

**UÇUCU KÜL – ÇİMENTO – KÖPÜK KARIŞIMININ HAFİF DOLGU
MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ**

**Dr. YÜKSEKÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
DOKÜMAN YASAL KÜTÜPHANESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İnş. Müh. M. Emre HAŞAL
(501970302011)**

100924

100924

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 1 Haziran 2000

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Haziran 2000

Tez Danışmanı : Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU

Prof. Dr. Erol GÜLER (B.Ü.)

HAZİRAN 2000

ÖNSÖZ

Günümüzde enerji üretiminin vazgeçilmez unsuru termik santrallerin, atık ürünü olan uçucu külün miktarı çevreyi tehdit eder boyutlara ulaşmıştır. Uçucu kül; sahip olduğu özellikler nedeniyle geoteknik mühendisliğinde çeşitli alanlarda büyük miktarda kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Uçucu külün geoteknik özelliklerinin ve uçucu kül – çimento – köpük karışımının geoteknik mühendisliğinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmanın, uçucu kül için yeni kullanım alanları oluşturulmasına katkıda bulunacağını ve zemin yapılarında ölü yüklerden meydana gelebilecek problemlerin en aza indirilmesinde kullanılan hafif dolgu malzemelerine yeni bir seçenek getireceğini ümit ederim.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü imkanı sağlayan, değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocam Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY'a, ayrıca çalışmalarım boyunca ihtiyaç duyduğum her an yardımını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Recep İYİSAN'a, sayın Doç. Dr. Ayşen LAV'a, sayın Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL'a ve bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkısı bulunan tüm Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyesi ve araştırma görevlilerine teşekkür ederim.

Bu çalışma kapsamında laboratuvar deneylerinin yapılması sırasında daima yardımcı olan sayın İnş. Yük. Müh. Gökhan ÇEVİKBİLEN'e, sayın İsmail CANTEKİN'e, sayın Serdar GÜLTÜRER'e ve sayın Semih VİÇ'e, çalışmalarım sırasında beni sabır ve anlayışla karşılayıp her türlü maddi ve manevi desteği veren aileme de içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2000

M. Emre HAŞAL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xxiii
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvi
1. GİRİŞ	1
2. HAFİF DOLGU MALZEMELERİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Polistiren Köpük	4
2.2.1. Polistiren köpüğün üretimi	5
2.2.2. Polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri	5
2.2.3. Polistiren köpüğün kimyasal özellikleri	9
2.2.4. Polistiren köpük ile yapılan dolgularda dizayn kriterleri	9
2.2.5. Polistirenin korunması	11
2.3. Hurda Taşıt Lastikleri	11
2.3.1. Parçalanmış lastiğin fiziksel özellikleri	13
2.3.2. Parçalanmış lastiğin mekanik özellikleri	15
2.3.3. Parçalanmış lastiğin kimyasal ve diğer özellikleri	21
2.4. Katı Atıkların Yakılmasıyla Oluşan Uçucu Küller	21
2.4.1. Katı atık uçucu küllerinin sınıflandırılması ve endeks özellikleri	23
2.4.2. Katı atık uçucu külünün kimyasal özellikleri	24
2.4.3. Katı atık uçucu külünün mühendislik özellikleri	25
2.5. Kömürün Yanmasıyla Oluşan Taban Külü ve Kazan Cürufu	29
2.5.1. Taban külü ve fırın cürufunun fiziksel özellikleri	30
2.5.2. Taban külü ve fırın cürufunun kimyasal özellikleri	32
2.5.3. Taban külü ve fırın cürufunun mühendislik özellikleri	33

2.6. Termik Santral Uçucu Külü	34
2.6.1. Termik santral uçucu külünün fiziksel özellikleri	37
2.6.2. Termik santral uçucu külünün kimyasal özellikleri	39
2.6.3. Termik santral uçucu külünün mühendislik özellikleri	42
2.6.4. Termik santral uçucu külünün nükleer özellikleri	51
3. KONU ÜZERİNDE YAPILMIŞ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	55
3.1. Polistiren Köpük Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar	55
3.1.1. Polistiren köpük ile yol dolgu teskili	55
3.1.2. Polistiren köpük ile yapılmış pratik uygulamalardan örnekler	56
3.1.3. Polistiren dolgunun faydaları ve kullanıldığı alanlar	60
3.2. Lastik Yongaları Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar	62
3.2.1. Lastik yongalardan oluşmuş tabakalara sahip yollarda araç yüklerinden meydana gelen şekil değiştirmelerin analizi	62
3.2.2. Yol kaplamasının performansına lastik yongalarının etkisini incelemek için yapılan arazi deneyleri	64
3.2.3. Lastik yongalarıyla inşa edilen yol dolgularında uyulması gerekli kriterler	67
3.2.4. Sonuçlar	67
3.3. Termik Santral Uçucu Külü Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar	68
3.3.1. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu	68
3.3.2. Uçucu kül katkısının şişen bir zeminin şişme basıncına etkisi	72
3.3.3. Uçucu külün akıcı dolgu olarak kullanılması	76
3.3.4. Uçucu kül – çimento bulamaçlarının dolgu malzemesi olarak kullanılması	82
3.3.5. Stabilize edilmiş uçucu külün mikro yapısının gelişimi	87
3.3.6. Uçucu küllerin geoteknik özellikleri	94
3.4. Hafif Dolgu Malzemesi Üretmek Amacıyla Yapılmış Çalışmalar	98
3.4.1. Volkanik kül – çimento – köpük karışımı	98
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	112
4.1. Giriş	112

4.2. Sadece Uçucu Kül Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	112
4.2.1. Orhaneli uçucu külünün kimyasal özellikleri	112
4.2.2. Orhaneli uçucu külünün geoteknik özelliklerinin bulunması	115
4.2.2.1. Elek analizi	115
4.2.2.2. Hidrometre analizi	116
4.2.2.3. Kıvam limitleri	118
4.2.2.4. Dane birim hacim ağırlığı	119
4.2.2.5. Kompaksiyon deneyi	121
4.2.2.6. Serbest basınç deneyi	122
4.2.2.7. CBR deneyi	125
4.3. Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	131
4.3.1. Karışım da kullanılan malzemelerin özellikleri	131
4.3.1.1. Hava sürükleyici katkı maddesi	131
4.3.1.2. Termik santral uçucu külü	133
4.3.1.3. Portland çimentosu	134
4.3.2. Uçucu kül – çimento – köpük karışımının hazırlanması	135
4.3.3. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı kullanılarak yapılan serbest basınç deneyleri	140
4.3.4. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı kullanılarak yapılan CBR deneyleri	143
4.4. Belirlenen (12 No'lu) Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımı Üzerinde Yapılan Deneyler	145
4.4.1. Belirlenen karışımın bazı fiziksel özellikleri	145
4.4.2. Belirlenen karışım kullanılarak yapılan serbest basınç deneyleri	146
4.4.3. Belirlenen karışım kullanılarak yapılan CBR deneyleri	149
4.4.4. Belirlenen karışım kullanılarak yapılan geçirimsizlik deneyleri	152
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	155
KAYNAKLAR	162
EKLER	167
EK A	167
EK B	170
EK C	189
EK D	215
ÖZGEÇMİŞ	228

KISALTMALAR

CBR	: California Bearing Ratio
CD	: Consolidated – Drained
CSH	: Calcium Silicate Hydrate
EPS	: Expanded Polystyrene
EXPS	: Extruded Polystyrene
HDPE	: Impermeable Polymer Membrane
KDMM	: Kontrollü Düşük Mukavemetli Malzeme
LOI	: Loss on Ignition
OUK	: Orhaneli Uçucu Külü
PÇ	: Portland Çimentosu
SEM	: Scanning Electron Mikroscope
UK	: Uçucu Kül
UKÇ	: Çimento Katılmış Uçucu Kül
UKK	: Kireç Katılmış Uçucu Kül
UU	: Unconsolidated – Drained
XRD	: X – Ray Diffraction
XRF	: X – Ray Fluorescence Spectrometry

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo No</u>		<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Hafif Dolgu Malzemeleri	4
Tablo 2.2	Polistiren Köpüğün Fiziksel ve Mühendislik Özellikleri	8
Tablo 2.3	Lastik Yongalarına Uygulanan Sıkıştırma Enerjisi, Tabaka Başına Vuruş Sayısı ve Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlık	15
Tablo 2.4	Lastik Yongalarının Elastik Parametreleri	20
Tablo 2.5	New York Şehrine Ait Katı Atıkların Genel Bileşenleri	23
Tablo 2.6	Katı Atık Külünün Fiziksel Özellikleri	24
Tablo 2.7	Katı Atık Külü Üzerinde Yapılan Test Sonuçlarının Özeti	27
Tablo 2.8	Taban Külü ve Fırın Cürufunun Dane Boyutu Dağılımları	31
Tablo 2.9	Taban Külü ve Fırın Cürufunun Tipik Fiziksel Özellikleri	31
Tablo 2.10	Seçilen Taban Külü ve Fırın Cürufu Numunelerinin Kimyasal Kompozisyonu	32
Tablo 2.11	Taban Külü ve Fırın Cürufunun Tipik Mekanik Özellikleri	33
Tablo 2.12	Dünyadaki Yıllık Uçucu Kül Üretim ve Kullanımı	36
Tablo 2.13	Değişik Kömür Çeşitlerinden Elde Edilen Uçucu Külün Kimyasal Kompozisyonları	40
Tablo 2.14	Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşimleri	42
Tablo 2.15	Kompaksiyon Enerjisinin, Zeminlerin ve Kömür Külünün Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı ve Optimum Su Muhtevası Üzerindeki Etkisi	43
Tablo 2.16	Alberta (Kanada) Uçucu Küllerinin Optimum Su Muhtevaları ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları	44

Tablo 2.17	Amerika Uçucu Küllerinin Optimum Su Muhtevaları ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları	44
Tablo 2.18	Standart Proktor Testinde Kullanılan Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri	45
Tablo 2.19	Kömür Cinsiyle Geçirimlilik Arasındaki İlişki	46
Tablo 2.20	Kömür Külü İçin Kayma Mukavemeti Açıları	49
Tablo 2.21	Lakeview Külünün; Çeşitli Kompaksiyon Enerjilerinde, Arazi ve Laboratuvarda Yapılan Deneylerle Elde Edilen CBR Değerlerinin Karşılaştırılması	50
Tablo 2.22	Türkiye'nin Çeşitli Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Uranyum Muhtevaları	51
Tablo 2.23	^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'nın Bozulmuş İzotoplarının Foton Sayıları	52
Tablo 2.24	Bazı Yapı Malzemelerinin Doğal Radyo-Nüklit Muhtevaları	53
Tablo 2.25	Uçucu Kül İçeren Betonda Radon Gazı Yayılma Hızları	53
Tablo 3.1	Lastik Yongalarıyla Yapılan Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	62
Tablo 3.2	Lastik Yükünün Merkezinin Altındaki Yol Kaplaması Deformasyonu	63
Tablo 3.3	Lastik Yongaları Kullanılarak Yapılan North Yarmouth Arazi Deneyi İçeriği	64
Tablo 3.4	Seyitömer Uçucu Külünün Bazı Endeks ve Mühendislik Özellikleri	68
Tablo 3.5	Kemberburgaz Kilinin Endeks ve Mühendislik Özellikleri	69
Tablo 3.6	Seyitömer Uçucu Külü Kullanılarak İyileştirilen Kemberburgaz Kili Üzerinde Yapılan Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları	70
Tablo 3.7	Numunelerin Endeks Özellikleri	73
Tablo 3.8	Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Analiz Sonuçları	74
Tablo 3.9	Kullanılan Malzemelerin Mineralojik Analiz Sonuçları	74
Tablo 3.10	Kül, Kireç ve Su Oranlarına Göre Grup İsimleri	76

Tablo 3.11	Soma Termik Santrali Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları	77
Tablo 3.12	Dizayn Karışımlarının 7, 14, 28 Günlük Serbest Basınç Mukavemeti ve Birim Deformasyon Sonuçları	77
Tablo 3.13	Dizayn Karışımlarının İlk ve Son Priz Süreleri ile Büzülme Yüzdeleri	80
Tablo 3.14	Dizayn Karışımlarının Geçirimlilik Katsayısı, Özgül ve Kuru Birim Hacim Ağırlıkları ve Boşluk Oranları	81
Tablo 3.15	Uçucu Kül – Çimento Bulamaçlarının Karışım Oranları ve Arazi Deney Sonuçları	84
Tablo 3.16	Uçucu Kül – Çimento Bulamaçlarının Basınç Mukavemetleri	84
Tablo 3.17	Stabilize Edilmiş ve Stabilize Edilmemiş Eraring Uçucu Külünün Kimyasal Bileşimi	88
Tablo 3.18	GFA, NFA ve VFA Uçucu Küllerinin Temel Özellikleri	95
Tablo 3.19	GFA, NFA ve VFA Uçucu Küllerinin Kimyasal Bileşimi	95
Tablo 3.20	Hafif Dolgu Malzemesi Üretiminde Kullanılan Sapporo Volkanik Külünün Fiziksel Özellikleri	99
Tablo 3.21	Su/Volkanik Kül Oranı ile Çimento Dozajı Arasındaki İlişki	99
Tablo 3.22	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımının Yoğunluğu ile Çimento Dozajı Arasındaki İlişki	100
Tablo 3.23	Solüsyonun 7 ile 28 Gün Sonundaki Ortalama Dayanım ve Yoğunlukları	109
Tablo 3.24	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımı Üzerinde Yapılan Fiziksel Deneylerin Sonuçları	110
Tablo 3.25	Arazide Yapılan Deneyin Sonucu	110
Tablo 4.1	Orhaneli Uçucu Külünün (OUK) Değişik Tarihlerde Elde Edilen Kimyasal Analiz Sonuçları	113
Tablo 4.2	Klinkere veya Betona Katılacak Uçucu Küllerin Sağlaması Gerekli Kimyasal Özellikler	113

Tablo 4.3	Zeminlerin Dane Boyutuna Göre Sınıflandırılması	115
Tablo 4.4	Elek Analizinde Kullanılan Standart Elekler	115
Tablo 4.5	Orhaneli Uçucu Külünün Kıvam Limitleri	119
Tablo 4.6	Orhaneli Uçucu Külünün Dane Birim Hacim Ağırlığı ve Özgül Ağırlığı	120
Tablo 4.7	Proktor Deneyinden Alınan Optimum Su Muhtevasına Sahip Uçucu Kül Numuneleri Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deneyinin Sonuçları	125
Tablo 4.8	CBR Deneyinde Kullanılan Standart Birim Yükler	126
Tablo 4.9	CBR Deneyi İçin Numune Hazırlanmasında Kullanılan Metotlar	126
Tablo 4.10	CBR Değerlerinin Sınıflandırılması	128
Tablo 4.11	Orhaneli Uçucu Külü Kullanılarak Yapılan CBR Deneylerinin Sonuçları	129
Tablo 4.12	PÇ 42.5'in Standart Değerleri	134
Tablo 4.13	PÇ 42.5'in Kimyasal Özellikleri	135
Tablo 4.14	Hafif Dolgu Malzemesi Üretmek İçin Yapılan Hazırlık Niteliğindeki Deneylerin Sonuçları	136
Tablo 4.15	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının İçinde Kullanılan Malzemelerin Ağırlıkça ve Hacimce Oranları	138
Tablo 4.16	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının Yoğunlukları	138
Tablo 4.17	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Elastisite Modülü (E) ve ϵ_f Değerleri	142
Tablo 4.18	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Kıvamının Belirlenmesinde Kullanılan Yayılma Deneyinin Sonuçları	146
Tablo 4.19	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının 7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı Değerleri	147
Tablo 4.20	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının 7 Günlük Elastisite Modülü ve ϵ_f Değerleri	148

Tablo 4.21	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı Değerleri	149
Tablo 4.22	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının 28 Günlük Elastisite Modülü ve ϵ_f Değerleri	149
Tablo 4.23	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının 7 Günlük CBR Değerleri	150
Tablo 4.24	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının 28 Günlük CBR Değeri	151
Tablo 4.25	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine Göre Permeabilite Katsayısı için Tipik Değerler	153
Tablo 4.26	Zeminlerin Permeabilite Katsayılarına Göre Sınıflandırılmaları	153
Tablo 4.27	Belirlenen Karışımın 7 ve 28 Günlük Permeabilite Katsayısı Değerleri	154
Tablo 5.1	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Diğer Hafif Dolgu Malzemeleriyle Karşılaştırılması	160
Tablo A.1	Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Kimyasal Bileşimleri ve Özgül Ağırlıkları	168
Tablo B.1	OUK Üzerinde Yapılan Piknometre Deneyi	171
Tablo B.2	OUK Üzerinde Yapılan Elek Analizi	172
Tablo B.3	OUK Üzerinde Yapılan Hidrometre Analizi	173
Tablo B.4	OUK Üzerinde Yapılan Standart Proktor Testi	174
Tablo B.5	0 Günlük (Kür Uygulanmayan) OUK Numunesi Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deneyi	177
Tablo B.6	1 Gün Küre Tabi Tutulan OUK Numunesi Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deneyi	178
Tablo B.7	7 Gün Küre Tabi Tutulan OUK Numunesi Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deneyi	179
Tablo B.8	15 Gün Küre Tabi Tutulan OUK Numunesi Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deneyi	180
Tablo B.9	28 Gün Küre Tabi Tutulan OUK Numunesi Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deneyi	181

Tablo B.10	0 Günlük OUK Numunesi zerinde Yapılan CBR Deneyi	182
Tablo B.11	1 Gün Su Altında Bekletilmiş OUK Numunesi zerinde Yapılan CBR Deneyi	183
Tablo B.12	10 Gün Su Altında Bekletilmiş OUK Numunesi zerinde Yapılan CBR Deneyi	184
Tablo B.13	10 Gün Su Altında Bekletilmiş OUK Numunesinin Şişme Değeri	185
Tablo D.1	7 Gün Küre Tabi Tutulmuş 12 No’lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Permeabilite Katsayısının Bulunması	226
Tablo D.2	28 Gün Küre Tabi Tutulmuş 12 No’lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Permeabilite Katsayısının Bulunması	227

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil No</u>		<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Çeşitli Dolgu Malzemelerinin Birim Hacim Ağırlıkları	6
Şekil 2.2	Polistiren Köpüğün Basınç Altında Gerilme – Deformasyon Eğrileri	6
Şekil 2.3	Polistiren Köpükte Yük Dağılımı	10
Şekil 2.4	Yapılan Çalışmada Kullanılan Lastik Yongalarının Dane Dağılımı	14
Şekil 2.5	Tek Boyutlu Sıkışabilmeyi Ölçmek İçin Kullanılan Sistem	17
Şekil 2.6	Üç Ayrı Numune Üzerinde Yapılan Sıkışabilirlik Deneyleri	17
Şekil 2.7	Yükleme – Boşaltma Çevrimlerine Bağlı Olarak Lastik Yongalarının Sıkışabilirliği	18
Şekil 2.8	Sıkışma Anında Numunede Meydana Gelen Düşey Gerilmeye Çevre Sürtünmesinin Etkisi	19
Şekil 2.9	Tek Boyutlu Sıkışma Altında Test Edilen Numunede Yatay ve Düşey Gerilme Arasındaki İlişki	19
Şekil 2.10	Katı Atık Fırını	22
Şekil 2.11	Katı Atık Uçucu Külünün Dane Dağılımı Eğrisi	23
Şekil 2.12	Katı Atık Uçucu Külünün Kimyasal Kompozisyonu	25
Şekil 2.13	Katı Atık Uçucu Külü Kullanılarak Yapılan Standart Proktor Testi Sonuçları	26
Şekil 2.14	Katı Atık Uçucu Külünde Boşluk Oranı – Geçirimsizlik İlişkisi	26
Şekil 2.15	CBR Testi Sonuçlarından Elde Edilen Su Muhtevası – Kuru Birim Hacim Ağırlık İlişkisi	28
Şekil 2.16	4 Gün Su Altında Kalan Numunelerde Su Muhtevası – CBR İlişkisi	29
Şekil 2.17	Uçucu Külün Kuru Tabanlı Kazanda Üretilmesi ve Elektrostatik Çökelticiler Yardımıyla Tutulması	35

Şekil 2.18	Mikrografikler: (a) Uçucu Kül (b) Taban Külü	38
Şekil 2.19	Termik Santral Uçucu Külünün Dane Dağılımı Eğrisi	39
Şekil 2.20	Kül Danelerinin Elektro – Mikrografikleri	41
Şekil 2.21	Tablo 2.18’de Fiziksel Özellikleri Verilen Uçucu Külün Standart Proktor Eğrisi	45
Şekil 2.22	Uçucu Küllerde Boşluk Oranı – Geçirimsizlik Katsayısı İlişkisi	46
Şekil 2.23	Sıkıştırılmış Uçucu Küllerin Donma Testleri Sonucunda Elde Edilen Su Muhtevası – Don Kabarması Eğrileri	47
Şekil 2.24	Uçucu Kül Üzerinde Yapılan Konsolidasyonlu – Drenajlı (CD) Kesme Deneyleri (Priz Süresi: 4 Gün)	48
Şekil 2.25	Uçucu Kül Üzerinde Yapılan Konsolidasyonlu – Drenajlı (CD) Kesme Deneyleri (Priz Süresi: 45 Gün)	49
Şekil 3.1	Polistiren Köpüğün Yol Dolgusunda Kullanılması	55
Şekil 3.2	Polistiren Köpük Tabakaların Yol Dolgusunda Kullanılması	56
Şekil 3.3	Yol Rampasının Polistiren Köpük Bloklarla Teşkili	57
Şekil 3.4	Kayan Yol Dolgusunun Polistiren Köpükle Tekrar Teşkili	58
Şekil 3.5	Fabrika Döşeme Dolgusunun Polistiren Köpükle Tekrar İnşası	58
Şekil 3.6	Turba Zemin Üzerinden Geçen Yol İçin Polistiren Köpük Dolgusu Teşkili	59
Şekil 3.7	Polistiren Köpük Blokların Köprü Ayağı, İstinat Duvarı, Palplanş Perde ve Dik Yamaçlardaki Yapılarda Kullanılması	61
Şekil 3.8	Polistiren Köpük Blokların Yol Dolgularında, Yaya Alt Geçitlerinde ve Yüzen Yapılarda Kullanılması	61
Şekil 3.9	Sonlu Elemanlar Çalışması için Kullanılan Zemin Profili	63
Şekil 3.10	North Yarmouth Arazi Deneyi Enine Kesiti	65
Şekil 3.11	1. ve 4. Kısımdaki İki Test Dolgusunun Enine Kesitleri	66
Şekil 3.12	Seyitömer Uçucu Külü Granülometri Eğrisi	69

Şekil 3.13	Kemberburgaz Kili Granülometri Eğrisi	69
Şekil 3.14	Kemberburgaz Kili Üç Eksenli Basınç Gerilme – Deformasyon Eğrileri	71
Şekil 3.15	% 20 Uçucu Kül - % 80 Kil Karışımı Üç Eksenli Basınç Gerilme – Deformasyon Eğrileri	71
Şekil 3.16	Soma ve Tunçbilek Uçucu Külü İlavesinin Zeminin Kıvam Limitlerine Etkisi	75
Şekil 3.17	Soma ve Tunçbilek Uçucu Külü İlavesinin Zeminin Şişme Basıncına Etkisi	75
Şekil 3.18	Soma ve Tunçbilek Uçucu Külü Katkılı Numunelerin Şişme Basıncına Kür Etkisi	76
Şekil 3.19	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Basınç Mukavemeti Değerleri	78
Şekil 3.20	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Kırılma Anı Deformasyon Değerleri	78
Şekil 3.21	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Basınç Mukavemeti Artışları	79
Şekil 3.22	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Kırılma Deformasyonu Değişimleri	79
Şekil 3.23	Uçucu Kül Numunelerinin Ağırlıkça Su / Çimento Oranı – Boşluk Oranı İlişkileri	81
Şekil 3.24	Uçucu Kül Numunelerinin Ağırlıkça Su / Çimento Oranı – Geçirimsizlik Katsayısı İlişkileri	81
Şekil 3.25	Uçucu Kül – Çimento Bulamaçlarının Basınç Mukavemetlerinin Zamanla Değişimi	85
Şekil 3.26	Bir Borunun Uçucu Kül – Çimento Bulamacıyla Dolduruluşu	86
Şekil 3.27	Yeraltı Borularının Döşenmesinde Uçucu Kül – Çimento Bulamaçlarının Kullanılması	86
Şekil 3.28	Stabilize Edilmemiş Uçucu Külün Yapısındaki Kristal Fazlarının XRD Modelleriyle Bulunması	89
Şekil 3.29	Çimento veya Kireçle Stabilize Edilmiş Uçucu Külün Yapısındaki Kristal Fazlarının XRD Modelleriyle Bulunması	90
Şekil 3.30	Uçucu Külün Çimentoyla Stabilize Edilişinden Sonraki İlk 7 Gün İçerisindeki Mikro Yapı	91

Şekil 3.31	Stabilizasyondan 7 Gün Sonra Uçucu Kül Danelerinin Hidratasyon Ürünleri İçin Çekirdekleşme ve Büyüme Sahası Oluşturması	91
Şekil 3.32	Çimentoyla Stabilize Edilmiş Uçucu Külde Etrenjit Oluşumu	92
Şekil 3.33	Çimentoyla Stabilize Edilmiş Uçucu Külde Hidratasyon Ürünlerinin Oluşması	92
Şekil 3.34	Çimentoyla Stabilize Edilmiş Uçucu Külde Kalsiyum Hidroksitin Çökmesi	92
Şekil 3.35	Kalsiyum Hidroksitin Havadaki Karbondioksitle Birleşerek Karbonatlaşması	93
Şekil 3.36	Çimento veya Kireçle Stabilize Edilen Uçucu Külün Dayanımının Zamana Bağlı Artması	94
Şekil 3.37	GFA, NFA ve VFA Uçucu Küllerinin Dane Dağılımı Eğrileri	96
Şekil 3.38	GFA, NFA ve VFA Uçucu Küllerinin Serbest Basınç Dayanımı – Deformasyon İlişkileri	97
Şekil 3.39	GFA, NFA ve VFA Uçucu Külleri İçin Boşluk Oranı – Efektif Gerilme İlişkisi	97
Şekil 3.40	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımının Üretilme Aşamaları ve Deney Yöntemi	100
Şekil 3.41	Ayarlanmış Su Oranı ile Serbest Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki	101
Şekil 3.42	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımının Yoğunluğu ile Serbest Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	102
Şekil 3.43	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımının Çimento Dozajı ile Serbest Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	103
Şekil 3.44	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımı Üzerinde Yapılan Model Deneyleri	104
Şekil 3.45	Deney Çukuru ve Kullanılan Ölçüm Aletleri	105
Şekil 3.46	Islak Birim Hacim Ağırlık ve Su Oranı	106
Şekil 3.47	Volkanik Kül – Çimento – Uçucu Kül Solüsyonunun Yoğunluk ve Akış Değerleri	106
Şekil 3.48	Kum Dolgunun Meydana Getirdiği Toprak Basıncı	107
Şekil 3.49	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımının Meydana Getirdiği Toprak Basıncı	107

Şekil 3.50	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımının Kullanıldığı Deneyde Oluşan Toprak Basıncı – Kür Süresi – Kür Sıcaklığı İlişkisi	108
Şekil 3.51	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımının 7 ve 28 Gün Sonundaki Dayanım – Yoğunluk İlişkileri	109
Şekil 4.1	Hidrometre Aleti	117
Şekil 4.2	Orhaneli Uçucu Külünün Granülometri Eğrisi	117
Şekil 4.3	Casagrande Aleti	118
Şekil 4.4	Standart Proktor Kalıbı ve Tokmağı	121
Şekil 4.5	Orhaneli Uçucu Külüne Ait Kuru Birim Hacim Ağırlık – Su Muhtevası Eğrisi	122
Şekil 4.6	Serbest Basınç Deneyinde Kullanılacak Numunenin Tüpten Çıkarılışı	123
Şekil 4.7	Serbest Basınç Deneyinde Kullanılan Üç Eksenli Basınç Aleti	123
Şekil 4.8	Optimum Su Muhtevasına Sahip Uçucu Kül Numunelerinin Kür Süresine Bağlı Gerilme – Düşey Deformasyon Eğrileri	124
Şekil 4.9	Optimum Su Muhtevasına Sahip Uçucu Kül Numunelerinin Serbest Basınç Dayanımlarının Kür Süresine Bağlı Değişimi	124
Şekil 4.10	Islak CBR Deneyinde Kabarmanın Ölçümü	127
Şekil 4.11	CBR Deneyinin Yapılışı ve Yükleme Aletinin Detayı	128
Şekil 4.12	Amerika'nın Değişik Eyaletlerinde CBR Değerlerine Göre Kaplama Kalınlıklarının Belirlenmesi İçin Kullanılan Eğriler	129
Şekil 4.13	Orhaneli Uçucu Külü Üzerinde Yapılan CBR Deneyleri Sonucunda Elde Edilen Düşey Yük – Penetrasyon Eğrileri	130
Şekil 4.14	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının Hazırlanmasında Kullanılan Mikser	137
Şekil 4.15	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının Yoğunluklarının Ağırlıkça Çimento ve Uçucu Kül Oranına Bağlı Değişimi	139
Şekil 4.16	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımlarının Çimento Dozajına Bağlı Değişimi	140

