikten sonra bir danesine, yukarıdaki işlemler uygulanır. Diğeri ise daha sonra denenmek üzere paslanmaz ve hava geçirmez bir kap içerisine konur [35].

Küre halindeki numune, 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar cam plâka ile el ayası arasında yuvarlanır. Numunenin çapı yaklaşık 3 mm olduğu anda çatlama ve kopma belirmemişse zemin tekrar toprak haline yoğrulur ve yeniden yumrulur. Çap tam 3 mm'ye indiği anda, yuvarlanan zeminde çatlayıp dağılmalar görülene değin bu işlem sürdürülür (Şekil 5.11). Çapın doğru olarak belirlenmesinde karşılaştırma ölçeği olarak bir metal çubuk kullanılır.

Numunenin dağılan parçaları toplanıp bir numune kabına konur ve su muhtevası ölçülür. Ölçüm için alınan numunenin yaş haldeki kütlesi en az 10 g olmalıdır. Yukarıda verilen işlemler, başlangıçtaki numunenin ikinci yarısı için tekrarlanır [35].



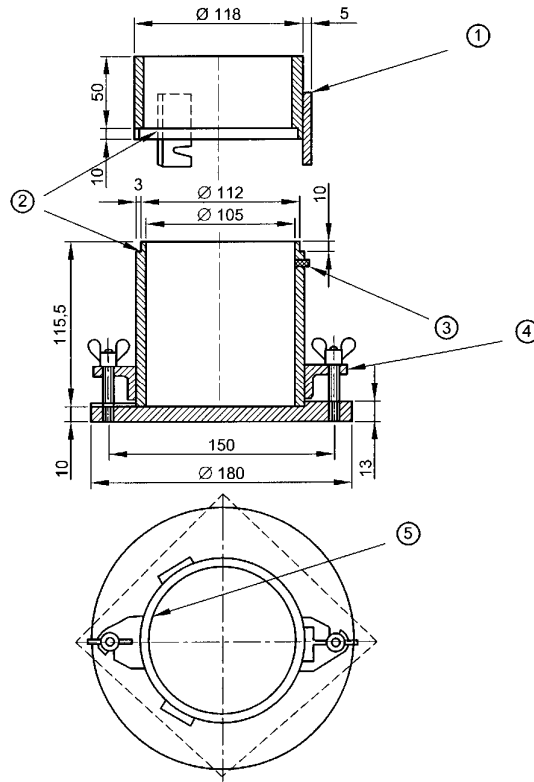
Şekil 5.11. Plâstik Limitin Belirlenmesi

5.2.5. Zemin sıkıştırma deneyleri

5.2.5.1. Zeminde kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası bağıntısının 2,5 kilogramlık tokmakla elde edilmesi (standart enerji)

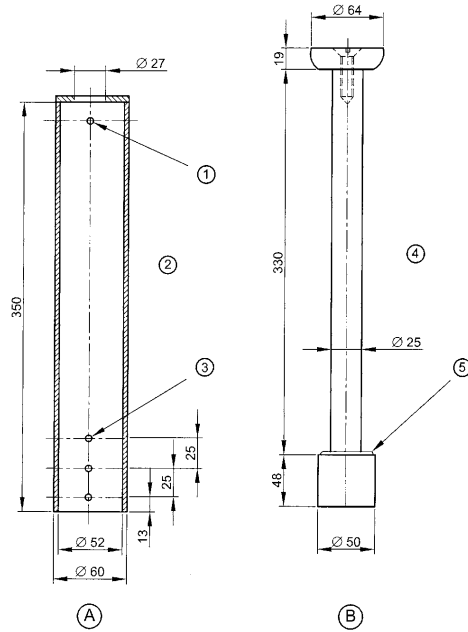
Bu deney, belirli bir metotla sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevasının bulunması ile ilgilidir. Bu deneyde 305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık tokmağın sağladığı mekanik iş kullanılmaktadır [35].

Metal kalıp, iç çapı 105 mm, iç yüksekliği 115,5 mm ve iç çapı 152,4 mm, iç yüksekliği 115,5 mm olan iki farklı ebatta, silindir biçiminde, kolayca çıkarılabilen bir taban plâkası ile 50 mm yüksekliği olan bir yakası bulunan kalıptır (Şekil5.12) [35].



Şekil 5.12. Standart Kompaksiyon Kalıbı

Metal tokmak, 50 mm çapında dairesel bir tabanı olan, 2,5 kg kütleinde, (tokmağın serbest düşüşünü 305 mm'ye ayarlayabilen bir düzeni olmalıdır), elle çalıştırılmaya elverişli bir cihazdır (Şekil 5.13) [35].



Şekil 5.13. Standart Sıkıştırma Deneyi İçin 2,5 Kg'lık Tokmak Ve Kılavuzu

Kalıp, taban plâkası takılmış olarak 1 g doğrulukla tartılır (M_1). Kalıp, beton döşeme gibi sert bir yüzey üzerine oturtulur ve nemli zemin mümkün olduğu kadar eşit kütlede üç tabaka halinde, her birine 305 mm serbest düşüş yapan tokmakla 25 darbe veya 56 darbe uygulanarak, üst ucuna yakası takılmış kalıbın içine sıkıştırılır. Darbeler, her tabaka yüzeyine eşit aralıklarla dağıtılmalıdır. Tokmak kılavuzunun, tokmağın serbest düşüşünü engelleyecek biçimde, zeminle tıkanmamasına özen gösterilmelidir. Kullanılan zemin miktarı, kalıbı doldurmaya yetmeli, ancak sıkıştırılıp yaka çıkarıldıktan sonra kesilip atılacak artık zemin yüksekliği 6 mm'yi aşmamalıdır. Yaka çıkarılır ve sıkıştırılmış zemin, çelik cetvelle, kalıbın üst kenarı düzeyinde dikkatle düzlenir. Kalıp ve zemin, 1 g duyarlılıkla tartılır (M_2). Şekil 5.14'te görülen sıkıştırılmış zemin, kalıptan çıkarılıp büyükçe bir metal kaba konur. Bu zeminini temsil eden bir numune alınarak su muhtevası ölçülür. Zeminin geriye kalanı, ufalanıp ilgili elekten geçirilir ve deneyin başında hazırlanan numunedan artmış oranla karıştırılır. Böylece elde edilen örneğe, uygun artışlarla su katılıp karıştırılır ve her defasında, aynı işlemler tekrarlanır [35].

Deney, en az beş değer verecek biçime tekrarlanır ve kullanılan su muhtevaları en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren optimum su muhtevalarını içine alan sınırlar arasında değişmelidir [35].



Şekil 5.14. Sıkıştırma işlemi tamamlanmış zemin numunesi

Sıkıştırılmış zeminin yağ birim hacim ağırlık (ρ_n), her numune için aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

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

Burada;

M_1 Kalıp ve tabanın kütlesi, (g),

M_2 Kalıp, tabanı ve tabanı sıkıştırılmış zemin kütlesi, (g),

V Kalıbın iç hacmi, (cm^3) dir.

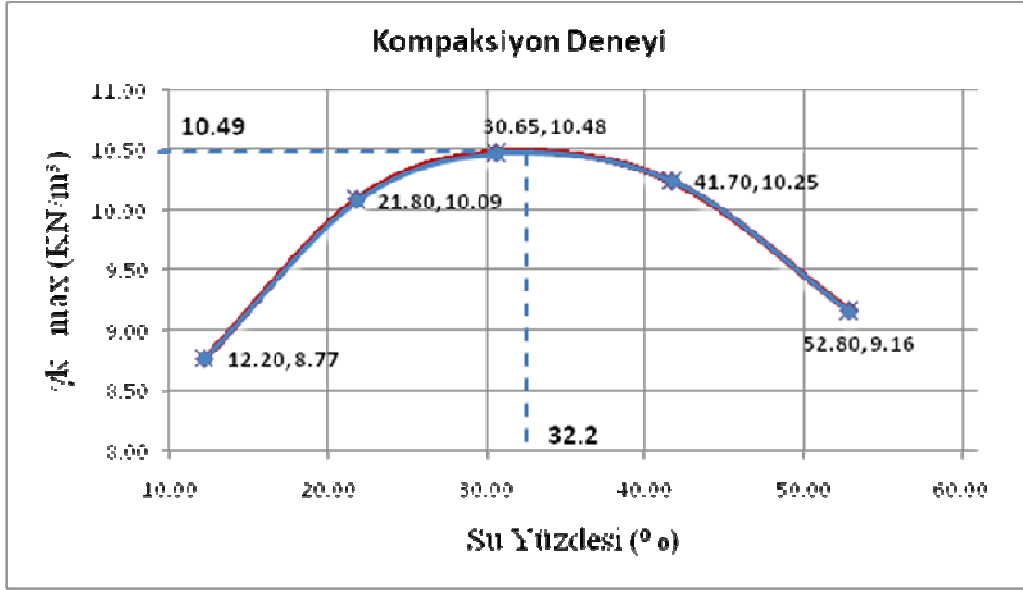
Zeminin kuru birim hacim ağırlığı (ρ_k) aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

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

Burada;

w numunenin su muhtevası,% dir.

Bir seri deney sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlık (ρ_k) ve bunlara karşılık olan su muhtevası değerleri, Şekil 5.15'teki gibi bir grafik kâğıdı üzerine işlenir. Elde edilen noktalar arasından düzgün bir eğri geçirilir ve bu eğri üzerindeki en büyük değer bulunur [35].



Şekil 5.15. Kompaksiyon deneyi örnek grafiği

5.2.6. California taşıma oranı tayini (CBR)

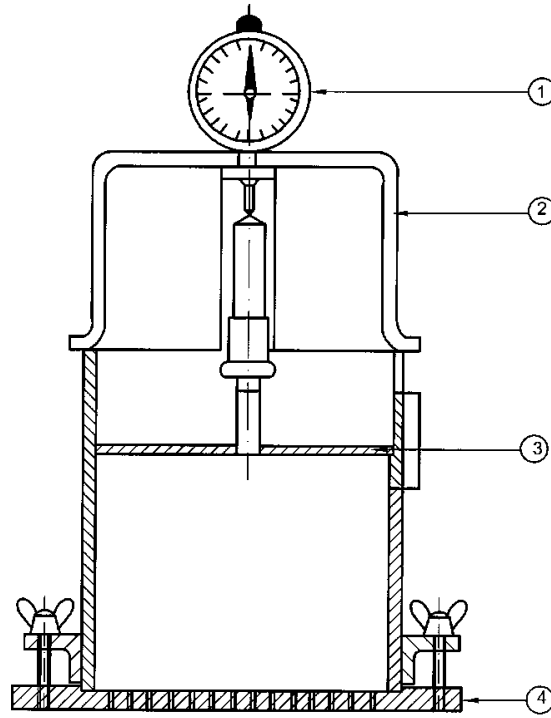
Bu deney, Şekil 5.16'daki alanı 1935 mm olan pistonun belirlenmiş bir hızda zemine itilmesiyle elde edilen yük - penetrasyon bağıntısını kullanarak taşıma oranının bulunmasıyla ilgilidir. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) olarak da bilinen bu deney, kalıbı ve penetrasyon pistonunun boyutları nedeniyle dane boyutu 20 mm'den küçük malzeme için elverişlidir [35].



Şekil 5.16. CBR deney aleti

Bu deney, taşıma oranının % 5'ten küçük çıkacağı düşünülen zeminlerde uygulanmaz. Deney normal zemin iyileştirmelerinde, otoyol, demiryolu ve havaalanı taban ve alt temel gerecinin sıkıştırılmış numunelerinde uygulanır. Deney, 20 mm'lik elekten geçen malzeme üzerinde yapılmalıdır. Deney, genellikle, zeminin kazı anındaki doğal su muhtevasında yapılır, ancak başka su muhtevalarında deneyler de gerekebilir. Değişik su muhtevasında deney yapılacağına, numuneler açıkta kurutulmuş ve 4,75 mm'lik eleğin üstünde kalan toprakların ufalanmış olduğu zemine, istenilen miktarda su eklenerek elde edilir. Bu gibi durumlarda zemini çok iyi karıştırmak ve sıkıştırma işleminden önce kapalı bir kap içerisinde 24 saat bekletmek gerekir [35].

yakanın üst kenarının hemen altında tutulur ve numunenin üstüne gerekli görülen kütleler yerleştirilir. Suyun numunenin üstünde belirmesi için geçen süre gözlenir. Üç gün içinde numunenin üzerinde su görülmemişse numune tümüyle suya boğulur ve normal ıslatma süresini tamamlamaya bırakılır. Normal ıslatma süresi 96 saattir. Islatma sırasında, herhangi bir şişme olup olmadığını ölçmek için numunenin üzerine bir süzgeç kâğıdı ve bir delikli plâka konur ve 0,02 mm bölüntülü göstergesi olan bir komparatör saati yüzeyin hareketini izleyecek biçimde yerleştirilir. Uygun bir tertibat Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Islatma tamamlandıktan sonra numune, su kabından çıkarılır ve 15 dakika süreyle süzölmeye bırakılır. Yaka ve delikli plâka çıkarılır, taban plâkası takılır ve numune 1 g doğrulukla tartılır.



Şekil 5.18. Taşıma Oranı İçin Suda Bekletilen Numunenin Yüzey Hareketini Ölçmeye Yarayan Sacayak ve Ölçüm Düzeni

Kalıp, taban plâkası takılmış ancak üst yüzeyi açık olarak, içindeki numuneyle birlikte basınç cihazının plâkası üzerine yerleştirilir. Numunenin üzerine yol yapısının zemine uygulayacağı yüklere karşılık gerekli görülen kütleler yerleştirilir. Penetrasyon pistonu, taşıma oranı % 30'un altında olan zeminler için 44,15 N'luk bir yük, taşıma oranı % 30'dan yüksek olan zeminler için 220,73 N'luk bir yük

numunenin yüzeyine oturtulur ve dakikada 1,20 mm'lik bir hızla zemine itilir. Penetrasyon işleminin bitiminde piston kaldırılır ve numune yüzeyinde bırakmış olduğu girintiler doldurulup çıkıntılar çelik cetvelle kesilerek numunenin yüzeyi düzlenir. Numunenin her iki yüzü de deneye tâbi tutulacaksa, taban plâkası kalıbın altından çıkarılıp üst yüzüne takılır ve kalıp içindeki numuneyle birlikte ters çevrilir. Aynı işlemler, numunenin diğer yüzü için de tekrarlanır. Penetrasyon deneyleri tamamlandıktan sonra, numunenin iki ucundaki yüzeylerin hemen altından, her biri 350 g dolayında olan numuneler alınıp, bunların su muhtevaları TS 1900-1/2006'ya bağlı kalınarak ölçülür [35].

%100 taşıma oranı değerine karşılık olan standard yük penetrasyon eğrisi şu değerlerle tariflenir: 1,25 mm'lik penetrasyonda 0,84 kN, 2,5 mm'de 13,2 kN ve 5,0 mm'de ise 20 kN'dur. Belirli bir penetrasyonu sağlayan yükün, aynı penetrasyonu standard eğri üzerinde sağlayan yüke oranı, o penetrasyondaki taşıma oranı değeri olarak tanımlanır. Taşıma oranı değeri, 2,5 mm'lik ve 5,0 mm'lik penetrasyonlarda hesaplanır ve elde edilen iki değerden, yüksek olanı zeminin taşıma oranı değeri olarak kabul edilir [35].

Taşıma oranı, % 30'a kadar değerler için % 1 yakınlıkla, % 30 ile % 100 arasındaki değerler için % 5 yakınlıkla (% 30, % 35, % 40, gibi) ve % 100'den yüksek değerler için de % 10 yakınlıkla (% 100, % 110, % 120, gibi) verilir. Sıkıştırma metodu ile ilgili ayrıntılar, zeminin kuru birim hacim ağırlığı, deneyden sonraki su muhtevası veya suda bekletilmişse, bu bekletilme süresi ayrıca belirtilmelidir. Genellikle, deney sonuçları numunenin alt ve üst ucu için ilgili su muhtevaları ile birlikte, ayrı ayrı verilir. Ancak sonuçlar, ortalama taşıma oranının % 10'undan daha az bir sapma gösteriyorsa sonuçların ortalaması verilir [35].



Şekil 5.19. Numunenin suda bekletilmesi

Numunelerin standart kompaksiyon işlemi ile tamamlandıktan sonra istenilen süredeki kür aşamaları gerçekleştirilir. Kür süresi tamamlanan CBR numunesi suyla dolu olan havuza yerleştirilir. CBR deney numuneleri zemin seviyesinde su dolu havuzda 3 gün süre ile bekletilir ve numunede meydana gelen şişme yüzdesine (miktarına) bakılır. 3. Gün sonunda numunede ölçülebilir miktarda şişme olmaması halinde 1 gün süre de numune tamamen suya gömülü olarak havuzda bekletilir. 4. Gün sonunda numunede meydana gelen şişme miktarı ölçülür ve 15 dakika süre numune süzölmeye bırakılır ve daha sonra numune CBR deneyine tabi tutulur (Şekil 5.19).

5.3. Deney Sonuçları

Çalışmada kullanılacak malzemelerin hepsi TS 1900-1/2006 [35] ve TS 1900-2/2006 [33] standartlarına uygun sonuçlar elde etmek için 40 nolu (425 μm) elekten elenerek kullanılmıştır. Sırası ile özgül ağırlık, atterberg limitleri, sınıflandırma deneyleri, standart kompaksiyon deneyi ve california taşıma oranı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen verilere göre kompaksiyon deneyi yapılmıştır ve optimum su muhtevastaki maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri

bulunmuştur. Elde edilen optimum su muhtevasında atık olarak kullanılan polisaj malzemesinin oranının sabit tutularak esas zeminimize uçucu kül ve kireç katkı maddeleri de eklenmiş olup 20 farkı numuneye CBR deneyi uygulanmıştır. CBR deneyleri günlük, 7, 14, 28 ve 56 günlük kür işlemlerine tabi tutulmuştur.

5.3.1. Özgül ağırlık deneyi sonuçları

5.3.1.1. Kullanılan malzemeler için özgül ağırlık analizi

Çalışma da kullanılan her malzemenin özgül ağırlık değeri deneylerle hesaplanmıştır. Hesaplanan özgül ağırlık değeri her malzeme için yapılan 5 deney sonucunun ortalaması alınarak belirlenmiştir. Tablo 5.1'de malzemelerin deneyler sonucu hesaplanan özgül ağırlık değerleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Kullanılan malzemelerin özgül ağırlık değerleri

Kullanılan malzemeler	Uçucu kül	Polisaj	Kaolen	Kireç
1. Deney	1.858	2.48	2.53	2.461
2. Deney	1.825	2.49	2.686	2.37
3. Deney	1.856	2.49	2.551	2.44
4. Deney	1.792	2.47	2.564	2.343
5. Deney	1.837	2.54	2.543	2.452
Ortalama Özgül Ağırlık	1.833	2.49	2.57	2.41

Yapılan özgül ağırlık deneyleri tam olarak standartlara uygun olarak yapılmıştır. Deneyler sonucu bulunan özgül ağırlık değerleri, literatür ile karşılaştırıldığında standart olarak kullanılan özgül ağırlık değerleri sınırlamaları arasındadır.

Kilin genel olarak özgül ağırlığı 2,15 – 2,75 arasında değişmektedir. Bu değerler kilin genel özgül ağırlık değerleri olup kaolenin ise genel özgül ağırlığı 2,55 – 2,65 arasında değişmektedir. Çalışmada elde edilen özgül ağırlık değeri de 2,57 olarak bulunduğu için bulunan değer standartlara uygundur.

Kirecin özgül ağırlık değeri genel olarak 2.20-2.45 değerleri arasında olduğu bilinmektedir. Bu veriler ışığında yapılan çalışmalar sonucu elde edilen kirecin özgül ağırlık değeri 2.41 olarak bulunmuştur ve bu değerimizde kabul gören kireç özgül ağırlığı değerini sağlamaktadır.

Polisaj malzemesi daha önce kullanılan bir malzeme olmadığı için bu malzeme ile ilgili genel bir özgül ağırlık değeri bulunmamaktadır. Diğer malzemelerde olduğu gibi polisaj malzemesi içinde 5 tane özgül ağırlık deneyi yapılarak bu değerlerin ortalaması alınarak polisaj malzemesinin özgül ağırlık değeri bulunmuştur. Polisaj malzemesinin özgül ağırlık değeri 2.49 olarak bulunmuştur.