Şekil 4.17	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımlarının Ağırlıkça Su / Çimento Oranına Bağlı Değişimi	141
Şekil 4.18	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımlarının Çimento ve Uçucu Kül Oranına Bağlı Değişimi	141
Şekil 4.19	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Elastisite Modüllerinin, Ağırlıkça Çimento ve Uçucu Kül Oranına Bağlı Değişimi	142
Şekil 4.20	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 Günlük CBR Değerlerinin Çimento Dozajına Bağlı Değişimi	143
Şekil 4.21	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 Günlük CBR Değerlerinin Ağırlıkça Su / Çimento Oranına Bağlı Değişimi	144
Şekil 4.22	Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımlarının 7 Günlük CBR Değerlerinin Çimento ve Uçucu Kül Oranına Bağlı Değişimi	144
Şekil 4.23	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Yoğunluğunun Karıştırma Süresine Bağlı Değişimi	145
Şekil 4.24	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Üretiminden 7 Gün Sonra Yapılan Serbest Basınç Deneylerinden Elde Edilen Gerilme – Düşey Deformasyon Bağlılıkları	147
Şekil 4.25	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Üretiminden 28 Gün Sonra Yapılan Serbest Basınç Deneylerinden Elde Edilen Gerilme – Düşey Deformasyon Bağlılıkları	148
Şekil 4.26	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Üretiminden 7 Gün Sonra Yapılan CBR Deneylerinden Elde Edilen Düşey Yük – Penetrasyon Eğrileri	150
Şekil 4.27	12 No'lu Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Üretiminden 28 Gün Sonra Yapılan CBR Deneyinden Elde Edilen Düşey Yük – Penetrasyon Eğrileri	151
Şekil 4.28	Sızma Hızı Şematik Gösterimi	152
Şekil 4.29	Düşen Seviyeli Permeametre Aleti	154
Şekil B.1	0 günlük (kür uygulanmayan) OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi	177

Şekil B.2	1 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi	178
Şekil B.3	7 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi	179
Şekil B.4	15 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi	180
Şekil B.5	28 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi	181
Şekil B.6	0 günlük (kür uygulanmamış) OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrisi	186
Şekil B.7	1 gün su altında bırakılmış OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrisi	187
Şekil B.8	10 gün su altında bırakılmış OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrisi	188
Şekil C.1	7 gün küre tabi tutulmuş 1 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	190
Şekil C.2	28 gün küre tabi tutulmuş 1 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	190
Şekil C.3	7 gün küre tabi tutulmuş 2 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	191
Şekil C.4	7 gün küre tabi tutulmuş 3 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	192
Şekil C.5	28 gün küre tabi tutulmuş 3 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	192
Şekil C.6	7 gün küre tabi tutulmuş 4 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	193

Şekil C.7	28 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	194
Şekil C.8	7 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	195
Şekil C.9	28 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	195
Şekil C.10	7 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	196
Şekil C.11	28 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	197
Şekil C.12	7 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	198
Şekil C.13	7 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	199
Şekil C.14	28 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	199
Şekil C.15	7 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	200
Şekil C.16	28 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	201
Şekil C.17	7 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	201
Şekil C.18	28 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	202
Şekil C.19	7 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	202

Şekil C.20	28 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	203
Şekil C.21	7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	203
Şekil C.22	28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	204
Şekil C.23	7 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	205
Şekil C.24	7 gün küre tabi tutulmuş 2 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	205
Şekil C.25	7 gün küre tabi tutulmuş 3 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	206
Şekil C.26	7 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	206
Şekil C.27	7 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	207
Şekil C.28	7 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	208
Şekil C.29	7 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	209
Şekil C.30	7 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	210
Şekil C.31	7 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	211
Şekil C.32	7 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	212

Şekil C.33	7 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	213
Şekil C.34	7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	214
Şekil D.1	7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	219
Şekil D.2	28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri	221
Şekil D.3	7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	224
Şekil D.4	28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri	225

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktivite
c	: Kohezyon
c_u	: Drenajsız Kayma Mukavemeti
C_c	: Sıkışma İndisi
C_r	: Yeniden Sıkışma İndisi
C_u	: Uniformluk Katsayısı
D	: Zorlanma Modülü
D_{50}	: Ortalama Dane Çapı
e	: Boşluk Oranı
E	: Young Modülü
G_s	: Özgül Ağırlık
I_p	: Plastisite İndisi
i	: Hidrolik Eğim
k	: Permeabilite Katsayısı
K_o	: Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı
pH	: Asitlik Derecesi
q_u	: Serbest Basınç Dayanımı
S	: Doygunluk Derecesi
w	: Su Muhtevası
w_L	: Likit Limit
w_{opt}	: Optimum Su Muhtevası
w_p	: Plastik Limit
w_s	: Rötire Limiti

- ε_f : Maksimum Deviator Gerilmeye Ulaşıldığı Andaki Eksenel Deformasyon
- ε_v : Düşey Deformasyon
- ϕ_u : Drenajsız Kayma Mukavemeti Açısı
- γ_{kmaks} : Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
- γ_n : Doğal Birim Hacim Ağırlık
- γ_s : Dane Birim Hacim Ağırlığı
- ν : Poisson Oranı
- σ : Düşey Gerilme
- $\Delta\sigma$: Deviator Gerilme



UÇUCU KÜL – ÇİMENTO – KÖPÜK KARIŞIMININ HAFİF DOLGU MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Kömürle çalışan termik santrallerin yan ürünü olan uçucu kül, bütün dünyada çevre için potansiyel tehlike oluşturmaktadır. Birçok endüstrileşmiş ülke, toz haline getirilmiş uçucu kül depolarına sahiptir. Bu atık malzeme, büyük miktarda kullanılabilirse ve mevcut stoklar tüketilebilirse, çok önemli çevresel faydalar sağlanacaktır. Bu çalışmada, C - sınıfı kimyasal bileşime sahip olan Orhaneli uçucu külünün geoteknik özellikleri araştırılmış ve daha sonra, dolgularda ve dayanma yapılarının arkasında kullanılabilecek hafif dolgu malzemesi üretilmesi amacıyla, Orhaneli uçucu külü; çimento ve hava sürükleyici katkı maddesiyle karıştırılmıştır.

Başlangıçta, Orhaneli uçucu külünün endeks özellikleri araştırılmış, daha sonra Standart Proktor enerjisi uygulanarak optimum su muhtevasında sıkıştırılmış uçucu kül numunelerinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Uçucu külün puzolanik reaktivitesinin mekanik özelliklerine etkisini bulmak amacıyla, nem odasında 1, 7, 15 ve 28 gün küre tabi tutulan uçucu kül numuneleri üzerinde serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır.

Uçucu külden faydalanmak ve konvansiyonel dolgu malzemelerine yeni bir alternatif getirmek için, uçucu kül – çimento – köpük karışımı hafif dolgu malzemesi olarak geliştirilmiştir. Homojen karışım elde etmek için laboratuvarında birçok karışım oranı deneyi düzenlenmiştir. Serbest basınç ve CBR deneylerinden elde edilen sonuçlar, uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının dolgu malzemesi olarak yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip olduğunu göstermiştir. 130 kg/m³ çimento ve 175 kg/m³ uçucu külden meydana gelen uçucu kül – çimento – köpük karışımı, üretildikten 7 gün sonra 150 kPa ve 28 gün sonra 300 kPa dayanıma ulaşmıştır. CBR deneyleri göstermiştir ki, uçucu kül – çimento – köpük karışımı temel altı malzemesi olarak yeterli taşıma gücüne sahiptir. Uçucu kül – çimento – köpük karışımları üretildikten hemen sonra akıcı haldeyken, 5.20 kN/m³ ile 5.60 kN/m³ arasında değişen yoğunluğa sahiptirler. Karışımın yoğunluğu ve dayanımı, kullanılan hava sürükleyici katkı maddesinin miktarının değiştirilmesiyle ayarlanabilir.

Toprak basınçlarını azaltmanın bir yolu da dolgu malzemelerini hafifletmek ve katılaştırmaktır. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı buna iyi bir örnektir. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı; dayanma yapıları ve köprü ayakları arkasında dolgu malzemesi olarak, yatay toprak basınçlarını azaltmak için kullanılabilir. Kayma potansiyeli yüksek şevler ve yumuşak killer üzerinde hafif dolgular oluşturarak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde de kullanılabilir. Uçucu kül – çimento – köpük karışımından hafif dolgu malzemesi olarak faydalanılması, uçucu kül için yeni bir kullanım alanı sağlayacaktır.

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF FLY ASH – CEMENT – FOAM MIXTURE AS A LIGHTWEIGHT FILL MATERIAL

SUMMARY

Fly ash, being a by – product of coal fired thermal power plant, creates a potential hazard for environment all around the world. Most of the industrial countries have large stockpiles of pulverized fly ash and there will be important environmental benefits if large quantities of such waste material can be used and if existing deposits can be removed. In this study, geotechnical properties of Orhaneli fly ash, which had a chemical composition of Class – C fly ash, were researched and after this, Orhaneli fly ash was mixed with cement and air entraining admixture to produce a lightweight fill material to be used in embankments and behind retaining walls.

Initially, index properties of Orhaneli fly ash were researched, afterwards mechanical properties of the fly ash samples, which had been compacted at their optimum water content by applying Standard Proctor energy, were examined. In order to find the effects of pozzolanic reactivity of fly ash to its mechanical properties, unconfined compression and CBR tests were done after fly ash samples had been cured in humidity room for 7 and 28 days.

In order to utilize fly ash and to bring a new alternative to conventional fill materials, fly ash – cement – foam mixture has been developed as a lightweight fill material. A lot of mix proportion tests were conducted in the laboratory to produce a homogeneous mixture. The results obtained from unconfined compression and CBR tests showed that fly ash – cement – foam mixtures have enough strength and durability for using as a fill material. Fly ash – cement – foam mixture attained a typical 7 day strength of 150 kPa and a 28 day strength of 300 kPa with a total solid material quantity of 305 kg/m³. The amount of total solid material was formed of both a cement quantity of 130 kg/m³ and a fly ash quantity of 175 kg/m³. CBR tests showed that fly ash – cement – foam mixture has enough bearing capacity to be used as a subbase material. Just after production in a flowable state, all of the fly ash – cement – foam mixtures had varying values of density between 5.20 – 5.60 kN/m³. The density and strength of the mixture can be adjusted by varying the quantity of the foam used.

One way of reducing soil pressures is to lighten and solidify the fill materials and fly ash – cement – foam mixture is a good example. It can be used behind retaining walls and abutments to relieve horizontal soil pressures. It can be used as a fill material on slopes with high slip potential. Also it can be used as a fill material on soft clays to reduce consolidation settlements and to solve bearing capacity problems. Utilization of fly ash – cement – foam mixture as a lightweight fill material will provide a new disposal area for fly ash.

1. GİRİŞ

Günümüzde bütün mühendislik dallarında gerekli özelliklere sahip ekonomik malzemelerin kullanılması yaygın hale gelmiştir. İnşaat mühendisliğinde kullanılan yapı malzemelerinde aranan özellikler; iç ve dış etkilere karşı yeterli dayanım ve dayanıklılığa, kullanılacağı alana uygun şartlara ve düşük maliyete sahip olmasıdır. Üstyapı inşaatında, taşıyıcı sistemleri daha ekonomik hale getirmek için ölü yükleri azaltma seçeneğine başvurulmuş, yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip hafif malzemelerin üretimine başlanmıştır. Hafif malzeme üretimini daha ekonomik hale getirmek için, ucuz hammadde arayışına gidilmiştir.

Endüstriyel atıkların tekrar kullanılabilir hale getirilmesi, bütün dünyada olduğu gibi Türkiye’de de büyük bir problem haline gelmiştir. Üstyapı inşaatında kullanılan malzemelerin hammadde ihtiyacının endüstriyel atıklardan sağlanması bu problemin çözümüne yetmemiş, yeni kullanım alanları bulunmasının gerekliliği anlaşılmıştır. Altyapı inşaatı ve zemin yapıları, özellikle hafif endüstri atıklarının büyük miktarlarda tüketilmesini imkan kılan kullanım alanlarına sahiptir. Hafif ve gerekli mühendislik özelliklerine sahip endüstriyel atıklar, ucuz temin edilebilmelerinin yanında, ölü yükleri azaltacaklarından çeşitli zemin problemlerinin ortadan kalkmasına ve zemin yapılarının en ekonomik şekilde dizayn edilmesine yardımcı olacaklardır.

Hafif dolgu malzemeleri, geoteknik mühendisliğinde; çok yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturularak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, heyelan veya kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde, dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılmaktadır. Ağaç kabuğu, talaş gibi orman ürünleri sanayii atıkları, kullanılmış oto lastiği parçaları, polistiren köpük ve termik santral külü hafif dolgu malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Günümüzde endüstriyel atıkların depolanması büyük bir problem haline geldiği için, geoteknik mühendisliğinde de mümkün olduğunca endüstriyel

atıkların hafif dolgu malzemesi olarak büyük miktarlarda kullanılması sağlanmalıdır. Kullanılmış oto lastiği parçaları, termik santral taban külleri ve uçucu külleri, hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmaya en elverişli endüstriyel atıklardır.

Kullanılmış oto lastikleri, özel makinelerle parçalanarak granül hale getirildikten sonra sıkıştırılarak hafif dolgu teşkil edilmesinde kullanılmaktadır. Sıkıştırılmış oto lastiği parçaları hafif olmaları dışında; ucuz, dayanıklı, düşük değerinde yatay basınç ileten ve kolaylıkla drene olabilir malzemelerdir.

Pulverize (toz haline getirilmiş) kömür ile çalışan termik santrallerde, elektrik enerjisi üretiminde uygulanan yöntemler sonucunda üretimin esas amacının dışında kalan yan ürünler ortaya çıkmaktadır. Aynı ürünler, kömür kullanan; demir, çelik veya diğer metal üretimi yapan fabrikalarda da ortaya çıkmaktadır. Yan ürün olarak ortaya çıkan ve büyük miktarlara ulaşan bu atık malzemelerden kurtulmak ve bunları depolamak çoğu kez büyük güçlükler çıkarmaktadır.

Pulverize edilen kömürün yanması sonucu üç çeşit atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birincisi taban külü, ikincisi sıcak baca gazları ile taşınan, filtrelerde tutulan ve atık malzemenin % 80 kadarını oluşturan uçucu küldür. Bunlardan başka kazanın dibinde bir miktar cüruf da kalmaktadır. Uçucu külün sıkıştırılması ile elde edilen dolgularda yüksek taşıma gücü elde edilmektedir. Ayrıca sıkıştırılmış uçucu kül ile hafif dolgular teşkil edilebildiğinden, çok sıkışabilir yumuşak zeminler üzerindeki dolgular problemsiz şekilde oluşturulabilmektedir. Uçucu kül; tek başına, zemin ile karıştırılarak kullanılabilirdiği gibi özelliklerine bağlı olarak çimento ve kireç karışımlarıyla da kullanılabilir. Uçucu kül, çimento ve köpük karışımı sonucunda yeterli mühendislik özelliklerine sahip hafif dolgu malzemesi üretilmektedir.

Türkiye'deki termik santrallerden elde edilen yıllık uçucu kül miktarı 15 milyon ton civarındadır. Hollanda, Danimarka, Almanya, Finlandiya ve Belçika gibi ülkelerde elde edilen uçucu külün neredeyse tamamı inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır. Türkiye'de, bilim adamları tarafından 1960 ve 1970'li yıllardan itibaren çok değerli çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, çok az sayıda uygulama yapılabilmektedir. Türkiye'de endüstriyel atıkların başında yer alan termik santral uçucu külü; katkı malzemeleri olmaksızın veya çeşitli katkı malzemeleri yardımıyla büyük miktarlarda hafif dolgu malzemesi üretiminde kullanılmaya elverişlidir.

2. HAFİF DOLGU MALZEMELERİ

2.1. Giriş

Hafif dolgu malzemeleri, geleneksel olarak kereste endüstrisinin talaş ve kabuk gibi atıklarıdır. Bu maddeler yeterli miktarda bulundukları zaman, dolgu malzemesi olarak kullanılmaya elverişlidir. Fakat günümüzde, diğer endüstri dallarından çok büyük miktarlarda atık malzeme elde edildiği için, yeni atık malzeme çeşitlerinin kullanıma kazandırılması gerekmektedir. Aksi takdirde yeni atık malzeme çeşitleri, çevre için büyük tehdit oluşturacaktır.

Dolguda kullanılan hafif dolgu malzemeleri olarak; ağaç kabuğu, talaş, yonga, deniz kabuğu, ponza taşı, köpük beton, termik santral külü, termik santral uçucu külü, volkanik kül – çimento – köpük karışımı, kullanılmış oto lastiği parçaları sayılabilir. Tablo 2.1’de hafif dolgu malzemelerinin sıkıştırılması ile elde edilen dolguların birim hacim ağırlıkları verilmektedir (Aksoy, 1998).

Hafif dolgu malzemelerinin kullanılması; dolguların dizayn yükünü sıradan dolgu malzemelerine göre azaltmakta, yumuşak zeminler üzerinde dolgu teşkili sırasında karşılaşılan stabilite ve oturma problemlerinin çözümünün yanında, kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilebilmesinde ve istinat yapılarına gelen toprak itkilerinin azaltılmasında da kullanılmaktadır.

Tablo 2.1 Hafif dolgu malzemeleri (Aksoy, 1998)

Dolgu Cinsi	Sıkıştırılmış Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
Zemin	15.69-21.58
Talaş / Yonga	3.43-9.81
Ağaç kabuğu	3.43-9.81
Deniz kabuğu	-
Ponza taşı	6.37
Köpük beton	5.88
Kül (termik santral)	15.69-17.65
Uçucu kül (termik santral)	14.71-17.65
Volkanik kül+Çimento+Köpük	9.81
Kullanılmış oto lastiği parçaları	6.28-9.32
Polistiren köpük	0.20-0.98

2.2. Polistiren Köpük

Polistiren; mühendislik dolgusu olarak ilk defa, 1965 yılında Norveç'te kaldırım inşaatı sırasında yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu tecrübeden anlaşılmıştır ki, polistiren kalın kütleler halinde yol dolgusu inşaatında kullanılabilir. Genleşmiş polistiren ilk kez Oslo yakınındaki Flonn'da (Norveç), 1.5 m yüksekliğinde olan ve üzerinde oturmaların 30 yılı aşkın süredir devam ettiği yolun tekrar yapımında kullanılmıştır. 1980'e kadar, Norveç'te yapılan 25 dolgu inşaatında 35000 m³ polistiren malzeme kullanılmıştır. Polistiren, Norveç ve İsveç'te bu şekilde kullanılmaya devam edilmektedir (Sanders ve Snowdon, 1993).

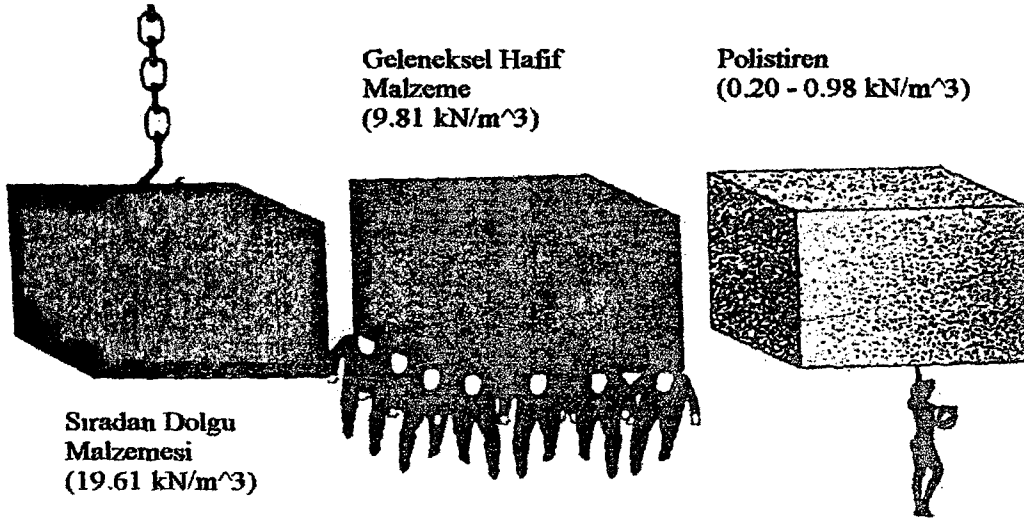
2.2.1. Polistiren Köpüğün Üretimi

Polistiren köpük; genleşmiş polistiren köpük ve ekstrude polistiren köpük olmak üzere iki tür imal edilmektedir. Polistiren köpüğü üretmek için; stiren monomer daneleri (genleşme köpüğü içeren), kuru buhar kürü yardımıyla orijinal hacimlerinin 40 katına kadar çıkarılmaktadır. Daneler daha sonra olgunlaşmaya bırakılmaktadır. Genleşmiş polistireni elde etmek için daneler kalıba dökülüp, daha fazla buhar kürü uygulanmakta ve istenen şekle gelmesi için eritilmektedir. Ekstrude polistiren ise köpüklü malzemenin kalıba dökülmesinden sonra malzemeye basınç uygulanması yoluyla elde edilmektedir. Üretim metotlarındaki farklılık nedeniyle, bu iki malzeme fiziksel ve mekanik açıdan birbirinden farklıdır. En son kalıba konulma işleminden sonraki iki güne kadar polistiren malzemeler nihai dayanımlarına ulaşamazlar. Polistiren köpük, fabrika çıkışı bloklar olarak temin edilebilir. Köpüğü yerinde dökmek teknik olarak mümkün değildir (Sanders ve Snowdon, 1993).

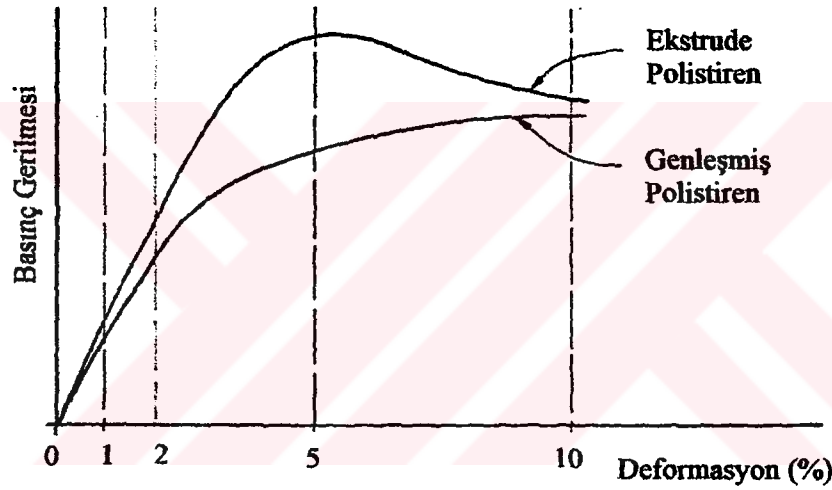
Ekstrude polistiren (EXPS) üretmek için gerekli işlem sonucunda 10-12 cm kalınlığında levhalar üretilir. Bu çeşit polistiren köpüğün dezavantajları; gerekenden fazla yoğunluğa sahip olması, yüksek üretim maliyeti ve büyük bloklar yerine kağıt levhalar şeklinde üretilmesidir. Bu faktörler toplam maliyeti arttırmaktadır. Genleşmiş polistiren (EPS); daha düşük maliyette, amaca uygun olarak büyük bloklar halinde ve dayanım/yoğunluk oranının gerektirdiği şekilde üretilebilir (Flaate,1989). Aynı birim hacim ağırlığa sahip ekstrude polistiren köpüğün fiyatı genleşmiş polistiren köpüğe nazaran iki mislidir (Aksoy,1998).

2.2.2. Polistiren Köpüğün Fiziksel ve Mühendislik Özellikleri

Polistirenin, şüphesiz ki en büyük avantajı düşük birim hacim ağırlığa sahip olmasıdır (Şekil 2.1). Normalde 0.20 kN/m^3 birim hacim ağırlığında üretilir, fakat su muhtevasında zamanla artış olacağını hesaba katarsak, oturma ve stabilite problemleri için 0.98 kN/m^3 değeri uygun olur. Bu durum EPS bloklarının sahada taşınmasını kolaylaştırır ($0.5 \times 1 \times 3 \text{ m}$). Blokların bir tanesi 300 N ağırlığındadır. Bir kamyon bir defada 100 m^3 alabilir. Taşımada limit, yük değil hacimdir (Flaate, 1989).



Şekil 2.1 Çeşitli dolgu malzemelerinin birim hacim ağırlıkları (Flaate, 1989)



Şekil 2.2 Polistiren köpüğün basınç altında gerilme-deformasyon eğrileri (Sanders ve Snowdon, 1993)

Genleşmiş ve ekstrude polistirenin, tek eksenli basınç altında gösterdikleri davranışlar birbirinden çok farklıdır (Şekil 2.2). Genleşmiş polistiren % 1 - 2 boy değiştirmeye kadar (akma başlangıcı), lineer elastik malzeme gibi davranır. Daha sonra, uygulanan basınç gerilmesinde oluşan küçük artışlar, büyük şekil değiştirmeler meydana gelmesini sağlar. Boyda meydana gelen % 10 kısalmadan sonra basınç dayanımında çok az bir artış meydana gelir. Ekstrude polistiren de genleşmiş polistiren gibi lineer elastik davranış gösterir (Daha geniş bir bölgede). Deformasyon kontrollü testlerde, % 5 boy kısalması değeri civarında maksimum basınç dayanımına ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu maksimum gerilme, genellikle

malzemenin karakteristik basınç dayanımı olarak alınır. Ekstrude polistiren göçme anında gevrek davranış gösterir.

Norveç'te yapılan deneyler göstermiştir ki; polistiren, karakteristik basınç dayanımının % 80'i büyüklüğünde tekrarlı gerilmelere maruz bırakılsa bile, bundan sonra yine karakteristik basınç mukavemetini sağlamaktadır. Mühendislik amaçları için akmanın başladığı gerilme değeri daha önemlidir. Çünkü, eğer akma gerilmesi değeri aşılsa, onarılamayacak plastik şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Genelde akma gerilmesi değeri olarak, % 1 boy değiştirmeye tekabül eden basınç gerilmesi alınabilir. Sabit yükler altında yapılan sünme deneyleri göstermiştir ki; uzun süreli sünme deformasyonları, uygulanan yükün artmasıyla artmaktadır. % 1 boy değiştirmeye sebep olacak basınç gerilmesi altında, sünmenin hızı yavaş olacaktır. Başlangıçtaki boy değiştirme % 0.5'i geçmediği takdirde, sünme ihmal edilebilir. Tekrarlı yüklerin meydana getireceği sünmeyi belirlemek için laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. Bulgular göstermiştir ki, tekrarlı yükler akma gerilmesi değerinin altında gerilmeler oluşturdukça sünme oluşmamaktadır.

Polistiren; düşük Poisson oranına (ν) sahip olduğundan, düşey yük altında çok az miktarda yanıl deplasman yapar. Polistiren malzemelerin birim hacim ağırlığının, karakteristik basınç dayanımı gibi diğer mühendislik özelliklerine doğrudan etkisi vardır. Polistiren, basınç dayanımına göre yüksek kayma dayanımı değerine sahiptir. Polistiren blokların kalıplanmış yüzeyi için genellikle sürtünme katsayısı olarak 0.5 değeri alınır, bu değer de 27°'lik sürtünme açısına denk gelir. Kesilmiş veya kırılmış yüzeylerin sürtünme açısı daha büyük alınır.

Polistiren malzemeler; çok düşük birim hacim ağırlıklarına rağmen, düşük su emme potansiyeline sahiptirler. Malzemeyi oluşturan daneler, kapalı hücreli yapıya sahiptirler ve bu nedenle su emmezler. Sınırlı sayıda içten bağlanmış boşluklar, toplam hacimde küçük orana sahiptirler ve suyun dolması için yeterli olmamaktadırlar. Malzemenin geçirimsizliği düşüktür, fakat su malzemenin içine kılcal boşluklar yardımıyla sınırlı miktarda girebilir. Norveç'te yapılan uzun süreli gözlemler; devamlı su seviyesinin altında kalan polistiren dolgularda, hacimce su emme değerinin % 9'a erişebileceğini göstermiştir. Periyodik olarak su seviyesinin altında kalan polistiren dolgularda, hacimce su emme değeri % 4'e çıkmıştır. Su seviyesinin üstünde kalan polistiren dolgularda, kılcal yükseklik küçük olmaktadır

(20 cm civarında). Kapiler doygun bölgenin üstünde kalan bölgede nem oranı hacimsel olarak % 1'i ancak geçmektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki; su emme değerinin, dolgunun dayanımı ve sıkışabilirliği üzerindeki etkisi çok azdır (Sanders ve Snowdon, 1993). Tablo 2.2'de, polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.2 Polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri (Aksoy, 1998)

ÖZELLİKLER	Genleşmiş Polistiren Köpük	Ekstrude Polistiren Köpük
Basınç Dayanımı * (N/mm ²)	0.02 – 0.1	0.14 - 0.37
Basınç Dayanımı ** (N/mm ²)	0.07 - 0.19	0.25 - 0.67
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	0.15 - 0.30	0.28 - 0.55
Projelendirmede Kullanılması Tavsiye Edilen Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	1.00	-
Poisson Oranı (ν)	0 – 0.02	
Kayma Dayanımı (N/mm ²)	0.09 – 0.22	-
Bloklar Arası Sürtünme Açısı (Sürtünme Katsayısı)	27° (μ=0.5)	
Hacimce Su Emme (%)	7 Gün 2 – 3	1 Yıl 3.5 - 5
Kapiler Yükseklik (cm)	20	-
CBR (%)	< 2	2 - 5
(*) % 1 Deformasyonda (**) % 10 Deformasyonda		

2.2.3. Polistiren Köpüğün Kimyasal Özellikleri

Polistiren, birçok çeşit malzemeye kimyasal olarak dirençlidir. Buna rağmen, polistiren köpüğün yüzeyinin tahrip olması ve uzun sürede büzülmelerin oluşması aşağıdaki malzemelerle reaksiyon oluşması sonucunda meydana gelebilir:

- Bazı bitkisel yağlar
- Birçok hayvani yağ çeşiti
- Motorin
- Fenol
- Parafin.

Bazı maddeler çok miktarda veya yüksek konsantrasyona sahip olduklarında polistiren köpüğü eritebilirler:

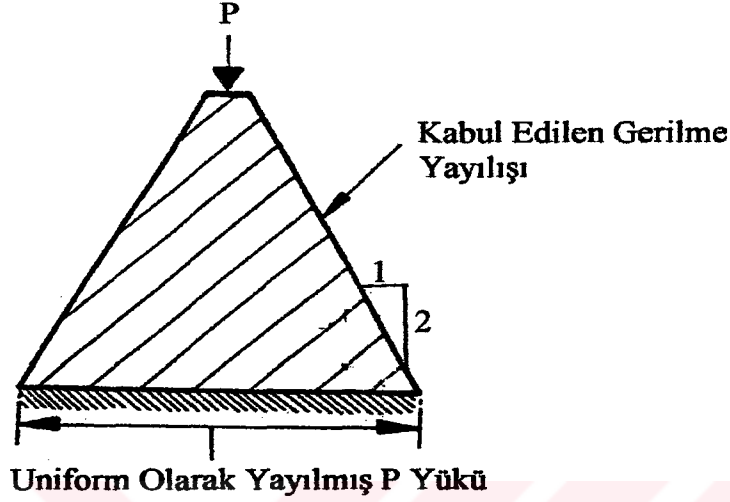
- Birçok hidrokarbon; özellikle petrol ve katran
- Klorlanmış hidrokarbonlar ve kloroflorokarbonlar
- Ketonlar, eterler ve esterler gibi diğer organik çözücüler
- Asit konsantrasyonları.

Polistiren; bakterilerin ve mantarların yol açacağı bozulmalara karşı hassas değildir, bu nedenle biyolojik bozulmaya uğramaz. Polistiren, hayvanlar açısından besin değerine sahip değildir. Polistiren, yanabilir bir malzemedir ve büyük hacimlerde oksijenin mevcut olduğu durumlarda tutuşunca aniden yanabilir. Polistiren, yanmayı geciktirici katkı maddesi ile birleştirilirse, ani tutuşma ihtimali ortadan kalkar. Ultra-viole ışınlarla maruz kalması halinde, polistirenin rengi solar ve yüzeyi kırılganlaşır. Bitmiş mühendislik dolgularında ışınların önemi yoktur (Sanders ve Snowdon, 1993).

2.2.4. Polistiren Köpük ile Yapılan Dolgularda Dizayn Kriterleri

Polistiren köpüğün dizayn dayanımı, % 1 şekil değiştirmeye (bütün normal yükleme koşullarında) karşı gelen basınç dayanımı olarak alınmalıdır. Polistiren dolgunun kendi ağırlığından, yol kaplamasından, taşıt yüklerinden meydana gelecek basınç gerilmeleri belirlenmeli ve basınç gerilmeleri malzemenin dizayn gerilmesini geçmeyecek şekilde uygun polistiren sınıfı seçilmelidir.

Tekerlek yükleri gibi konsantre yükler için, yükün sınırlı bir alana üniform olarak yayıldığı düşünülebilir. Polistiren üzerindeki doğal dolgu veya kaldırım malzemeleri için yükün belli bir açıyla (yatayda 1 birim, düşeyde 2 birim) olarak yayıldığı kabul edilebilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Polistiren köpükte yük dağılımı (Sanders ve Snowdon, 1993)

Polistiren üzerine betonarme döşeme yapıldığında, yükün yayılma açısının büyümesi beklenir. Hafif betonarme döşemeler için 45° 'lik yayılma açısı uygundur (yatayda 1 birim, düşeyde 1 birim). Polistiren blokların üzerindeki dolgu ve kaldırım sebebiyle oluşan basınç gerilmesinin derinlikle değişmediği varsayılır. Yüksek dayanıma sahip polistiren malzemenin, yollardaki kaplama tabakalarının hemen altında kullanılması uygundur.

Oturma hesaplarında kullanılan birim hacim ağırlık değeri, kullanma durumunda su emilmesini göz önüne alacak şekilde tasarlanmalıdır. Oturma hesaplarında aşağıdaki birim hacim ağırlıklar kullanılmalıdır (Sanders ve Snowdon, 1993):

Genleşmiş Polistiren

Düzenli olarak su seviyesinin altında kalan dolgular= 1.0 kN/m^3

Kısa periyotlarda su altında kalan dolgular= 0.50 kN/m^3

Düzenli olarak su üstünde kalan dolgular= 0.50 kN/m^3

Hiç batmayan dolgular= 0.20 kN/m^3

Ekstrude Polistiren

Bütün durumlar için kuru birim hacim ağırlık kullanılır.

2.2.5. Polistirenin Korunması

Genleşmiş ve ekstrude polistiren, birçok sayıda potansiyel sebep dolayısıyla hasara açıktır. Çeşitli potansiyel tehlikeler aşağıda sıralanmıştır:

- Kötü niyetli hasar
- Petrol ve kimyasal ürünlerle temas
- Sıcaklık ve kıvılcım
- Ultra-viole ışınlar
- Kaza darbeleri.

Dizayn yapılırken uygun koruma ölçütleri bir araya getirilmelidir. Aşağıdaki fonksiyonları yerine getirmek için koruma yapılmalıdır:

- Isı ve kıvılcımlardan korumak için sabit yalıtım tabakası oluşturmak (Polistirene hava giriş çıkışını önlemek için)
- Darbe kuvvetlerini emmek veya dağıtmak
- Kötü niyetli hasara karşı korumak
- Petrol, organik çözücüler ve diğer bozucu maddelere karşı geçirimsiz engel oluşturmak.

2.3. Hurda Taşı Lastikleri

Amerika Birleşik Devletlerinde her sene yaklaşık 300 milyon adet taşı lastiği hurdaya çıkmakta ve büyük bir atık problemi oluşmaktadır. Hurda lastiklerin % 85'i otomobil lastiği, geriye kalan % 15'i ağır taşı lastiğidir. Amerika Birleşik Devletlerinde, 3 milyar adet civarında hurda lastiğin depolandığı sanılmaktadır. Bu lastikler tipik olarak geniş açık hava depolarında biriktirilmektedirler. Bu depolar için gereksiz yere geniş alanlar tahsis edilmektedir. Ayrıca lastik yığınları yangın tehlikesi oluşturmakta, sivrisinekler için üreme yeri olabilmekte ve doğal görüntüyü bozmaktadır. Bu durum; büyük hacimlerde hurda lastiğin, kullanıma tekrar kazandırılması için acil önlemler alınmasını gerektirmektedir. Atık taşı lastiklerinin birkaç faydası, son yıllarda ortaya konulmuş ve bazıları pratikte kullanıma sunulmuştur. Yonga haline getirilmiş lastiklerin kazanlarda yakıt olarak kullanılması,

birbirine bağlanmış lastiklerin alçak istinat duvarı olarak ve erozyona karşı korunmada kullanılması, ince öğütülmüş lastiğin asfalt yapımında kullanılması, yonga haline getirilmiş veya parçalanmış lastiğin hafif dolgu malzemesi olarak kullanılması, bu faydalardan bazılarıdır.

Otomobil lastiklerinin üretimi, ham malzemelerin eşsiz özelliklere (esneklik, dayanım, tokluk ve yüksek sürtünme dayanımı) sahip olmasını sağlayan özel aşamaları içerir. Hurda lastikler, yanarak yok edilecekleri bir sisteme (A.B.D’de hurda lastiklerin % 17’si yakılmaktadır) sokulmadan, kullanıma tekrar yapı malzemesi olarak kazandırılabilirse, lastiklerin eşsiz özelliklerinden faydalanabilme şansı yakalanır. Hurda lastikler; yenilenemeyen kaynaklardan elde edilen yapı malzemelerinin yerine kullanılırlarsa daha faydalı hale geleceklerdir.

Parçalanmış lastiğin yol dolgularında agrega yerine kullanılabileceği birçok uygulama sahası mevcuttur. Örnek vermek gerekirse; ses kesici dolgularda, yumuşak veya stabil olmayan zeminin üzerinde inşa edilen hafif dolgularda, yol kaplamasının donmasını engelleyici tabaka olarak, istinat duvarlarının arkasında dolgu olarak ve kenarlardaki drenlerde kullanılması uygundur (Bosscher ve diğ. , 1997).

Zayıf ve sıkışabilir zeminler üzerinde inşa edilen dolgularda, lastik yongaların hafif malzeme olarak kullanılmasının birçok yararı vardır. En önemlisi, oturmalar azalır ve stabilite artar. Lastik yongaların bir diğer avantajı da, kereste yongaları (talaş) gibi biyolojik bozulmaya uğramamasıdır. Lastik yongalar; serbest drenaj sağlar, böylece fazla boşluk suyu basıncı oluşması problemi ortadan kalkar. Lastik yongaların hafif dolgu malzemesi olarak kullanılması, her sene sayıları artan lastik depolarının çoğalmasını önleyecektir (Humphrey ve Manion, 1992). Yeni yapılan araştırmalara göre; parçalanmış lastikler, zararlı atık malzeme özelliği göstererek yeraltı su seviyesi üzerinde herhangi bir ters etki oluşturmamıştır (Bosscher ve diğ. , 1997).

Hurda lastikler; parçalanmadan, parçalanmış halde, kırıntı veya yonga halinde kullanılabilir.

Parçalanmamış Lastik

Tipik bir hurda otomobil lastiği 89 N ağırlığındadır. Kabaca 53-58 N kadarı tekrar kullanılabilir lastikten meydana gelmiştir. Bu miktarın % 35’i doğal, % 65’i de sentetik lastikten meydana gelmiştir. Tipik bir kamyon lastiği 178.5 N ağırlığındadır

ve % 60-70 oranlarında tekrar kullanılabilir lastik ihtiva etmektedir. Kamyon lastikleri genellikle % 65 oranında doğal lastik ve % 35 oranında sentetik lastik ihtiva ederler. Otomobil ve kamyon lastikleri; çelik, naylon veya polyester kuşaklı olabilirler.

Parçalanmış Lastik

Parçalanmış lastikler, lastik kesme makinesinde üretilmektedir. Bu makineler, lastiği iki eşit parçaya bölebilir veya lastiğin yan yüzlerini gövdeden ayırabilirler.

Kırılmış veya Yonga Haline Getirilmiş Lastikler

Birçok durumda, kırılmış veya yonga haline gelmiş lastiğin üretimi, birinci ve ikinci kırma işlemleriyle gerçekleşir. Lastik kırıcı; seriler halinde ileri geri çalışan ve salınım yapan kesme kenarlarına sahip, geri ve ileri (zıt yönlerde) hareket edip kesme hareketi yapan bir makinedir. Birinci kırma işleminde üretilen parça lastiklerin boyutları; uzunluk olarak 30 ile 46 cm arasında, genişlik olarak 10 ile 23 cm arasındadır. Boyutlar, genellikle kesme yüzlerinin modeline ve şekline göre değişir. Lastik yongaların üretimi, kırılmış lastiklerin ikinci bir kırma işlemine tabi tutulmasıyla olur ve sonuçta 7.6 ile 1.3 cm arasında boyutlara sahip parçalar oluşur. 1 m³ sıkıştırılmış lastik yongalarından oluşan dolguda, yaklaşık 100 otomobil lastiği bulunmaktadır. Böylece küçük projelerde bile kayda değer sayıda lastik kullanılmakta ve hurda lastiklerin tekrar kullanıma kazandırılması sağlanmaktadır.

Gelişmiş ülkelerin bugünkü problemi olan ve gelişmekte olan ülkeleri gelecekte sıkıntıya sokacak atık taşıt lastikleri konusu çözülmesi gerekli bir sorundur. Hurda taşıt lastiklerinin büyük miktarlarda kullanılmasını sağlayacak zemin yapılarının ve dolguların yapılabilmesi için, lastik yongalarının fiziksel ve mühendislik özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir.

2.3.1. Parçalanmış Lastiğin Fiziksel Özellikleri

Lastik Kırıntıları

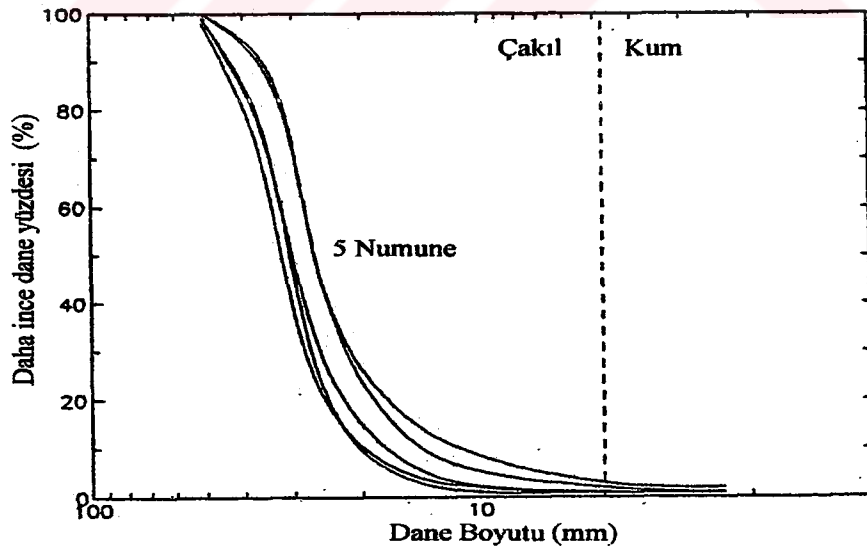
Kırıntı haldeki lastikler; genelde düz ve düzensiz biçimdeki kısa, kalın parçalardan oluşup, çelik kuşağın parçalanmasıyla meydana gelen keskin metal parçaları da ihtiva edebilirler. Daha önce de belirtildiği gibi, lastik kırıntılarının boyutu 46 cm ile 2.5 cm arasında değişir, birçok parça da 10-20 cm boyutları arasındadır. Lastik kırıntılarının ortalama gevşek yoğunluğu, kırıntıların boyutuna bağlı olarak

değişmekle birlikte, 3.9 - 5.35 kN/m³ arasında değer alması beklenir. Ortalama sıkışmış yoğunluk 6.5 - 8.4 kN/m³ arasında değişir (Read ve diğ., 1991).

Lastik Yongaları

Lastik yongaları, lastik kırıntılarından daha ince ve uniform olup, boyutları 7.6 cm ile 1.3 cm arasında değişen malzemelerdir. Lastik yongalarının boyutları; lastik kırıntıları gibi, imalat makinelerinin yapısına ve çalışma biçimine bağlı olmasına rağmen, lastik yongalarının hepsi yaklaşık olarak çakıl boyutundadır. Lastik yongalarının gevşek yoğunluğu 3.2 - 4.9 kN/m³ arasında değişir. Lastik yongalarının sıkıştırılmış yoğunluğu da 5.7 - 7.3 kN/m³ arasında değişir. Lastik yongaları % 2 - 3.8 oranları arasında değişen su emme değerine sahiptirler (Humphrey ve diğ., 1993).

Lastik yongalarının fiziksel ve mühendislik özelliklerini belirlemek için gerekli malzeme, çelik ve polyester kuşaklı taşıt lastiklerinin karışımından elde edilmiştir. Parçalama işlemi sonucunda maksimum boyutu 5 cm olan yongalar üretilmiştir. Çelik kuşağın büyük parçaları bir mıknatıs yardımıyla uzaklaştırılmıştır. 5 ayrı numune üzerinde yapılan dane dağılımı deneylerinden görülebileceği gibi, dane dağılımı eğrileri dar bir alana sığmıştır (Şekil 2.4). Elde edilen değerlere göre, numunenin sadece % 10'u, 12.7 mm çapından küçüktür ve numunenin % 50'si, 25.4-38.1 mm çapları arasında değişen dane boyutuna sahiptir. Başka bir üretim sistemiyle elde edilen lastik yongaları, daha değişik dane çapı dağılımına sahip olacaktır.



Şekil 2.4 Yapılan çalışmada kullanılan lastik yongalarının dane dağılımı (Humphrey ve Manion, 1992)

Lastik yongalarının dane birim hacim ağırlığını ve su emme miktarını belirlemek için deneyler yapılmıştır. Üç çeşit numune test edilmiştir: Çelik ve polyester kuşaklı lastiklerin karışımından elde edilen lastik yongası numuneleri, sadece polyester kuşaklı lastiklerden elde edilen lastik yongaları ve sadece çelik kuşaklı lastiklerden elde edilen lastik yongaları. Çelik ve fiber kuşaklı lastiklerin karışımından elde edilen yongaların dane birim hacim ağırlığı 10.5 kN/m^3 , sadece fiber kuşaklı lastiklerden elde edilen yongaların dane birim hacim ağırlığı 10.2 kN/m^3 ve sadece çelik kuşaklı lastiklerden elde edilen yongaların dane birim hacim ağırlığı 11 kN/m^3 'tür. Lastik yongalarının dane birim hacim ağırlığı suyunkinden biraz fazladır. Üç çeşit numune için de su emme kapasitesi % 4 kadardır ve bu nedenle lastik yongaları çok az miktarda su emerler (Humphrey ve Manion, 1992).

2.3.2. Parçalanmış Lastiğin Mekanik Özellikleri

Sıkıştırılmış Birim Hacim Ağırlık

Lastik yongalarının 5 cm'lik maksimum dane çapını deney şartlarına uydurmak için, çapı ve yüksekliği 25.4 cm olan 0.012 m^3 'lük bir kap kullanılmıştır. Numuneler 5 tabaka halinde; 4.54 kg'lık tokmağın 46 cm'den düşürülmesiyle (Modifiye Proktor tokmağı) sıkıştırılmıştır. Tabaka başına düşen vuruş sayısı; Modifiye Proktordaki (ASTM D1557), Standart Proktordaki (ASTM D698) ve Standart Proktorun % 60'ına eşdeğerdeki sıkıştırma enerjisini verecek şekilde ayarlanmıştır. Birim hacim başına düşen sıkıştırma enerjisi ve bu enerjiyi elde etmek için gerekli vuruş sayısı, Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3 Sıkıştırma enerjisi, tabaka başına vuruş sayısı ve sıkıştırılmış kuru birim hacim ağırlık (Humphrey ve Manion, 1992)

Test Standartı	Birim Hacim Başına Düşen Enerji (kJ/m^3)	Tabaka Başına Vuruş Sayısı	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)
Modifiye	2694.38	330	6.44
Standart	592.76	73	6.28
% 60 Standart	355.66	44	6.28

Başlangıçtaki deneyler, havada kurumuş numuneler üzerinde yapılmış ve Tablo 2.3’de özetlenmiştir. Sonuçta elde edilen kuru birim hacim ağırlığa, sıkıştırma enerjisinin etkisinin küçük olduğu ortadadır. Aynı numuneden alınan lastik yongaları üzerinde yapılan Modifiye Proktor, Standart Proktor veya % 60’lık Standart Proktor testleri göstermiştir ki; Modifiye Proktor testinden elde edilen kuru birim hacim ağırlık, Standart Proktor testinden elde edilen kuru birim hacim ağırlıktan 0.16 kN/m^3 daha fazladır. Buradan anlaşılmaktadır ki; lastik yongalarını sıkıştırmak için mütevazi seviyede enerji kullanmak yeterli olacaktır. % 60’lık standart enerjiyle, farklı boyutlara sahip iki lastik numunesi üzerinde deney yapılmıştır. Elde edilen kuru birim hacim ağırlıklar 6.1 ve 6.4 kN/m^3 ’tür. Numune farklılığının kuru birim hacim ağırlık üzerindeki etkisi, sıkıştırma enerjisine göre çok daha fazladır.

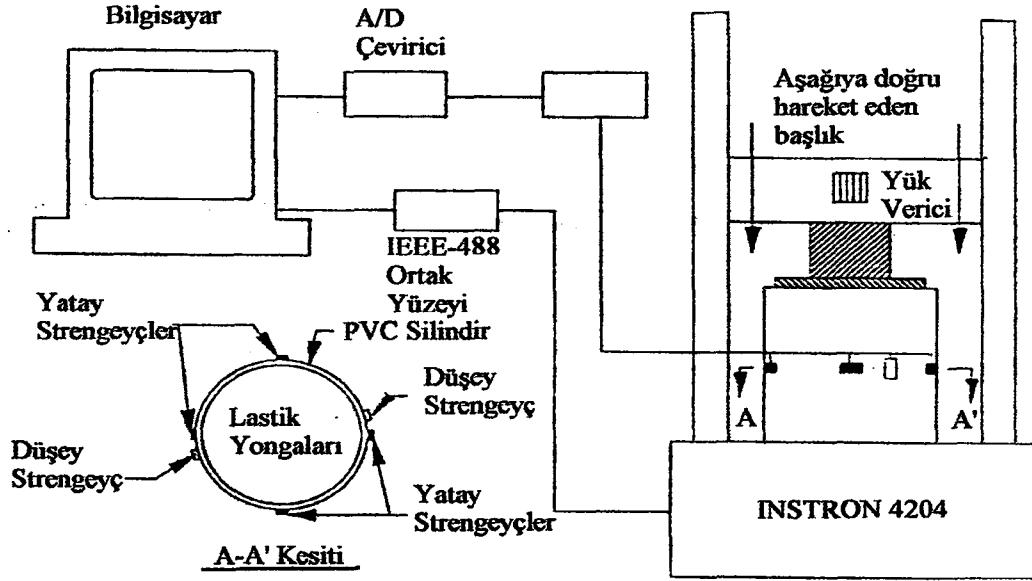
Sıkıştırılmış kuru birim hacim ağırlığa, su muhtevasının etkisi; bir gece önceden ıslatılan (% 5.3 su muhtevasına sahip) ve havada kurutulmuş lastik yongalarının ayrı olarak sıkıştırılmasıyla incelenmiştir. Sıkıştırma sırasında, Standart Proktor testinde uygulanan enerjinin % 60’ına eşdeğer sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Islak sıkıştırılmış numuneler, havada kuruyanlara oranla 0.64 kN/m^3 fazla kuru birim hacim ağırlığa sahiptirler (Humphrey ve Manion, 1992).

Sıkışabilirlik Testleri ve Sonuçları

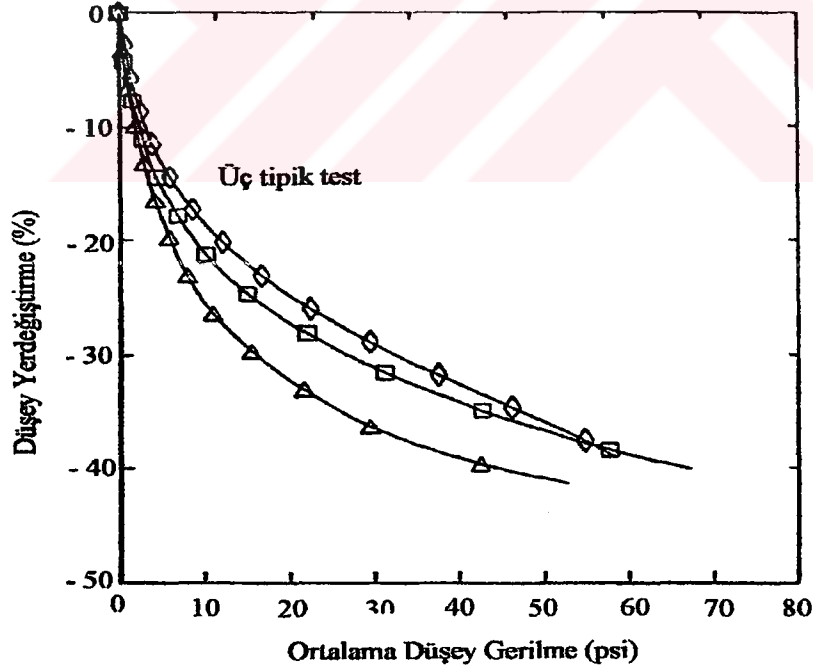
Sıkıştırılmış lastik yongalarının sıkışabilirliğini belirlemek, Young modülü ve Poisson oranı gibi yol kaplamasının şekil değiştirmesini belirlemek için gerekli sayısal analiz yöntemlerinde kullanılan elastik parametreleri elde etmek için sıkışabilirlik testleri düzenlenmiştir (Şekil 2.5). Numune hazırlamak için; silindirik şeklindeki boş bir kalıp, çelik tabana kenetlenmiş ve daha sonra silindirik kalıbın iç yüzüne yağ sürülmüştür. Daha sonra, havada kurumuş lastik yongalar her birinin yüksekliği 5 cm olan 5 tabaka halinde Standart Proktor enerjisinin % 60’ı kullanılarak sıkıştırılmıştır. Bundan dolayı, numune yaklaşık 25.4 cm yüksekliğindedir. Silindiri tabana bağlayan kelepçe, testin başlamasıyla kaldırılmıştır.

Üç ayrı numuneden oluşan sıkıştırılmış lastik yongaları üzerinde yapılan sıkışabilirlik deneyi sonuçları Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Buradan görülmektedir ki; sadece 68.9 kPa’lık düşey gerilme, % 20-25 oranında düşey şekil değiştirmeye neden olmaktadır. Gerilmeyi, 68.9 kPa’dan 413kPa’a çıkarmak % 15-20’lik ek düşey şekil değiştirmeye

sebeptir. Lastik yongaları, düşük gerilme seviyelerinde çok sıkışmakta fakat gerilme seviyesi arttıkça sıkışabilirlik dikkate değer ölçüde azalmaktadır.