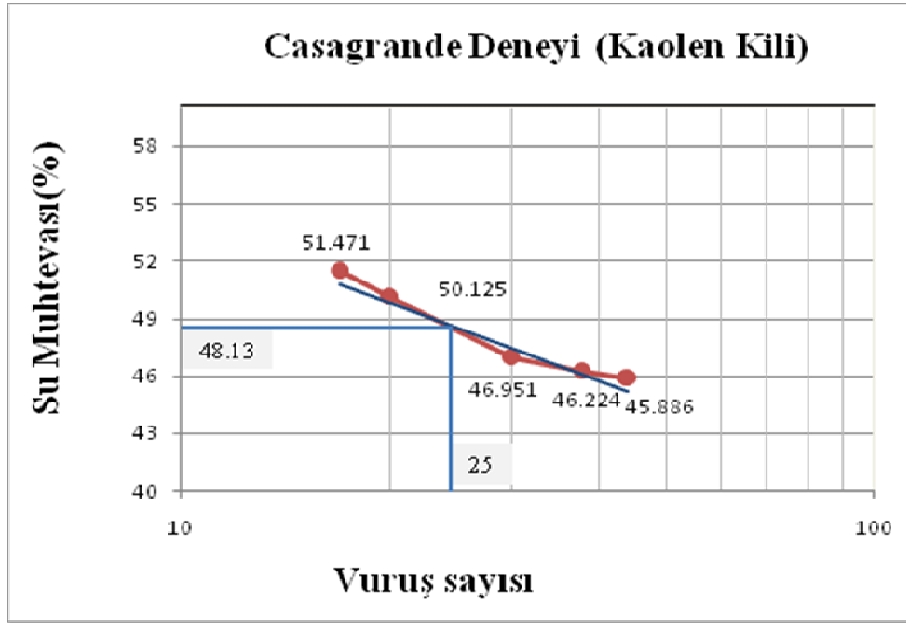
5.3.2. Atterberg limitleri deneyleri sonuçları

5.3.2.1. Kaolen kili casagrande likit limit deneyi

Kaolen kilinin sınıflandırılması için yapılan Atterberg limiti deneylerinden casagrande deneyi sonuçları Tablo 5.2'de gösterilmiştir. Sonuçlardan elde edilen verilere göre kaolen kiline ait casagrande deneyi likit limit grafiği de Şekil 5.19'da verilmiştir.

Tablo 5.2. Kaolen Kili için Casagrande Deneyi Sonuçları

	Vuruş sayısı	Su muhtevası (%)
Casagrande 1.Deney Vuruş Sayısı	44	45.886
Casagrande 2.Deney Vuruş Sayısı	38	46.224
Casagrande 3.Deney Vuruş Sayısı	30	46.951
Casagrande 4.Deney Vuruş Sayısı	20	50.125
Casagrande 5.Deney Vuruş Sayısı	17	51.471
Likit Limit Değeri	25	50



Şekil 5.20. Kaolen kili casagrande deneyi likit limit grafiği

Casagrande deneyi yöntemi ile kaolen kilinin likit limit değeri %48,13 olarak bulunmuştur. Bulunan su muhtevası değeri istenilen şartname sınırı olan ≤ 60 olma zorunluluğuna uygundur.

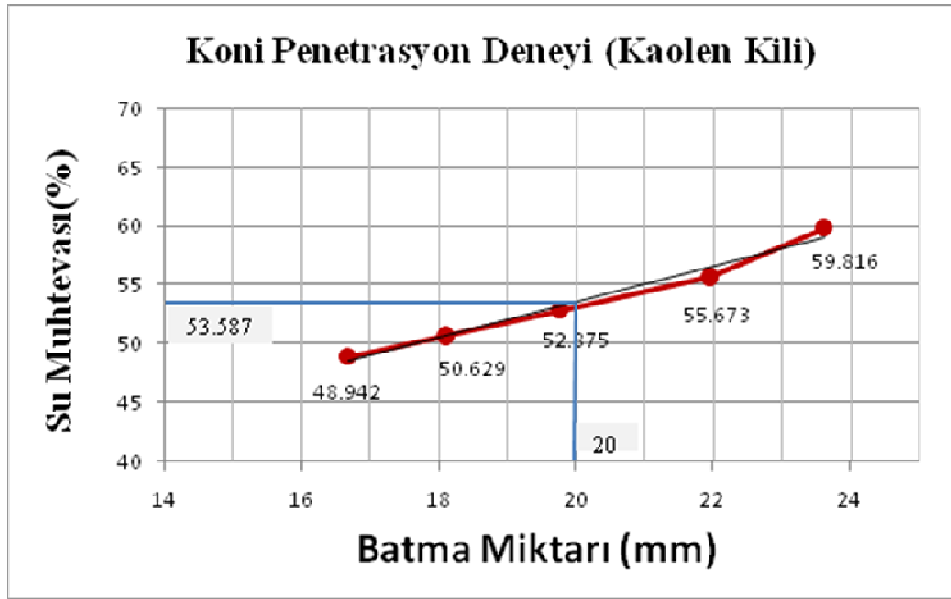
Casagrande deneyinde cihazın çevirme kolunun saniyede 2 vuruşa denk gelecek şekilde çevrilmesi gerektiği için olası bir yanlışlıkta deneyin yanlış sonuç verme ihtimali yüksektir. Bunun için likit limit tayini deneylerinde konipenetrasyon deneyleri daha ön plana çıkmaktadır.

5.3.2.2. Kaolen kili konipenetrasyon likit limit deneyi

Likit limit tayinin için ince taneli malzemelerde 2 çeşit deney vardır. Kaolen kiline yapılan casagrande deneyinden sonra kaolen kiline konipenetrasyon deneyi de yapılmıştır. Kaolen kiline uygulanan konipenetrasyon deneyi sonucu elde edilen veriler Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Elde edilen verilerden yararlanılarak kaolen kiline ait likit limit grafiği de Şekil 5.20'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Kaolen Kili için Konipenetrasyon Deneyi Sonuçları

	Batma miktarı (mm)	Su muhtevası (%)
Düşen Koni 1.Deney Batma Miktarı	16.68	48.942
Düşen Koni 2.Deney Batma Miktarı	18.11	50.629
Düşen Koni 3.Deney Batma Miktarı	19.78	52.875
Düşen Koni 4.Deney Batma Miktarı	21.96	55.673
Düşen Koni 5.Deney Batma Miktarı	23.63	59.816
Likit Limit Değeri	20	54



Şekil 5. 21. Kaolen kiline ait konipenetrasyon likit limit grafiği

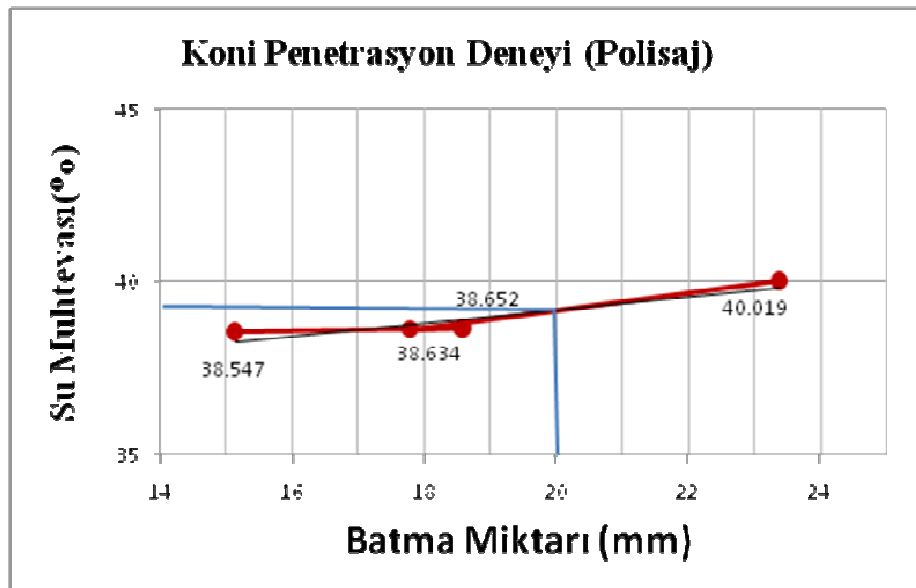
Şartnameye göre zemin iyileştirmesinde kullanılacak olan malzemelerin likit limit değerleri ≤ 60 olma zorunluluğu vardır. Likit limit deneyleri sonucunda bulunan su muhtevaları değerleri 60'dan büyük çıkması durumunda o malzemenin zemin iyileştirmesinde kullanılamayacak olduğunu gösterir. Grafiğe göre bulunan %53,587'lik su muhtevası bu malzemenin iyileştirme malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

5.3.2.3. Polisaj likit limit deneyi

Polisaj malzemesinin zemin sınıfını belirlemek içinde likit limit tayini yapılmıştır. Yapılan likit limit deneyi sonucu Tablo 5.4’de gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Polisaj için Konipenetrasyon Deneyi Sonuçları

	Batma miktarı (mm)	Su muhtevası (%)
Düşen Koni 1.Deney Batma Miktarı	15.13	38.547
Düşen Koni 2.Deney Batma Miktarı	20.09	41.746
Düşen Koni 3.Deney Batma Miktarı	18.59	38.652
Düşen Koni 4.Deney Batma Miktarı	17.79	38.634
Düşen Koni 5.Deney Batma Miktarı	23.39	40.019
Likit Limit Değeri	20	39.8



Şekil 5.22. Polisaj malzemesi için likit limit grafiği

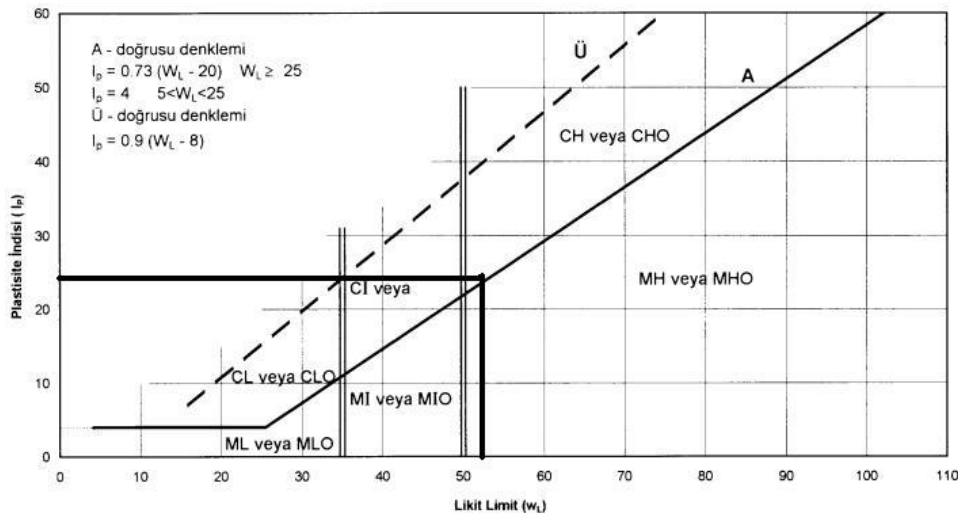
Konipenetrasyon yöntemi ile yapılan polisaj malzemesinin likit limit tayini için bulunan su muhtevası değeri Şekil 5.21’de verilmiştir. Bulunan sonuçlar malzemelerin plastik limit deneyi sonucunda bulunacak değer ile beraber kullanılarak zemin sınıflandırılması yapılacaktır.

Grafikten de anlaşıldığı gibi polisaj malzemesinin likit limit değeri %39,8 olarak bulunmuştur. Bulunan değer KTŞ'de istenen değer sınırları içerisinde olduğu için doğru sonuç olarak kabul edilmiştir.

5.3.2.4. Plastik limit deneyi

Zeminlerin sınıflandırılması için likit limit değerlerinin yanı sıra plastik limit değerlerine de ihtiyaç vardır. Bulunan likit limit değerlerinden plastik limit (P_L) değerleri çıkarılarak plastisite indisi (PI) bulunur ve bu değer de plastisite kartında likit limit değeri ile beraber kullanılarak zeminin hangi tür sınıf olduğu bulunmaktadır.

Kaolen kiline yapılan Plastik Limit deneyi sonucu numunenin Plastik Limit değeri %30.36 olarak bulunmuştur. Bu sonuçtan sonra kaolen kiline ait Plastisite İndisi 23.22 olarak bulunmuştur. KTŞ'ne göre Plastisite İndisi 35'ten düşük olan numuneler iyileştirme çalışmalarında kullanılabilir.



Şekil 5.23. Kaolen kilinin plastisite kartındaki yeri ve zemin sınıfı

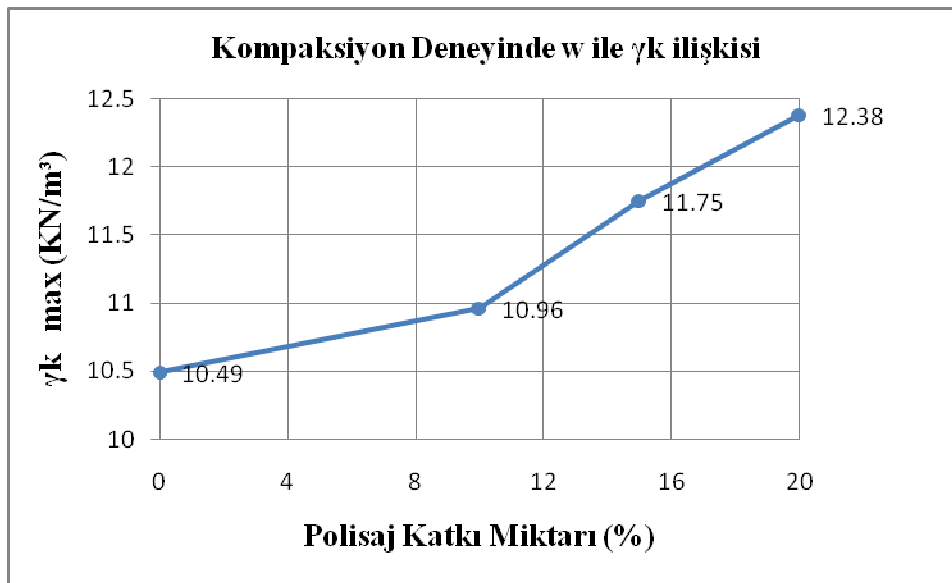
Kaolen kilinin plastisite kartına bakıldığında CH (Yüksek Plastisiteli Kil) sınıfı zemine ait olduğu görülmektedir (Şekil 5.22).

Polisaj malzemesinin yüzeyi kaygan bir yapıya sahip olduğu için bu malzemeye plastik limit deneyi uygulanamamıştır. Yapılan denemeler sonucunda polisa malzemesinin plastik limit değeri bulunamamıştır. Plastik limit değeri bulunamayan malzeme için de Plastisise İndisi hesaplanamamaktadır.

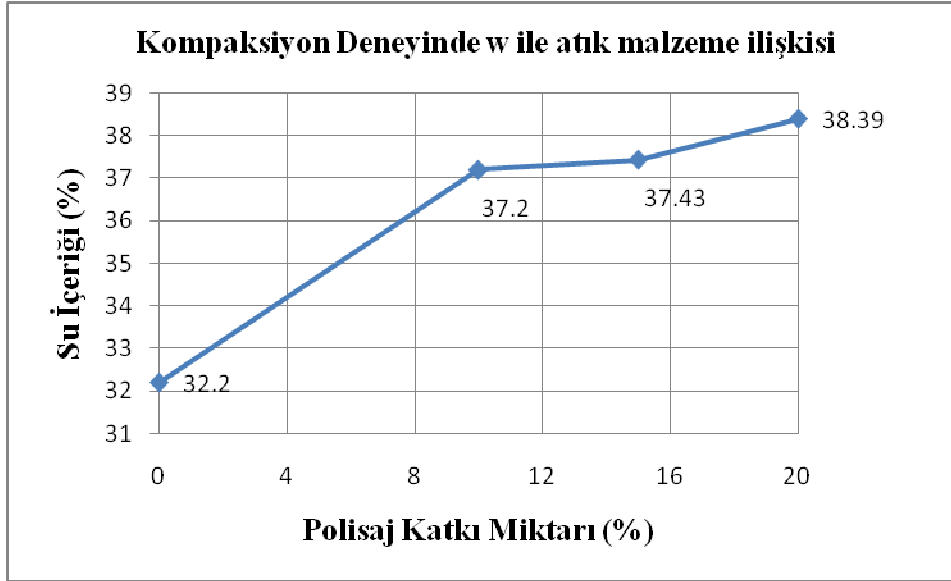
5.3.3. Kompaksiyon deneyi sonuçları

Kompaksiyon deneyinde esas zemin numunesi olarak kaolen kili kullanılmıştır. Bu zemini iyileştirmek için atık malzemeler olarak polisaj ve uçucu kül ile beraber kireç kullanılmıştır. Çalışmada kireç ve uçucu kül değerleri % 15 oranında sabit tutularak polisaj malzemesinin oranı % 10, %15, %20 oranlarında konularak bu değerler arasındaki farkın gözlenmesi amaçlanmıştır. Katılan her polisaj malzemesinin oranında su yüzdesi % 10'dan başlanarak % 50 oranına kadar yükseltilmiştir. Böylece elde edilen her yeni zemin numunesi için bir optimum su içeriği (W_{opt}) ve bu optimum su içeriğine denk gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunur.

Yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda su muhtevası ile maksimum kuru birim ağırlık değerleri arasındaki ilişkiyi gösterebilmek için Şekil 5.23 çizilmiştir.



Şekil 5.24. Kompaksiyon Deneyinde γ_k ve Polisaj Katkısının İlişkisi

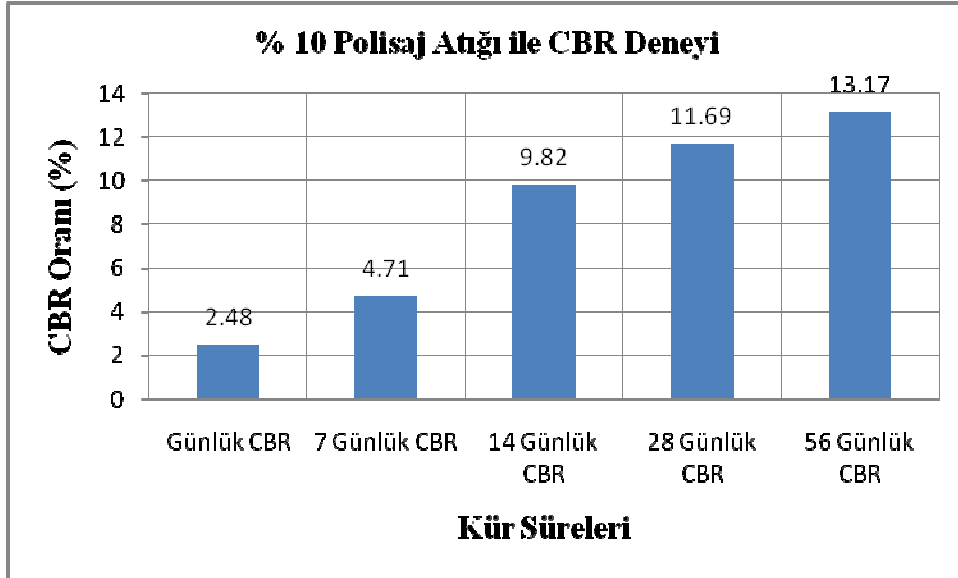


Şekil 5.25. Kompaksiyon Deneyinde Su İçeriği ve Polisaj Katkısının İlişkisi

Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre çizilen Şekil 5.24'teki grafik kullanılan polisaj atığı ile su içeriği arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

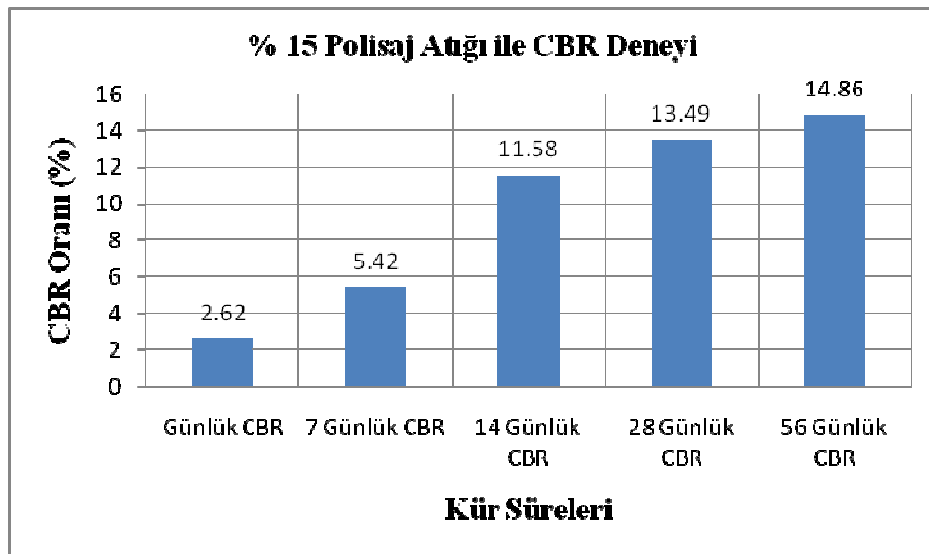
5.3.4. CBR deneyi sonuçları

Kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine göre her zemin karışımı numunelere CBR deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan her zemin numunesi için günlük, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlere tabi tutulmuştur. Bu kür zamanında numuneler dış ortamdan etkilenmeyecek şekilde sabit nem ve sabit sıcaklıkta bir durumda bekletilmiştir. Kompaksiyon deneyi sonucu en uygun zemin numunesi olarak % 20 polisaj katkısı ile yapılan zemin numunesi olarak bulunmuştur. CBR deneyleri sadece % 20 polisaj katkısında bulunmuş olan su içeriği ile elde edilecek olan zemin numunelerine yapılmıştır.