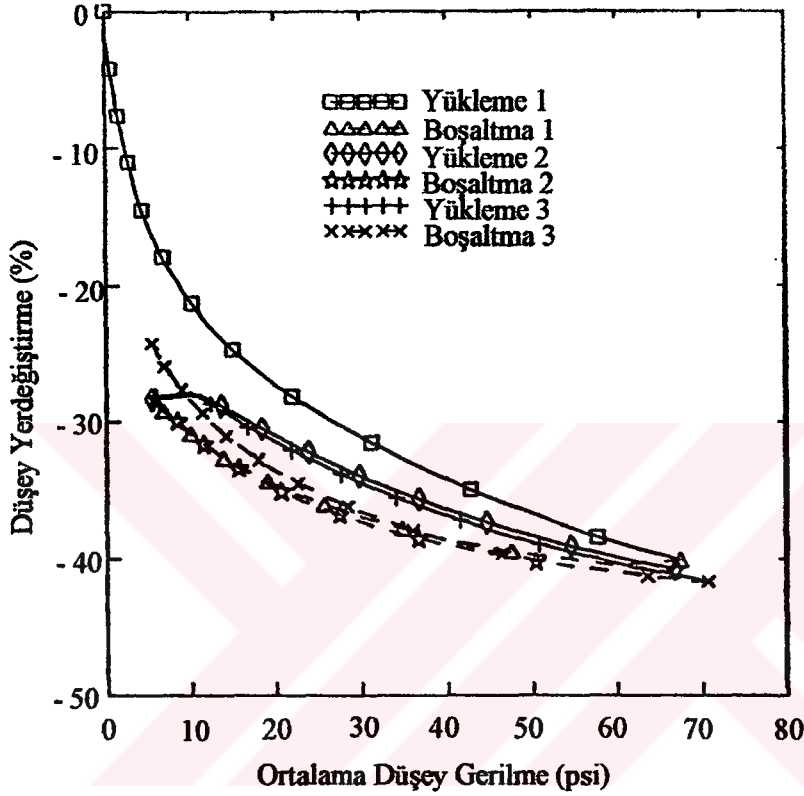


Şekil 2.5 Tek boyutlu sıkışabilirliği ölçmek için kullanılan sistem (Humphrey ve Manion, 1992)



Şekil 2.6 Üç ayrı numune üzerinde yapılan sıkışabilirlik deneyleri, 1 psi=6.89 kPa (Humphrey ve Manion, 1992)

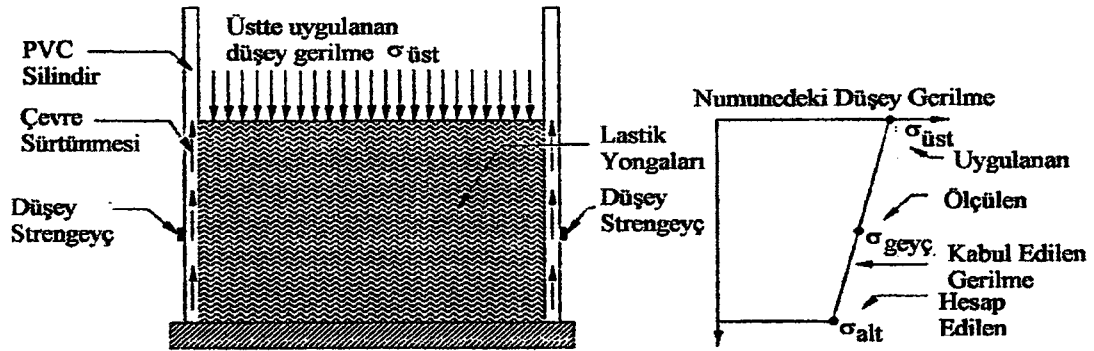
Çok sayıdaki yükleme ve boşaltma çevrimlerinin etkisi; düşey gerilmenin 447 kPa'lık maksimum ve 34.5 kPa'lık minimum değerler arasında çevrime tabi tutulmasıyla incelenmiştir. En düşük düşey gerilme, 1.8 m yüksekliğindeki standart çakıl tabakasını temsil etmektedir. En yüksek ve en düşük yük limitleri arasında çevrim yapılması, % 10 ve % 40 arasında elastik şekil değiştirmeye neden olmuştur. Şekil 2.7'de tipik bir test sonucu gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Yükleme-boşaltma çevrimlerine bağlı olarak lastik yongalarının sıkışabilirliği, 1 psi= 6.89 kPa (Humphrey ve Manion, 1992)

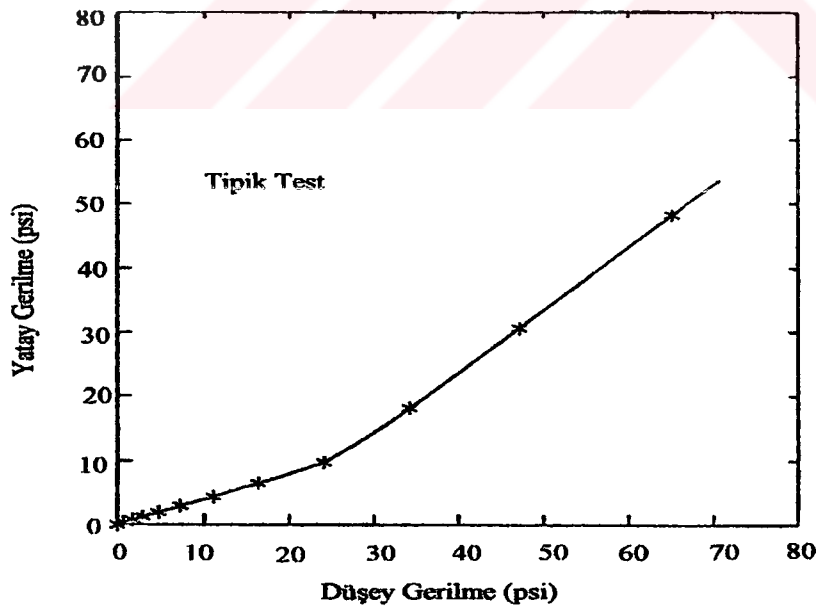
Çevre sürtünmesi dikkat çekici bir faktördür. Çevre sürtünmesi, numuneye uygulanan düşey gerilmenin yukarıdan aşağıya doğru azalmasını sağlar. Numunenin üst kısmındaki düşey gerilme (σ_{top}); uygulanan düşey yükün, numunenin kesit alanına bölünmesi ile elde edilir. Düşey strengayçlerin bulunduğu seviyede, kalıp tarafından taşınan yük bilinmektedir. Numune tarafından karşılanan düşey gerilme ($\sigma_{ölçüm}$); kalıp tarafından taşınan yük, uygulanan toplam düşey yükten çıkarıldığında geri kalan net yükün numune alanına bölünmesiyle elde edilir. Bu seviyede, toplam uygulanan yükün % 10-40 oranlarındaki kısmı, kalıp tarafından karşılanmaktadır. Numunenin yüksekliği boyunca oluşan ortalama düşey gerilmeyi belirlemek için,

numunenin yukarisından aşağıya doğru gerilmenin lineer olarak azaldığı kabul edilmiştir. şekil 2.8'den grlebilirceği gibi, numunenin st kısmındaki ve strengaylerin seviyesindeki gerçek gerilme değerleri bilinmektedir. Ortalama düşey gerilme; kalıbın üstündeki ve tabanındaki düşey gerilmelerin ortalamasıdır. şekil 2.6 ve 2.7'de ortalama düşey gerilme değerleri kullanılmıştır.



şekil 2.8 Sıkışma anında numunede meydana gelen düşey gerilmeye vre sürtünmesinin etkisi (Humphrey ve Manion, 1992)

Sıkışabilme deneyleri sırasında yatay gerilme ölçülmüştür ve şekil 2.9'da tipik bir deney için yatay gerilme-düşey gerilme grafiği gösterilmiştir. Düşey gerilme değer, yatay strengaylerin seviyesinde ölçülmüştür (Humphrey ve Manion, 1992).



şekil 2.9 Tek boyutlu sıkışma altında test edilen numunede yatay ve düşey gerilme arasındaki ilişki, 1 psi= 6.89 kPa (Humphrey ve Manion, 1992)

Şekil 2.9'dan da görülebileceği gibi; durgun haldeki yatay toprak basıncı katsayısı (K_0), doğrunun eğiminde meydana gelen değişimden önce 0.40, daha sonra yaklaşık 0.94 değerini almıştır. Lastik yongaları için elastik parametreler, sıkışabilme testi sonuçlarına göre hesaplanabilir. Tek boyutlu sıkışma halinde Poisson oranı (ν); durgun haldeki toprak basıncı katsayısı (K_0) yardımıyla, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir (Humphrey ve Manion,1992):

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (2.1)$$

Düşey yerdeğiştirme (ϵ_v)- düşey gerilme (σ_{avg}) grafiğinin eğimi, zorlanma modülünü (D) verir:

$$D = \frac{\Delta \sigma_{avg}}{\Delta \epsilon_v} \quad (2.2)$$

Zorlanma modülü ve Poisson oranının kullanılmasıyla, Young modülü (E) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)D}{1 - \nu} \quad (2.3)$$

Üç numune üzerinde yapılan test sonuçları ve ortalaması Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4 Lastik yongalarının elastik parametreleri, 1psi=6.89 kPa (Humphrey ve Manion, 1992)

Test No.	Poisson Oranı		Young Modülü		
	<25 psi	>25 psi	Başlangıç Eğimi (psi)	ϵ_v =%10 iken Sekant (psi)	ϵ_v =%20 iken Sekant (psi)
301	0.25	0.54	18.0	25.1	50.0
1001	0.39	0.50	3.4	9.0	14.4
1002	0.29	0.49	12.9	21.6	37.3
Ortalama	0.32	0.51	10.7	18.1	32.7

Kayma Dayanımı ve Geçirimsizlik

Lastik yongalarının kayma dayanımı üzerine kısıtlı bilgi vardır ve bu arada lastik kırıntılarının kayma dayanımı üzerine çok az veya hiç bilgi yoktur. Lastik kırıntılarının boyutlarının çok çeşitli olması, uygun bir kesme deneyi yapılmasını zorlaştırmaktadır. Lastik yongalarının kayma dayanımı karakteristiklerinin, yongaların boyut ve şekline bağlı olarak değişmesine rağmen, içsel sürtünme açılarının 19°-26° arasında değiştiği ve bu sırada kohezyon değerlerinin de 4.3 kPa ile 11.5 kPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Lastik yongaları 1.5-15 cm/sn değerleri arasında değişen geçirimsizlik katsayısına sahiptir (Humphrey ve diğ., 1993).

2.3.3. Parçalanmış Lastiğin Kimyasal ve Diğer Özellikleri

Lastik kırıntıları ve lastik yongaları, normal çevre şartları altında reaktif değildir. Lastiklerin temel kimyasal bileşeni, doğal ve sentetik lastik karışımıdır. Fakat ek bileşenler; karbon, sülfür, polimerler, yağ, parafinler, pigmentler ve kuşak malzemeleri ihtiva ederler (Schnormeier, 1992).

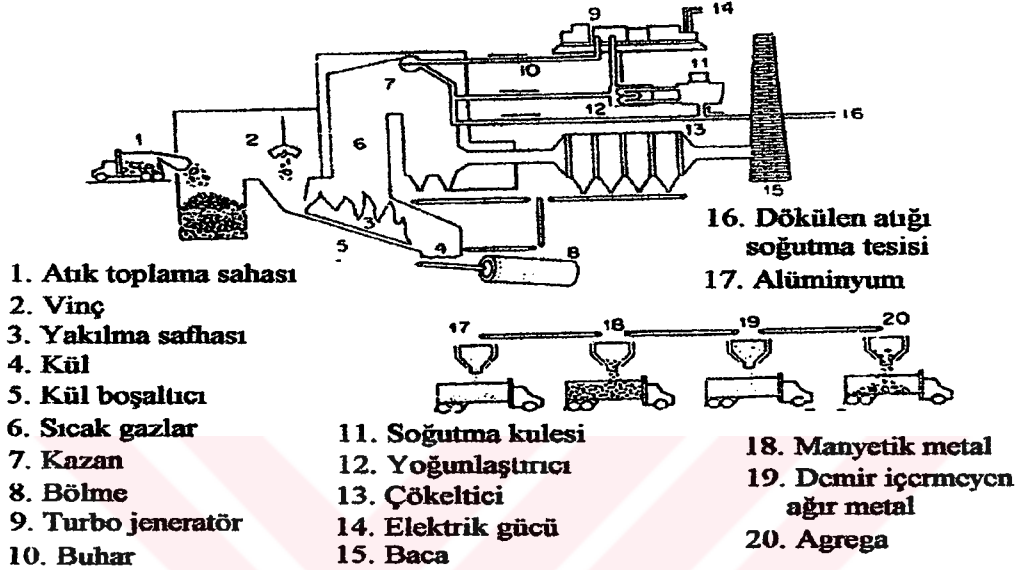
Hurda lastikler, 28000 kJ/kg ile 35000 kJ/kg arasında ısıtma değerine sahiptirler. Sonuç olarak; uygun koşullarda, hurda lastiğin yanabilmesi söz konusudur ve bu durum, her uygulamada göz önüne alınmalıdır (Schnormeier, 1992).

Lastik yongaları yüksek yalıtım özelliklerine sahiptirler. Eğer lastik yongaları, zemin uygulamalarında dolgu malzemesi olarak kullanılırsa, aynı özellikteki granül zemine göre daha az donma derinliği beklenebilir (Humphrey ve Eaton, 1993).

2.4. Katı Atıkların Yakılmasıyla Oluşan Uçucu Küller

Amerika Birleşik Devletlerinde, son 30 yılda katı atık fırınlarının kullanımı büyük ölçüde artmıştır. 1985 yılında, A.B.D’de 150 milyon tondan fazla katı atık üretilmiştir. Katı atıkların % 7-10 arasındaki miktarı yakılmıştır. Katı atık fırınları; katı atıkların yüksek sıcaklıklarda (900°-1000°C), kontrol altında yakılması prensibine dayanarak çalışır. Yandıktan sonra, katı atıkların bir kısmı fırının alt bölümünde toplanan taban külüne, diğer kısmı uçan gazla uzaklaşan uçucu küle dönüşür (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989).

Katı atıkların yanma verimliliği, çeşitli yanma parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler; fırının sıcaklığı, fırına püskürtülen hava miktarı, türbülans derecesi ve zaman periyodudur. Yanma verimliliğini kontrol eden üç önemli parametre; zaman, sıcaklık ve türbülanstır. Katı atıkların, yüksek sıcaklığa ve türbülansa maruz kalması ne kadar fazla olursa, yanma verimliliği de o derece yüksek olur. Şekil 2.10, tipik bir katı atık fırını ve bünyesinde bulunan diğer tesisleri göstermektedir.



Şekil 2.10 Katı atık fırını (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)

New York şehri çevre departmanının bildirdiğine göre (1985), New York şehrinde yakılan her bir milyonluk katı atık için 37000 ton uçucu kül üretilmektedir. Katı atık uçucu külleri büyük miktarlarda üretildiği için, acilen yeni kullanma sahalarına ihtiyaç vardır (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989).

Katı atık uçucu külünün kullanılmasının iki tane genel avantajı vardır: Katı atığın bir kısmının yok edilmesi ve dolgular için pahalı olmayan yapı malzemesinin kullanılması.

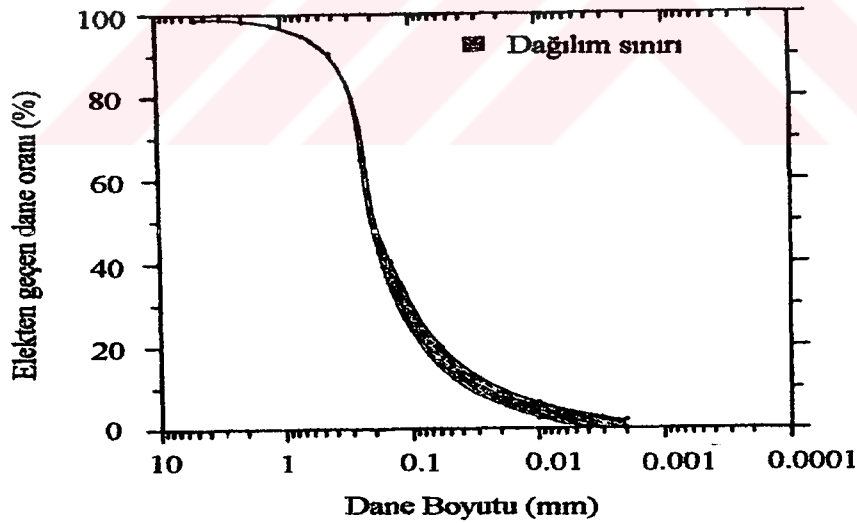
Katı atık uçucu külünün fiziksel özelliklerinin kömür uçucu külüne benzemesinden dolayı, katı atık uçucu külünün mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve kullanım alanlarının iyi şekilde saptanması gerekir. Tablo 2.5'de New York şehri çevresinden elde edilen katı atıkların genel bileşenleri verilmiştir.

Tablo 2.5 New York şehrine ait katı atıkların genel bileşenleri (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)

Katı Atığın İçeriği:	Ağırlıkça Oran (%):
Kağıt	37
Plastik	4
Cam	10
Yemek	14
Metal	9
Deri ve lastik	2
Kereste	4
Bahçe malzemesi	16
Tekstil ürünleri	2
Diğer malzemeler	2

2.4.1. Katı Atık Uçucu Külünün Sınıflandırılması ve Endeks Özellikleri

Katı atık uçucu külü üzerinde elek analizi ve hidrometre testleri düzenlenmiştir. Hidrometre testinde ayrıştırıcı malzeme olarak, % 4'lük sodyum metafosfat (NaPO_3) kullanılmıştır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, dane dağılımı eğrisi dar bir alanda kalmaktadır. Buradan, katı atık uçucu külü karışımının homojen olduğu anlaşılmaktadır (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989).



Şekil 2.11 Derecelenme eğrisi (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)

Karışımın %20'si 200 No'lu elekten (0.074 mm) geçmektedir ve %5'i de kilin dane boyutuna yakındır (0.002 mm'den küçük daneler). Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre katı atık uçucu külü, siltli kum (SM) sınıfına girmektedir.

Katı atık uçucu külü plastik özellik göstermemektedir. Katı atık uçucu külü daneleri mikroskop altında incelendiğinde, içlerinin boş olduğu anlaşılmaktadır (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989). Tablo 2.6’da, katı atıkların yakılmasıyla elde edilen külün fiziksel özellikleri verilmiştir.

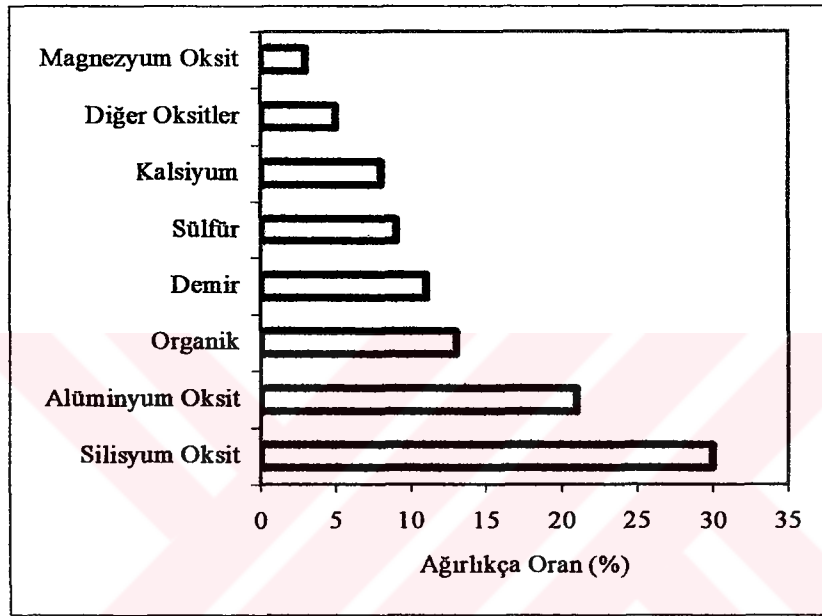
Tablo 2.6 Katı atık külünün fiziksel özellikleri

Özellik	Taban Külü	Taban Külü + Uçucu Kül
Dane özgül ağırlığı (G_s)		
İnce (<4 No’lu elek)	1.50-2.22	1.86-2.03
Kaba (>4 No’lu elek)	1.93-2.44	1.96-2.24
Su emme (%)		
İnce (<4 No’lu elek)	12.0-17.0	4.8-14.8
Kaba (>4 No’lu elek)	4.1-4.7	3.6-10.0
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	9.6-14	9.9-11.7
Derecelenme (%)		
İnce malzeme yüzdesi <4.75 mm (4 No’lu elek)	42-70	50-70
Kil+silt yüzdesi <0.075 mm (200 No’lu elek)	2-16	15-20
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	12.6-17.6	12.6-17.3
Sıkıştırılmış numunenin geçirimsizliği (cm/sn)	10^{-3} - 10^{-4}	10^{-6} - 10^{-9}

2.4.2. Katı Atık Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri

Katı atık uçucu küllerinin yüksek tuz muhtevasına ve metal konsantrasyonlarına sahip olması (kurşun, kadmiyum, çinko vb.), bu malzemenin agrega yerine kullanılmasının çevresel açıdan uygun olup olmayacağı konusunda tartışmaları da beraberinde getirmiştir. Katı atık uçucu külünde yüksek konsantrasyonlarda kalsiyum

ve diğer tuzların bulunması; külün, hidrasyon ve/veya bağlayıcı reaksiyonlara, daha sonra meydana gelebilecek şişme olayına hassas hale gelmesini sağlamıştır. Katı atık uçucu külünde bulunan serbest alüminyum, suyla birleştiğinde hidrojen gazı oluşmasına sebep olabilir. Buna ek olarak, katı atık uçucu külünde bulunan yüksek tuz muhtevsından dolayı; kül, metal malzemelere temas ettiğinde paslandırıcı etki gösterebilir. Katı atık uçucu külü, Portland çimentosuyla birlikte kullanıldığı takdirde dayanımın zamanla artmasına yardımcı olacaktır (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989). Şekil 2.12’de, katı atık uçucu külünün kimyasal kompozisyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Katı atık uçucu külünün kimyasal kompozisyonu (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)

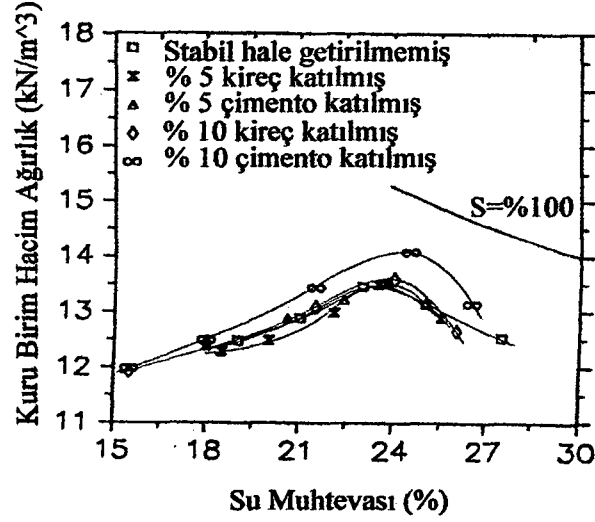
2.4.3. Katı Atık Uçucu Külünün Mühendislik Özellikleri

Su muhtevası – kuru birim hacim ağırlık ilişkisi, geçirimsizlik, kayma dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (C.B.R) testleri düzenlenerek; katı atık uçucu külünün mühendislik özellikleri, sıkıştırılmış dolgularda ve yol altı dolgusu olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Su muhtevası – Kuru birim hacim ağırlık ilişkisi

Su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık eğrisi Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Elde edilen değerlere göre, stabilizasyonu sağlanmamış katı atık uçucu külünün maksimum kuru birim hacim ağırlığı 13.5 kN/m^3 ve optimum su muhtevası da % 23’tür. Ayrıca Şekil

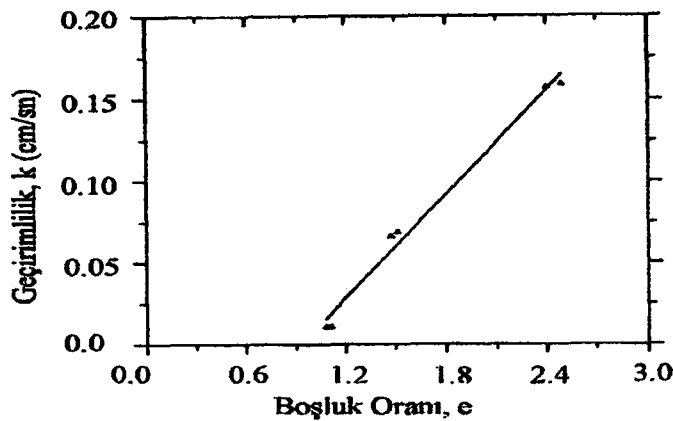
2.13’de, çimento ve kireç kullanılarak stabil hale getirilmiş katı atık uçucu külünün kompaksiyon eğrileri de verilmiştir (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989).



Şekil 2.13 Standart kompaksiyon testi sonuçları (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)

Geçirimlilik

Stabilize edilmemiş katı atık uçucu külleri için sabit seviyeli permeametre testleri düzenlenmiştir. Boşluk oranının geçirimlilik üzerindeki etkisini bulabilmek için değişik birim hacim ağırlıklara sahip üç çeşit numune üzerinde deneyler düzenlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 2.14’de gösterilmiştir. 0.159 cm/sn ile 0.010 cm/sn arasında değişen geçirimlilik katsayıları, malzemenin orta-ince kum karakterine sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 2.14, katı atık uçucu külünün geçirimliliği ile boşluk oranı arasındaki lineer bağıntıyı göstermektedir.



Şekil 2.14 Boşluk oranı – geçirimlilik ilişkisi (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)

Kayma Dayanımı

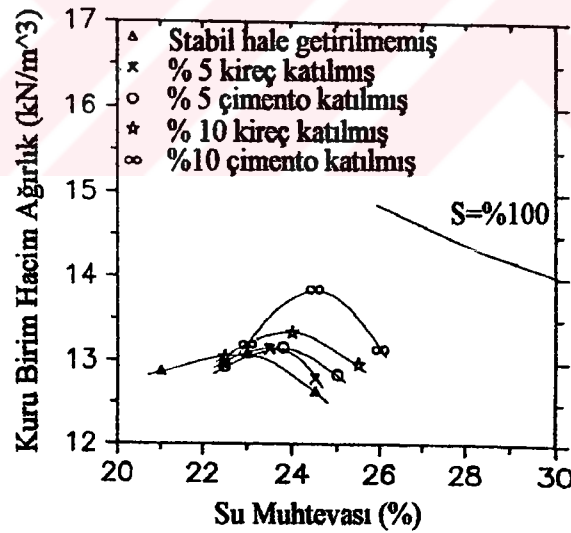
Kayma dayanımı parametreleri, konsolidasyonsuz – drenajsız (UU) üç eksenli basınç testleri kullanılarak bulunmuştur. Testler; optimum su muhtevasında sıkıştırılan maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip, doymun olmayan numuneler üzerinde yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 2.7’de gösterilmiştir. UU testleri; yol inşaatı gibi uygulamalarda ortaya çıkabilecek durumları yansıtmak amacıyla düşük çevre basınçlarında yapılmış ve görünen kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri sırasıyla 65 kPa ve 43° olarak elde edilmiştir. Numunelerin doymunluk derecesi yaklaşık % 67 olduğu için bu tip bir sonuç beklenebilir. ($\phi_u=0$ tipi sonuçlara zıt olarak)

Tablo 2.7 Test sonuçlarının özeti (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)

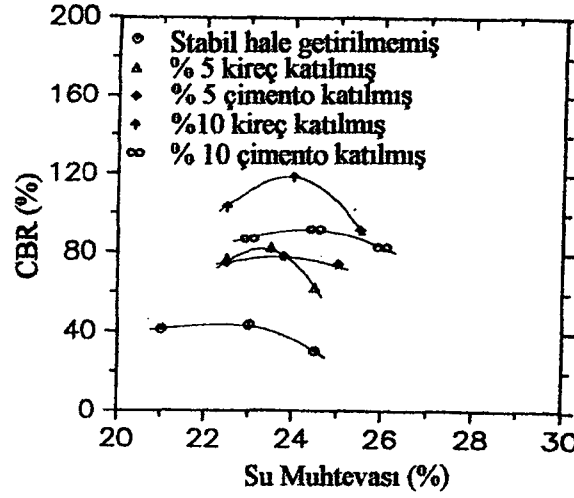
Mühendislik Özellikleri	Stabilize Edilmemiş Katı Atık Uçucu Külü	Stabilize Edilmiş Katı Atık Uçucu Külü			
		Kireç		Çimento	
		%5’lik Karışım	%10’luk Karışım	%5’lik Karışım	%10’luk Karışım
Standart Proktor Testi Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	113.5	13.5	13.6	13.6	14.1
Optimum Su Muhtevası (%)	23.0	23.5	24.0	23.8	24.5
Geçirimsizlik ^a (10^{-6} cm/sn)	10000	93	85	89	85
Kohezyon ^b , c_u (kPa)	65	100	137	106	173
İçsel Sürt. Açısı ^b , ϕ_u (°)	43	45	45	44	44
CBR Testi, (4 gün su altında kalmış) CBR (%) Şişme (%)	44 0	80 0.8	119 1.3	78 0	92 0
CBR Testi, (28 gün su altında kalmış) CBR (%) Şişme (%)	44 0	83 6.4	122 9.4	105 0	132 0
^a Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış, maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip numuneler ^b Konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç testlerindeki doymun olmayan numuneler (doymunluk derecesi % 60 ile % 70 arası)					

CBR Testi

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testi, genellikle sıkıştırılmış dolgular ve yol kaplaması altındaki zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesinde kullanılır. 15 cm çapındaki kalıplarda üç adet CBR numunesi hazırlanmıştır. Numuneler; kuru halde, ıslak olarak ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmışlardır. Optimum su muhtevası değerleri Şekil 2.13’de gözükmemektedir. Şekil 2.15’de stabilize edilmemiş ve stabilize edilmiş katı atık uçucu külü numuneleri (15 cm çapında kalıplarda sıkıştırılmış) için su muhtevası – kuru birim hacim ağırlık eğrileri verilmiştir. Stabilize edilmemiş katı atık uçucu külü için optimum su muhtevası değeri % 22.7 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 13.1 kN/m^3 ’dür. Numuneler 28 gün boyunca 50 N ’luk sürşarj yükü altında kalmışlar ve dikkate değer bir şişme durumu söz konusu olmamıştır. Su altında bekletilen numuneler, 4 ve 28 gün sonra test edilmişlerdir. 4 gün su altında bekletilen numuneler için yapılan testin sonuçları Şekil 2.16’da gösterilmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış, stabilize edilmeyen katı atık uçucu külü için 4 ve 28 günlük ıslak CBR değeri % 44’tür. Bu CBR değeri, yol dolgularında kullanılan zemin cinsleri için yeterlidir (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989).



Şekil 2.15 CBR testi sonuçlarından elde edilen su muhtevası–kuru birim hacim ağırlık ilişkisi (Poran ve Ahtchi-Ali, 1989)



Şekil 2.16 4 gün su altında kalan numunelerde su muhtevası-CBR ilişkisi

2.5. Kömürün Yanmasıyla Oluşan Taban Külü ve Kazan Cürufu

Kömür taban külü ve kazan cürufu; elektrik enerjisi üretmek için gerekli buharı kömürün yanmasıyla meydana getiren fırınların tabanından toplanan kaba daneli ve yanmayan yan ürünlerdir. Kömürün yakılmasıyla oluşan bu yan ürünlerin büyük kısmı termik santrallerden elde edilmektedir. Diğer kısmı ise, kömürle çalışan daha küçük endüstriyel veya geleneksel kazanlardan elde edilmektedir. Meydana gelen yan ürünün (taban külü veya kazan cürufu) çeşidi, kömürü yakmak için kullanılan kazanın cinsine bağlıdır.

Taban Külü

Elektrik enerjisi üreten termik santrallerde en çok kullanılan fırın cinsi; toz haline getirilmiş kömürü yakan kuru taban kazanıdır. Toz haline getirilmiş kömür kuru taban kazanında yandığı zaman, yanmayan malzemenin (külün) yaklaşık % 80'i uçucu gaz haline gelir ve uçucu kül olarak tutulur. Külün geriye kalan % 20'lik kısmı; koyu gri renkte, granül (daneli), gözenekli, baskın olarak kum boyutunda olan kuru taban külüdür. Bu malzeme, fırının tabanında yer alan su dolu silolarda toplanır. Siloya yeterli miktarda taban külü girdiğinde, yüksek basınçlı su jetleri kullanılarak uzaklaştırılır ve savak yatakları yardımıyla atık göletine veya kullanılmak üzere depo edileceği havuzlara taşınır (Hecht ve Duvall, 1975). 1996 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde 16.1 milyon ton taban külü üretilmiştir (American Coal Ash Association, 1996).

Kazan Cürufu

İki çeşit ıslak taban kazanı vardır: Cüruf akıtan kazan ve ıslak taban kazanı. Cüruf akıtan kazan, pulverize (toz haline getirilmiş) kömürü ve siklon kazanı da kırılmış kömürü yakar. Her ikisinde de, taban külü erimiş halde saklanır ve sıvı gibi akıtılır. Her iki kazan cinsinde de orifise sahip katı taban bulunur. Bu orifis sayesinde, tabanda toplanan erimiş kül, alt taraftaki kül silosuna akıtılabilir. Islak taban fırınlarındaki kül silosu, erimiş halde bulunan külü soğutmak için gerekli miktarda su ihtiva eder. Erimiş cüruf, suyla birleştiğinde aniden çatlar, kristalleşir ve küçük topaklar oluşur. Sonuçta oluşan kazan cürufu “kara güzellik” olarak isimlendirilir. Bu malzeme; kaba daneli, sert, köşeli, siyah renkli ve donuktur. 1995 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde 2.6 milyon ton kazan cürufu üretilmiştir (American Coal Ash Association, 1996).

Pulverize kömür; cüruf akıtan kazanda yandığı zaman, külün % 50’si fırında kazan cürufu olarak kalır. İçinde kırılmış kömürün yandığı siklon fırınında, külün % 70-80’i fırın cürufu olarak kalır. Külün % 20-30 oranındaki kısmı ise fırını uçucu kül olarak terk eder.

2.5.1. Taban Külü ve Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri

Taban külleri; yüzeyleri çok gözenekli olan köşeli danelerden meydana gelir. Taban külü daneleri, ince çakıl ile ince kum boyutları arasında yer almakla birlikte, düşük oranlarda silt ve kil boyutundaki danelere de sahiptir. Taban külü, genellikle iyi derecelenmiş bir malzemedir. Bununla birlikte, aynı termik santralden değişik zamanlarda alınmış kül numunelerinin dane boyutlarında farklılıklar görülebilir. Taban külü baskın olarak kum boyutundadır. 4 No’lu elekten (4.75 mm) % 50 ile 90 oranları arasında, 40 No’lu elekten (0.42 mm) % 10 ile 60 oranları arasında ve 200 No’lu elekten (0.075 mm) % 0 ile 10 oranları arasında taban külü geçer. Tablo 2.8, taban külü ve kazan cürufunun tipik dane dağılımlarını karşılaştırmaktadır (Moulton, 1973).

Kazan cürufları genelde uniform dane boyutuna sahiptir ve dane boyutu 5 mm ile 0.5 mm arasında değişir. Kazan cürufları pürüzsüz yüzey dokusuna sahiptir. Eğer erimiş haldeki cüruf fırından dökülürken içinde gazlar sıkışır, cüruf soğuduğu zaman kabarcıklı veya gözenekli hale gelir. Linyit veya az bitümlü kömürün yanmasıyla

oluşan kazan cürufu, bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşan cürufa göre daha gözeneklidir. Kazan cürufu genellikle iri veya orta kum boyutundadır. Kuru taban külünün dane birim hacim ağırlığı kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Yüksek karbon muhtevası dane birim hacim ağırlığı düşürür. Düşük dane birim hacim ağırlığa sahip taban külü, gözenekli veya kabarcıklı dokuya sahiptir. Bu malzeme, yükleme veya kompaksiyona maruz kalırsa bozulur (Lovell ve diğ. , 1991). Tablo 2.9, taban külü ve fırın cürufunun bazı tipik fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Tablo 2.8 Taban külü ve fırın cürufunun dane boyutu dağılımları (Ağırlıkça oran)

Dane Çapı	Taban Külü Numuneleri			Fırın Cürufu Numuneleri		
	Glasgow	New Haven	Moundsville	Willow Island	Rockdale	Moundsville
38 mm	100	99	100	100	100	100
19 mm	100	95	100	100	100	100
9.5 mm	100	87	73	99	100	97
4.75 mm	90	77	52	97	99	90
2.36 mm	80	57	32	85	88	62
1.18 mm	72	42	17	46	42	16
0.60 mm	65	29	10	23	10	4
0.30 mm	56	19	5	12	5	2
0.15 mm	35	15	2	6	2	1
0.075 mm	9	4	1	4	1	0.5

Tablo 2.9 Taban külü ve fırın cürufunun tipik fiziksel özellikleri

Özellik	Taban Külü	Fırın Cürufu
Dane özgül ağırlığı	2.1-2.7	2.3-2.9
Kuru birim hacim ağırlık	7.2-16 kN/m ³	9.6-14.4 kN/m ³
Plastisite	Yok	Yok
Su emme	% 0.8-2.0	% 0.3-1.1

2.5.2. Taban Külü ve Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Taban külü ve fırın cürufu; silis, alüminyum oksit, demir, düşük oranda kalsiyum, magnezyum, sülfatlar ve diğer bileşimlerin karışımıyla meydana gelmiştir. Taban külü veya fırın cürufu danelerinin bileşimi kömür cinsine bağlıdır. Fırın cinsinin bileşim üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Tablo 2.10'da, seçilen taban külü ve fırın cürufu numunelerinin (farklı bölgelerden kömür çeşitleri) kimyasal analizi verilmiştir.

Tablo 2.10 Seçilen taban külü ve fırın cürufu numunelerinin kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça oran)

Kül Çeşidi:	Taban Külü					Fırın Cürufu		
Kömür Çeşidi:	Bitümlü		Az-bitümlü	Linyit		Bitümlü		Linyit
Yer	West Virginia		Ohio	Texas		West Virginia		North Dakota
SiO ₂	53.6	45.9	47.1	45.4	70.0	48.9	53.6	40.5
Al ₂ O ₃	28.3	25.1	28.3	19.3	15.9	21.9	22.7	13.8
Fe ₂ O ₃	5.8	14.3	10.7	9.7	2.0	14.3	10.3	14.2
CaO	0.4	1.4	0.4	15.3	6.0	1.4	1.4	22.4
MgO	4.2	5.2	5.2	3.1	1.9	5.2	5.2	5.6
Na ₂ O	1.0	0.7	0.8	1.0	0.6	0.7	1.2	1.7
K ₂ O	0.3	0.2	0.2	-	0.1	0.1	0.1	1.1

Linyit veya az bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşan taban külü veya fırın cürufu, antrasitli veya bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşan taban külü veya kazan cürufuna göre daha yüksek oranda kalsiyum muhtevasına sahiptir. Tablo 2.10'da sülfat miktarı gösterilmemesine rağmen, genellikle % 1'den az orandadır.

Tuz muhtevasına ve bazı durumlarda düşük pH değerlerine rağmen, taban külü veya fırın cürufu çürütücü özellik gösterebilirler. Taban külü veya fırın cürufu, dolgularda ve duvar arkası malzemesi olarak kullanıldığı takdirde, bu malzemeye temas edecek metal yapıların korozyon potansiyeli gözönüne alınmalı ve incelenmelidir.

Taban külü veya kazan cürufunun çürütücü özelliğini gösteren testler; pH, elektrik direnci, çözünabilir klorid ve sülfat muhtevasıdır. pH değeri 5.5'i geçtiği, elektrik direnci 1500 ohm-santimetreden fazla olduğu, klorid muhtevası 200 ppm'den az olduğu ve çözünabilir sülfat muhtevası 1000 ppm'den az olduğu zaman malzemelerin paslandırıcı etkisi olmadığı söylenebilir.

2.5.3. Taban Külü ve Fırın Cürufunun Mekanik Özellikleri

Tablo 2.11'de, taban külü ve fırın cürufunun bazı tipik kompaksiyon karakteristikleri (maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası), kayma dayanımı ve taşıma gücü karakteristikleri (sürtünme açısı) ve geçirimsizliği liste halinde belirtilmiştir.

Tablo 2.11 Taban külü ve fırın cürufunun tipik mekanik özellikleri

Özellik	Taban Külü	Fırın Cürufu
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	12.1 – 16.2	13.3 – 16.5
Optimum su muhtevası (%)	Genellikle < 20 12 – 24 arası	8 – 20
Kayma dayanımı açısı (°)	38 - 42° 32 - 45° (< 9.5 mm)	38 - 42° 36 - 46° (< 9.5 mm)
Kaliforniya taşıma oranı (CBR)	40 – 70	40 – 70
Geçirimsizlik katsayısı (cm/sn)	10 ⁻² – 10 ⁻³	10 ⁻² – 10 ⁻³

Taban külü ve fırın cürufunun maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, doğal olarak meydana gelmiş eşdeğer dane boyutuna sahip malzemelere göre % 10-25 oranında daha azdır. Taban külünün optimum su muhtevası değeri fırın cürufuna göre daha fazladır. Hem taban külünün hem de fırın cürufunun optimum su muhtevası değerleri doğal olarak meydana gelmiş eşdeğer dane boyutuna sahip malzemelere göre daha fazladır.

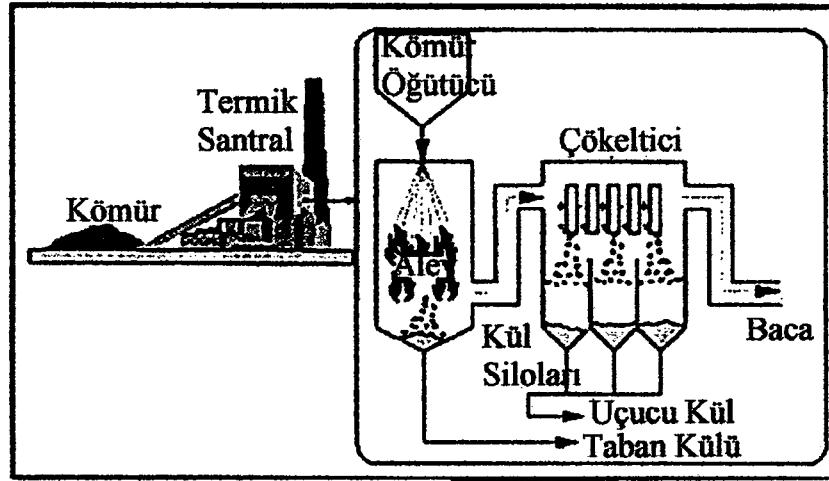
Taban külü ve fırın cürufu için rapor edilen kayma dayanımı açıları, kum ve diğer standart ince daneli agregalarla aynı değerdedir. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerleri, yüksek kaliteli taban malzemeleriyle kıyaslanabilirler. Kuru taban külü ve fırın cürufu, eşdeğer dane boyutuna sahip malzemelerle yaklaşık değerlerde geçirimsizlik katsayısına sahiptir. Geçirimsizlik katsayısı, malzemenin 200 No'lu elekten küçük dane oranına bağlıdır.

2.6. Termik Santral Uçucu Külü

Uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taşkömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino-silisli toz halinde bir yanma kalıntısıdır (TS 639, 1975). Dünyada giderek artan miktarlarda uçucu kül üretilmektedir. Sıkıştırılmış uçucu kül dolgularında, yüksek taşıma gücü elde edilmekte ve bu dolguların hafif-orta şiddetteki yükler altındaki sıkışması ise düşük olmaktadır. Sıkıştırılmış uçucu kül dolgular diğer dolgu malzemelerinden daha düşük yoğunlukta olurlar. Bu özellikleri nedeniyle sıkışabilir zeminler üzerindeki dolgulara önemli bir avantaj sağlarlar. Uçucu küller istinat duvarı arkası dolguları için de uygun bir malzemedir (Aksoy, 1992).

Pulverize (toz haline gelmiş) kömürün kazanın içinde yanmasıyla üretilen uçucu kül; ince daneli, toz şeklinde bir malzemedir. Uçucu kül baca gazıyla taşınır ve genellikle elektrostatik çökticiler veya siklon ayırıcıları yardımıyla filtre çantalarında toplanırlar. Görünüşü genel olarak, açık griden koyu griye değişen renk aralığındadır. Belirgin olarak silt boyutundadır (Hausmann, 1990).

Genellikle termik santrallerde kullanılan üç tip kazan vardır. Bunlar; kuru taban kazanları, ıslak taban kazanları ve siklon fırınları olarak isimlendirilirler. Kömür yakmak için en yaygın olarak kuru taban fırını kullanılır. Pulverize kömür kuru taban kazanında yandığında, üretilen külün % 80'i fırını uçucu kül olarak terk eder ve baca gazıyla dışarı çıkar. Pulverize kömür, ıslak tabanlı kazanda yandığı zaman külün % 50'si fırında kalır ve geri kalan % 50'si baca gazı ile çıkar. Şekil 2.17'de uçucu külün üretim aşamaları ve akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Uçucu külün kuru tabanlı kazanda üretilmesi ve elektrostatik çökelticiler yardımıyla tutulması

Termik santrallerden elde edilen uçucu küller birçok durumda ön plana çıkmaktadırlar. Birçok endüstrileşmiş ülke çok büyük kül depolarına sahiptir ve bu atık malzemenin büyük kısmı kullanılıp mevcut depolardaki kül bitirilirse, önemli çevresel faydalar elde edilecektir. Zemin, hava ve su kirlenmesi azalacaktır. Ayrıca uçucu külün, çimento ve kireç yerine kullanılması gereksiz enerji kaybını önleyecektir. Uçucu külün yumuşak zemin üzerinde inşa edilen yol dolgularında kullanılması avantajlıdır, çünkü düşük birim hacim ağırlığı oturmayı engeller. Daha fazlası, etkili kohezyonu dik dolgu yamaçları yapılmasını mümkün kılar ve köprü ayaklarına gelen yatay toprak itkisini azaltır. Son olarak, uçucu külün kendi kendine sertleşme özelliği, bu tip dolgular için zaman geçtikçe artan uzun süreli stabilite sağlamaktadır (Brandl, 1995).

Her yıl artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla artan miktarlarda yapılan kömür tüketimi, üretilen uçucu kül miktarını da hızla arttırmaktadır. Ülkemizde halen üretilmekte olan uçucu küller ya kuru olarak atık depolarına atılmakta ya da suyla karıştırmak suretiyle kül barajlarına pompalanmaktadır. Her iki durumda da çevrenin kirlenme riski vardır. Bu kirliliği önlemek amacıyla ve aynı zamanda ucuz bir kaynak olarak uçucu kül çeşitli alanlarda değerlendirilebilir. Bu alanlar; çimento üretiminde puzolanik katkı maddesi ve beton içinde ikincil bağlayıcı madde olarak çimentoyla birlikte, tuğla ve yapı bloğu üretiminde, suni agrega üretiminde, enjeksiyon uygulamalarında, dolgu malzemesi olarak, yol inşaatlarında temel ve temel altı tabakası olarak, zemin iyileştirilmesinde, atıkların stabilizasyonunda, zirai

amaçlarla kullanım ve bunun gibi özetlenebilir. Tablo 2.12’de uçucu külün dünyadaki üretim ve değerlendirme miktarları ile ilgili bilgiler verilmektedir (Baykal ve diğ., 1993).

Tablo 2.12 Dünyada uçucu kül üretim ve kullanımı, 1000 ton/yıl (Baykal ve diğ., 1993)

Ülke	Uçucu Kül	Bacaaltı Külü	Kullanım	Yüzde Kullanım	Yıl
Hollanda	815	85	940	100	1991
HongKong	1012	112	1124	100	1989
Danimarka	840	140	880	90	1990
Almanya	7980	4330	10710	87	1989
Finlandiya	434	49	412	85.3	1990
Belçika	930	160	795	73	1990
İtalya	1300	135	900	63	1988
İsrail	370	40	250	61	1989
Fransa	2200	405	1300	50	1987
Japonya	3341	459	1758	46.2	1991
Britanya	13300	2200	5467	35.3	1989
ABD	48458	16766	15974	24.4	1989
SSCB	90000	35000	11500	9.2	1990
İspanya	7391	1304	1500	17.3	1989
Türkiye	15250	1865	0	0	1991

Değişik kaynaklardan elde edilen kömürlerin ve kömür kazanlarının farklı olması sebebiyle bütün küller aynı yapıda değildir. Portland çimentosunda kullanılacak olan uçucu kül ASTM C618’de belirtilen şartlara uymalıdır. ASTM C618’de iki çeşit uçucu kül tanımlanmıştır: 1) F sınıfı uçucu kül 2) C sınıfı uçucu kül

F Sınıfı Uçucu Küller

Antrasit veya bitümlü kömürün yanması sonucu oluşan uçucu kül tipik olarak puzolanik etki gösterir ve ASTM C618’de belirtilen kimyasal kompozisyon ve fiziksel koşullara uygunsu F sınıfı uçucu kül olarak tanımlanır. Puzolanik özelliklere

sahip malzemeler silis ve alüminyum oksit içerirler. Su ve serbest kireç bulunduğu takdirde, silis ve alüminyum oksit; kireçteki kalsiyum ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidratlarını (bağlayıcı bileşimler) üretecektir. F sınıfı uçucu küller stabilizasyon için kireç veya çimentoya ihtiyaç duyarlar.

C Sınıfı Uçucu Küller

Linyit veya az bitümlü kömürün yanması sonucu oluşan uçucu kül, puzolanik özelliklere sahip olmasının yanında, ayrıca çimento özelliğine de sahiptir (sertleşme yeteneği ve su ile birleştiğinde dayanım kazanma özelliği). Bu uçucu kül çeşidi, ASTM C618'de belirtilen kimyasal kompozisyon ve fiziksel koşullara uygunsa C sınıfı uçucu kül olarak tanımlanır. Çoğu C sınıfı uçucu kül çimento özelliğine sahiptir. C sınıfı küller, F sınıfı küllere göre daha yüksek kireç (CaO) muhtevasına sahiptir. Bu özellik C sınıfı küllerin, kireç eklenmeden sertleşmesini veya bağlayıcı olarak davranmasını sağlar.

Uçucu kül heterojen bir malzemedir. Uçucu külün fiziksel, kimyasal ve mühendislik özelliklerini etkileyen faktörler aşağıdakileri kapsar (Hausmann, 1990):

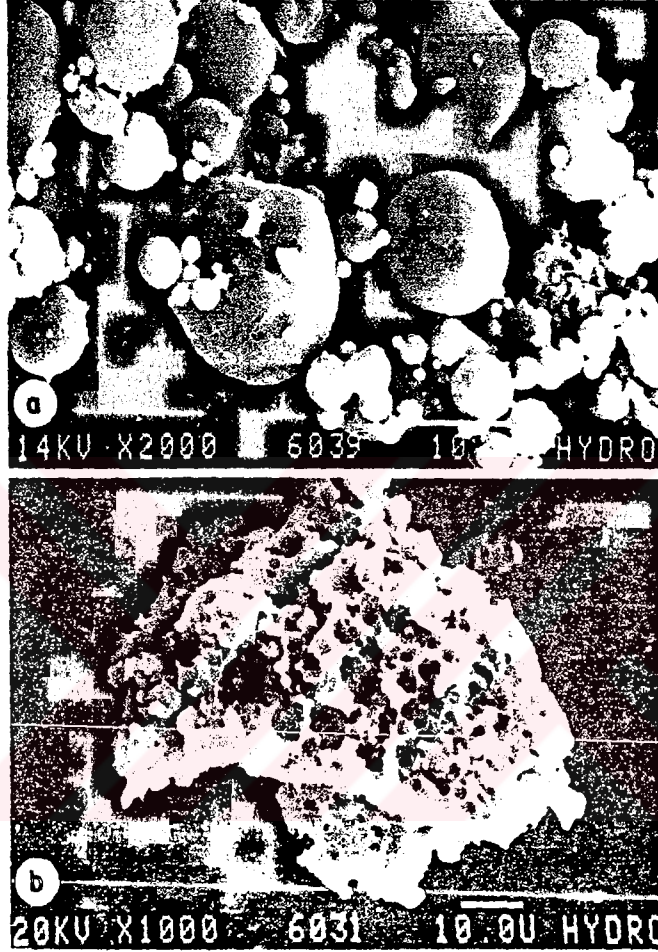
- Kömür cinsi ve saflığı
- Toz haline gelme derecesi
- Kazan tipi ve yanma şekli
- Toplama ve depolama metotları

2.6.1. Termik Santral Uçucu Külünün Fiziksel Özellikleri

Uçucu külün daneleri başlıca silis camı kürecikleri olmak üzere, bazı kristal malzemeler ve yanmamış karbondan oluşmaktadır (Aksoy, 1992). Uçucu kül daneleri küre şeklindedir, katı veya içi boş olsalar bile doğal olarak amorf yapıdadırlar. İçi boş cam kürelerden oluşan bazı kül daneleri yüzebilirler ve bu daneler birçok endüstriyel uygulamada kullanılır.

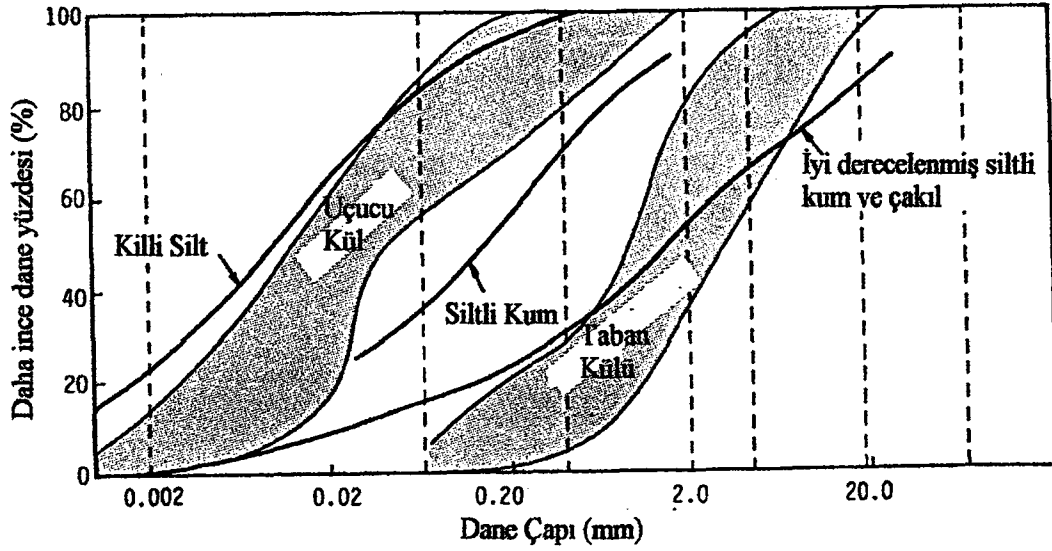
Uçucu kül silt boyutlu bir malzemedir. Uçucu külün ortalama dane çapı (D_{50}), 0.02 – 0.06 mm değerleri arasında değişir. Uçucu külün dane özgül ağırlığı genellikle 1.9 ile 2.5 arasında değişmektedir (Hausmann, 1990). Aynı zamanda özgül yüzey alanı 170 ile 1000 m²/kg arasında değişebilir. Uçucu külün rengi açık kahverengi, gri ve siyah arasında değişebilir. Renk değişiminin sebebi yanmamış karbondan kaynaklanır.

Renk ne kadar açıksa karbon muhtevası da o kadar azdır. Linyit ve az bitümlü kömürlerin külleri açık kahverengi ile deve tüyü rengi arasında değişen renklere sahiptir. Bitümlü kömürlerin uçucu külleri genellikle gri tonlarındadır. Grinin tonunun açılması, külün kalitesinin arttığını gösterir. Şekil 2.18’de, uçucu kül ve taban külü danelerinin mikrografikleri görülmektedir (Toth ve diğ. , 1988).



Şekil 2.18 Mikrografikler: (a) Uçucu kül (b) Taban külü (Toth ve diğ., 1988)
Not: Şekilde gösterilen çizginin uzunluğu 10 µm’dir.

Şekil 2.19’da termik santral uçucu külünün dane dağılımı eğrisi ve diğer zemin türleriyle dane dağılımı açısından karşılaştırılması gösterilmiştir (Toth ve diğ. , 1988).



Şekil 2.19 Termik santral uçucu külünün dane dağılımı eğrisi (Toth ve diğ., 1988)

2.6.2. Termik Santral Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri

Uçucu külün kimyasal özellikleri yanan kömürün cinsine ve enerji üretmek için gerekli yakma sistemine bağlıdır. Temel olarak dört çeşit kömür vardır. Her birinin ısıtma derecesi, kimyasal kompozisyonu, kül muhtevası ve jeolojik kökeni farklıdır. Bu dört çeşit kömür; antrasit, bitümlü, az bitümlü ve linyittir.

Bitümlü kömür uçucu külünün temel bileşenleri; silis, alüminyum oksit, demir oksit, kalsiyum ve değişik muhtevalarda karbondur. Linyit ve az bitümlü kömürlerin uçucu külü yüksek konsantrasyonlu kalsiyum ve magnezyum oksit ile düşük konsantrasyonlu silis ve demir oksit ile karakterize edilir. Ayrıca bitümlü kömürün uçucu külü ile karşılaştırıldığında düşük karbon muhtevasına sahiptir.

Uçucu küle mikroskopik olarak bakıldığında, kristal ve karbon içeren cam kürelerin varlığı ortaya çıkacaktır. Temel kimyasal maddeler; silis (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksittir (CaO). Diğer bileşenler magnezyum oksit (MgO), titanyum oksit (TiO_2), alkaliler (Na_2O ve K_2O), sülfür trioksit (SO_3), fosfor oksit (P_2O_5) ve karbondur. Uçucu küle eklenen su, genellikle pH'ı 6 ile 11 arasında değişen alkali solüsyonu yaratır (Hausmann, 1990).

Uçucu külün puzolanik aktivitesinin göstergesi olan tek bir kimyasal veya fiziksel özellik yoktur. Uçucu külün camsal bileşenleri ($3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ veya mullit) su ve

kireçle birleştğinde, çimentoda bulunan kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminosilikat hidratları oluşur. Uçucu külün puzolanik özelliğini ortaya çıkaran koşullar aşağıdaki gibidir (Hausmann, 1990):

- Silis ve alüminyum oksit miktarı
- Nemlilik ve kireç muhtevası
- Uçucu külün inceliği (dane yüzey alanı)
- Düşük karbon miktarı

Tablo 2.13’de bitümlü, az bitümlü ve linyit kömürünün kimyasal bileşenleri mukayese edilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi, linyit ve az bitümlü kömürlerin uçucu külleri yüksek kalsiyum oksit muhtevasına ve tutuşturma sırasında bitümlü kömürden elde edilen uçucu küllere göre daha az kayba sahiptirler. Linyit ve az bitümlü kömürlerden elde edilen uçucu küller, bitümlü kömürün uçucu külüne göre daha yüksek sülfat konsantrasyonuna sahiptirler.