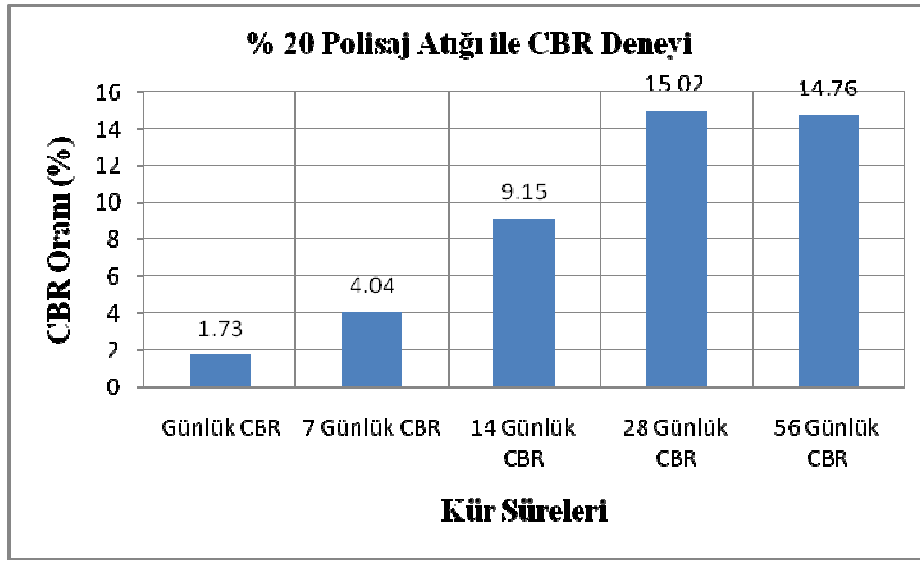
Şekil 5.26. % 10 Polisaj Katkısı ile CBR Deneyi Sonuçları

CBR deneyinde yapılan %10 polisaj katkılı zemin numunesi ile elde edilen taşıma gücü dayanımları Şekil 5.25'te görülmektedir. Elde edilen yeni zemin numunesi 5 ayrı kür sürelerinde deneye tabi tutulmuş ve sonuçları bir grafikte toplanmıştır. Günlük kürsüz zemine uygulanan deney sonucu elde edilen taşıma gücü dayanımı 2.48 iken 56 günlük kür süresi sonunda zemin numunesine uygulanan deney sonucu taşıma gücü dayanımı 13.17 gibi bir değere yükselmiştir. Bu sonuçlara göre 56 günlük kürden elde edilen dayanım günlük elde edilen dayanıma göre %530'luk bir artış göstermiştir.



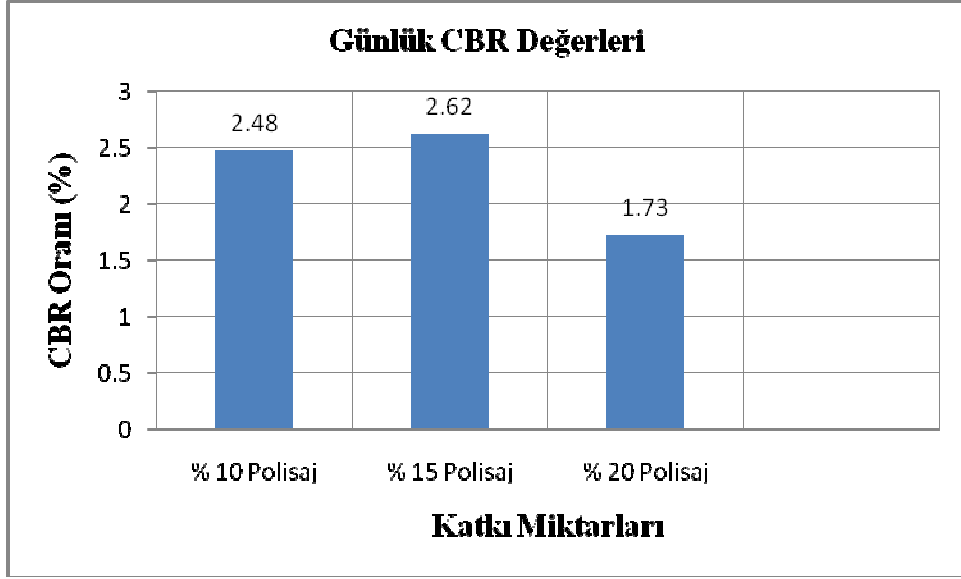
Şekil 5.27. % 15 Polisaj Katkısı ile CBR Deneyi Sonuçları

Polisaj atığı ile yapılan bir başka zemin numunesinden elde edilen taşıma gücü dayanımları Şekil 5.26'da verilmiştir. % 15 katkılı polisaj atığı ile hazırlanan zemin numunesine uygulanan CBR deneyleri sonucu elde edilen taşıma gücü dayanımları, % 10 polisaj katkılı zemin numunesindeki gibi kür süreleri uzadıkça elde edilen dayanımlarda artış göstermiştir. % 15 polisaj katkılı zemin numunesinden elde edilen günlük CBR değeri 2.62 iken 56 gün sonundaki elde edilen CBR 14.86 gibi yüksek bir değere ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre 56 günlük CBR değeri günlük CBR değerine göre % 560 gibi bir yükselme göstermiştir.



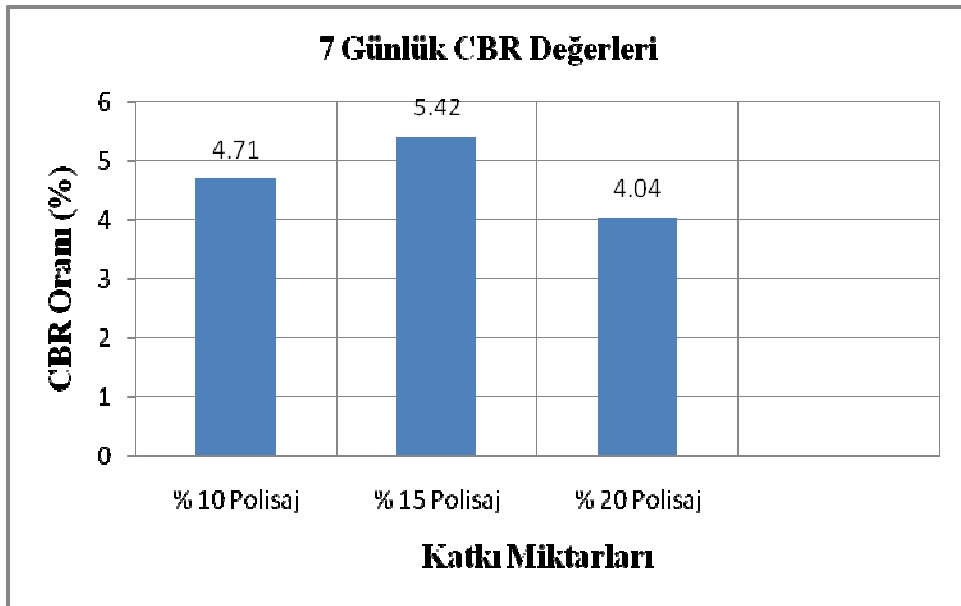
Şekil 5.28. % 20 Polisaj Katkısı ile CBR Deneyi Sonuçları

% 20 polisaj katkılı zemin numunesinden elde edilen maksimum taşıma gücü dayanımı diğer zemin numunelerinin aksine en yüksek taşıma gücü dayanımına 28 gün sonunda ulaşmıştır. Günlük CBR değeri 1.73 iken 28 gün sonunda bu zeminin maksimum taşıyabileceği CBR değeri 15.02 değerine kadar yükselmiştir. Bu değer % 10 ve % 15 katkılı polisaj atıkları ile hazırlanan zemin numunelerine göre daha yüksek bir dayanım göstermiştir. % 20 polisaj atığı ile hazırlanan bu numunede de 28 gün sonundaki CBR değeri günlük CBR değerine göre % 860 gibi bir artış göstermiştir (Şekil 5.27).



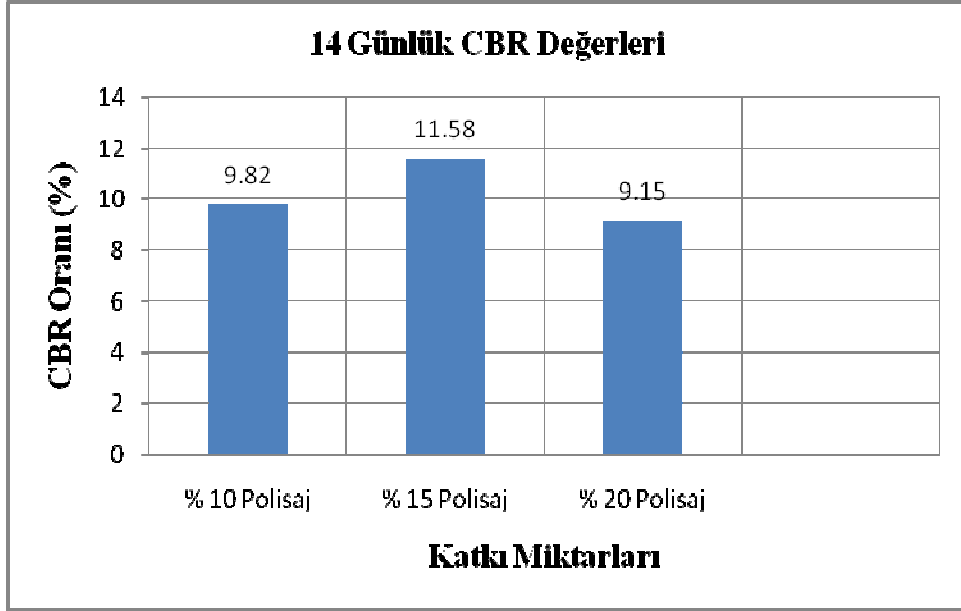
Şekil 5.29. Günlük CBR Değerleri Sonuçları

% 10, % 15 ve % 20 polisaj katkılı atık malzemesinin ve diğer bileşenlerin homojen karışımı ile hazırlanan zemin numunelerinin günlük kürsüz CBR deneyi sonuçları Şekil 5.28’de gösterilmiştir. Günlük CBR deneyi sonucunda % 20 polisaj katkılı zemin numunesinin taşıdığı yük 1.73 iken % 15 katkılı zemin numunesi günlük deneyler sonucunda 2.62’lik değerle maksimum taşınabilen zemin numunesi olmuştur.



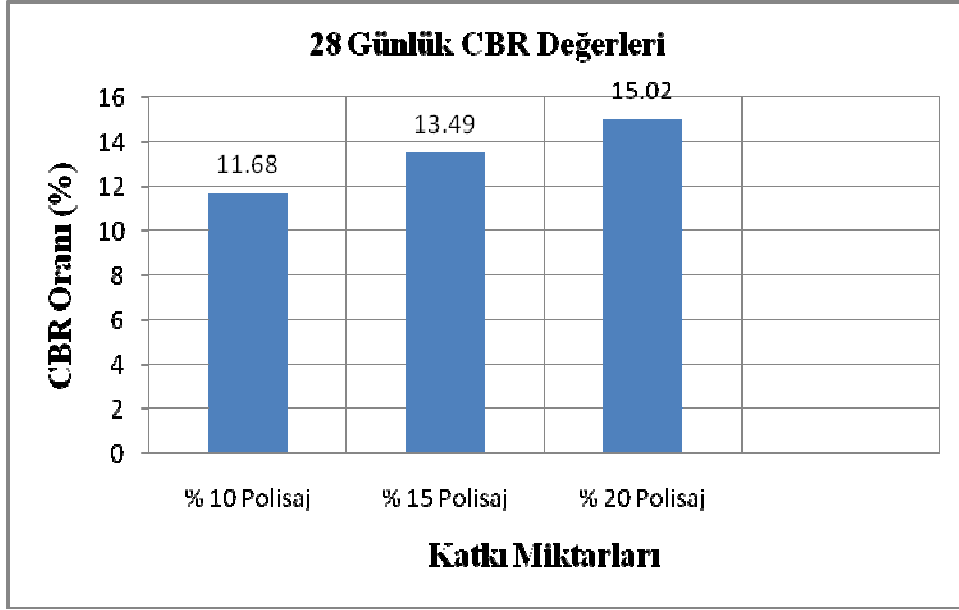
Şekil 5. 30. 7 Günlük CBR Değerleri Sonuçları

7 günlük kür süreleri sonunda CBR deneyine tabi tutulan tüm karışımların taşıdıkları yük dayanımları Şekil 5.29’da verilmiştir. En düşük dayanımı % 20 polisaj katkılı (4,04) zemin numunesi gösterirken en yüksek dayanıma % 15 polisaj katkılı (5,42) zemin numunesinde ulaşılmıştır.



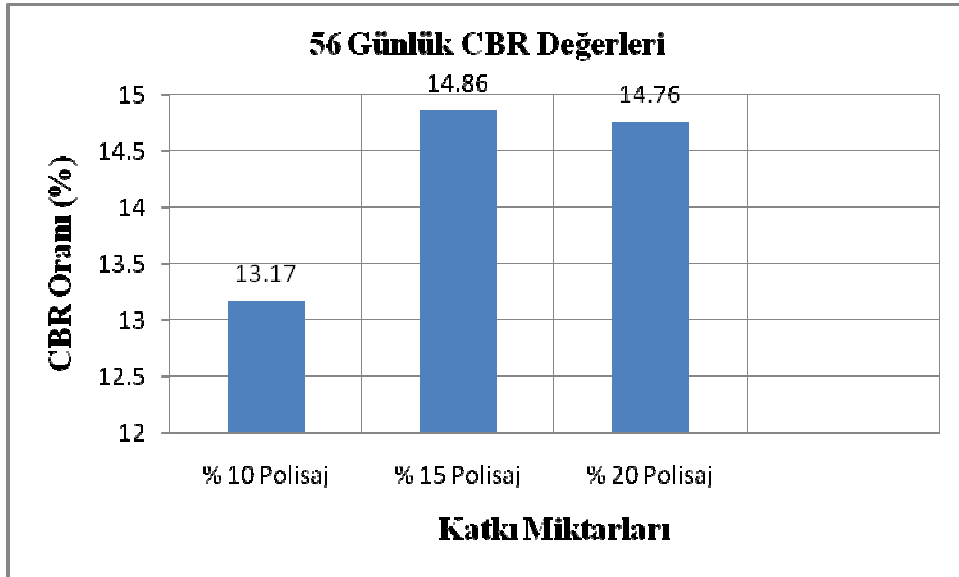
Şekil 5.31. 14 Günlük CBR Değerleri Sonuçları

14 günlük kür süreleri sonunda hazırlanan zemin numunelerinin taşıdıkları yüklerde günlük ve 7 günlük kür sürelerindeki deneylere göre farklılıklar gözlemlenmiştir. Diğer numunelerde en düşük taşıma gücü % 20 polisaj katkılı (14,76) zemin numunesinden elde edilirken 14 gün kür sonunda elde edilen en düşük taşıma gücü dayanımı % 10 polisaj katkılı (13,17) zemin numunesinden elde edilmiştir. En yüksek taşıma gücüne sahip zemin numunesi ise % 15 polisaj katkılı (14,86) zemin numunesi olmuştur (Şekil 5.30).



Şekil 5.32. 28 Günlük CBR Değerleri Sonuçları

28 günlük kür süresi sonunda CBR deneyine tabi tutulan zemin numunelerinden elde edilen taşıma gücü dayanımları lineer bir artış göstererek maksimum değerine % 20 polisaj katkılı (15,02) zemin numunesinde ulaşmıştır. Bu değerde CBR deneylerinin tüm kür süreleri içerisinde ulaşılan maksimum CBR değeri olmuştur (Şekil 5.31).



Şekil 5.33. 56 Günlük CBR Değerleri Sonuçları

56 günlük kür süresi sonunda % 15 polisaj katkılı zemin numunesine 14.86 gibi yüksek bir CBR değeri ile en yüksek taşıma gücüne ulaşıdır. 28 gün sonunda % 20 polisaj katkılı zemin numunesinden elde edilen 15.02'lik taşıma gücü dayanımı maksimum çıkmasına rağmen bu çalışmada 56 gün sonunda ulaşılan değerler numunelerin taşıyabileceği yükler olarak kabul dirmiştir. 56 gün sonunda % 15 polisaj katkılı zemin numunesinden elde edilen 14.86 CBR oranı bu çalışmada ulaşılan en yüksek taşıma gücü dayanımı olmuştur.

BÖLÜM 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu bölümde çalışma boyunca yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ve sonuçların analizine yer verilmiştir. Kullanılan atık malzemeler ile zemin numunesinin taşıyabileceği yüklerde meydana gelen artışlara, atık malzemelerin kullanımı ile çevreden ne kadar bir atığın yok edildiği konuları verilmiştir.

Kaolen kilini sınıflandırabilmek için gerekli olan likit limit değerimiz (W_L) % 53.587 olarak bulunmuştur. KTŞ'ne göre iyileştirme ve dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin likit limit değerleri ≤ 60 olmak zorundadır. Bulunan % 53.587'lik değer bu şartı sağladığı için kaolen kili zemin iyileştirme çalışmalarına uygun bir malzemedir. Kaolen kilinin Plastik Limit değeri ise % 30.36 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre kaolen kiline ait Plastisite İndis değeri ise 23.22 olarak bulunmuş ve bu değer Plastisite kartında Likit limit değeri ile beraber kullanılarak kaolen kiline ait zemin sınıfı cinsi belirlenmiştir. Kaolen kilinin plastisite kartındaki yeri CH (Yüksek Plastisiteli Kil) sınıfı zemini olmuştur.

Polisaj malzemesinin kil esaslı bir malzemedir ve genellikle parlatici malzeme olarak kullanılmasından dolayı fiziksel yapısı çok kaygan bir malzemedir. Bundan dolayı da polisaj malzemesine ne casagrande nede plastik limit deneyleri yapılamamıştır. Polisaj malzemesinin likit limit değerini bulmak için konipenetrasyon deneyi uygulanmış ve polisajın likit limit değeri % 39.8 olarak bulunmuştur. Plastik limit değeri bulunamadığı için Plastisite İndiside bulunamamıştır ve zemin sınıflandırması da yapılamamıştır.

Kaolen, kireç, polisaj ve uçucu kül ile homojen olarak karıştırılmış zeminlerde deneylere başlamadan önce sadece kaolen kili ile yapılan kompaksiyon işlemi % 32,2 su içeriğinde $10,49 \text{ kN/m}^3$ lük bir kuru birim hacim ağırlık değeri elde edilmiştir.

Kaolen zeminine % 15 Kireç + % 15 UK + % 10, 15 ve 20 oranlarında Polisaj malzemesi eklenerek elde edilen yeni zeminler içinde kompaksiyon deneyleri uygulanmıştır. Sadece kille yapılan zemin numunesi deneyinde elde edilen 10.49 kN/m³'lük bir γ_k değeri % 20 polisaj malzemesine % 38.19 su eklenerek 12.38 kN/m³ değerine kadar yükseltilmiştir. Bulunan değerlere göre sadece kil yapılan zemin numunesini iyileştirmek amacı ile yapılan çalışmada maksimum kuru birim ağırlık değeri yaklaşık olarak %20'lik bir artış meydana getirmiştir.

Kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen verilere göre polisaj miktarlarında ki her bir artışa göre elde edilen optimum su içeriklerinin de arttığı gözlemlenmektedir. Kompaksiyon deneyi sonucunda en uygun zemin numunemizi 28 günlük % 20 polisaj katkısı (12.38 kN/m³) ile yapılan zemin numunesinden elde edilmiştir.

% 15 kireç + % 15 UK + % 60 kaolen + % 10 polisaj atığı ile hazırlanan zemin numunesinin en düşük taşıma oranı günlük CBR deneyinden (2.48) edilirken en büyük CBR değeri ise 56 gün kürde (13.17) beklemiş ve ardından CBR deneyine tabi tutulmuş numunemizden alınmıştır. 56 gün kürde bekleyerek elde edilen numunenin taşıma oranı % 13.17 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre 56 günlük kürden elde edilen dayanım günlük elde edilen dayanıma göre %530'luk bir artış göstermiştir.

% 15 kireç + % 15 UK + % 55 kaolen % 15 polisaj atığı ile hazırlanan zemin numunesinden en düşük taşıma oranına sahip günlük kür (2.62) sonunda deneye tabi tutulan zemin numunesi olurken en yüksek dayanıma sahip zemin numunesi ise 56 gün (14.86) sonunda CBR deneyine tabi tutulan zemin numunesinden elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre 56 günlük CBR değeri günlük CBR değerine göre % 560 gibi bir yükselme göstermiştir.

% 15 kireç + % 15 UK + % 50 kaolen % 20 polisaj atığı ile hazırlanan zemin numunesinden en düşük taşıma oranına sahip günlük kür (1.73) sonunda deneye tabi tutulan zemin numunesi olurken en yüksek dayanıma sahip zemin numunesi ise 28 gün (15.02) sonunda CBR deneyine tabi tutulan zemin numunesinden elde edilmiştir.

% 20 polisaj atığı ile hazırlanan bu numunede de 28 gün sonundaki CBR değeri günlük CBR değerine göre % 860 gibi bir artış göstermiştir.