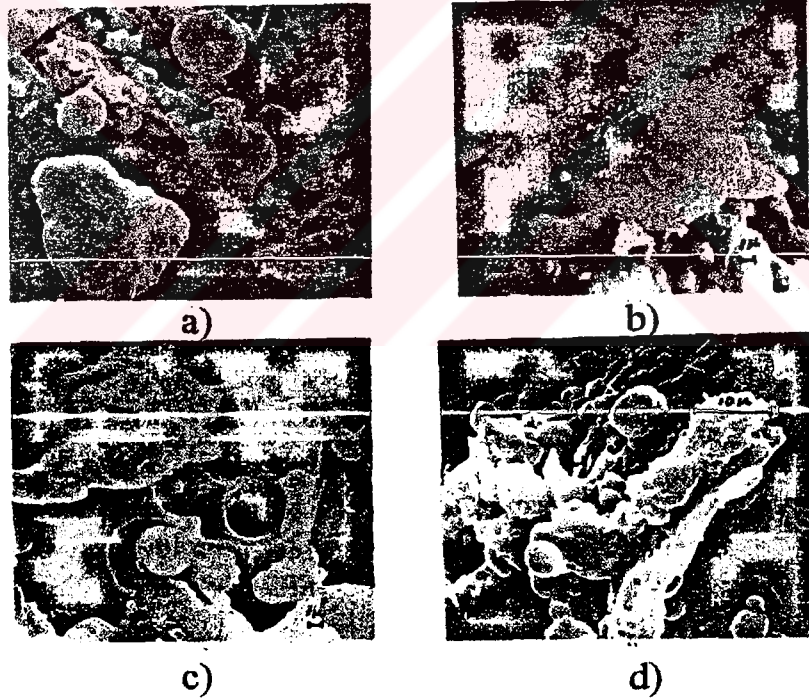
Tablo 2.13 Değişik kömür çeşitlerinden elde edilen uçucu külün kimyasal kompozisyonları (Ağırlıkça yüzde olarak)

Kimyasal Bileşim	Bitümlü Kömür	Az Bitümlü Kömür	Linyit
SiO ₂	20 – 60	40 – 60	15 – 45
Al ₂ O ₃	5 - 35	20 – 30	10 – 25
Fe ₂ O ₃	10 – 40	4 – 10	4 – 15
CaO	1 – 12	5 – 30	15 – 40
MgO	0 – 5	1 – 6	3 – 10
SO ₃	0 – 4	0 – 2	0 – 10
Na ₂ O	0 – 4	0 – 2	0 – 6
K ₂ O	0 – 3	0 – 4	0 – 4
Tutuşturma sırasındaki kayıp	0 - 15	0 - 3	0 - 5

F ve C sınıfı uçucu küller arasındaki en büyük fark; kül içindeki kalsiyum, silis, alüminyum oksit ve demir oksit miktarlarından kaynaklanır. F sınıfı uçucu külde toplam kalsiyum miktarı % 1-12 arasında değişmektedir. Kalsiyum; kalsiyum hidroksit, kalsiyum sülfat, silis ve alüminyum oksit ile birleşmiş camsal bileşikler halinde bulunur. Buna zıt olarak C sınıfı uçucu kül % 30-40 oranlarında kalsiyum

oksit muhtevasına sahiptir. F ve C sınıfı küller arasındaki diğer fark ise, alkali (sodyum ve potasyum karışımı) ve sülfat (SO_4) miktarının C sınıfı küllerde, F sınıfı küllere göre daha yüksek oluşudur. Tutuşturma sırasındaki kayıp (LOI), uçucu külde kalan yanmamış karbonun ölçüsüdür ve uçucu külün en dikkat çekici kimyasal özelliklerinden birisidir. Ayrıca betona konulacak çimentoda kullanılacak uçucu külün uygunluğunu belirler.

Uçucu kül üzerinde yapılan mineralojik analizler göstermiştir ki, temel kimyasal öğeler kendilerini kristal ve cam formunda göstermektedir. Tipik cam öğeleri % 66 - 88 oranları arasında bulunmaktadır ve temel kristal yapılar kuvars, manyetit ve hematittir. Pozolanik aktivite; ince cam parçacıklarının (mullit), kireçtaşı ve su olduğu zaman reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Şekil 2.20'de kül danelerinin elektro-mikroskoplarla elde edilen mikrografikleri görülmektedir (Leonards ve Bailey, 1982).



Şekil 2.20 Kül danelerinin elektro-mikrografiklerinin taranması: (a) Küresel yapı (b) Çatlamış küre (c) Düzensiz, delikli yapı (d) Levha şeklindeki yapı (Leonards ve Bailey, 1982)

Tablo 2.14’de uçucu küllerin ASTM’ye göre sınıflandırılmaları ve kimyasal bileşimleri verilmiştir (Akman, 1993). Ek A’da Türkiye’de üretilen uçucu kül çeşitlerinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 2.14 Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Akman, 1993)

ASTM Sınıfı Tanım	F			C			Diğer
	F _f	F _c	F _a	C _{1a}	C _{2a}	C _{1f}	C _{2f}
Kimyasal bileşim	Siliko-alumin		Siliko-kalsik			Sülfo-kalsik	
SiO ₂	59.4	41.4	47.4	36.3	37.9	24.0	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	24.8	21.3	17.4	18.9	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	18.6	6.2	6.4	6.5	17.0	3.5
CaO	2.6	2.5	16.6	26.5	24.9	24.0	59.0
Na ₂ O eşdeğer	2.2	1.5	0.4	2.2	0.8	0.8	-
MgO	1.3	0.7	4.7	6.6	6.6	1.0	1.8
SO ₃	2.4	1.2	1.5	2.8	3.0	8.0	15.1
Kızdırma Kaybı	2.0	9.5	15.0	0.6	0.8	-	-
SiO ₂ +R ₂ O ₃	90.7	84.8	74.9	60.0	63.3	59.5	22.5
Serbest Kireç	-	-	-	2.8	2.2	-	28.0

2.6.3. Termik Santral Uçucu Külünün Mühendislik Özellikleri

Kompaksiyon

Uçucu kül; ortalama aynı dane boyutuna sahip iyi derecelenmiş zemine göre, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası değerlerinde daha az değişim gösterir. Uçucu külün; kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası değerlerinde daha az hassas olması, uçucu külün daha yüksek hava boşluğuna sahip olması ile açıklanabilir. Doğal

zeminler, maksimum kuru birim hacim ağırlığa ulaştıklarında % 1-5 arasında değişen hava boşluğu içerirler. Uçucu kül ise, maksimum kuru birim hacim ağırlığa eriştiğinde % 5-15 arasında değişen hava boşluğuna sahiptir. Yüksek hava boşluğu oranı, kompaksiyon sırasında boşluk suyu basıncı oluşmasını sınırlayabilir. Böylece uçucu kül, geniş bir su muhtevası aralığında sıkışabilmektedir.

Uygulanan sıkıştırma enerjisi artınca, bütün doğal zeminlerin kuru birim hacim ağırlıklarında artış meydana gelecektir. İnce daneli zeminler, kuru birim hacim ağırlık değişimini en geniş sınırlarda gösterirler. Tablo 2.15’den görülebileceği gibi; sıkıştırma enerjisi artınca uçucu külün kuru birim hacim ağırlığında meydana gelen artış, diğer zemin çeşitlerinin sıkıştırılmasıyla oluşan artış kadar fazla olmamaktadır. Uçucu külden farklı olarak taban külü, Modifiye Proktor Testi uygulandığında çarpıcı bir kuru birim hacim ağırlık artışı gösterir. Bu durumun, yüksek enerji uygulanması sonucu poroz taban külü partiküllerinin ezilmesiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Tablo 2.15 Kompaksiyon enerjisinin, zeminlerin ve kömür külünün maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası üzerindeki etkisi (Toth ve diğ., 1988)

Zemin Cinsi	Standart Proktor Testinin Ortalama Sonuçları		Modifiye Proktor Testi Sonucunda Meydana Gelen Ortalama Değişim	
	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Optimum Su Muhtevası (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Optimum Su Muhtevası (%)
Yağlı kil*	15.54	28	+3.20	-10
Siltli kil*	16.66	21	+2.72	-9
Kumlu kil*	18.42	14	+2.08	-3
Kum*	19.38	11	+1.44	-2
Çakıl-kum-kil karışımı*	20.67	9	+1.28	-1
Uçucu kül** (Lambton G.S.)	11.47	36	+0.93	-10
Taban külü** (Lambton G.S.)	10.05	28	+5.95	-11
Taban külü*** (Lakeview G.S.)	12.75	29	+3.26	-11
* İngiltere Yol Araştırma Laboratuvarı tarafından düzenlenen testler				
** Ontario Su Araştırma Bölümü tarafından düzenlenen testler				
*** Kanada Ulaştırma Bölümü verisi				

Bazı Kanada ve Amerika uçucu küllerinin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Tablo 2.16 ve 2.17’de verilmiştir.

Tablo 2.16 Alberta (Kanada) uçucu küllerinin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (Aksoy, 1992)

	Forestburg		Sundance		Wabamum	
	25 Darbe	10 Darbe	25 Darbe	10 Darbe	25 Darbe	10 Darbe
Optimum Su Muhtevası (%)	18	20.4	19.6	22	16.2	18.0
Maksimum Kuru Birim Hacim (kN/m ³)	13.50	13.12	12.80	12.37	15.26	14.84

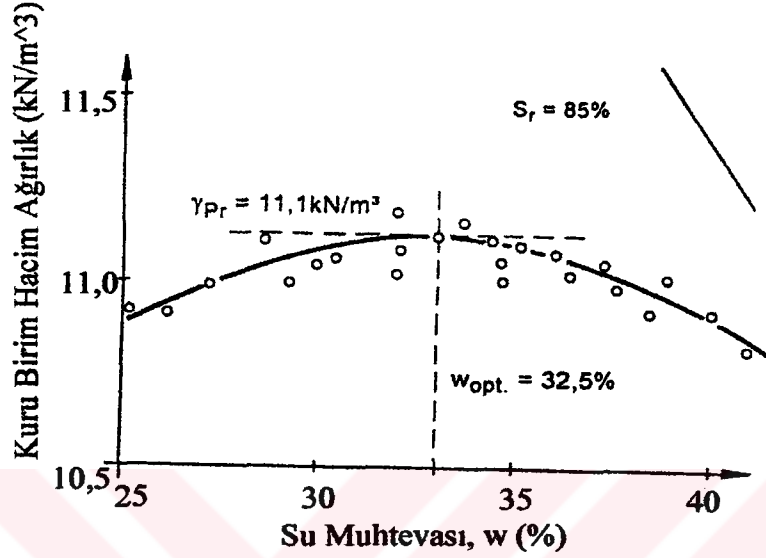
Tablo 2.17 Amerika uçucu küllerinin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (Aksoy, 1992)

	Montana	Kansas Montrose	Kemmerer
Optimum Su Muhtevası (%)	24.0	17.0	21.0
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	18.25	15.40	15.01

Dane dağılımı özellikleri ve uniformluluk katsayısı Tablo 2.18’de verilen uçucu külün, Standart Proktor eğrisi Şekil 2.21’de çizilmiştir. Dane dağılımına ve düşük uniformluluk katsayısına göre Proktor eğrisi neredeyse düz şekil alacaktır. Bu durum; arazide su muhtevasının, kompaksiyonun kalitesini azaltmadan değişeceğini göstermektedir. Uçucu külün depolanma metodu ve depolanma süresi de uçucu külün sıkıştırılmasında önemli rol oynar (Brandl, 1995).

Tablo 2.18 Standart Proktor testinde kullanılan uçucu külün fiziksel özellikleri (Brandl, 1995)

Dane Boyutu (%)			Uniformluluk Katsayısı ($C_u=d_{60}/d_{10}$)	Dane Birim Hacim Ağırlığı γ_s (kN/m ³)
Kum	Silt	Kil		
24	74	2	1.95	24.5



Şekil 2.21 Tablo 2.18’de fiziksel özellikleri verilen uçucu külün standart proktor eğrisi (Brandl, 1995)

Enerji uygulanarak sıkıştırılan kül, 12 ile 19 kN/m³ arasında kuru birim hacim ağırlığa sahip olabilir ve optimum su muhtevası % 15 – 30 aralığında değişir. Bununla birlikte literatürde çok daha sınır değerler rapor edilmiştir ($\gamma_{kmax}=7$ kN/m³ ve $w_{opt}=\%$ 60). Kompaksiyon sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlığın düşük olması, uçucu külün yol inşaatlarında ve dolgu malzemesi olarak kullanılması için potansiyel bir avantaj olarak gösterilebilir. Düşük birim hacim ağırlık, yüksek sürtünme açısı ile birleştiğinde düşük zemin itkileri meydana getirecektir (Hausmann, 1990).

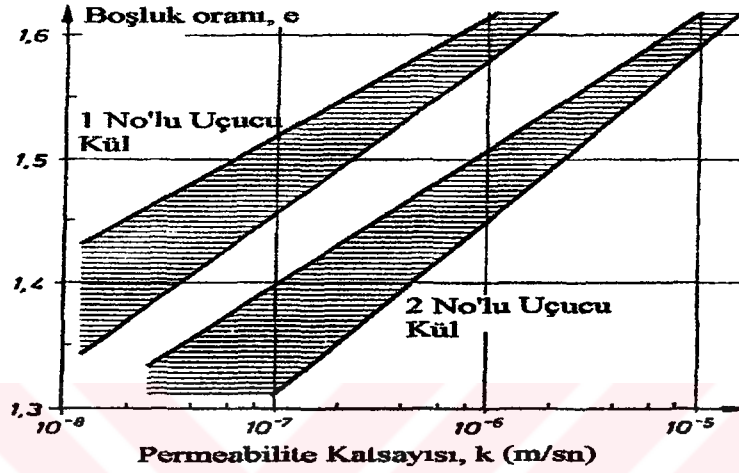
Geçirimsizlik

Çevre açısından ele alındığında, uçucu külün hidrolik iletkenliği en ilgi çekici zemin mekaniği özelliğidir. Hidrolik iletkenliğe etki eden birçok parametre mevcuttur:

- Kompaksiyon derecesi
- Optimum su muhtevası
- Boşluk oranı, porozite

- Doygunluk derecesi
- Hidrolik eğim ($i=1-200$)
- Zaman

Laboratuvar testlerinde elde edilen permeabilite katsayısı (k) değeri, 10^{-9} ile 10^{-5} m/sn arasında değişmektedir. Şekil 2.22'den de görülebileceği gibi, genel olarak boşluk oranı (e) ile geçirimlilik katsayısının (k) logaritması arasında doğrusal bir bağıntı vardır (Brandl, 1995).



Şekil 2.22 Uçucu külde boşluk oranı (e) ve geçirimlilik katsayısı (k) arasındaki ilişki (Taranan alan, sıkıştırılmış külün geçirimliliğinin 1 ile 28 günlük zaman aralığındaki değişimini göstermektedir) (Brandl, 1995)

Başlangıçta; 2 numaralı uçucu kül CaCO_3 katkısı nedeniyle, 1 numaralı uçucu küle göre daha yüksek geçirimliliğe sahiptir. Fakat zamanla numunede meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sebebiyle geçirimlilikte azalma meydana gelir. Uzun süreli araştırmalar göstermiştir ki; geçirimlilikte meydana gelen azalma 10^{-1} - 10^{-2} mertebesinde (Brandl, 1995). Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış uçucu kül için geçirimlilik, elde edildiği kömür cinsine bağlıdır.

Tablo 2.19 Kömür cinsiyle geçirimlilik arasındaki ilişki (Hausmann, 1990)

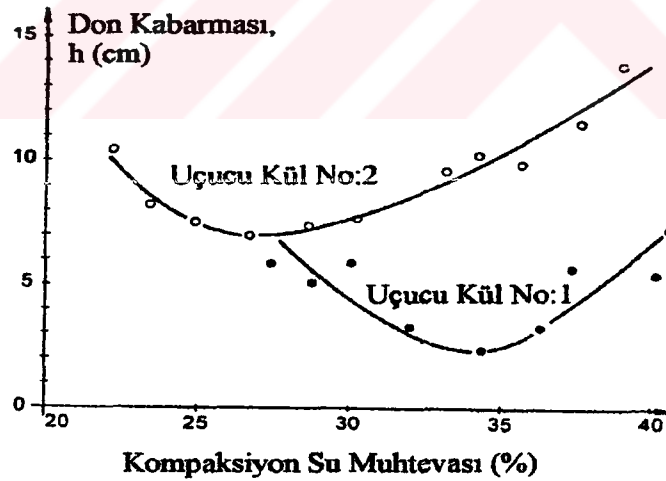
Kömür Cinsi	Bitümlü	Az Bitümlü	Linyit
Uçucu Külün Geçirimliliği (cm/sn)	10^{-4} - 10^{-7}	10^{-5} - 3×10^{-6}	9×10^{-6} - 10^{-7}

Sıkışabilme

Uçucu külün sıkışabilme özelliği, laboratuvarında ödometre deneyi yapılarak saptanabilir. Yapılan araştırmalara göre; bakir konsolidasyon eğrisinin sıkışma indisi (C_c) değerleri, 0.05 - 0.37 aralığında değişmektedir. Daha önce sıkıştırılmış dolgularda meydana gelen oturmayı hesaplamak için kullanılan tekrar sıkışma indisi (C_r) değerleri, 0.006 - 0.04 aralığında değişmektedir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; kompaksiyon, uçucu külün dolgulardaki sıkışabilirliğini önemli ölçüde azaltmaktadır (Toth ve diğ., 1988).

Dona Karşı Hassaslık ve Kılcallık

Kış ayları soğuk geçen ülkelerde, dolgu malzemeleri dona maruz kalabilir. Uçucu küllerin dona karşı olan hassaslığı donma-erime testleri ile incelenmiştir. Şekil 2.23'den de görülebileceği gibi, 2 numaralı uçucu kül numunesi CaCO_3 katkısı nedeniyle buz lenslerinin oluşmasına daha kolay imkan vermiştir. Bu durum, yüksek geçirimsizlik katsayısı ve kireç muhtevasının fazla olması nedeniyle meydana gelen düşük gerilme dayanımı ile izah edilebilir. 1 ve 2 numaralı uçucu kül numunelerinin dolgu malzemesi olarak kullanılabilirmeleri için, çimento ile stabil hale getirilmeleri gerekmektedir (Brandl, 1995).



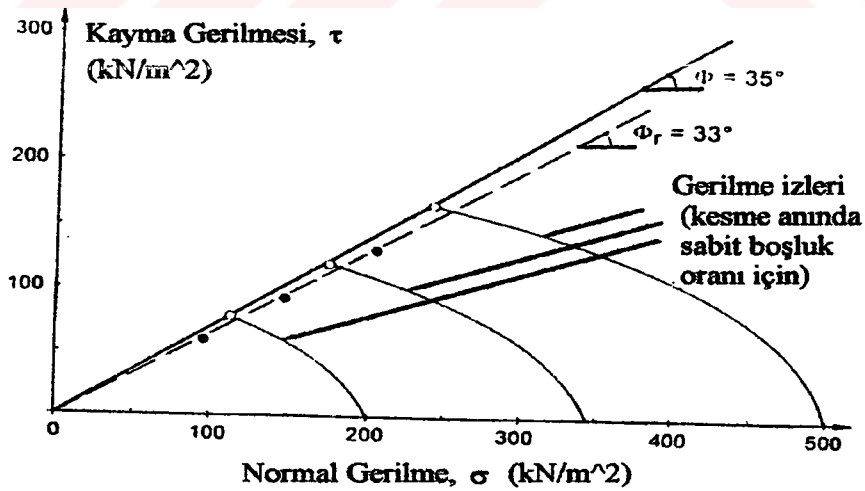
Şekil 2.23 1 ve 2 numaralı uçucu küllerin kompaksiyon yapıldıktan 7 gün sonra -15 °C'de yapılan donma testleri sonucunda elde edilen su muhtevası-don kabarması eğrileri (Brandl, 1995)

Uçucu kül silt boyutunda bir malzeme olup, kapiler su yükselmesi 2.0 metre veya daha fazla olabilmektedir. Uçucu külün dondan etkilenmesi sebebiyle soğuk bölgelerdeki yol inşaatlarında dikkatle ve gerekli tedbirler alınarak kullanılması gerekmektedir (Aksoy, 1992).

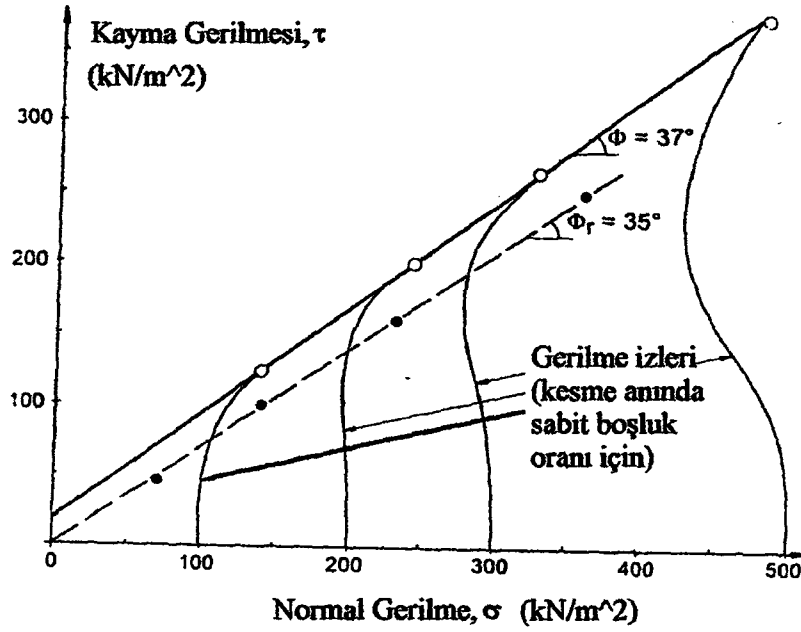
Kayma Dayanımı

Uçucu kül kuru halde toplanmışsa tamamen kohezyonsuz ve plastik olmayan bir malzemedir. Kohezyon eksikliği, kendi kendine sertleşme özelliği olmayan uçucu külü aşınmaya maruz bırakabilir. Suyu doymun olmayan, nemli uçucu külde boşluk suyunun oluşturduğu yüzey gerilimi görünür bir kohezyon vermektedir. Ortaya çıkan bu görünür kohezyon, uçucu külün suya doymun hale gelmesiyle tamamen kaybolduğundan tasarım da göz önüne alınmamalıdır.

Kendi kendine sertleşme özelliğine sahip sıkıştırılmış uçucu küllerde zamanla artan orta veya yüksek değerlerde kayma mukavemeti oluşmaktadır. Şekil 2.24 ve 2.25'den de görülebileceği gibi zaman geçtikçe, sıkıştırılmış uçucu kül numunelerinin kayma mukavemeti açıları ve rezidüel kayma dayanımı açılarında artış gözlenmiştir. Sıkıştırılmış uçucu kül dolgulardan alınan numunelerde yapılan konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli deneylerde ölçülen kayma mukavemeti açısının tipik değeri 30° olarak verilebilir. Bununla birlikte, en düşük 20° ve en yüksek 40° 'lik açı değerleri de ölçülmüştür.



Şekil 2.24 Uçucu kül üzerinde yapılan konsolidasyonlu-drenajlı (CD) basit kesme deneyleri (sabit boşluk oranıyla). Priz süresi: 4 gün ($\sigma= 200, 350$ ve 500 kN/m² gerilme altında) (Brandl, 1995)



Şekil 2.25 Uçucu kül üzerinde yapılan konsolidasyonlu-drenajlı (CD) kesme deneyleri (sabit boşluk oranıyla). Priz süresi: 45 gün ($\sigma=100, 200, 300$ ve 500 kN/m^2 gerilme altında) (Brandl, 1995)

Çeşitli kaynaklardan elde edilen uçucu küllerin ve taban küllerinin, üç eksenli basınç ve basit kesme deneyleri sonucu elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 2.20’de verilmiştir.

Tablo 2.20 Kömür külü için kayma mukavemeti açıları (Toth ve diğ., 1988)

Kül Çeşidi	Kohezyon (kPa)	Kayma Mukavemeti Açısı (°)	Açıklamalar
Kanawha Nehri uçucu külü	0	34.0	Konsolidasyonlu-drenajsız (CU) üç eksenli basınç testleri
Kanawha Nehri uçucu külü	0	37.5	Konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç testleri
Uçucu kül	0	33.1 ±3.0	Doğu Amerika’dan elde edilen 24 numune üzerinde yapılan test
Kanawha Nehri uçucu külü	0	38.0	$e_{ortalama}=1.68$
Fort Martin taban külü	0	40.0	$e_{ortalama}=1.41$
Mitchell taban külü	0	42.5	$e_{ortalama}=1.08$
Nanticoke uçucu külü	0	35	
Nanticoke uçucu külü	0	28-30	

CBR Testi

Kanada Ontario Lakeview uçucu külleri üzerinde yapılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneylerinden elde edilen değerler, su emdirilmiş numunelerde % 6.8 – 13.5 ve su emdirilmemiş numunelerde % 10.8 – 15.4 arasında değişmektedir (Toth ve diğ., 1988). Tablo 2.20’de, arazi ve laboratuvar deneylerinde değişik seviyelerde enerji uygulanarak elde edilen CBR değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.21 Lakeview külünün; çeşitli kompaksiyon enerjilerinde, arazi ve laboratuvar da yapılan deneylerle elde edilen CBR değerlerinin karşılaştırılması (Toth ve diğ., 1988)

Malzeme	Sürşarj (N)	Tabaka/ Vuruş	Islak Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Optimum Su Muhtevası (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	CBR (%)
Arazi uçucu külü	113.39					6.7
Taban külü						
Kuru	9.071	3/25	16.81	26.0	13.34	22.0
Islak	9.071	3/25	17.34	27.5	13.60	15.3
Taban külü						
Kuru	9.071	3/40	17.36	26.0	13.78	24.1
Islak	9.071	3/40	17.61	27.4	13.82	23.8
Taban külü						
Kuru	9.071	3/55	17.98	26.0	14.27	36.4
Islak	9.071	3/55	18.30	27.8	14.32	26.5
Uçucu kül						
Kuru	18.142	3/25	16.52	32.2	12.50	11.2
Islak	18.142	3/25	16.90	41.1	11.98	6.8
Uçucu kül						
Kuru	18.142	3/40	17.20	31.8	13.05	15.4
Islak	18.142	3/40	17.47	35.0	12.94	13.5
Uçucu kül						
Kuru	18.142	3/55	17.40	32.4	13.14	10.8
Islak	18.142	3/55	17.40	34.1	12.98	13.2

Şişme

0.5 m ile 1.0 m kalınlığındaki uçucu kül dolgusunun yarattığı düşey gerilmeden daha az düşey gerilmeye maruz sıkıştırılmış uçucu kül dolgular ıslandıkları zaman şişebilirler. Uçucu külde Goelen tarafından yapılan deneylerde serbest şişme değeri olarak % 11-% 14.5 değerleri saptanmıştır (Aksoy, 1992).

2.6.4. Termik Santral Uçucu Külünün Nükleer Özellikleri

Uranyum; dünyadaki değişik mineral bileşimlerinde 2-4 ppm oranlarında bulunan bir elemandır. Bu oran, silisli volkanik tüflerde 6 ppm ve bazı alkali granitlerinde 100 ppm'e kadar çıkar. Uranyum cevherleri, hava ve nem sebebiyle 6 valanslık oksitlere dönüşürler ve yer altı suyu yardımıyla taşınırlar. Kömür gibi sülfürlü malzemelerle bir araya gelirlse valansları 4'e düşer ve çökelirler. Bu cevher yatakları arasında en önemlileri; turba, linyit ve düşük dereceli kömür yataklarıdır. Karbon ve hidrojen gibi hafif içerikler, kömürün yanma işlemi sırasında yok olurlar ve geri kalan küller uranyum muhtevası açısından zengin hale gelirler.

Linyitlerde bulunan uranyum cevherleri üzerindeki araştırmalar Türkiye'de 1952 yılından beri süregelmektedir ve Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde ölçümler yapılmaktadır. Bu araştırmalardan elde edilen bazı sonuçlar Tablo 2.22'de verilmiştir:

Tablo 2.22 Türkiye'nin çeşitli termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin uranyum muhtevaları (Akman ve İlhan, 1997)

Termik Santralin Bölgesi:	Yatağan	Orhaneli	Afşin-Elbistan	Soma
Uranyum Muhtevası (%):	0.0105-0.0025	0.009	Çok az	0.008-0.004

Uçucu külde bulunan ^{238}U , başlangıçta çok etkili radyoaktif bir element değildir. α ve β partiküllerini kaybederek parçalanır ve bazı radyo-nuklitlere dönüşür. Bu radyo-nuklitler arasında ^{226}Ra (Radyum) en aktif elementtir ve α partiküllerini kaybederek Radon gazına (^{222}Rn) dönüşür. Nadir bulunan Radon gazı ve radyoaktif olan Radyum, insan yaşamını büyük ölçüde tehlikeye sokan maddelerdir. Uranyumun (^{238}U) parçalanma işlemi sırasında başka radyo-nuklitler de oluşur. Bunlara örnek

olarak Toryum, Protaktinyum (^{234}Pa), Polonyum (^{218}Po), Plomb (^{214}Pb), Bizmut (^{214}Bi) verilebilir. Stabil olan ve reaktif olmayan en son element ^{206}Pb 'dir.

Radyoaktivitenin derecesini açıklamak için gerekli kriter, parçalanmış atom çekirdeklerinin sayısıdır. Bu derecenin birimi Küri'dir (Ci). Ci birimi; bir saniyede parçalanmış 3.7×10^{10} tane atom çekirdeğini belirtmektedir. Bu birim çok büyük olduğu için, bekerel (Bq) denilen başka bir birim kullanılmaktadır ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$). Her parçalanma sonucunda foton yayılması ortaya çıkmaktadır. Reaktivite seviyesi bu fotonların ölçülmesi ile belirlenmektedir. Fakat foton sayısı ile reaktivite arasındaki ilişki basit değildir. Bu metotlardan başka radyasyonun şiddeti, röntgen (r) adı altında başka bir birim kullanılarak açıklanmaktadır. Röntgen birimi (r); normal koşullarda 1 cm^3 havadaki bir tane elektrostatik şarj birimini üretebilen γ veya X radyasyonunun şiddeti olarak tanımlanır. Bir röntgen γ veya X ışını tarafından insan hücresinde meydana getirilen biyolojik hasar 1 rem'e (insan eşdeğeri röntgen) eşittir. α ve β radyasyonlarının insan üzerindeki etkisi γ ve X ışınlarından farklıdır.

Türkiye uçucu küllerinin radyoaktivitesini belirlemek için; yüksek radyoaktiviteye sahip olduğu iddia edilen Orhaneli ve Yatağan termik santrali uçucu küllerinin foton emisyonları ölçülmüştür. Aynı zamanda kıyaslayarak sonuç elde etmek için, diğer uçucu küllere oranla daha az foton emisyonuna sahip olan Afşin-Elbistan uçucu külü ve Portland çimentosu (PÇ-32.5) üzerinde çalışılmıştır. Tablo 2.23'de, uçucu kül ve çimentoda bulunan bozulmuş izotoplardan yayılan foton sayıları verilmiştir. Buradan, uçucu külde bulunan radyoizotopların çimentoda da bulunduğu ve yaklaşık aynı sayıda foton yaydıkları belirlenmiştir (Akman ve İlhan, 1997).

Tablo 2.23 ^{238}U , ^{232}Th , ve ^{40}K 'nin bozulmuş izotoplarının foton sayıları

	Laboratuvar Ortamı	Portland Çimentosu	Afşin-Elbistan Uçucu Külü	Orhaneli Uçucu Külü	Yatağan Uçucu Külü
Toplam	947234±973	1183059	953942	967653	1214265

İnsan sağılığı açısından en tehlikeli radyo-nüklitler; ^{238}U 'un parçalanması sonucu oluşan Radium (^{226}Ra , ^{228}Ra) ve Radon (^{222}Rn) gazıdır. Tablo 2.24'de, değişik bağlayıcı ve puzolanik malzemelerde bulunan Radium ve Radon gazı muhtevaları verilmiştir.

Tablo 2.24 Bazı yapı malzemelerinin doğal radyo-nüklit muhtevaları, Bq/kg (Akman ve İlhan, 1997)

Yapı Malzemesi	^{226}Ra	^{228}Ra	^{40}K
Standart portland çimentosu (PÇ-32.5)	26	18	210
Puzolanik portland çimentosu	49	45	390
Doğal puzolan	210	250	1660
Amerika uçucu külü	170	130	470
Güney Afrika uçucu külü	170	150	330
Tuğla	40	40	710

Battaglia, ayrıca betona çimento yerine belli oranlarda uçucu kül koyarak Radon gazı çıkışını incelemiştir. Çimento yerine % 5, 15, 26 ve 40 oranlarında uçucu kül yerleştirilerek prizmatik beton levhalar üretilmiştir (20×20×10 cm boyutlarında). Tablo 2.25'de uçucu kül içeren betonda Radon gazı yayılma hızları verilmiştir.

Tablo 2.25 Uçucu kül içeren betonda Radon gazı yayılma hızları, $\mu\text{Bq/kg.sec}$ (Akman ve İlhan, 1997)

Uçucu Kül Yerleştirme Oranı (%)	Güney Afrika Uçucu Külü	Amerika Uçucu Külü
0	5.49	
5	5.63	5.77
15	6.01	5.74
26	6.63	6.65
40	7.20	6.81

Uçucu küller her zaman ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotoplarını ve bunların bozulmuş radyo-nüklitleri olan ^{226}Ra ve ^{222}Rn ihtiva ederler; bu nedenle içine kondukları yapı malzemelerinin radyoaktivite seviyesini yükseltirler.

Akman ve İlhan (1997) tarafından yapılan araştırmalarda uçucu kül ve çimentodaki foton yayılımı gözlemlenmiş ve aralarında kayda değer bir farklılık bulunamamıştır. Çimento ve uçucu küller üzerinde yapılan testler sonucunda, Portland çimentosu ve uçucu külün eşit sayıda radyo-nüklite ve aynı seviyede radyoaktiviteye sahip olduğu anlaşılmıştır. Afşin-Elbistan ve Orhaneli uçucu külleri, çimentodan % 19.4-18.2 daha az foton yaymıştır. Yatağan uçucu külü diğerlerine göre daha radyoaktiftir, fakat sadece çimentodan % 2.6 daha fazla foton yaymıştır. Bu incelemelere göre, çimento yerine uçucu kül kullanılmasının radyasyon miktarında fazla bir artışa neden olmayacağı anlaşılmıştır.

Tablo 2.24'ten de anlaşılabilir olduğu gibi; uçucu küllerin Radyum muhtevaları çimento çeşitlerinin Radyum muhtevalarından fazla, fakat ^{40}K muhtevaları daha azdır. Bu araştırmanın en ilginç sonucu; portland klinkerine doğal puzolan konulmasının, portland çimentosunun radyo-nüklit muhtevalarını iki katına çıkarmasıdır. Bu nedenle; puzolan karıştırılmış çimento herhangi bir radyoaktif şüpheye yol açmıyorsa, uçucu kül karıştırılmış çimento hiçbir kullanım sakıncası oluşturmaz.

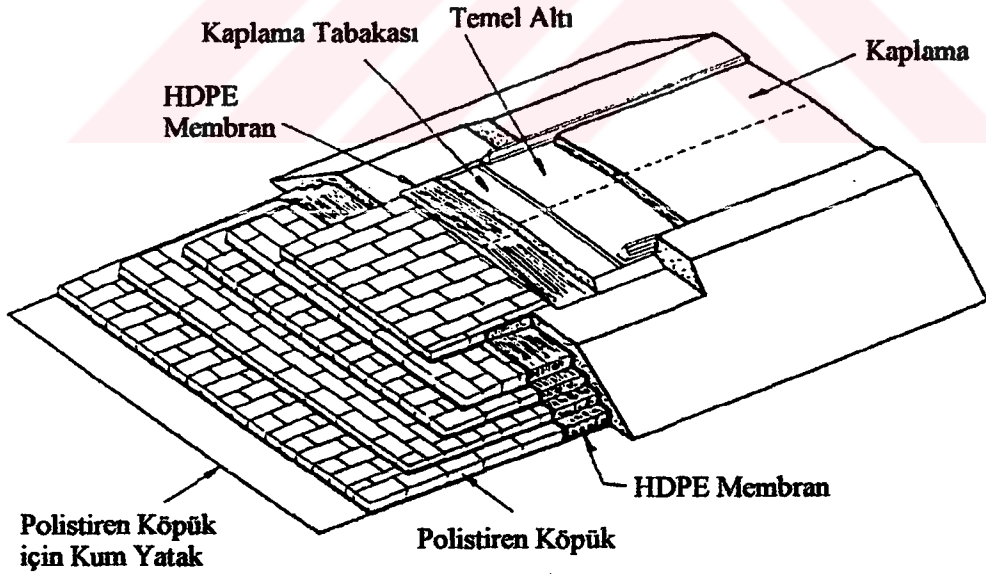
1988'de yayınlanan Birleşmiş Milletler Bilim Komitesine ait rapora göre; uçucu külün yapı malzemelerinde kullanılması, toplam radyasyonda yıllık 30 μSv -70 μSv (3 mrem-7 mrem) arasında değişen artışa neden olmaktadır. 20 yıl önce, medeni bir insanın doğal ve yapay kaynaklar nedeniyle yıllık 160 mrem radyasyona maruz kalacağı düşünülmektedir. Günümüzde bu miktar 240 mrem'e ulaşmıştır. Birleşmiş Milletler tarafından açıklanan değerlere göre uçucu külün yapı malzemesi olarak kullanılmasıyla, insanların maruz kalacağı radyasyonda % 1.3-2.9 oranında artış meydana gelmektedir. Buna göre, insanların alacağı radyasyon miktarı 247 mrem'e yükselmektedir. İnsanoğlu için kabul edilebilir yıllık radyasyon dozajı limiti 500 mrem'dir. Bu değer de, insanların alacağı radyasyon miktarının iki katıdır. Buradan da açıkça görülebilir ki; radyasyonda yıllık 7 mrem artış, ihmal edilebilir miktardadır. Uçucu küllerdeki; ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{222}Rn radyo-nüklit muhtevalarından kaynaklanabilecek potansiyel risk minimum seviyededir. Bu risk, volkanik tüf orijinli doğal puzolanlar için çok daha büyüktür. Yüksek nükleer tehlikeye sahip olduğu düşünülen Yatağan ve Orhaneli külleri üzerinde yapılan testlerin sonuçları genellikle pozitif çıkmıştır (Akman ve İlhan, 1997).

3. KONU ÜZERİNDE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1. Polistiren Köpük Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

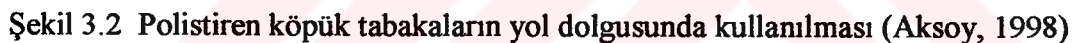
3.1.1. Polistiren Köpük ile Yol Dolgusu Teşkili

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi polistiren köpük bloklarla yol dolgusu teşkilinde, önce zemin üzerinde kum yatak hazırlanır ve ilk sıra bloklar döşenir. Her tabakada, polistiren bloklar aşağıdaki tabakanın derzlerini örtecek tarzda ve birbirine dik yönde yerleştirilir. Kademeli düzenleme, şevleri kaplayan zeminin tutunmasını da temin eder. Polistiren blokların birleştirilmesi veya sabitlenmesi gerekli değildir. Ancak Norveç ve Fransız şartnameleri metal elemanlarla blokların tutturulmasını önermektedir.



Şekil 3.1 Polistiren köpüğün yol dolgusunda kullanılması (Aksoy, 1998)

Dolguda kullanılan genişmiş polistiren köpüğün CBR değerlerinin % 2'den küçük olması nedeniyle; otoyollarda polistiren köpük dolgu ile bitmiş yol yüzeyi arasında en az 1.0 m kalınlığında temel altı dolgusu yapılmalıdır. Bu değer, trafiğin daha az yoğunlukta olduğu yollarda azaltılabilecektir. Şekil 3.2'de, polistiren köpük tabakaların yol dolgusunda kullanılmasına ait bir örnek gösterilmektedir.

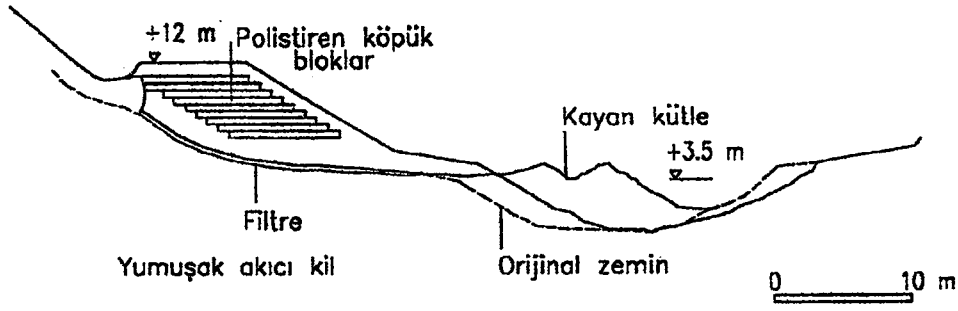


3.1.2. Polistiren Köpükle Yapılmış Pratik Uygulamalardan Örnekler

Oslo otoyoluna giriş ve çıkış rampası, yüksek bir istinat duvarı ve duvarın arkasına önemli miktarda dolgu yapılmasını gerektirmiştir. Ana kaya derinliği 10 m ile 25 m

Akıcı Kil Üzerindeki Yol Dolgusunun Tekrar İnşası

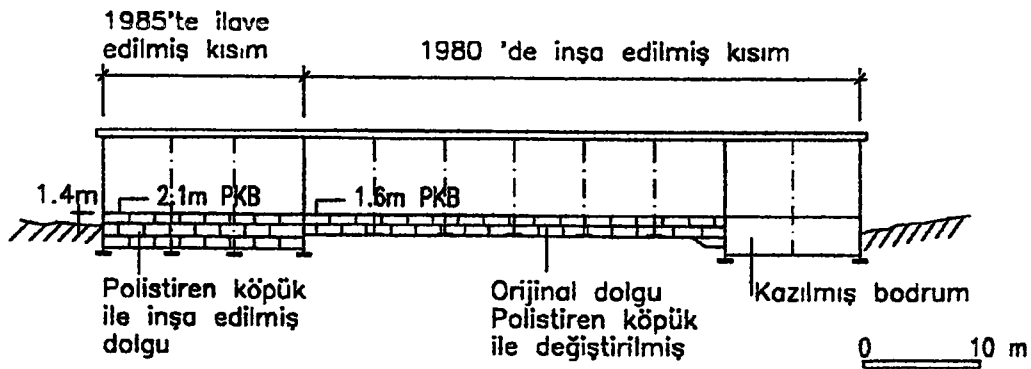
1982 yılı Eylül ayında, kuzey Norveç'te yumusak akıcı kil dolgu üzerinde bulunan



Şekil 3.4 Kayan yol dolgusunun polistiren köpüklerle tekrar teşkili (Aksoy, 1998)

Oturan Fabrika Döşeme Dolgusunun Tekrar İnşası

1980 yılında Norveç'te, 50 m × 55 m alanına sahip bir fabrika binası inşa edilmiştir. Binanın ana kısmında orijinal zemin üzerinde, 1.5 m ile 1.8 m kalınlığında sıkıştırılmış çakıl dolgu ve üzerinde betonarme döşeme bulunuyordu. Tabii zemin, 40 m'den fazla kalınlığa sahip normal konsolide deniz kiliydi. İnşaattan 5 yıl sonra, maksimum oturma 35 cm ve farklı oturmalarda 25 cm'e ulaşmıştır. Dolgu yapılan alanlarda gerilme, hareketli yük dahil 40 kPa ile 50 kPa arasında değişmektedir. Oturmaları önlemek için çakıl dolgu kazılmış ve yerine 1.6 m kalınlığında polistiren köpük bloklar ve 0.45 m kalınlığında çakıl ile beton tabaka konmuştur (Şekil 3.5). Fabrikaya 1985 yılında 18 m × 55 m boyutlarında ilave bir bölüm yapılması söz konusu olduğunda önceki deneyimler de göz önünde tutularak 2.1 m'lik dolgu, polistiren köpük bloklarla teşkil edilmiştir (Flaate, 1989).

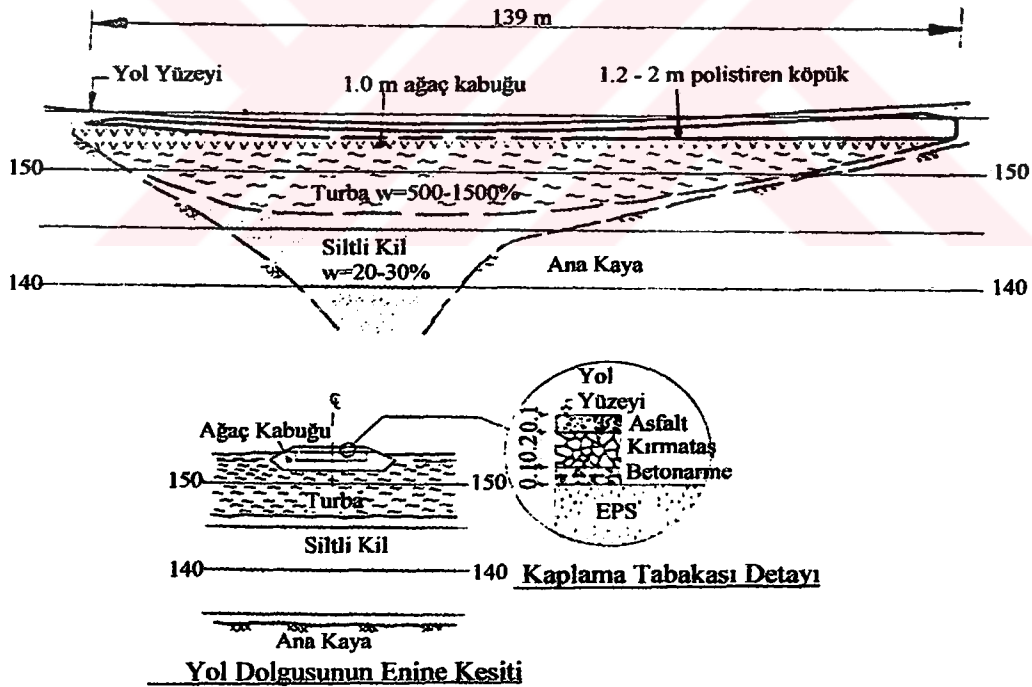


Şekil 3.5 Fabrika döşeme dolgusunun polistiren köpüklerle tekrar inşası (Aksoy, 1998)

Turba Zemin Üzerinden Geçen Yol

Daha önce turba zemin üzerinde inşa edilen yol, yıllar geçtikçe önemli oturmalarla maruz kalmıştır. Yol üzerinde yapılan kot ayarlamaları sırasında yola malzeme eklenmesi gerekmiş ve bu durum da oturmaların artmasına sebebiyet vermiştir. İnşaat sırasında yol, her sene düzenli olarak sele maruz kalmıştır. Toplam oturmalar 1.7 m'ye erişmiş ve hızla artmıştır. Çatlaklar, göçmeye yakın durumda bulunulduğunu göstermektedir. Oturmaları durdurmak ve yol seviyesini sel seviyesinin üstünde tutmak için hafif dolgu malzemesi kullanmak gerekmektedir.

Bu durumda, inşaatı yapmak için ağaç kabuğu ve genişleşmiş polistiren kombinasyonu kullanılmıştır. Çakıl dolgu, su seviyesinin 1 m altına kadar kazılmış ve su seviyesinin altında kalan kısma ağaç kabuğu yerleştirilmiştir. Ağaç kabuğundan oluşan tabakanın sıkıştırılması ve tesviye edilmesinden sonra üstüne 0.5 m – 2.7 m arasında değişen kalınlıkta genişleşmiş polistiren köpük tabakası yerleştirilmiştir. Yolun dizaynı boyuna ve enine kesit olarak Şekil 3.6'da gösterilmiştir. İnşaatın bitiminden 10 yıl sonraki maksimum oturma 6 cm'dir ve oturma miktarı zamanla azalmaktadır (Flaate, 1989).



Şekil 3.6 Turba zemin üzerinden geçen yol için polistiren köpük dolgusu teşkili (Flaate, 1989)

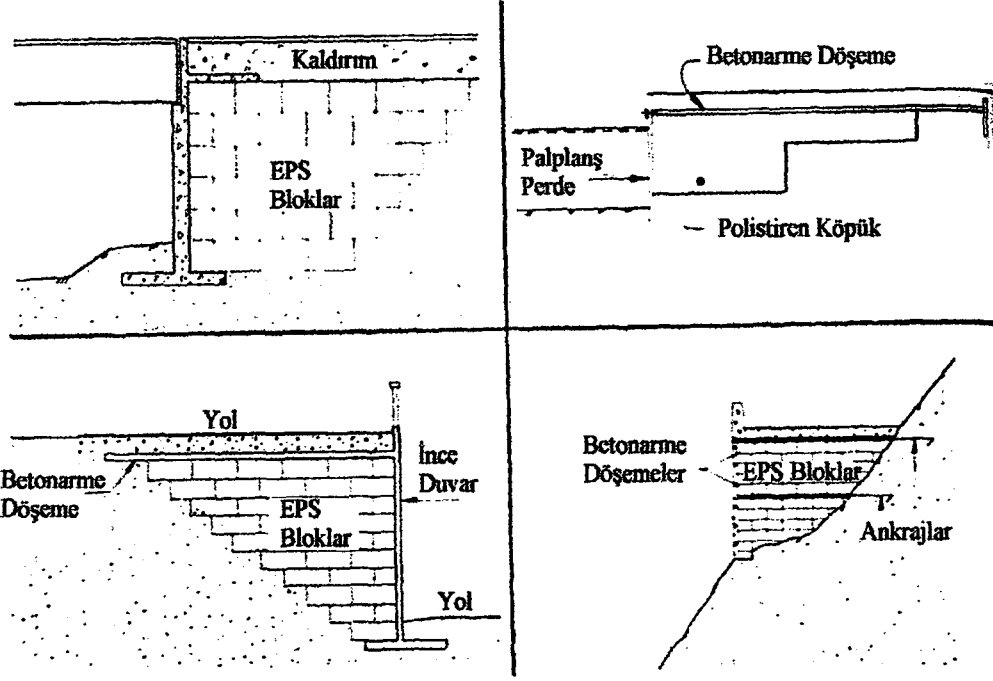
3.1.3. Polistiren Dolgunun Faydaları ve Kullanıldığı Alanlar

Polistiren dolgular, konvansiyonel dolgularla kıyaslandıklarında pahalıdırlar. Fakat düşük yoğunluğu, daha pahalı olan zemin iyileştirmeleri ve derin temellerin kullanılacağı yerlerde avantaj sağlar. Farklı oturmalar ve uzun süreli ikincil konsolidasyonun beklendiği yerlerde, polistiren köpüğün kullanılması daha uygun olacaktır. Polistiren köpüğün kullanılabileceği alanlar aşağıdaki gibidir:

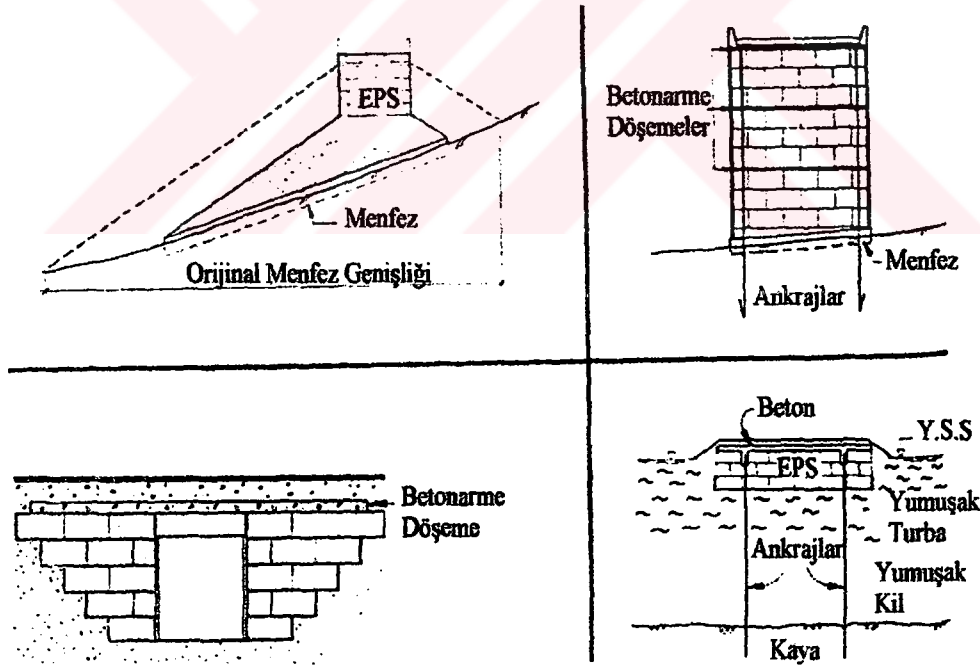
- Çok zayıf veya sıkışabilir zeminlerin üzerinde; stabilite ve oturma problemlerini önlemek için
- Oturmaya duyarlı yapıların üzerinde
- Zayıf yapıların üzerinde, yapı göçmesini önlemek için
- Potansiyel olarak stabil olmayan şevlerde, şevin yüklenmesini önlemek için
- Köprülerle normal dolgular arasındaki geçişi sağlamak için
- Bitişik kazıklarda negatif sürtünmeyi ve yanal yüklemeyi önlemek için
- İstinat duvarları ve köprü ayaklarında duvar arkası dolgusu olarak, duvar kalınlığını azaltmak ve kazıklı temellerin yapımını önlemek için
- Daha önce yapılmış yol dolgularını genişletirken
- Viyadük ayaklarını desteklemek için
- Yeraltı yapılarının etrafını doldurarak; düşey ve yatay gerilmeleri azaltmak ve aynı zamanda ısı yalıtımı sağlamak için
- Yol trafiğinden gelen titreşimleri azaltmak için (Brandl, 1995).

Şekil 3.7’de; polistiren köpük blokların köprü ayağı, istinat duvarı, palplanş perde ve dik yamaçlardaki yapılarda kullanılmasına ait örnekler verilmiştir. Şekil 3.8’de de polistiren köpük blokların; yol dolgularında, yaya alt geçitlerinde ve yüzen yapılarda kullanılmasına ait örnekler verilmiştir.

Gelecekte; boşluklu ve hücreli çok daha hafif polistiren köpük elemanların üretilmesi, yüzen yapılarda polistiren köpük kullanımının artması ve polistiren köpüğün geoteknik mühendisliğinde kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir.



Şekil 3.7 Polistiren köpük blokların köprü ayağı, istinat duvarı, palplanş perde ve dik yamaçlardaki yapılarda kullanılması (Flaate, 1989)



Şekil 3.8 Polistiren köpük blokların yol dolgularında, yaya alt geçitlerinde ve yüzen yapılarda kullanılması (Flaate, 1989)

3.2. Lastik Yongaları Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

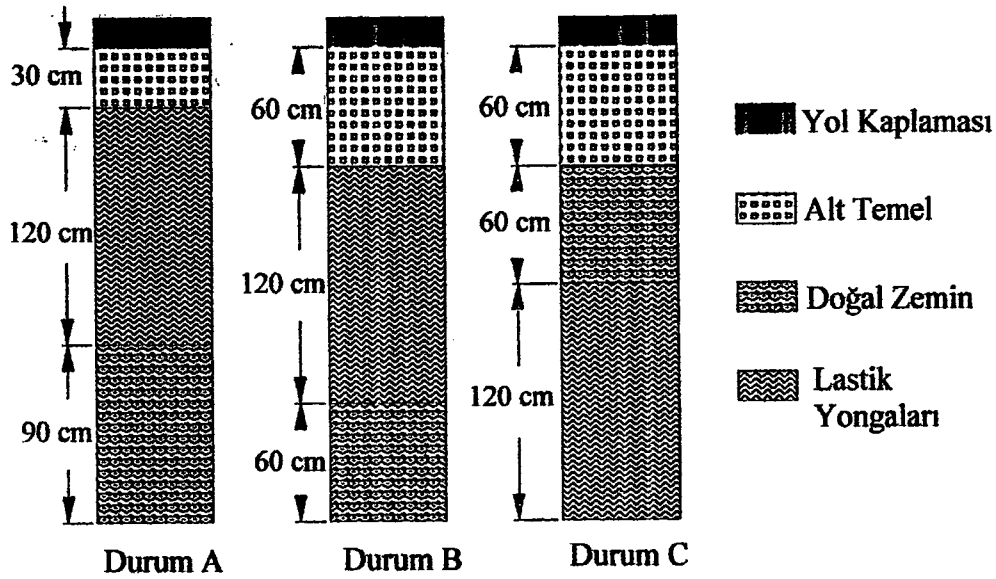
3.2.1. Lastik Yongaları Tabakasına Sahip Yollarda Araç Yüklerinden Meydana Gelen Şekil Değiştirmelerin Analizi

Bir yol dolgusunda; lastik yongalarından oluşan tabakanın üzerindeki zemin kalınlığının, yol kaplamasının şekil değiştirmesine olan etkisini bulmak için ön çalışma yapılmıştır. Üç değişik durum incelenmiştir. Bütün durumlarda; 15 cm kalınlığında bitümlü beton üst kaplama, lastik yongalarından oluşan 1.2 m kalınlığında alt temel ve altında rijit bir taban bulunan doğal zemin tabakası kullanılmıştır. Üç durumun farklılığı; Şekil 3.9’da gösterildiği gibi 1.2 m kalınlığındaki lastik yongası tabakasının pozisyonunun değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Analiz yapmak için lineer elastik sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Analizde kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri (Humphrey ve Manion, 1992)

Malzeme	Young Modülü, E (kPa=kN/m ²)	Poisson Oranı, ν
Yol kaplaması	6.89×10^6	0.35
Alt temel, yüksek E	8.27×10^4	0.25
Alt temel, düşük E	16.54×10^3	0.25
Doğal zemin, yüksek E	41.34×10^3	0.25
Doğal zemin, düşük E	8.27×10^3	0.25
Lastik yongaları	13.78×10^2	0.32

Yol kaplaması, alt temel ve doğal zemin için gerekli parametreler daha önce elde edilen tipik değerler kullanılarak belirlenmiştir. Alt temel ve doğal zemin modüllerinin etkisi, yüksek ve düşük E (Young modülü) değerleriyle analizler düzenlenerek incelenmiştir. Düşük E değerleri; sığ derinlikte oluşan düşük çevre basıncı sonucu ve lastik yongalarından oluşan tabakanın üzerindeki alt temel ve doğal zeminin iyi sıkıştırılamaması sonucunda daha gerçekçi olacaktır. Lastik yongaları için gerekli parametreler sıkışabilirlik testlerindeki yükleme – boşaltma eğrilerinden elde edilmiştir. 33.5 cm çapındaki dairesel bir alana 551 kPa’lık basınç uygulanarak, lastik yükü modellenmiştir. Bu durumda oluşan gerilme, 100 kN’luk dingil yükü uygulanması sonucunda yol kaplamasında oluşacak gerilmeye eşittir.