Kompaksiyon deneylerinde ulaşılan sonuçlara göre en yüksek kuru birim ağırlık değeri (12.38 kN/m^3) % 15 kireç + % 15 UK + % 50 kaolen + % 20 polisaj katkılı zemin numunesinden elde edilmesine rağmen CBR deneyleri sonuçları dikkatlice incelendiğinde en yüksek taşıma oranına (14.86) sahip zemin numunesi % 15 kireç + % 15 UK + % 55 kaolen + % 15 polisaj katkılı numunesinden elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ileriki aşamalarında numunelere permeabilite, kayma dayanımı ve esneklik modülü hesaplamaları da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] SARIİZ, K., NUHOĞLU, Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciligi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, No: 62, 452 s., Eskişehir, 1992
- [2] CÖMERT, A.T., Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyona Etkileri, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi,1-43 S., Sakarya, 2005
- [3] Karayolu Teknik Şartnamesi, Bayındırlık Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2006.
- [4] TS EN 459-1:2010, Yapı Kireci ve Yapılar , Çimento, Kireç, Harç, Ocak 2011
- [5] Uyum Sürecinin Sağlıklı Planlanması Bağlamında Avrupa Birliğinde Kireç Sektörü, T.C. Çevre Bakanlığı, Ankara 2009
- [6] ÖZDEMİR, A., ÖZDEMİR, M., Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri, Sondaj Dünyası, Sayı 3, Ocak 2007
- [7] AKYARLI, A., KAVAK, A., ATAY, S., ALKAYA, S., Killi Zeminlerin İyileştirilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, Trabzon, 2006
- [8] DUNLOP, G., Katkı Maddelerinin Çeşitleri ve Bunların Zemin Özelliklerine Etkileri, 1977
- [9] YALÇIN, M., Çevresel Kirlilik Şartlarının Bentonit Kilinin Şişme/Büzülme Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim 1997

- [10] GARAİSAYEV, S., Şişen Killerin Kimyasal Yöntemlerle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Haziran 2008
- [11] ALKAYA, D., Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilizesine Etkisi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2002
- [12] TAN, O., İYİSAN, R., Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu, ZMTM 6. Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Ün., s. 417-426, İzmir, 1996
- [13] ALATAŞ, T., Afşin–Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1996
- [14] Linyit Sektörü Raporu, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Kömür İşletmeleri Kurumu, Ankara, Mart 2010
- [15] Kömür Sektörü Raporu, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Kömür İşletmeleri Kurumu, Ankara, Mart 2010
- [16] TS EN 450-1, Uçucu Kül - Betonda Kullanılan -Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, T.S.E., Ankara, Nisan 1998
- [17] TÜRKER, P., ERDOĞAN, B., Türkiyede ki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, AR-GE TCMA, 2004 Ankara
- [18] YILMAZ, Ş., Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, 1992
- [19] ASTM C 618, Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM, 1991
- [20] AYTEKİN, S., GÜNEYLİ, H., YÜKSEL, Ö., Uçucu Küllerin Killi Zeminler Üzerinde ki Etkileri, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Aralık 2008

- [21] TÜRKER, P., ERDOĞAN, D., KATNAŞ, F., YEĞİNOBALI, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ar-ge Enstitüsü, Ankara, i-ii, 2004
- [22] MISRA, A., BİSWAS, D., UPADHYAYA, S., Physico-Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly Ash-Clay Mixtures, Fuel, 84, 11, 1410-1422, 2005
- [23] ERDEMİŞ, S., Termik Santral Artık Uçucu Küllerinin Sinterleme Davranışına B203'ün Etkisi, Bitirme Ödevi, Sakarya Üniversitesi, 2001
- [24] ARORA, S., AYDİLEK, A.H., Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials, Journal of Materials in Civil Engineering, 17, 640-649, 2005
- [25] DIGIOA, A.M., HUZZO, W.L., Fly Ash Structural Fiil, Journal of the Power Division, ASCE, Vol.98, No:P01, s. 77-93, 1972
- [26] YILMAZ, G., ÖZSOY, E.A., ÇETİN, M., Seyitömer Uçucu Küllerinin Killerle Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Konya, 841-848, 2008
- [27] BAYKAL, G., EDİNÇLİLER, A., SAYGILI, A., Karla Sıkıştırılmış Uçucu Külün Mikroyapısı ile Mühendislik Özelliklerinin İlişkilendirilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, Trabzon, 2006
- [28] ŞENOL, A., GÜMÜŞER, C., Uçucu Kül ve Polipropilen Elyafarla Stabilize Edilmiş Zayıf Zeminlerin Analizi, Üçüncü Geoteknik Sempozyumu, Adana, 277-289, 2009
- [29] LEE, SEUNG, W., FİSHMAN, K.L., Resilient and Plastic Behavior of Classifier Tailings And Fly Ash Mixtures, Transport Res Rec 1418, 51-59, 1993
- [30] ARSLAN, V, İ., Biyoliç Yöntemiyle Endüstriyel Hammaddelerden Safsızlıkların uzaklaştırılmasının Araştırılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2008

- [31] DPT Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu, Ankara, 2005.
- [32] POLAT, H., POLAT, M., ŞEKEROĞLU, K., Uçucu Kül ve Doğal Zeolitin Beraber Kullanılarak Borun Atık Sulardan Uzaklaştırılması, İzmir, Mayıs 2008
- [33] TS Standardı TS-1900-2/2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, Bölüm 2, Mekanik Özelliklerin Tayini, Mart 2006
- [34] TS Standardı TS-1500-2/2000, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Aralık 2000
- [35] TS Standardı TS-1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, Mart 2006

EK-A: EKLER (DENEY SONUÇLARI ve GRAFİKLER)

Ek-1. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Tablo A.1. Kaolen Kili Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	12/1/2011	
Deney No	1	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kil	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	19,2 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99837	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.27
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	164.46
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	648.33
Piknometre + Su ağırlığı	gr	619.16
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	48.19
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.530

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	12/1/2011	
Deney No	2	
Kullanılan Malzeme	Kil	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	19,2 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99837	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	115.54
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	160.17
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	643.82
Piknometre + Su ağırlığı	gr	615.78
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	44.63
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.686

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	12/1/2011	
Deney No	3	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kil	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	20 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99821	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.89
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	164.67
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	649.13
Piknometre + Su ağırlığı	gr	620.05
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	47.78
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.551

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	12/1/2011	
Deney No	4	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kil	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	22 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99777	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.18
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	161.67
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	645.27
Piknometre + Su ağırlığı	gr	617.48
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	45.49
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.564

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	12/1/2011	
Deney No	5	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kil	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	22 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99777	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	102.64
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	147.01
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	685.59
Piknometre + Su ağırlığı	gr	658.63
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	44.37
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.543

Tablo A.2. Kaolen Kiline ait Özgül Ağırlık Değeri

Deney No	Özgül Ağırlık (G_s) (gr/cm³)
1. Deney	2.53
2. Deney	2.686
3. Deney	2.551
4. Deney	2.564
5. Deney	2.543
Kaolen için özgül ağırlık (Ort.)	2.57

Tablo A.3. Kireç Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	1	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kireç	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	20,5 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.9981	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	117.02
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	163.84
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	646.89
Piknometre + Su ağırlığı	gr	619.06
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	46.82
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.461

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	2	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kireç	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	22,2 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.997726	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.89
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	159.18
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	644.4
Piknometre + Su ağırlığı	gr	619.91
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	42.29
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.370

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	3	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kireç	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99799	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	115.55
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	168.51
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	646.85
Piknometre + Su ağırlığı	gr	615.55
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	52.96
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.440

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	4	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kireç	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99799	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.28
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	162.2
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	645.35
Piknometre + Su ağırlığı	gr	618.99
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	45.92
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.343

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	5	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Kireç	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99799	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.36
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	158.06
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	640.72
Piknometre + Su ağırlığı	gr	615.99
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	41.7
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.452

Tablo A.4. Kirece ait Özgül Ağırlık Değeri

Deney No	Özgül Ağırlık (Gs) (gr/cm³)
1. Deney	2.461
2. Deney	2.37
3. Deney	2.44
4. Deney	2.343
5. Deney	2.452
Kireç için özgül ağırlık (Ort.)	2.41

Tablo A.5. Polisaj Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	5/10/2010	
Deney No	1	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Polisaj	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21,9 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.997866	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	102.67
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	146.97
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	684.95
Piknometre + Su ağırlığı	gr	658.48
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	44.3
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.48

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	26/11/2010	
Deney No	2	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Polisaj	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21,9 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.997866	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.99
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	166.16
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	649.54
Piknometre + Su ağırlığı	gr	620.05
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	49.17
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.49

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	15/12/2010	
Deney No	3	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Polisaj	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21,9 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.997866	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	115.55
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	172.14
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	650.43
Piknometre + Su ağırlığı	gr	616.56
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	56.59
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.49

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	15/12/2010	
Deney No	4	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Polisaj	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21,9 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.997866	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	103.31
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	148.03
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	686.36
Piknometre + Su ağırlığı	gr	659.72
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	44.72
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.47

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	20/12/2010	
Deney No	5	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Polisaj	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21,9 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.997866	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	115.55
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	165.74
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	647.53
Piknometre + Su ağırlığı	gr	617.03
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	50.19
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	2.54

Tablo A.6. Polisaja ait Özgül Ağırlık Değeri

Deney No	Özgül Ağırlık (Gs) (gr/cm³)
1. Deney	2.48
2. Deney	2.49
3. Deney	2.49
4. Deney	2.47
5. Deney	2.54
Polisaj için özgül ağırlık (Ort.)	2.49

Tablo A.7. Uçucu Kül Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	13/1/2011	
Deney No	1	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Uçucu Kül	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	20,9 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.998012	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	102.65
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	149.78
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	680.01
Piknometre + Su ağırlığı	gr	658.2
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	47.13
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	1.858

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	13/1/2011	
Deney No	2	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Uçucu Kül	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	20,9 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.998012	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.33
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	164.99
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	641
Piknometre + Su ağırlığı	gr	618.95
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	48.66
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	1.825

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	3	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Uçucu Kül	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	20,6 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.998078	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	116.18
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	154.96
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	634.45
Piknometre + Su ağırlığı	gr	616.52
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	38.78
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	1.856

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	4	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Uçucu Kül	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	22,2 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.997726	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	102.65
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	154.39
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	681.17
Piknometre + Su ağırlığı	gr	658.23
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	51.74
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	1.792

Deney Adı	Özgül Ağırlık Deneyi	
Deney Tarihi	14/1/2011	
Deney No	5	
Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Kullanılan Malzeme	Uçucu Kül	
Kullanılan Piknometre	500 ml	
Saf Suyun Sıcaklığı	21 °C	
K Düzeltme Katsayısı	0.99799	
	Birim	
Piknometre Ağırlığı	gr	103.33
Piknometre + Numune ağırlığı	gr	155.06
Piknometre + Numune + Su ağırlığı	gr	683.32
Piknometre + Su ağırlığı	gr	659.7
Hesaplamalar		
Numune Ağırlığı	gr	51.73
Özgül Ağırlık Hesaplama (Gs)	gr/cm ³	1.837

Tablo A.8. Uçucu Küle ait Özgül Ağırlık Değeri

Deney No	Özgül Ağırlık (Gs) (gr/cm³)
1. Deney	1.858
2. Deney	1.825
3. Deney	1.856
4. Deney	1.792
5. Deney	1.837
Uçucu Kül için özgül ağırlık (Ort.)	1.833

Ek-2. Atterberg Limitleri Sonuçları

Tablo A.9. Kaolen Kili Casagrande Deneyi Likit Limit Sonuçları

Deney Adı	Casagrande Deneyi
Deney Tarihi	20/1/2011
Deney No	1
Proje	Yüksek Lisans Tezi
Kullanılan Malzeme	Kil
Vuruş Sayısı	44
Kap No	251
Kap Ağırlığı (gr)	19.9
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	30.36
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	27.07
Hesaplamalar	
Su Muhtevası (%)	45.886

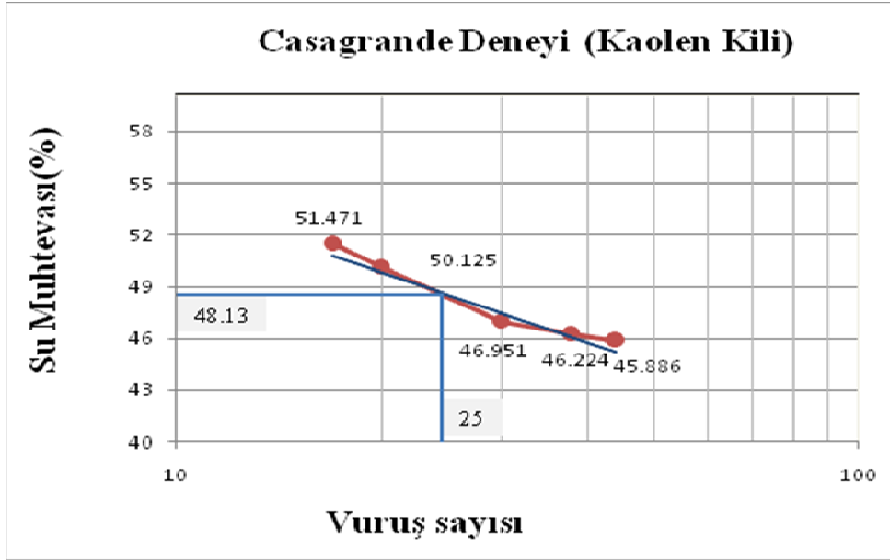
Deney Adı	Casagrande Deneyi
Deney Tarihi	20/1/2011
Deney No	2
Proje	Yüksek Lisans Tezi
Kullanılan Malzeme	Kil
Vuruş Sayısı	38
Kap No	324
Kap Ağırlığı (gr)	18.44
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	31.22
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	27.18
Hesaplamalar	
Su Muhtevası (%)	46.224

Deney Adı	Casagrande Deneyi
Deney Tarihi	20/1/2011
Deney No	3
Proje	Yüksek Lisans Tezi
Kullanılan Malzeme	Kil
Vuruş Sayısı	30
Kap No	L2
Kap Ağırlığı (gr)	15.45
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	27.5
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	23.65
Hesaplamalar	
Su Muhtevası (%)	46.951

Deney Adı	Casagrande Deneyi
Deney Tarihi	20/1/2011
Deney No	4
Proje	Yüksek Lisans Tezi
Kullanılan Malzeme	Kil
Vuruş Sayısı	20
Kap No	234
Kap Ağırlığı (gr)	19.72
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	31.73
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	27.72
Hesaplamalar	
Su Muhtevası (%)	50.125

Deney Adı	Casagrande Deneyi
Deney Tarihi	20/1/2011
Deney No	5
Proje	Yüksek Lisans Tezi
Kullanılan Malzeme	Kil
Vuruş Sayısı	17
Kap No	432
Kap Ağırlığı (gr)	19.86
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	33.25
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	28.7
Hesaplamalar	
Su Muhtevası (%)	51.471

	Vuruş sayısı	Su muhtevası (%)
Casagrande 1.Deney Vuruş Sayısı	44	45.886
Casagrande 2.Deney Vuruş Sayısı	38	46.224
Casagrande 3.Deney Vuruş Sayısı	30	46.951
Casagrande 4.Deney Vuruş Sayısı	20	50.125
Casagrande 5.Deney Vuruş Sayısı	17	51.471
Likit Limit Değeri	25	50



Şekil A.1. Kaolen Kili Casagrande Deneyi Grafiği

Tablo A.10. Kaolen Kili Konipenetrasyon Deneyi Likit Limit Sonuçları

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	1		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Kil		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	16.5	16.58	16.97
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	16.68		
Kap No	L3		
Kap Ağırlığı (gr)	15.37		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	25.93		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	22.46		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	48.942		

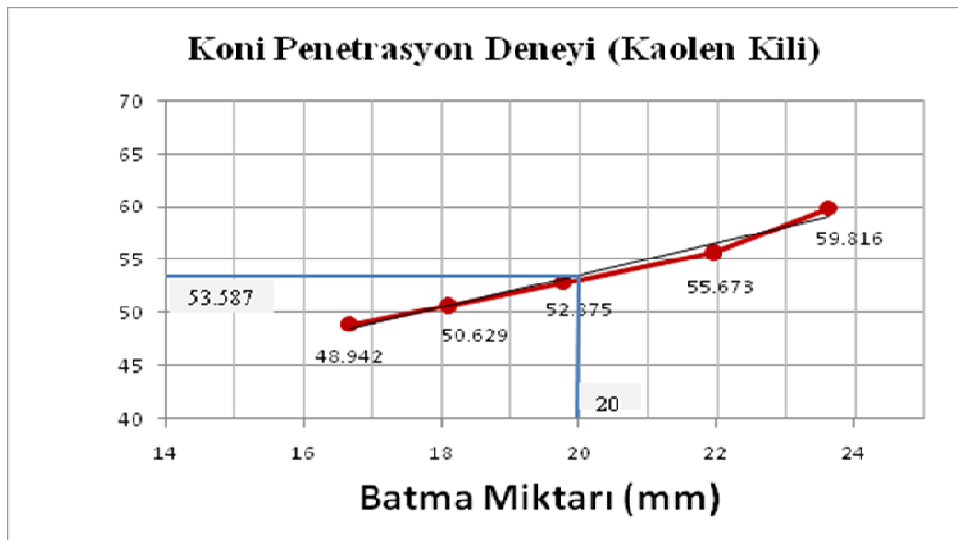
Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	2		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Kil		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	19.08	18.28	16.98
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	18.11		
Kap No	L8		
Kap Ağırlığı (gr)	17.22		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	27.99		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	24.37		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	50.629		

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	3		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Kil		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	20.29	18.78	20.27
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	19.78		
Kap No	L7		
Kap Ağırlığı (gr)	15.68		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	26.58		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	22.81		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	52.875		

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	4		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Kil		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	22.25	21.4	22.22
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	21.96		
Kap No	L6		
Kap Ağırlığı (gr)	15.7		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	25.99		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	22.31		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	55.673		

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	5		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Kil		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	23.7	23.12	24.06
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	23.63		
Kap No	L2		
Kap Ağırlığı (gr)	16.11		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	26.53		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	22.63		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	59.816		

	Batma miktarı (mm)	Su muhtevası (%)
Düşen Koni 1.Deney Batma Mik.	16.68	48.942
Düşen Koni 2.Deney Batma Mik.	18.11	50.629
Düşen Koni 3.Deney Batma Mik.	19.78	52.875
Düşen Koni 4.Deney Batma Mik.	21.96	55.673
Düşen Koni 5.Deney Batma Mik.	23.63	59.816
Likit Limit Değeri	20	54



Şekil A.2. Kaolen Kili Konipenetrasyon Deneyi Grafiği

Tablo A.11. Polisaj Malzemesi Konipenetrasyon Deneyi Likit Limit Sonuçları

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	1		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Polisaj		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	14.79	15.16	15.45
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	15.13		
Kap No	L6		
Kap Ağırlığı (gr)	15.7		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	30.58		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	26.44		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	38.547		

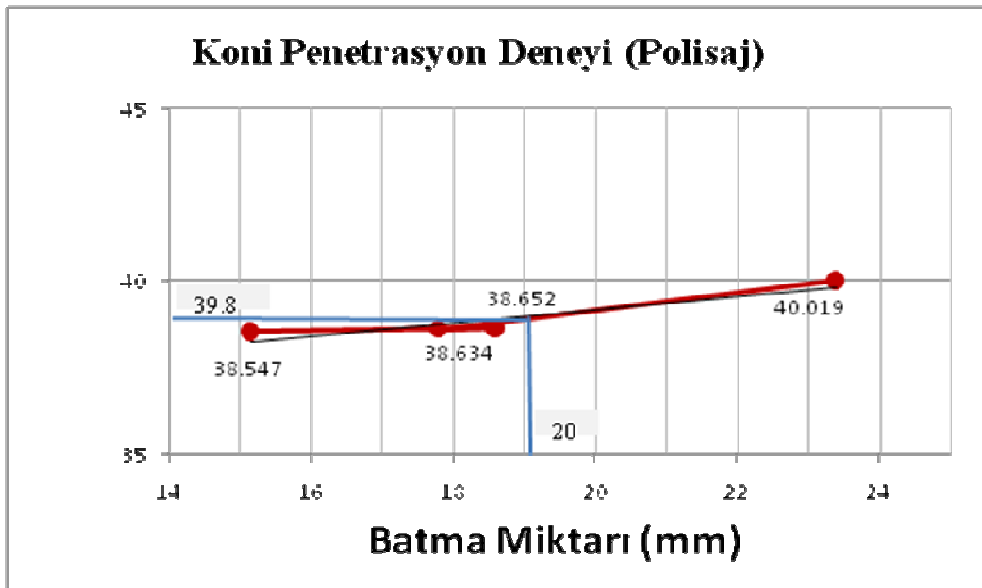
Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	2		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Polisaj		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	20.56	20.42	19.28
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	20.09		
Kap No	345		
Kap Ağırlığı (gr)	16.44		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	26.83		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	23.77		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	41.746		

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	3		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Polisaj		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	20.62	17.82	17.34
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	18.59		
Kap No	L7		
Kap Ağırlığı (gr)	17.19		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	28.92		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	25.65		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	38.652		

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	4		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Polisaj		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	15.71	19.62	18.04
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	17.79		
Kap No	L2		
Kap Ağırlığı (gr)	15.43		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	26.59		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	23.48		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	38.634		

Deney Adı	3 Nokta Likit Limit Deneyi		
Deney Tarihi	20/1/2011		
Deney No	5		
Proje	Yüksek Lisans Tezi		
Kullanılan Malzeme	Polisaj		
	1. Batma	2. Batma	3. Batma
Penetrasyon Değerleri (mm)	24.82	21.74	23.6
Ortalama Penetrasyon Değeri (mm)	23.39		
Kap No	L1		
Kap Ağırlığı (gr)	15.67		
Kap + Yaş Numune Ağırlığı (gr)	30.33		
Kap + Kuru Numune Ağırlığı (gr)	26.14		
Hesaplamalar			
Su Muhtevası (%)	40.019		

	Batma miktarı (mm)	Su muhtevası (%)
Düşen Koni 1.Den. Batma Miktarı	15.13	38.547
Düşen Koni 2.Den. Batma Miktarı	20.09	41.746
Düşen Koni 3.Den. Batma Miktarı	18.59	38.652
Düşen Koni 4.Den. Batma Miktarı	17.79	38.634
Düşen Koni 5.Den. Batma Miktarı	23.39	40.019
Likit Limit Değeri	20	39.8

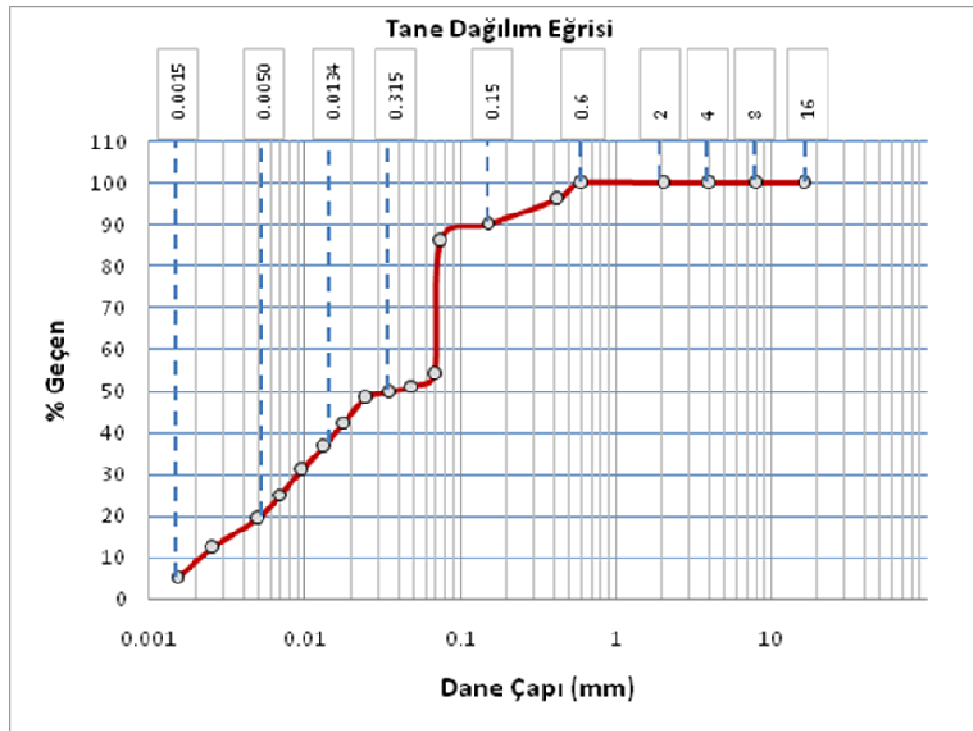


Şekil A.3. Polisaj Malzemesi Konipenetrasyon Deneyi Grafiği

Ek-3. Sınıflandırma Deneyleri Sonuçları

Tablo A.12. Polisaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 1.Deney Sonuçları

Deney Adı	Yıkamalı Elek Analizi			
Deney Tar.	10/1/2011	Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Deney No	1	Kullanılan Malzeme	Polisaj	
Elek Ebadı	Elekte Kalan Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığılımlı Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığılımlı ağırlık (%)	Elekten Geçen Yığılımlı Ağırlık (%)
16.00	0	0	0	100
8.00	0	0	0	100
4.00	0	0	0	100
2.00	0	0	0	100
0.60	0	0	0	100
0.425	3.97	3.97	3.97	96.03
0.150	5.99	9.96	9.96	90.04
0.075	3.81	13.77	13.77	86.23
Tepsi	86.23	100	100	0
Toplam	100			



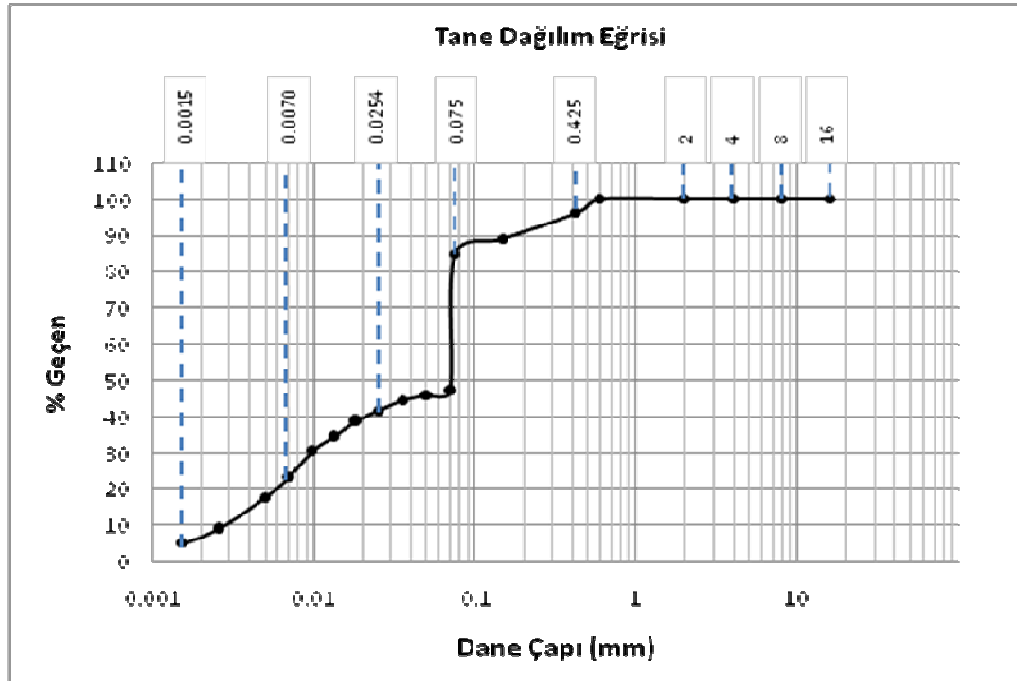
Şekil A.4. Polisaj Malzemesi 1. Dane Dağılım Grafiği

Tablo A.13. Polisaj Malzemesi 1.Hidrometre Deneyi Sonuçları

HİDROMETRE DENEYİ										
DENEY ADI	HİDROMETRE			NUMUNE AĞIRLIĞI	50					
DENEY NO	1			HİDROMETRE TİPİ	151 H					
DENEY TARİHİ	13/1/2011			MENİSKÜS DÜZELTMESİ	0.0008					
DENEYİ YAPAN	KURBAN ÖNTÜRK			ÖZGÜL AĞIRLIK	2.49					
NUMUNE	POLİSAJ									
SÜRE (dk)	HİDROMETRE OKUMASI	MENİSKÜS DÜZ. YAPILMIŞ HİDROMETRE OKUMASI	SICAKLIK	Ayrıştırıcı Madde +Sıcaklık Düzeltmesi	Düzeltilmiş Hidrometre Okuması (R)	K Değeri	EFEKTİF DERİNLİK L (cm)	EŞDEĞER DANE ÇAPI (mm)	TOPLAM GEÇEN % P	% K
0.5	1.0220	1.0228	20.3	0.00405	1.01875	0.0143	11.4975	0.0687	54.04	54.04
1	1.0210	1.0218	20.3	0.00405	1.01775	0.0143	11.7675	0.0491	51.16	51.16
2	1.0205	1.0213	20.3	0.00405	1.01725	0.0143	11.9025	0.0350	49.72	49.72
4	1.0200	1.0208	20.3	0.00405	1.01675	0.0143	12.0375	0.0249	48.27	48.27
8	1.0180	1.0188	20.3	0.00405	1.01475	0.0143	12.5775	0.0180	42.51	42.51
15	1.0160	1.0168	20.3	0.00405	1.01275	0.0143	13.1175	0.0134	36.75	36.75
30	1.0140	1.0148	20.3	0.00405	1.01075	0.0143	13.6675	0.0097	30.98	30.98
60	1.0120	1.0128	20.3	0.00405	1.00875	0.0143	14.2075	0.0070	25.22	25.22
120	1.0100	1.0108	20.3	0.00405	1.00675	0.0143	14.7475	0.0050	19.45	19.45
480	1.0075	1.0083	20.3	0.00405	1.00425	0.0143	15.4225	0.0026	12.25	12.25
1440	1.0050	1.0058	20.3	0.00405	1.00175	0.0143	16.0975	0.0015	5.04	5.04

Tablo A.14. Polisaaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 2.Deney Sonuçları

Deney Adı	Yıkamalı Elek Analizi			
Deney Tar.	11/1/2011	Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Deney No	2	Kullanılan Malzeme	Polisaaj	
Elek Ebadı	Elekte Kalan Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığışım Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığışım Ağırlık (%)	Elekten Geçen Yığışım Ağırlık (%)
16.00	0	0	0	100
8.00	0	0	0	100
4.00	0	0	0	100
2.00	0	0	0	100
0.60	0	0	0	100
0.425	3.82	3.82	3.82	96.18
0.150	7.03	10.85	10.85	89.15
0.075	4.6	15.45	15.45	84.55
Tepsi	84.55	100	100	0
Toplam	100			



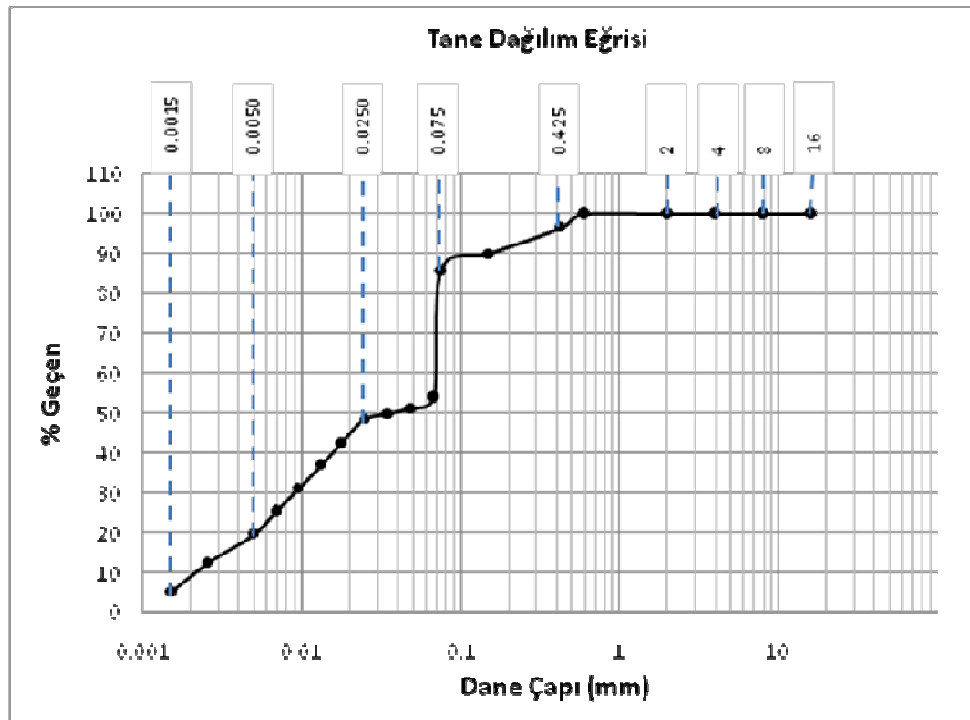
Şekil A.5. Polisaaj Malzemesi 2. Dane Dağılım Grafiği

Tablo A.15. Polisaj Malzemesi 2.Hidrometre Deneyi Sonuçları

HİDROMETRE DENEYİ										
DENEY ADI	HİDROMETRE			NUMUNE AĞIRLIĞI	50					
DENEY NO	2			HİDROMETRE TİPİ	151 H					
DENEY TARİHİ	14/1/2011			MENİSKÜS DÜZELTMESİ	0.0008					
DENEYİ YAPAN	KURBAN ÖNTÜRK			ÖZGÜL AĞIRLIK	2.49					
NUMUNE	POLİSAJ									
SÜRE (dk)	HİDROMETRE OKUMASI	MENİSKÜS DÜZ. YAPILMIŞ HİDROMETRE OKUMASI	SICAKLIK	Ayrıştırıcı Madde +Sıcaklık Düzeltmesi	Düzeltilmiş Hidrometre Okuması (R)	K Değeri	EFEKTİF DERİNLİK L (cm)	EŞDEĞER DANE ÇAPI (mm)	TOPLAM GEÇEN % P	% K
0.5	1.0200	1.0208	20.3	0.00405	1.01675	0.0143	12.0375	0.0703	47.33	47.33
1	1.0195	1.0203	20.3	0.00405	1.01625	0.0143	12.1725	0.0500	45.92	45.92
2	1.0190	1.0198	20.3	0.00405	1.01575	0.0143	12.3075	0.0355	44.51	44.51
4	1.0180	1.0188	20.3	0.00405	1.01475	0.0143	12.5775	0.0254	41.68	41.68
8	1.0170	1.0178	20.3	0.00405	1.01375	0.0143	12.8475	0.0182	38.86	38.86
15	1.0155	1.0163	20.3	0.00405	1.01225	0.0143	13.2525	0.0135	34.62	34.62
30	1.0140	1.0148	20.3	0.00405	1.01075	0.0143	13.6675	0.0097	30.38	30.38
60	1.0115	1.0123	20.3	0.00405	1.00825	0.0143	14.3425	0.0070	23.31	23.31
120	1.0095	1.0103	20.3	0.00405	1.00625	0.0143	14.8825	0.0050	17.66	17.66
480	1.0065	1.0073	20.3	0.00405	1.00325	0.0143	15.6925	0.0026	9.18	9.18
1440	1.0050	1.0058	20.3	0.00405	1.00175	0.0143	16.0975	0.0015	4.95	4.95

Tablo A.16. Polisaaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 3.Deney Sonuçları

Deney Adı				
Yıkamalı Elek Analizi				
Deney Tar.	11/1/2011	Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Deney No	3	Kullanılan Malzeme	Polisaaj	
Elek Ebadı	Elekte Kalan Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığılımlı Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığılımlı ağırlık (%)	Elekten Geçen Yığılımlı Ağırlık (%)
16.00	0	0	0	100
8.00	0	0	0	100
4.00	0	0	0	100
2.00	0	0	0	100
0.60	0	0	0	100
0.425	3.51	3.51	3.51	96.49
0.150	6.64	10.15	10.15	89.85
0.075	4.27	14.42	14.42	85.58
Tepsi	85.58	100	100	0
Toplam	100			



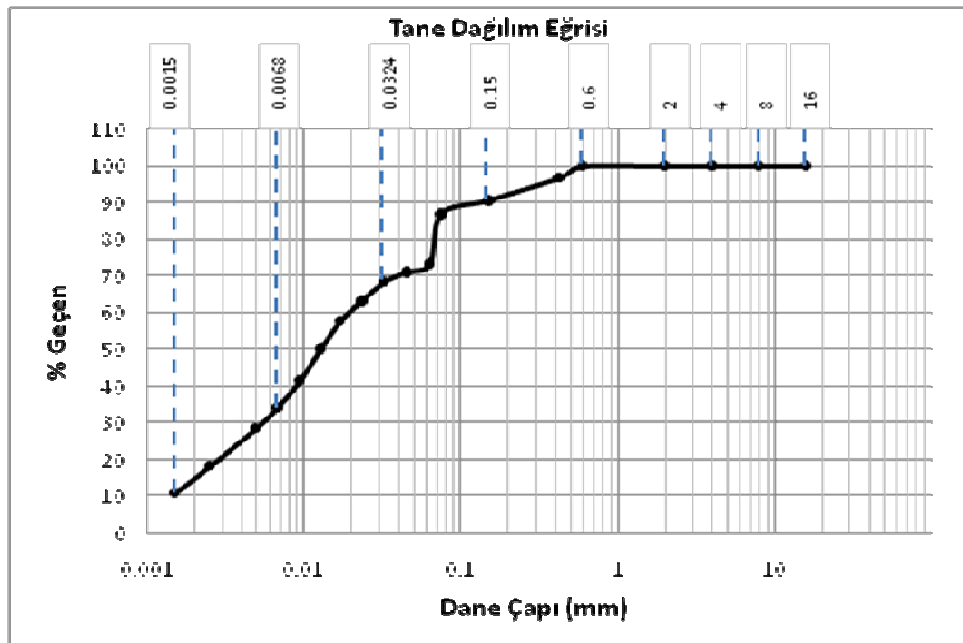
Şekil A.6. Polisaaj Malzemesi 3. Dane Dağılım Grafiği

Tablo A.17. Polisaj Malzemesi 3.Hidrometre Deneyi Sonuçları

HİDROMETRE DENEYİ										
DENEY ADI	HİDROMETRE			NUMUNE AĞIRLIĞI	50					
DENEY NO	3			HİDROMETRE TİPİ	151 H					
DENEY TARİHİ	14/1/2011			MENİSKÜS DÜZELTMESİ	0.0008					
DENEYİ YAPAN	KURBAN ÖNTÜRK			ÖZGÜL AĞIRLIK	2.49					
NUMUNE	POLİSAJ									
SÜRE (dk)	HİDROMETRE OKUMASI	MENİSKÜS DÜZ. YAPILMIŞ HİDROMETRE OKUMASI	SICAKLIK	Ayrıştırıcı Madde +Sıcaklık Düzeltmesi	Düzeltilme Uygulanmış Hidrometre Okuması (R)	K Değeri	EFEKTİF DERİNLİK L (cm)	EŞDEĞER DANE ÇAPI (mm)	TOPLAM GEÇEN % P	% K
0.5	1.0235	1.0243	20.3	0.00405	1.02025	0.0143	11.0925	0.0675	57.92	57.92
1	1.0220	1.0228	20.3	0.00405	1.01875	0.0143	11.4975	0.0486	53.63	53.63
2	1.0210	1.0218	20.3	0.00405	1.01775	0.0143	11.7675	0.0348	50.77	50.77
4	1.0195	1.0203	20.3	0.00405	1.01625	0.0143	12.1725	0.0250	46.48	46.48
8	1.0190	1.0198	20.3	0.00405	1.01575	0.0143	12.3075	0.0178	45.05	45.05
15	1.0175	1.0183	20.3	0.00405	1.01425	0.0143	12.7175	0.0132	40.76	40.76
30	1.0150	1.0158	20.3	0.00405	1.01175	0.0143	13.3900	0.0096	33.61	33.61
60	1.0125	1.0133	20.3	0.00405	1.00925	0.0143	14.0725	0.0069	26.46	26.46
120	1.0105	1.0113	20.3	0.00405	1.00725	0.0143	14.6125	0.0050	20.74	20.74
480	1.0070	1.0078	20.3	0.00405	1.00375	0.0143	15.5575	0.0026	10.73	10.73
1440	1.0050	1.0058	20.3	0.00405	1.00175	0.0143	16.0975	0.0015	5.01	5.01

Tablo A.18. Polisaj Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 4.Deney Sonuçları

Deney Adı	Yıkamalı Elek Analizi			
Deney Tar.	11/1/2011	Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Deney No	4	Kullanılan Malzeme	Polisaj	
Elek Ebadı	Elekte Kalan Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığılımlı Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığılımlı ağırlık (%)	Elekten Geçen Yığılımlı Ağırlık (%)
16.00	0	0	0	100
8.00	0	0	0	100
4.00	0	0	0	100
2.00	0	0	0	100
0.60	0	0	0	100
0.425	3.29	3.29	3.29	96.71
0.150	6.22	9.51	9.51	90.49
0.075	3.73	13.24	13.24	86.76
Tepsi	86.76	100	100	0
Toplam	100			



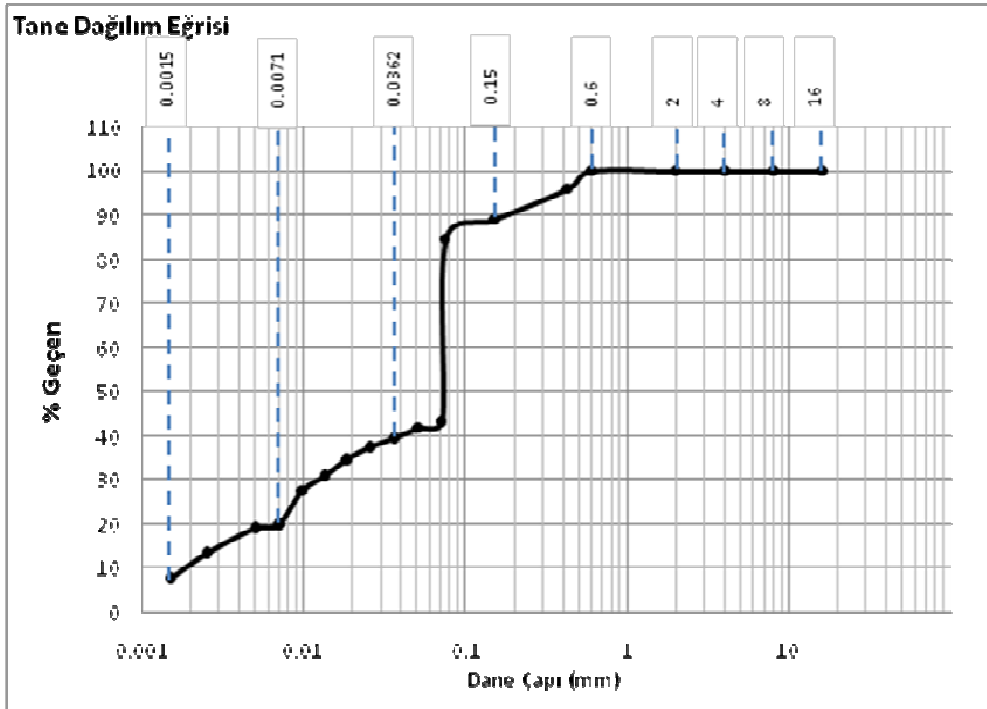
Şekil A.7. Polisaj Malzemesi 4. Dane Dağılım Grafiği

Tablo A.19. Polisaj Malzemesi 4.Hidrometre Deneyi Sonuçları

HİDROMETRE DENEYİ										
DENEY ADI	HİDROMETRE			NUMUNE AĞIRLIĞI	50					
DENEY NO	4			HİDROMETRE TİPİ	151 H					
DENEY TARİHİ	18/1/2011			MENİSKÜS DÜZELTMESİ	0.0008					
DENEYİ YAPAN	KURBAN ÖNTÜRK			ÖZGÜL AĞIRLIK	2.49					
NUMUNE	POLİSAJ									
SÜRE (dk)	HİDROMETRE OKUMASI	MENİSKÜS DÜZ. YAPILMIŞ HİDROMETRE OKUMASI	SICAKLIK	Ayrıştırıcı Madde +Sıcaklık Düzeltmesi	Düzeltilme Uygulanmış Hidrometre Okuması (R)	K Değeri	EFEKTİF DERİNLİK L (cm)	EŞDEĞER DANE ÇAPI (mm)	TOPLAM GEÇEN % P	% K
0.5	1.0285	1.0293	20.3	0.00405	1.02525	0.0143	9.7425	0.0632	73.22	73.22
1	1.0277	1.0285	20.3	0.00405	1.02445	0.0143	9.9455	0.0452	70.90	70.90
2	1.0268	1.0276	20.3	0.00405	1.02355	0.0143	10.2100	0.0324	68.29	68.29
4	1.0250	1.0258	20.3	0.00405	1.02175	0.0143	10.6875	0.0234	63.07	63.07
8	1.0231	1.0239	20.3	0.00405	1.01985	0.0143	11.2005	0.0170	57.56	57.56
15	1.0205	1.0213	20.3	0.00405	1.01725	0.0143	11.9025	0.0128	50.02	50.02
30	1.0175	1.0183	20.3	0.00405	1.01425	0.0143	12.7125	0.0093	41.32	41.32
60	1.0150	1.0158	20.3	0.00405	1.01175	0.0143	13.3900	0.0068	34.07	34.07
120	1.0130	1.0138	20.3	0.00405	1.00975	0.0143	13.9375	0.0049	28.27	28.27
480	1.0095	1.0103	20.3	0.00405	1.00625	0.0143	14.8825	0.0025	18.12	18.12
1440	1.0070	1.0078	20.3	0.00405	1.00375	0.0143	15.5575	0.0015	10.87	10.87

Tablo A.20. Polisaş Malzemesi Yıkamalı Elek Analizi 5.Deney Sonuçları

Deney Adı	Yıkamalı Elek Analizi			
Deney Tar.	11/1/2011	Proje	Yüksek Lisans Tezi	
Deney No	5	Kullanılan Malzeme	Polisaş	
Elek Ebadı	Elekte Kalan Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığışım Ağırlık (gr)	Elekte Kalan Yığışım ağırlık (%)	Elekten Geçen Yığışım Ağırlık (%)
16.00	0	0	0	100
8.00	0	0	0	100
4.00	0	0	0	100
2.00	0	0	0	100
0.60	0	0	0	100
0.425	4.19	4.19	4.19	95.81
0.150	6.89	11.08	11.08	88.92
0.075	4.29	15.37	15.37	84.63
Tepsi	84.63	100	100	0
Toplam	100			



Şekil A.8. Polisaş Malzemesi 5. Dane Dağılım Grafiği

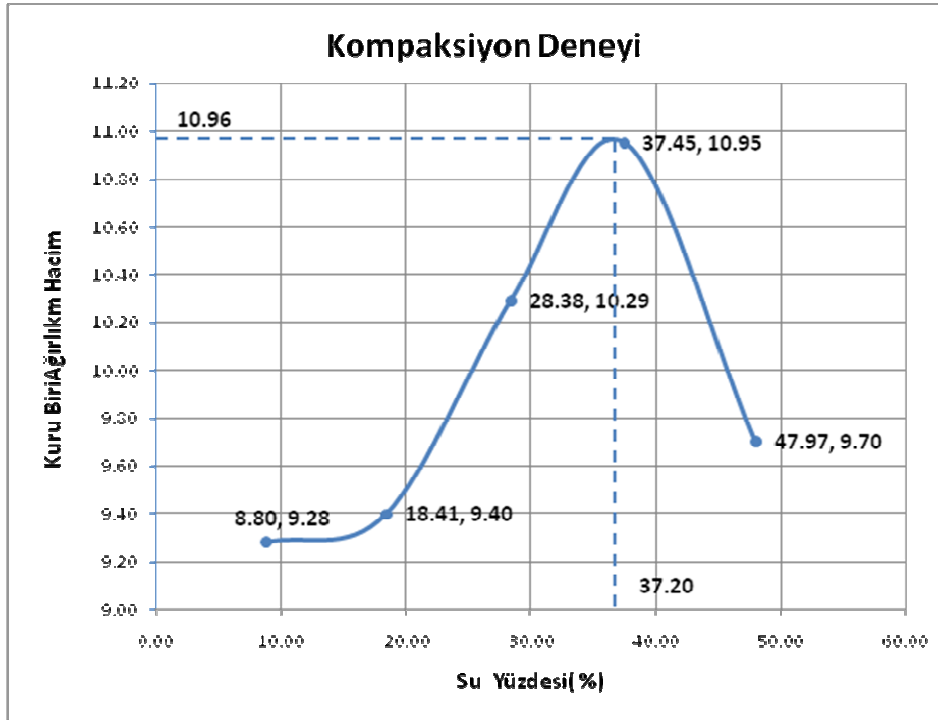
Tablo A.21. Polisaj Malzemesi 5.Hidrometre Deneyi Sonuçları

HİDROMETRE DENEYİ										
DENEY ADI	HİDROMETRE			NUMUNE AĞIRLIĞI	50					
DENEY NO	5			HİDROMETRE TİPİ	151 H					
DENEY TARİHİ	18/1/2011			MENİSKÜS DÜZELTMESİ	0.0008					
DENEYİ YAPAN	KURBAN ÖNTÜRK			ÖZGÜL AĞIRLIK	2.49					
NUMUNE	POLİSAJ									
SÜRE (dk)	HİDROMETRE OKUMASI	MENİSKÜS DÜZ. YAPILMIŞ HİDROMETRE OKUMASI	SICAKLIK	Ayrıştırıcı Madde +Sıcaklık Düzeltmesi	Düzeltilme Uygulanmış Hidrometre Okuması (R)	K Değeri	EFEKTİF DERİNLİK L (cm)	EŞDEĞER DANE ÇAPI (mm)	TOPLAM GEÇEN % P	% K
0.5	1.0185	1.0193	20.3	0.00405	1.01525	0.0143	12.4425	0.0715	43.14	43.14
1	1.0180	1.0188	20.3	0.00405	1.01475	0.0143	12.5775	0.0508	41.72	41.72
2	1.0172	1.018	20.3	0.00405	1.01395	0.0143	12.7935	0.0362	39.46	39.46
4	1.0165	1.0173	20.3	0.00405	1.01325	0.0143	12.9825	0.0258	37.48	37.48
8	1.0155	1.0163	20.3	0.00405	1.01225	0.0143	13.2525	0.0184	34.65	34.65
15	1.0142	1.015	20.3	0.00405	1.01095	0.0143	13.6135	0.0136	30.97	30.97
30	1.0130	1.0138	20.3	0.00405	1.00975	0.0143	13.9375	0.0098	27.58	27.58
60	1.0103	1.0111	20.3	0.00405	1.00705	0.0143	14.6665	0.0071	19.94	19.94
120	1.0100	1.0108	20.3	0.00405	1.00675	0.0143	14.7475	0.0050	19.09	19.09
480	1.0080	1.0088	20.3	0.00405	1.00475	0.0143	15.2875	0.0026	13.44	13.44
1440	1.0060	1.0068	20.3	0.00405	1.00275	0.0143	15.8275	0.0015	7.78	7.78

Ek-4. Kompaksiyon Deneyleri Sonuçları

Tablo A.22. % 10 Polisaj Katkılı Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

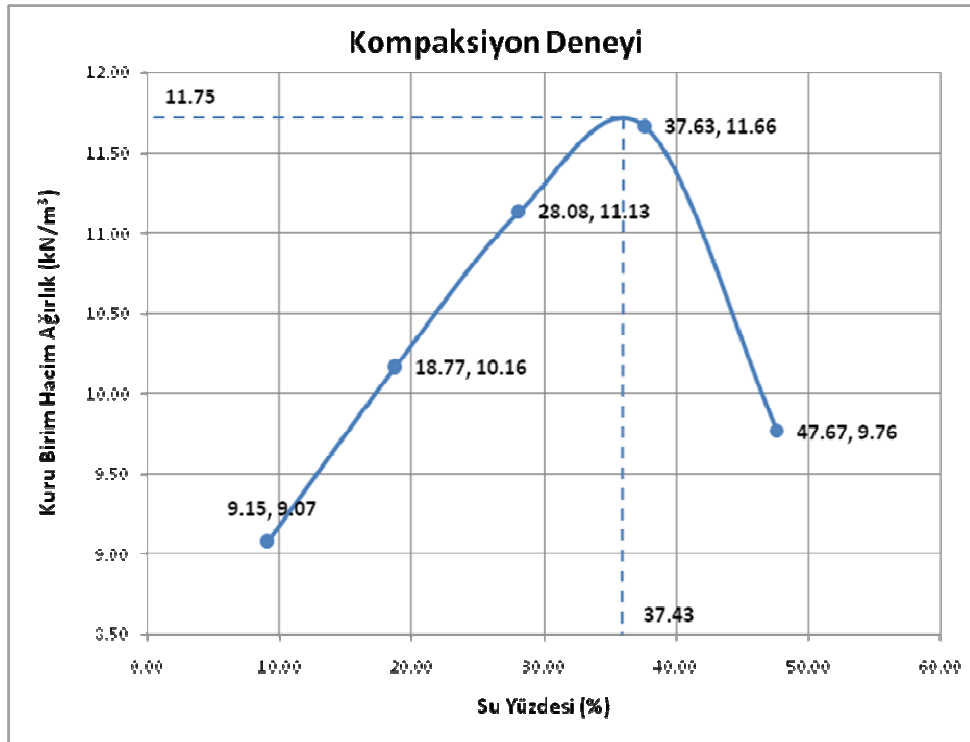
DENEY NO	DENEYİ YAPAN					Kurban ÖNTÜRK
DERİNLİK	DANE ÖZĞÜL AĞIRLIĞI (KN/m ³)					25.7
TARİH	ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)					1500
20 mm ELEK	KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)					1000.52
DENEY NO	1	2	3	4	5	
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	5251	5356	5568	5756	5685	
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr)	4221	4221	4221	4221	4221	
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	1030	1135	1347	1535	1464	
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (KN/m ³)	10.10	11.13	13.21	15.05	14.35	
KAP NO	420	261	232	268	258	
KAP AĞIRLIĞI (gr)	67.93	65.7	51.91	55.01	54.54	
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	188.97	207.65	208.94	254.35	255.48	
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	179.18	185.58	174.23	200.04	190.34	
SU MUHTEVASI (%)	8.80	18.41	28.38	37.45	47.97	
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (KN/m ³)	9.28	9.40	10.29	10.95	9.70	



Şekil A.9. % 10 Katkılı Kompaksiyon Deneyi Grafiği

Tablo A.23. % 15 Polisaaj Katkılı Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

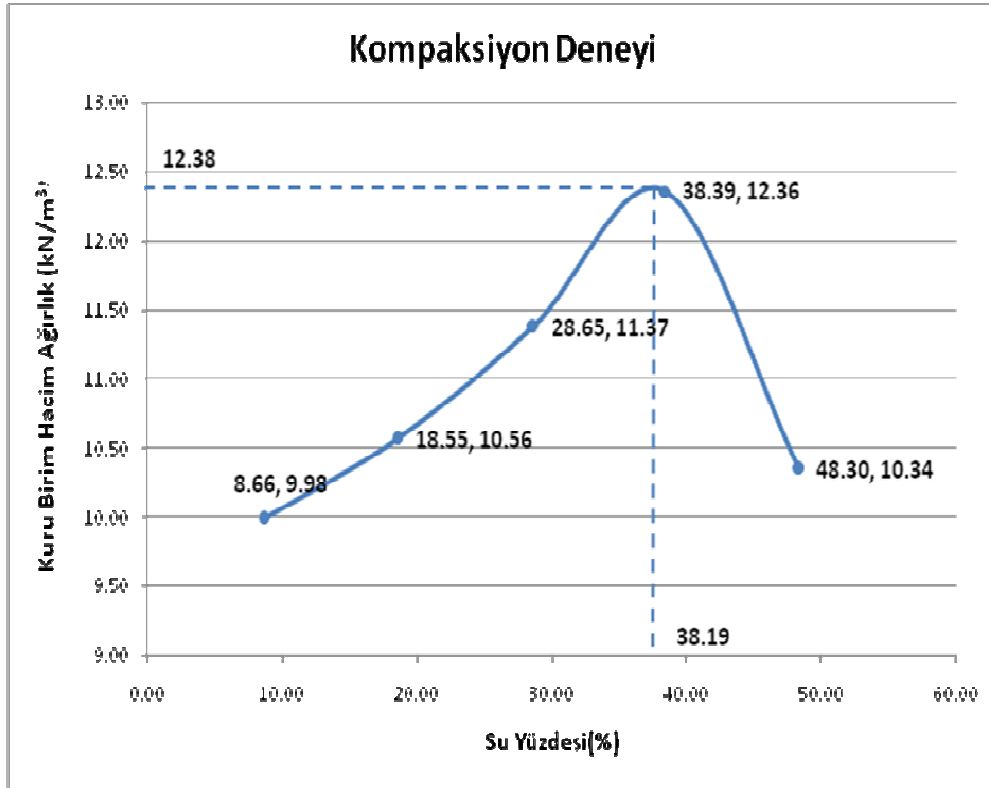
DENEY NO	DENEYİ YAPAN					Kurban ÖNTÜRK
DERİNLİK	DANE ÖZĞÜL AĞIRLIĞI (KN/m ³)					25.7
TARİH	ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)					1500
20 mm ELEK	KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)					1000.52
DENEY NO	1	2	3	4	5	
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	5231	5452	5675	5858	5691	
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr)	4221	4221	4221	4221	4221	
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	1010	1231	1454	1637	1470	
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (KN/m ³)	9.90	12.07	14.26	16.05	14.41	
KAP NO	231	263	458	272	219	
KAP AĞIRLIĞI (gr)	54.38	53.6	54.68	52.63	49.65	
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	198.28	209.73	244.82	240.89	242.7	
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	186.22	185.06	203.13	189.42	180.38	
SU MUHTEVASI (%)	9.15	18.77	28.08	37.63	47.67	
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (KN/m ³)	9.07	10.16	11.13	11.66	9.76	



Şekil A.10. % 15 Katkılı Kompaksiyon Deneyi Grafiği

Tablo A.24. % 20 Polisaaj Katkılı Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

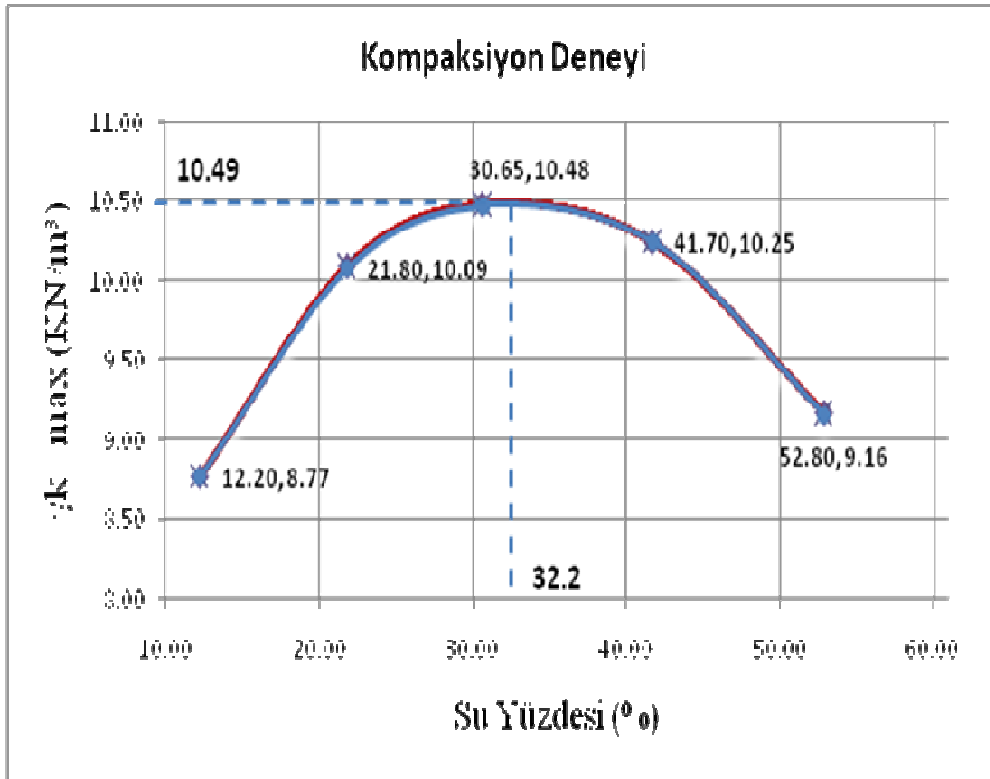
DENEY NO	DENEYİ YAPAN	Kurban ÖNTÜRK			
DERİNLİK	DANE ÖZĞÜL AĞIRLIĞI (KN/m ³)	25.7			
TARİH	ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	1500			
20 mm ELEK	KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)	1000.52			
DENEY NO	1	2	3	4	5
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	5327	5498	5713	5965	5785
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr)	4221	4221	4221	4221	4221
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	1106	1277	1492	1744	1564
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (KN/m ³)	10.84	12.52	14.63	17.10	15.33
KAP NO	439	802	448	207	456
KAP AĞIRLIĞI (gr)	52.72	62.88	50.49	54.48	65.9
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	226.79	253.41	238.92	266.65	251.94
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	212.91	223.6	196.96	207.79	191.35
SU MUHTEVASI (%)	8.66	18.55	28.65	38.39	48.30
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (KN/m ³)	9.98	10.56	11.37	12.36	10.34



Şekil A.11. % 20 Katkılı Kompaksiyon Deneyi Grafiği

Tablo A.25. Sadece Kil Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

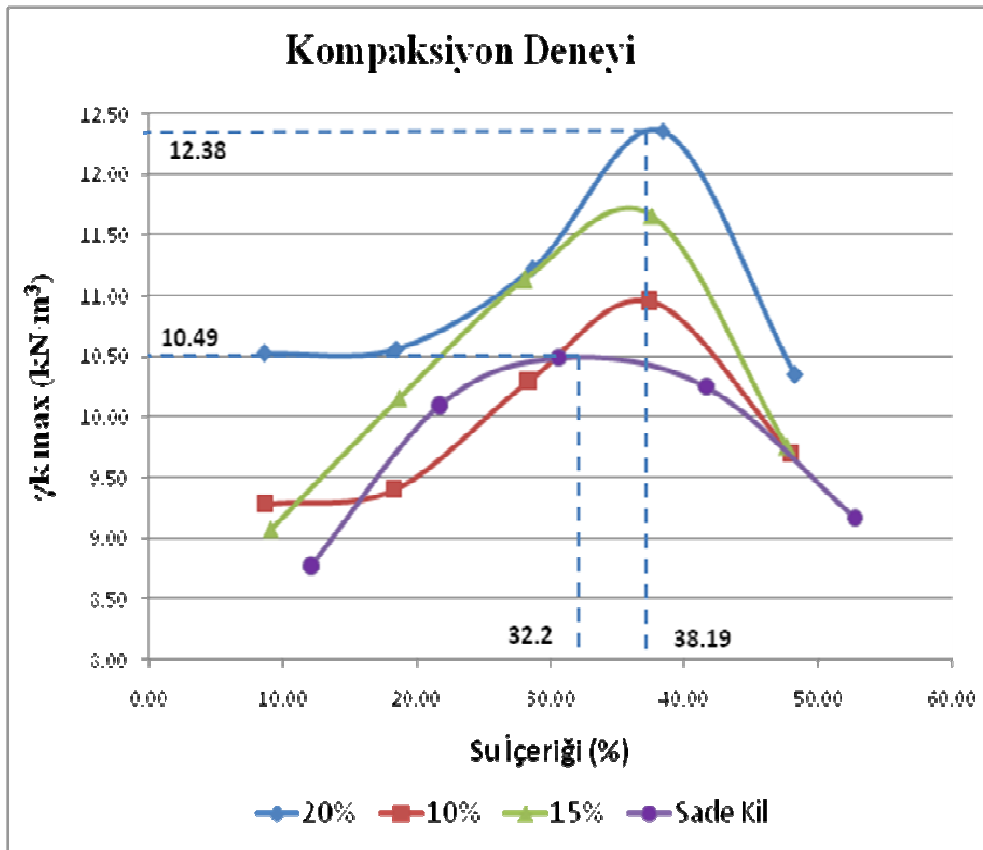
DENEY NO	DENEYİ YAPAN					
DERİNLİK	DANE ÖZGÜL AĞIRLIĞI (KN/m ³)					25.70
TARİH	ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)					1500
20 mm ELEK	KALIBIN İÇ HACMİ (cm ³)					1000.52
DENEY NO	1	2	3	4	5	
KALIP + TABAN + ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	5224	5474	5617	5702	5649	
KALIP + TABAN AĞIRLIĞI (gr)	4221	4221	4221	4221	4221	
SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİN AĞIRLIĞI (gr)	1003	1253	1396	1481	1428	
YAŞ BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (KN/m ³)	9.83	12.29	13.69	14.52	14.00	
KAP NO	427	435	456	231	451	
KAP AĞIRLIĞI (gr)	70.04	53.7	65.93	54.36	51.54	
KAP + YAŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	174.24	146.87	234.16	242.51	304.58	
KAP + KURU ÖRNEK AĞIRLIĞI (gr)	162.91	130.19	194.69	187.14	217.14	
SU MUHTEVASI (%)	12.20	21.80	30.65	41.70	52.80	
KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK (KN/m ³)	8.77	10.09	10.48	10.25	9.16	



Şekil A.12. Sadece Kil Kompaksiyon Deneyi Grafiği

Tablo A.26. %10, %15, %20 Katkılı Numunelerin Deney Sonuçları

	1.Deney	2.Deney	3.Deney	4.Deney	5.Deney
SU MUHTEVASI (%) 10	8.800	18.410	28.376	37.447	47.968
K. BİRİM HACİM AĞ. (KN/m ³)	9.280	9.400	10.290	10.950	9.700
SU MUHTEVASI (%) 15	9.147	18.766	28.084	37.627	47.671
K. BİRİM HACİM AĞ. (KN/m ³)	9.070	10.160	11.130	11.660	9.760
SU MUHTEVASI (%)	8.665	18.548	28.648	38.393	48.298
K. BİRİM HACİM AĞ. (KN/m ³)	9.980	10.560	11.370	12.360	10.340
SU MUHTEVASI (Sade Kil)	12.200	21.800	30.654	41.701	52.802
K. BİRİM HACİM AĞ. (KN/m ³)	8.770	10.090	10.480	10.250	9.160

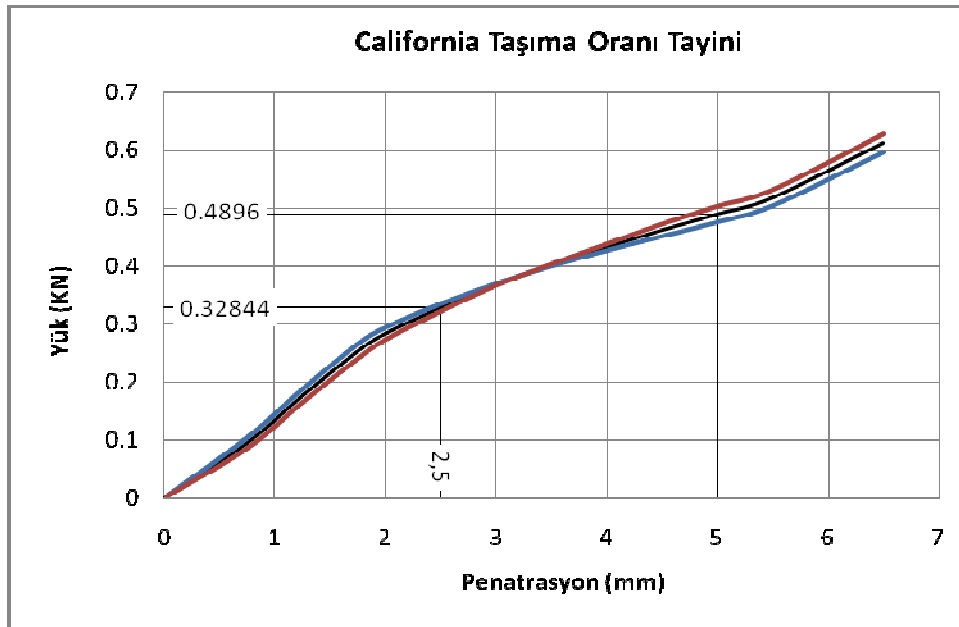


Şekil A.13. %10, %15, %20 Katkılı Numunelerin Deneylerinin Grafiği

Ek-5. CBR Deney Sonuçları

Tablo A.27. % 10 Polisaj Katkılı Günlük Numune CBR Sonucu

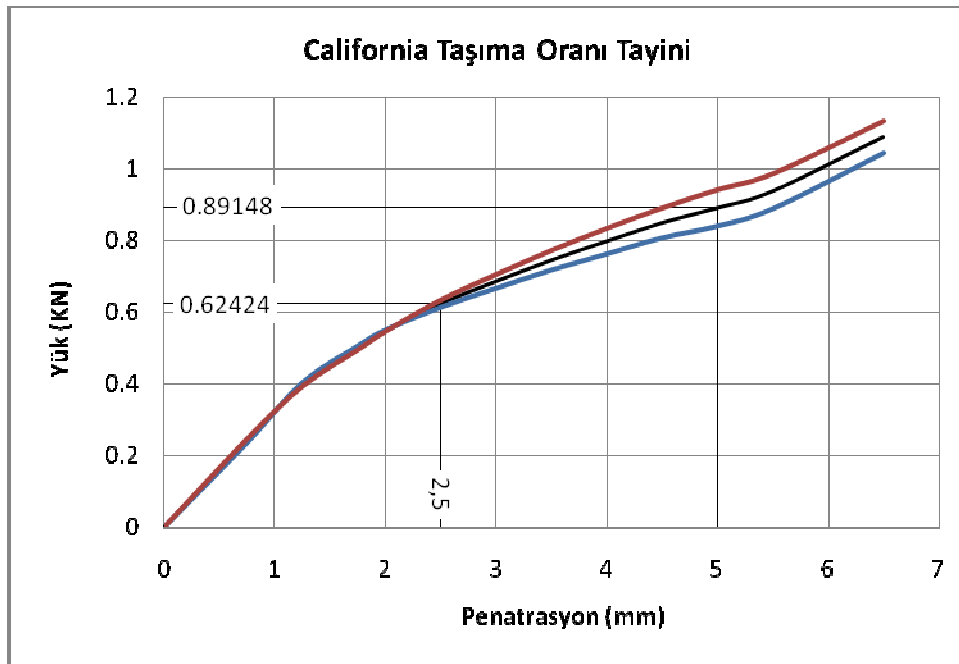
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER		Kil+Kireç+UK+% 10 Polisaj CBR				
ÖRNEĞİN TANIMI		Günlük				
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	51	0.10404	42	0.08568		
1.25	92	0.18768	81	0.16524		
1.75	130	0.2652	118	0.24072		
2	144	0.29376	134	0.27336	11.5	2.47
2.5	164	0.33456	158	0.32232	13.24	2.48
3	181	0.36924	180	0.3672		
3.5	196	0.39984	198	0.40392		
4	209	0.42636	215	0.4386	17.6	2.46
4.5	221	0.45084	232	0.47328		
5	233	0.47532	247	0.50388	19.96	2.45
5.5	247	0.50388	261	0.53244		
6.5	292	0.59568	308	0.62832		



Şekil A.14. % 10 Polisaj Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.28. % 10 Polisaj Katkılı 7 Günlük Numune CBR Sonucu

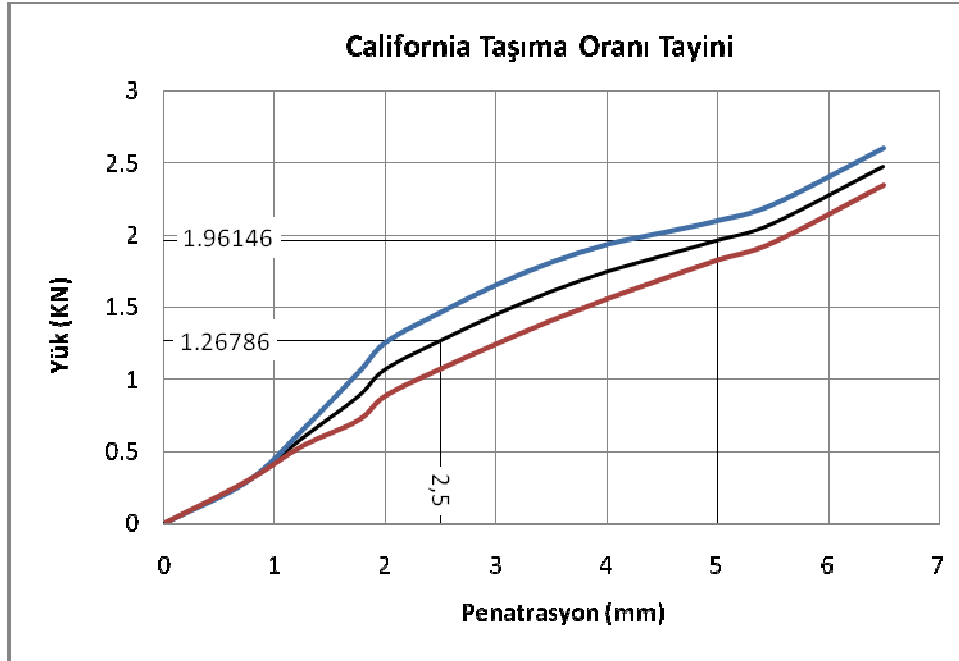
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 10 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			7 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	116	0.23664	121	0.24684		
1.25	198	0.40392	193	0.39372		
1.75	248	0.50592	243	0.49572		
2	270	0.5508	268	0.54672	11.5	4.77
2.5	301	0.61404	311	0.63444	13.24	4.71
3	327	0.66708	346	0.70584		
3.5	352	0.71808	379	0.77316		
4	374	0.76296	409	0.83436	17.6	4.54
4.5	396	0.80784	437	0.89148		
5	412	0.84048	462	0.94248	19.96	4.47
5.5	436	0.88944	484	0.98736		
6.5	512	1.04448	556	1.13424		



Şekil A.15. % 10 Polisaj 7 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.29. % 10 Polisaj Katkılı 14 Günlük Numune CBR Sonucu

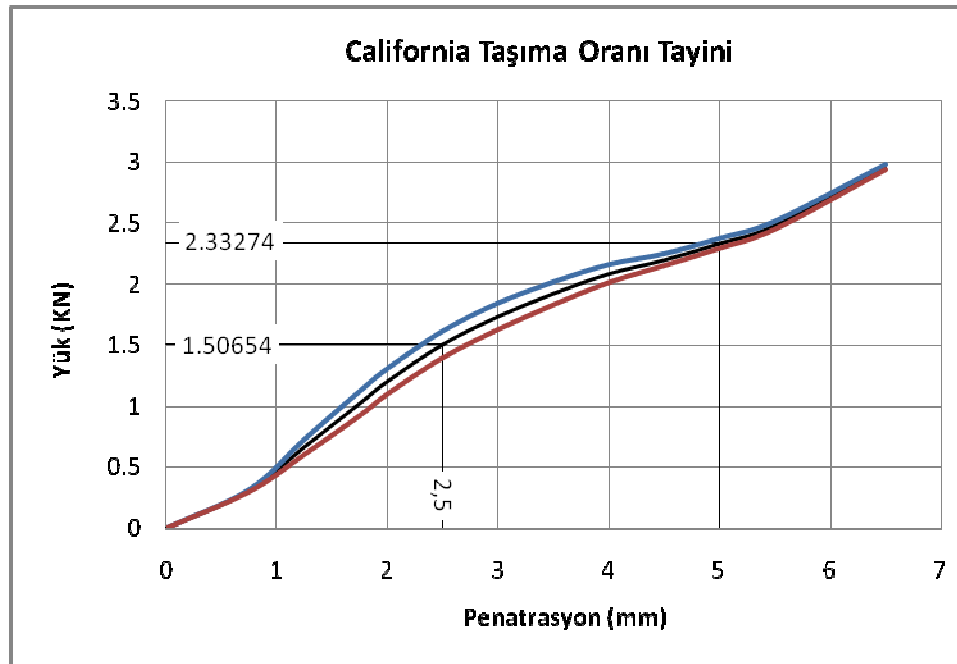
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 10 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			14 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	142	0.28968	144	0.29376		
1.25	318	0.64872	263	0.53652		
1.75	511	1.04244	349	0.71196		
2	615	1.2546	433	0.88332	11.5	9.30
2.5	718	1.46472	525	1.071	13.24	9.58
3	811	1.65444	609	1.24236		
3.5	888	1.81152	689	1.40556		
4	948	1.93392	762	1.55448	17.6	9.91
4.5	988	2.01552	829	1.69116		
5	1029	2.09916	894	1.82376	19.96	9.83
5.5	1084	2.21136	953	1.94412		
6.5	1276	2.60304	1148	2.34192		



Şekil A.16. % 10 Polisaj 14 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.30. % 10 Polisaj Katkılı 28 Günlük Numune CBR Sonucu

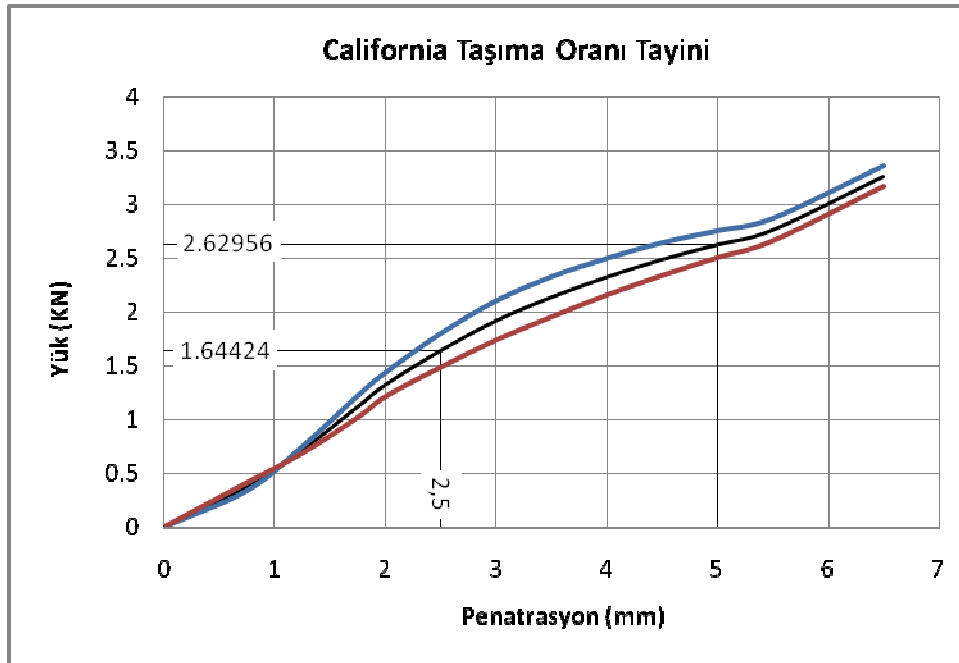
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 10 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			28 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	155	0.3162	146	0.29784		
1.25	358	0.73032	296	0.60384		
1.75	551	1.12404	452	0.92208		
2	642	1.30968	538	1.09752	11.5	10.47
2.5	793	1.61772	684	1.39536	13.24	11.38
3	905	1.8462	797	1.62588		
3.5	990	2.0196	896	1.82784		
4	1060	2.1624	985	2.0094	17.6	11.85
4.5	1103	2.25012	1053	2.14812		
5	1165	2.3766	1122	2.28888	19.96	11.69
5.5	1234	2.51736	1199	2.44596		
6.5	1462	2.98248	1438	2.93352		



Şekil A.17. % 10 Polisaj 28 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.31. % 10 Polisağ Katkılı 56 Günlük Numune CBR Sonucu

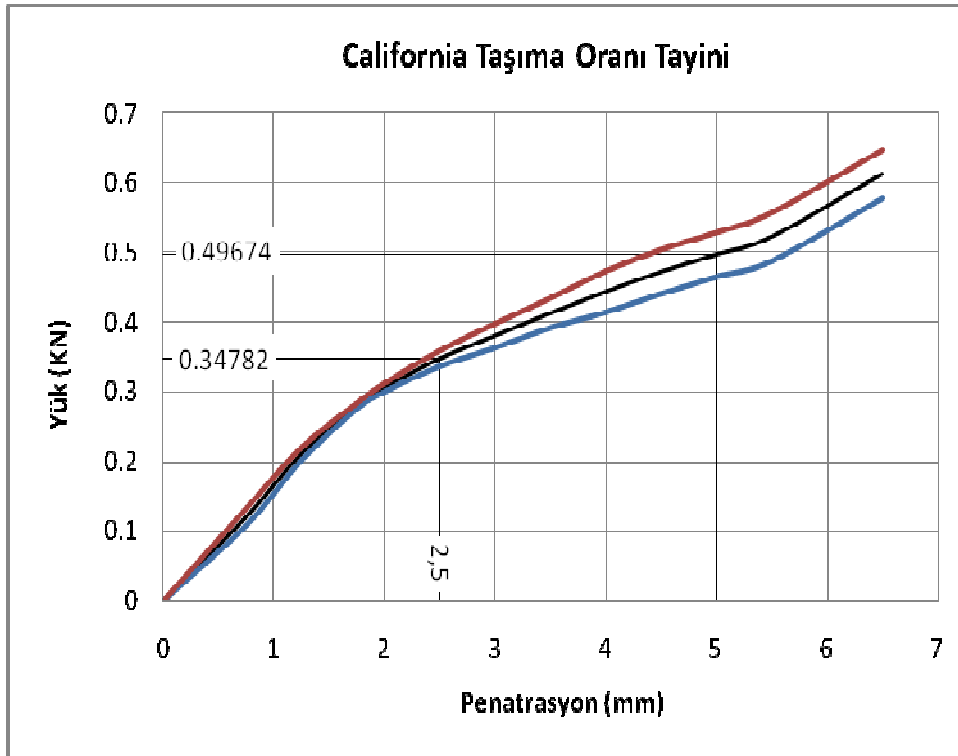
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+%10 Polisağ CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			56 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	166	0.33864	203	0.41412		
1.25	368	0.75072	337	0.68748		
1.75	599	1.22196	500	1.02		
2	704	1.43616	595	1.2138	11.5	11.52
2.5	883	1.80132	729	1.48716	13.24	12.42
3	1031	2.10324	853	1.74012		
3.5	1141	2.32764	958	1.95432		
4	1224	2.49696	1058	2.15832	17.6	13.23
4.5	1296	2.64384	1147	2.33988		
5	1350	2.754	1228	2.50512	19.96	13.17
5.5	1407	2.87028	1305	2.6622		
6.5	1646	3.35784	1553	3.16812		



Şekil A.18. % 10 Polisağ 56 Günlük Numune CBR Grafiğı

Tablo A.32. % 15 Polisaj Katkılı Günlük Numune CBR Sonucu

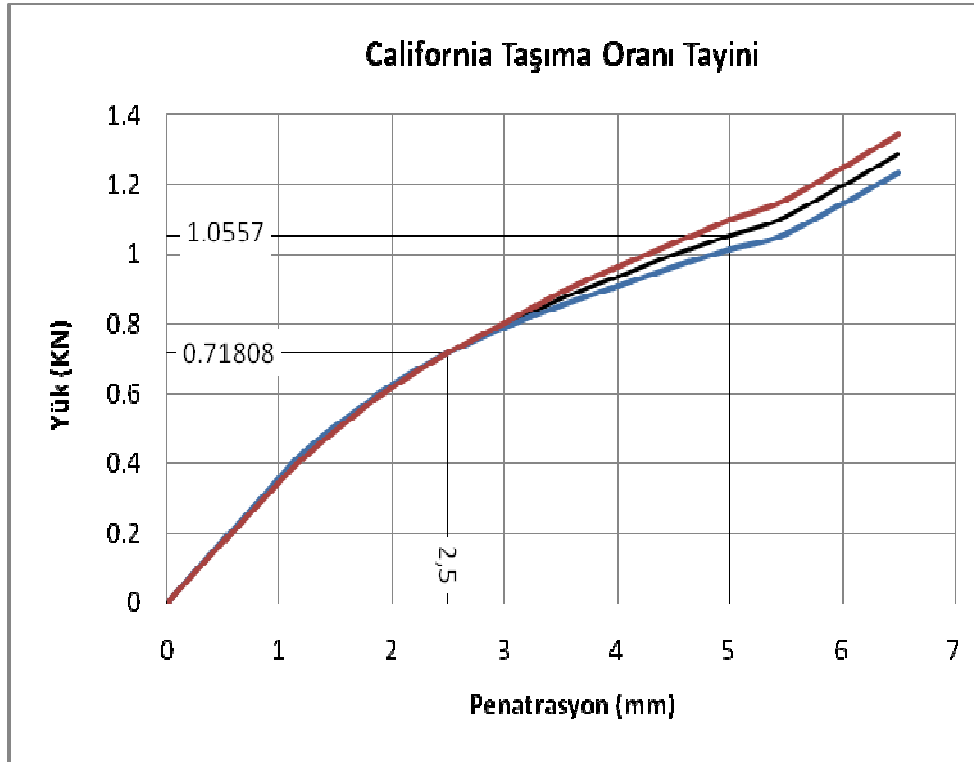
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 15 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	53	0.10812	65	0.1326		
1.25	99	0.20196	108	0.22032		
1.75	135	0.2754	139	0.28356		
2	147	0.29988	153	0.31212	11.5	2.66
2.5	165	0.3366	176	0.35904	13.24	2.63
3	178	0.36312	195	0.3978		
3.5	192	0.39168	213	0.43452		
4	203	0.41412	232	0.47328	17.6	2.52
4.5	216	0.44064	247	0.50388		
5	228	0.46512	259	0.52836	19.96	2.49
5.5	239	0.48756	273	0.55692		
6.5	283	0.57732	317	0.64668		



Şekil A.19. % 15 Polisaj Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.33. % 15 Polisaj Katkılı 7 Günlük Numune CBR Sonucu

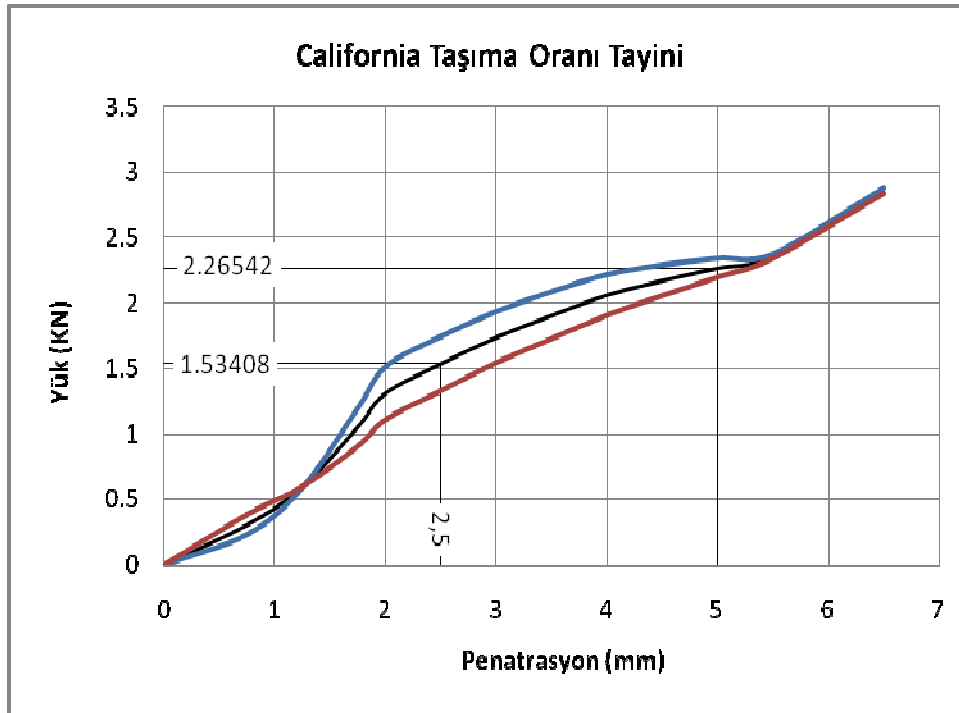
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 15 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			7 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	130	0.2652	126	0.25704		
1.25	218	0.44472	209	0.42636		
1.75	278	0.56712	273	0.55692		
2	307	0.62628	303	0.61812	11.5	5.41
2.5	352	0.71808	352	0.71808	13.24	5.42
3	388	0.79152	394	0.80376		
3.5	418	0.85272	436	0.88944		
4	446	0.90984	473	0.96492	17.6	5.33
4.5	473	0.96492	505	1.0302		
5	497	1.01388	538	1.09752	19.96	5.29
5.5	520	1.0608	568	1.15872		
6.5	604	1.23216	658	1.34232		



Şekil A.20. % 15 Polisaj 7 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.34. % 15 Polisaj Katkılı 14 Günlük Numune CBR Sonucu

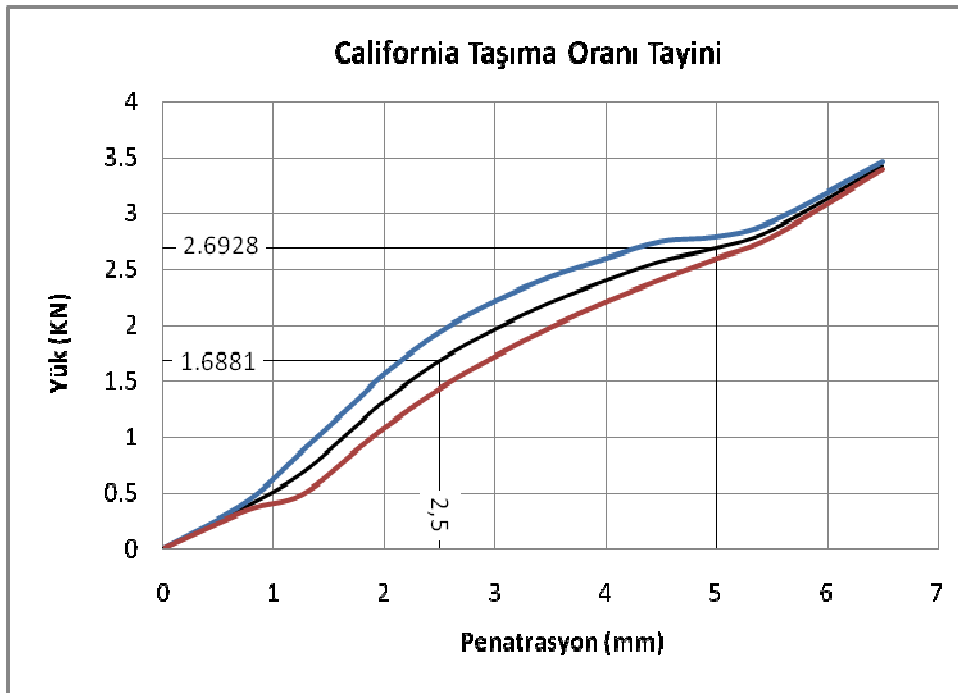
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 15 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			14 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	113	0.23052	188	0.38352		
1.25	289	0.58956	293	0.59772		
1.75	586	1.19544	444	0.90576		
2	740	1.5096	543	1.10772	11.5	11.38
2.5	853	1.74012	651	1.32804	13.24	11.59
3	946	1.92984	756	1.54224		
3.5	1020	2.0808	846	1.72584		
4	1084	2.21136	934	1.90536	17.6	11.70
4.5	1120	2.2848	1007	2.05428		
5	1145	2.3358	1076	2.19504	19.96	11.35
5.5	1161	2.36844	1147	2.33988		
6.5	1407	2.87028	1389	2.83356		



Şekil A.21. % 15 Polisaj 14 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.35. % 15 Polisaj Katkılı 28 Günlük Numune CBR Sonucu

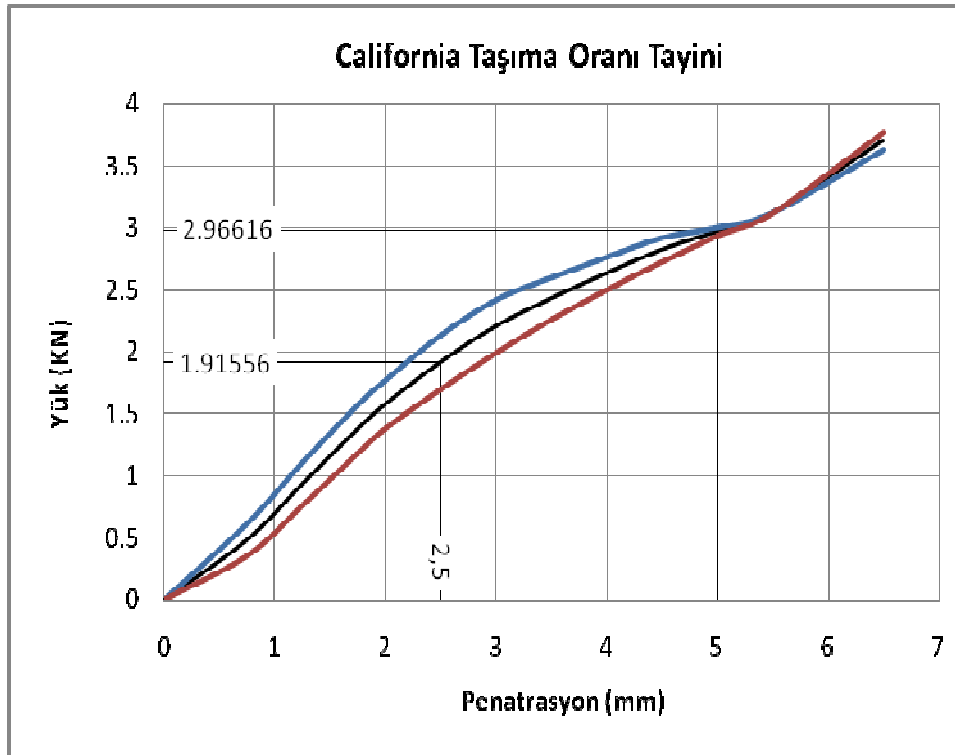
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 15 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			28 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	206	0.42024	167	0.34068		
1.25	427	0.87108	237	0.48348		
1.75	652	1.33008	434	0.88536		
2	768	1.56672	531	1.08324	11.5	11.52
2.5	952	1.94208	703	1.43412	13.24	12.75
3	1087	2.21748	844	1.72176		
3.5	1193	2.43372	971	1.98084		
4	1273	2.59692	1082	2.20728	17.6	13.65
4.5	1347	2.74788	1180	2.4072		
5	1368	2.79072	1272	2.59488	19.96	13.49
5.5	1434	2.92536	1366	2.78664		
6.5	1699	3.46596	1663	3.39252		



Şekil A.22. % 15 Polisaj 28 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.36. % 15 Polisaj Katkılı 56 Günlük Numune CBR Sonucu

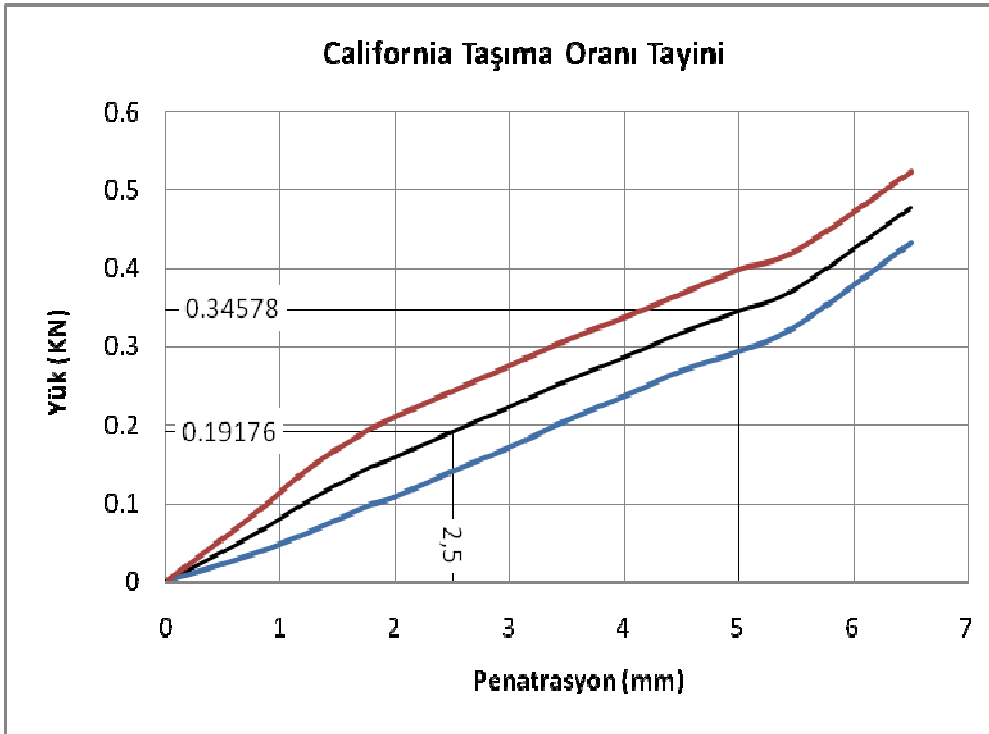
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 15 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			56 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	301	0.61404	173	0.35292		
1.25	543	1.10772	373	0.76092		
1.75	770	1.5708	579	1.18116		
2	868	1.77072	677	1.38108	11.5	13.70
2.5	1046	2.13384	832	1.69728	13.24	14.47
3	1186	2.41944	976	1.99104		
3.5	1274	2.59896	1108	2.26032		
4	1355	2.7642	1225	2.499	17.6	14.95
4.5	1430	2.9172	1336	2.72544		
5	1470	2.9988	1438	2.93352	19.96	14.86
5.5	1530	3.1212	1528	3.11712		
6.5	1778	3.62712	1847	3.76788		



Şekil A.23. % 15 Polisaj 56 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.37. % 20 Polisaj Katkılı Günlük Numune CBR Sonucu

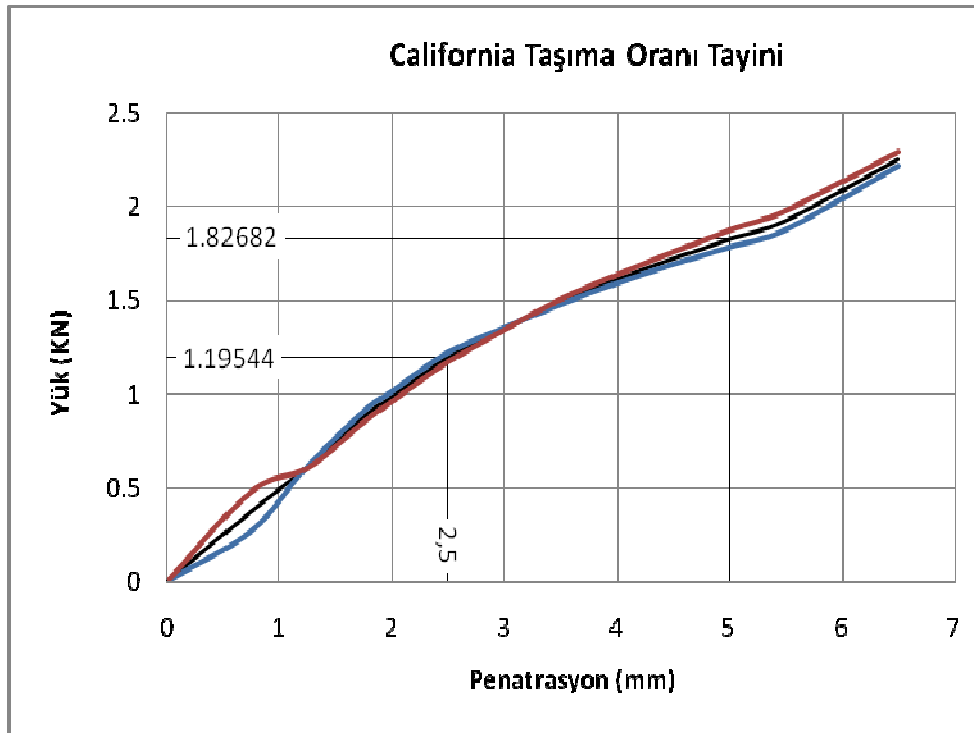
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 20 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	17	0.03468	41	0.08364		
1.25	31	0.06324	71	0.14484		
1.75	47	0.09588	94	0.19176		
2	53	0.10812	103	0.21012	11.5	1.38
2.5	69	0.14076	119	0.24276	13.24	1.45
3	84	0.17136	135	0.2754		
3.5	101	0.20604	151	0.30804		
4	116	0.23664	165	0.3366	17.6	1.63
4.5	132	0.26928	180	0.3672		
5	144	0.29376	195	0.3978	19.96	1.73
5.5	160	0.3264	207	0.42228		
6.5	212	0.43248	256	0.52224		



Şekil A.24. % 20 Polisaj Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.38. % 20 Polisaj Katkılı 14 Günlük Numune CBR Sonucu

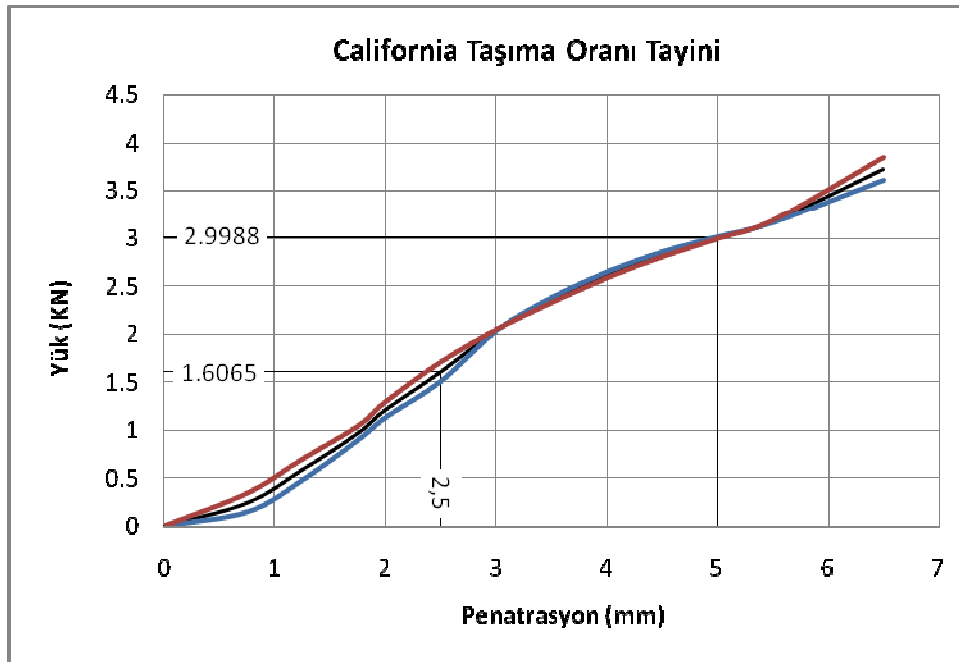
PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 20 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			14 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	132	0.26928	235	0.4794		
1.25	302	0.61608	297	0.60588		
1.75	444	0.90576	416	0.84864		
2	497	1.01388	471	0.96084	11.5	8.59
2.5	598	1.21992	574	1.17096	13.24	9.03
3	663	1.35252	658	1.34232		
3.5	724	1.47696	738	1.50552		
4	779	1.58916	802	1.63608	17.6	9.16
4.5	828	1.68912	861	1.75644		
5	873	1.78092	918	1.87272	19.96	9.15
5.5	919	1.87476	970	1.9788		
6.5	1085	2.2134	1123	2.29092		



Şekil A.25. % 20 Polisaj 14 Günlük Numune CBR Grafiği

Tablo A.39. % 20 Polisaj Katkılı 28 Günlük Numune CBR Sonucu

PROJE						
ÖRNEĞİN GELDİĞİ YER			Kil+Kireç+UK+% 20 Polisaj CBR			
ÖRNEĞİN TANIMI			28 Günlük			
Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (KN)	Alt Okuma	Yük (KN)	Standart Yük (KN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0.75	71	0.14484	168	0.34272		
1.25	235	0.4794	342	0.69768		
1.75	438	0.89352	510	1.0404		
2	553	1.12812	634	1.29336	11.5	10.53
2.5	738	1.50552	837	1.70748	13.24	12.13
3	994	2.02776	1001	2.04204		
3.5	1163	2.37252	1138	2.32152		
4	1294	2.63976	1265	2.5806	17.6	14.83
4.5	1397	2.84988	1373	2.80092		
5	1474	3.00696	1466	2.99064	19.96	15.02
5.5	1548	3.15792	1561	3.18444		
6.5	1767	3.60468	1886	3.84744		



Şekil A.26. % 20 Polisaj 28 Günlük Numune CBR Grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Kurban ÖNTÜRK, 19.09.1985 yılında Van'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İzmir'de tamamladı. 2004 yılında Çınarlı EML'den mezun oldu. 2005 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü'nü 2009'da bitirdi. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Ana bilim Dalında yüksek lisansa başladı.