Şekil 3.9 Sonlu elemanlar çalışması için kullanılan zemin profili (Humphrey ve Manion, 1992)

Tablo 3.2'den de görülebileceği gibi, lastik yongalarından oluşmuş tabakanın üzerindeki alt temel ve doğal zeminin kalınlığının ve ayrıca elastisite modüllerinin yol kaplamasının yüzeyinde oluşacak şekil değiştirmelere etkisi çok büyüktür. Sonuç olarak; lastik yongaları üzerindeki zeminin kalınlığının ve rijitliğinin artırılmasının, kaplamanın şekil değiştirmesini büyük ölçüde azalttığı görülmüştür (Humphrey ve Manion, 1992).

Tablo 3.2 Lastik Yükünün Merkezinin Altındaki Yol Kaplaması Deformasyonu (Humphrey ve Manion, 1992)

Durum	Alt Temel ve Doğal Zeminin Young Modülleri (E)	
	Düşük değerdeki E	Yüksek değerdeki E
A	0.33 cm	0.25 cm
B	0.28 cm	0.18 cm
C	0.23 cm	0.13 cm

3.2.2. Yol Kaplamasının Performansına Lastik Yongalarının Etkisini İncelemek İçin Yapılan Arazi Deneyleri

North Yarmouth Arazi Deneyi

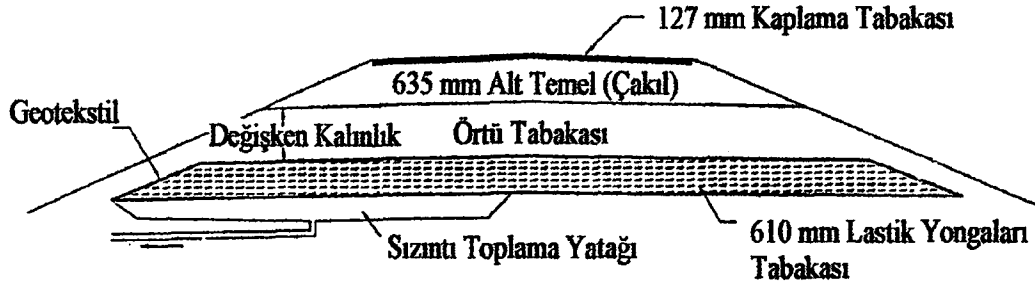
Yol kaplamasının performansına lastik yongalarının etkisini incelemek için North Yarmouth, Maine’de 2.sınıf bir otoyol üzerinde arazi uygulaması yapılmıştır. Esas amaç; lastik yongalarından oluşan tabakanın üzerindeki zeminin kalınlığının, yol kaplamasının şekil değiştirmesine olan etkisini bulmaktır. Deneyin ikinci amacı, lastik yongalarının yer altı suyunun kalitesine olan etkisini bulmaktır. 3 yıl süren gözlemler böyle bir etkinin ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir (Humphrey ve Nickels, 1997).

North Yarmouth arazi deneyi; Maine Merkez Demiryolu’nun üstündeki Route 231 köprüsü için gerekli bir dolgunun teşkilinde kullanılmıştır. 2.sınıf olan bu yol, günlük ortalama 1250 araç kapasitesine sahiptir ve bu kapasitenin sadece % 10’u ağır taşıtlardır.

Arazi deneyi; dört adet 30’ar metre uzunluğunda, 610 mm kalınlığında lastik yongası tabakasına sahip yoldan oluşmaktadır. Her lastik yongası tabakasının üstünde değişik kalınlıkta örtü ve temel altı tabakası mevcuttur. Bu tabakaların toplam kalınlığı 765 mm ile 1375 mm arasında değişmektedir. Her 30 m’lik kısım 127 mm kalınlığında bitümlü kaplamaya sahiptir. Lastik yongalarından oluşan tabaka, örgülü olmayan geotekstil (Amoco 4551) ile sarılmıştır. Böylece lastik yongalarından oluşan tabakanın üstündeki ve altındaki zemin, lastik yongası tabakasına girmeden drenaja müsaade edilecektir. Deney kısımlarını oluşturan tabakaların içerikleri Tablo 3.3’de özetlenmiş ve Şekil 3.10’da da enine kesitleri gösterilmiştir.

Tablo 3.3 North Yarmouth arazi deneyi içeriği (Humphrey ve Nickels, 1997)

Kısım	Lastik Yongası Çeşidi	Tabaka Kalınlığı (mm)			
		Lastik Yongaları	Örtü Tabakası	Alt Temel	Kaplama
1	B	610	130	635	127
2	A	610	430	635	127
3	A	610	740	635	127
4	A	610	130	635	127



Şekil 3.10 North Yarmouth arazi deneyi enine kesiti (Humphrey ve Nickels, 1997)

Yapılan arazi deneyinde kullanılan lastik yongaları farklı iki boyuttadır. A tipi lastik yongaları uniform olarak derecelenmişlerdir ve 76 mm maksimum boyuta sahiptirler. Derecelenme şartnameleri, lastik yongalarının % 100'ünün 76 mm'lik elekten geçmesini, en az % 50'sinin 51 mm'lik elekten geçmesini ve maksimum % 20'sinin 4 No'lu (4.75 mm) elekten geçmesini öngörmüştür.

B tipi lastik yongaları da uniform boyutlara sahiptir ve maksimum boyutları 305 mm'dir. Derecelenme şartnameleri, lastik yongalarının % 100'ünün 305 mm'den küçük boyutlara sahip olmasını, en az % 75'inin 203 mm'lik elekten geçmesini ve maksimum % 20'sinin 51 mm'lik elekten geçmesini öngörmüştür. Yonga haline getirilmiş yaklaşık 100.000 taşıt lastiği, bu proje için kullanılmıştır. Lastik yongalarından oluşan bölümün toplam uzunluğunun 122 m olduğu düşünülürse, en küçük projelerde bile büyük miktarlarda hurda lastiğin kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır.

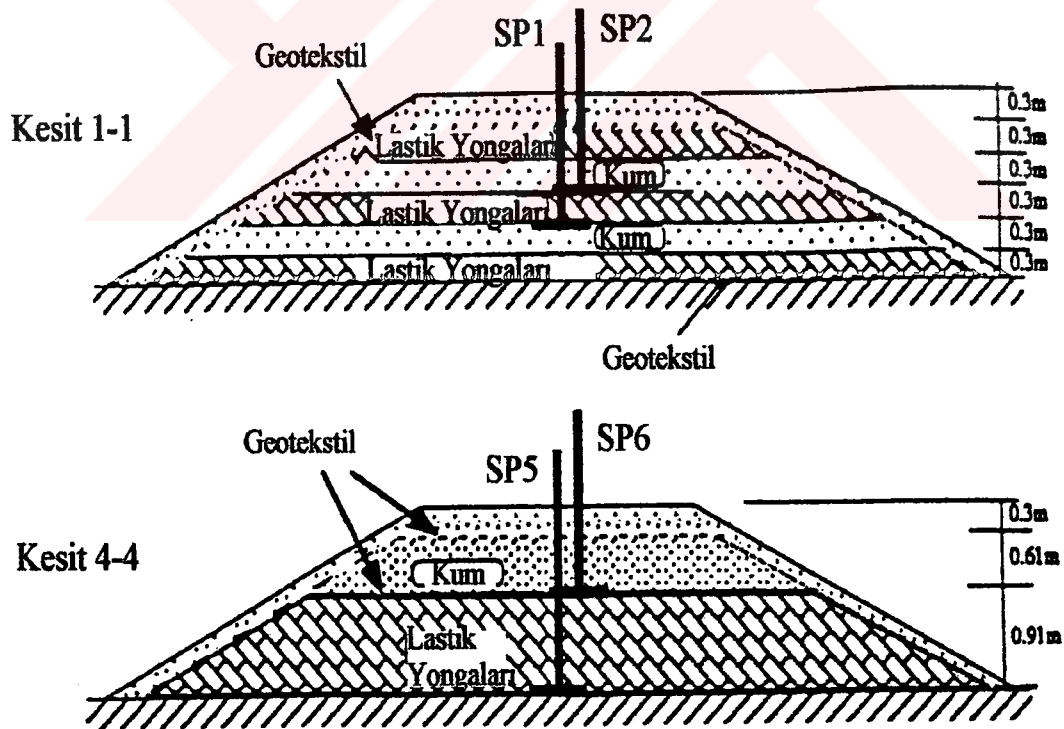
Daha sonra, sıkıştırılan lastik yongalardan oluşan dolguların birim hacim ağırlıkları; dolguya yerleştirilen lastik yongalarının toplam kütesinin, arazi ölçümleriyle bulunan dolgu hacmine bölünmesiyle elde edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen birim hacim ağırlıklar; A tipi lastik yongaları için 6.9 kN/m^3 , B tipi lastik yongaları için 6.1 kN/m^3 olarak bulunmuştur. Bu değerler, laboratuvar testleriyle bulunan değerlere yakındır (Humphrey ve Nickels, 1997).

Wisconsin'deki Test Dolgusu

Madison, Wisconsin'deki bir dolguya girmek için kullanılan yola paralel bir test dolgusu inşa edilmiştir. Bu düzenlemeyle, ağır trafik yoğunluğunun bir kısmının test dolgusu üzerine saptırılabilmesi için olanak doğmuştur. Çevre geometrisi ve

değişken sayısına bağlı olarak, test dolgusu 8 değişik kısımdan oluşturulmuştur. Her kısım 6 m uzunluğundadır. Test dolgusunun 6 kısmı değişik boyutlarda lastik yongalarından, zeminle karıştırılmış lastik yongalarından veya tabakalı kesitlerden oluşturulmuştur:

- 1.kısım: Tabakalı kısım (3 tabaka 0.3 m kalınlığında lastik yonga dolgusu ve 2 tabaka 0.3 m kalınlığında zemin örtüsü)
- 2.kısım: 0.3 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 1.5 m kalınlığında lastik yonga dolgusu
- 3.kısım: 0.9 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 0.9 m kalınlığındaki lastik yonga dolgusu
- 4.kısım: 0.9 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 0.9 m kalınlığında kaba lastik yonga dolgusu
- 5.kısım: 0.3 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 1.5 m kalınlığında ince lastik yonga dolgusu
- 6.kısım: 0.3 m kalınlığındaki zemin örtüsü altında 1.5 m kalınlığında hacimce yarı yarıya lastik yongası-zemin karışımı



Şekil 3.11 1. ve 4. kısımdaki iki test dolgusunun enine kesitleri (Bosscher ve diğ., 1997)

1., 2., 3. ve 6. kısımda 50-75 mm boyutlarında lastik yongalar kullanılmıştır. 4. ve 5. kısımda hem kaba (300 mm dane boyutuna kadar) hem de ince (25 mm dane boyutlu) lastik yongalar kullanılmıştır. Zemin olarak iyi yıkanmış çakıllı kum kullanılmıştır. En üstteki 0.3 m'lik kısım kırmataştan oluşmuştur.

Test dolgusu 2 m yüksekliğe sahip olup, şev eğimleri 1:2'dir. Dolgunun en üstteki enine genişliği 4.8 m'dir. Şekil 3.11'de enine kesitlerden ikisi gösterilmiştir. Test dolgusu, 1990'da trafiğe açılmış ve 1995'e kadar hizmet vermiştir. 1995'te güzergah değişimi nedeniyle kaldırılmıştır (Bosscher ve diğ., 1997).

3.2.3. Lastik Yongalarıyla İnşa Edilen Yol Dolgularında Uyulması Gerekli Kriterler

- Sadece lastik yongalarından oluşan dolguların birim hacim ağırlıkları 3-5.5 kN/m³ değerleri arasında değişir. Bu değer, yonga boyutu ve kompaksiyonun fonksiyonudur. Yongaların özgül ağırlıkları metal muhtevasına bağlı olarak 1.13 ile 1.36 (ortalama 1.22) değerleri arasında değişir.
- Lastik yongalarından oluşan dolguların dizaynında hakim olan parametre sıkışabilirliktir. Sıkışmanın minimum olması için; en az 1 m kalınlığında zemin örtüsü, lastik yongaların üzerine serilmelidir. Zemin örtüsünün lastik yongalardan oluşan tabakanın içine girmesini önlemek için, lastik yongaların geotekstille sarılması gereklidir.
- Dolgu inşaatının bitirilmesinden sonra belli bir süre için farklı oturmaların oluşması muhtemeldir. Yol yüzeyinin son haline getirilmesi bu periyottan sonra olmalıdır.
- Lastik yongalarından oluşan dolgunun yangına karşı, yeterli kalınlıkta zemin tabakası ile örtülmesi gereklidir (Bosscher ve diğ., 1997).

3.2.4. Sonuçlar

- Kum – lastik yongası karışımından oluşan dolgular, sadece lastik yongalarından oluşan dolgulara göre deformasyona çok daha az uğramaktadırlar. Ağırlıkça % 30 kum - % 70 lastik yongası karışımının elastisite modülü, saf kumun elastisite modülüne yakın değerdedir. Kil – lastik yongası karışımlarının elastisite modülleri daha düşük değere sahiptir.

- Yol dolgusunda kullanılan lastik yongası tabakaları 1 m kalınlığında zemin örtüsüyle kaplandığında, 0.3 m kalınlığında zemin örtüsüyle kaplandığı duruma göre çok daha iyi performans göstermiştir.
- Lastik yongalarının porozitesi, malzemenin rijitliğini etkiler. Malzemenin porozitesi; lastik yongalarının boyutlarına, uygulanan basınca ve lastik yongalarının arasında kalan zeminin varlığına bağlı olarak değişmektedir (Bosscher ve diğ., 1997).

3.3. Termik Santral Uçucu Külü Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

3.3.1. Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu

Tan ve İyisan (1996) tarafından yapılan çalışmada Kemerburgaz (İstanbul) kili ve Seyitömer uçucu külü kullanılarak; % 80 kil, % 20 uçucu kül karışımı halinde, uçucu külün zeminin mekanik davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Uçucu kül numunesi Seyitömer kül atık sahasından temin edilmiştir. Daneilerin % 65'i 0.074 mm'den (200 No'lu elek) ince, fakat plastik değildir. Deneylerde kullanılan malzemenin dane çapı dağılımı Şekil 3.12'de verilmiştir. Laboratuvarında yapılan deneylerde uçucu külün bazı endeks ve mühendislik özellikleri bulunmuştur (Tablo 3.4).

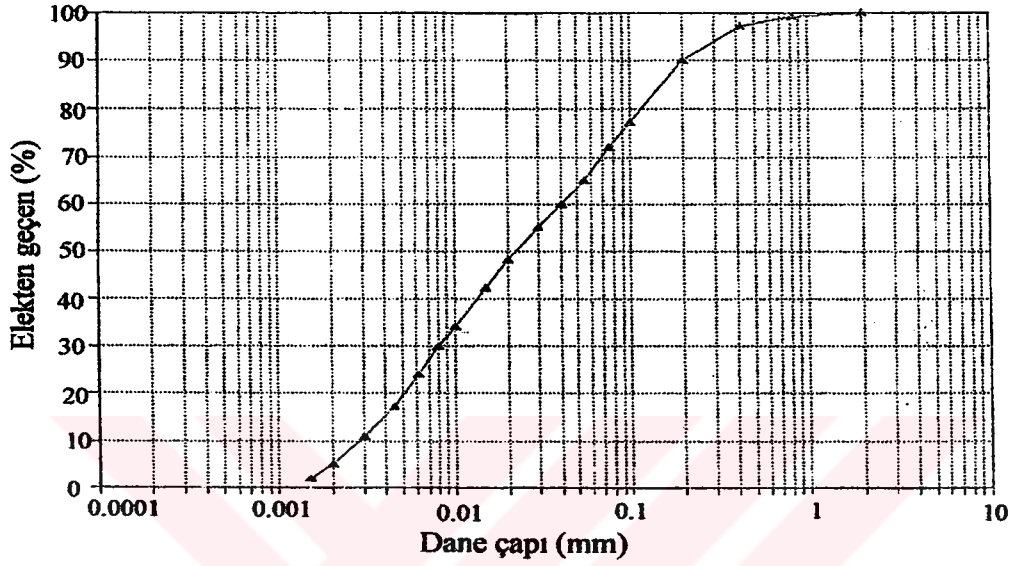
Tablo 3.4 Seyitömer uçucu külünün bazı endeks ve mühendislik özellikleri (Tan ve İyisan, 1996)

Dane Birim Hacim Ağırlığı, γ_s (kN/m ³)	Kıvam Limitleri	Standart Proktor Deneyi		Modifiye Proktor Deneyi	
		γ_{kmaks} (kN/m ³)	W_{opt} (%)	γ_{kmaks} (kN/m ³)	W_{opt} (%)
19.8	Non-plastik	8.25	46	9.25	43

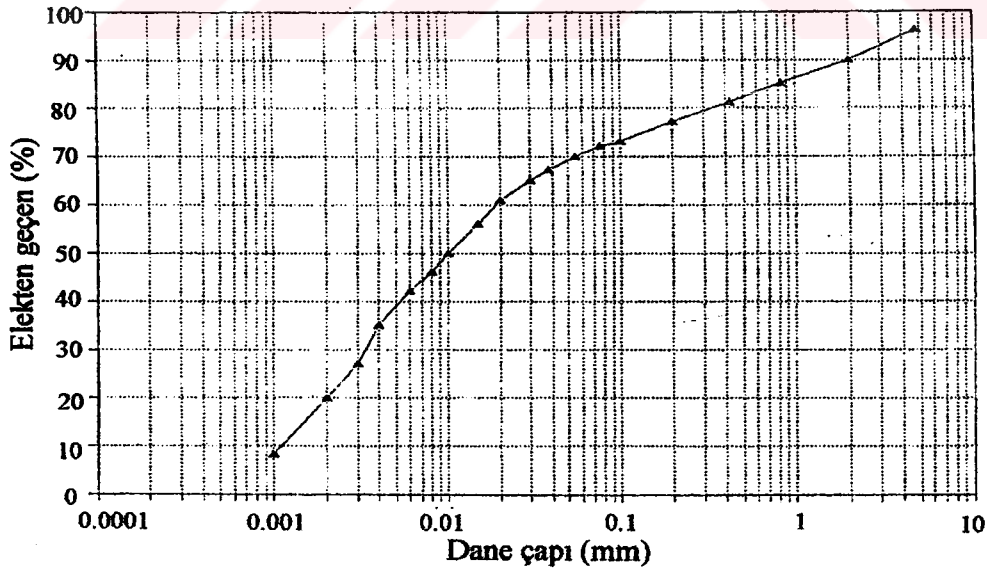
Deneyde kullanılan kil numunesi; Kemerburgaz (İstanbul), Kilsan Tuğla Fabrikası kil yatağından alınmış ve havada kurutulmuştur. Numuneye ait dane çapı dağılımı Şekil 3.13'de verilmektedir. Tablo 3.5'de Kemerburgaz kilinin laboratuvarında bulunan endeks ve mühendislik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.5 Kemberburgaz kilinin endeks ve mühendislik özellikleri (Tan ve İyisan, 1996)

Dane Birim Hacim Ağırlığı, γ_s (kN/m ³)	Kıvam Limitleri			Zemin Sınıfı	Standart Proktor Deneyi	
	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)		γ_{kmaks} (kN/m ³)	w_{opt} (%)
27.3	40	19	21	CL	17	18



Şekil 3.12 Seyitömer uçucu külü granülometri eğrisi (Tan ve İyisan, 1996)



Şekil 3.13 Kemberburgaz kili granülometri eğrisi (Tan ve İyisan, 1996)

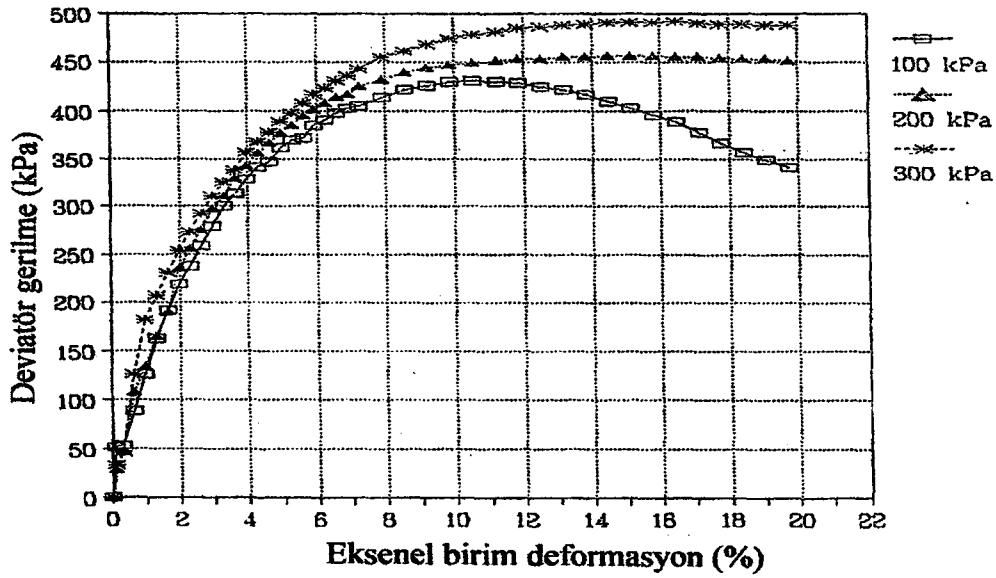
Uçucu kül katkısının kilin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini incelemek üzere yapılan deneylerde, uçucu kül/kil kuru ağırlık oranı % 20 olarak seçilmiştir. % 20 kül - % 80 kil karışımının Standart Proktor şartlarında; maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) 15.1 kN/m³ ve optimum su muhtevası (w_{opt}) % 20 olarak bulunmuştur.

Uçucu kül katılmamış kil ve kuru ağırlıkça % 20 uçucu kül - % 80 kil karışımı ile iki grup numune hazırlanmıştır. Katkısız kil ve kül-kil karışımları daha önce elde edilmiş olan optimum, sırası ile % 18 ve % 20 su muhtevalarında; Standart Proktor kalıbında ve şartlarında kompaksiyonla sıkıştırılmıştır. Uçucu küllerin puzolanik özelliği nedeni ile kil-kül kimyasal reaksiyonu dikkate alınarak, katkılı kilin kompaksiyon süresinin kısa; 3 saatten az olmasına dikkat edilmiştir. İçinde numune olan kalıp tartılmış, su muhtevası için örnek alınmıştır. Üç eksenli basınç deneyinde kullanılmak üzere, Proktor kalıbı içine 1 1/2" (38.1 mm) lik ring çakılarak numune alınmış, numune su muhtevası değişmeyecek şekilde muhafaza edilmiş, 1 gün sonra ring içinden çıkarılarak boyu 76 mm'ye indirilmiş ve drenajsız şartlarda; 100, 200, 300 kPa çevre basıncında, 1.5 mm/dak sabit deformasyon hızında kırılıncaya kadar yüklenmiştir (Tan ve İyisan, 1996).

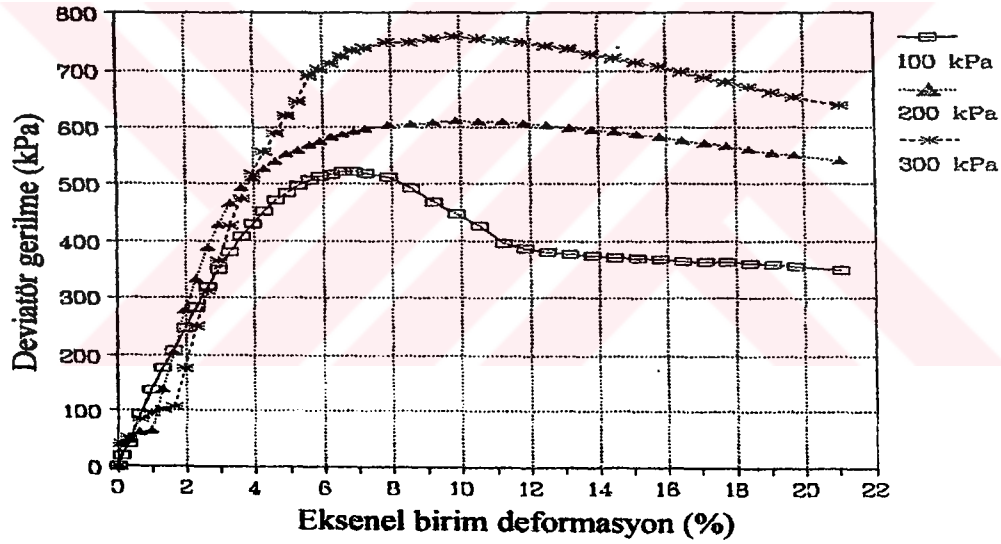
Katkısız kil ve % 20 uçucu kül - % 80 kil karışımlarından oluşan; optimum su muhtevalarında, Standart Proktor şartlarında, kompaksiyon ile hazırlanan iki grup numune 1 günlük kürden sonra, drenajsız şartlarda üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. İki grup numune üzerinde yapılan deneylere ait gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de verilmektedir. Uçucu kül katılmış ve katılmamış numunelerin, Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre kayma direnci parametreleri; drenajsız kohezyon (c_u) ve kayma direnci açısı (ϕ_u), deformasyon modülleri ile kırılmanın gözlendiği; maksimum deviyör gerilmeye ulaşılan eksenel birim deformasyonlar (ϵ_f) Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Tan ve İyisan, 1996)

Zemin	Kohezyon, c_u (kPa)	Kayma Direnci Açısı, ϕ_u (°)	Deformasyon Modülü, E_d (MN/m ²)	Kırıldığı Deformasyon, ϵ_f (%)
Kil	160	9	12.5	13
%20 Kül-%80 Kil	140	22	12.3	10



Şekil 3.14 Kemberburgaz kili üç eksenli basınç gerilme-deformasyon eğrileri (Tan ve İyisan, 1996)



Şekil 3.15 % 20 uçucu kül - % 80 kil karışımı üç eksenli basınç gerilme-deformasyon eğrileri (Tan ve İyisan, 1996)

Deneysel sonuçlar; 1 günlük kür sonucunda dahi zeminin kayma direncinde önemli derecede artış meydana geldiğini göstermektedir. Zeminin kil kısmı daha çok plaka şekilli danelerden, uçucu kül ise silt boyutunda küresel danelerden oluşmaktadır. Bu iki malzeme karıştırıldığında, kayma direnci açısından gözlenen dikkat çekici artış, uçucu külün küresel şekilli danelerinin etkisi ile açıklanabilir. Kohezyonda ise az miktarda bir azalma veya önemli bir değişiklik görülmemektedir. Yapılmış

çalışmalar, uçucu küllerin puzolanik özellikleri ile açıklanan; zamanla, özellikle ilk 7 gün sonunda, karıştırıldığı kilin kimyasal yapısına da bağlı olarak, kohezyonda önemli artışlar görüldüğünü aktarmaktadırlar. Bu nedenle kohezyonda da zamana bağlı artış beklenir. Kile uçucu kül karıştırılması ile deformasyon modülünde anlamlı bir değişim görülmemekle birlikte, kırılmanın meydana geldiği eksenel birim deformasyonda bir azalma gözlenmektedir. Yine kompaksiyonla hazırlanmış % 20 uçucu kül - % 80 kil karışımının permeabilitesi, düşen seviyeli permeametrede 2×10^{-9} m/sn olarak ölçülmüştür (Tan ve İyisan, 1996).

3.3.2. Uçucu Kül Katkısının Şişen Bir Zeminin Şişme Basıncına Etkisi

Şişen zeminlere dünyanın pek çok bölgesinde rastlanabilmektedir. Bu tip zeminler su ile temas ettiklerinde su alıp hacimlerini arttırmakta ve üzerlerinde bulunan yapılara basınç uygulamaktadırlar. Bu suyun kaynağı, yağmur ve sel suları veya sızıntı yapan su kanalları olabilmektedir. Bu tür zeminler üzerinde inşa edilmiş hafif yapılar (karayolu, demiryolu, zemin üzerine oturmuş döşemeler, kanal ve rezervuar kaplamaları, sulama kanalları vb.) şayet alttan gelen şişme basıncını karşılayamazlarsa çatlayabilmektedirler. Şişen zeminlerin hacim artışı çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; zemin özellikleri ve çevresel faktörler olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Zemin özellikleri olarak; zeminin ilk su muhtevası, kil muhtevası, mineralojisi, ilk kuru birim hacim ağırlığı ve yapısı sayılabilir. Çevresel faktörler olarak; iklim, yer altı su seviyesi, arazinin drenajı, bitki örtüsü, zeminin hidrolik iletkenliği ve çevre basıncı sayılabilir. Montmorillonit minerali içeren killer, su aldıklarında hacimlerini arttırma eğilimindedirler. Şişen zeminlerin stabilizasyonu genellikle, kireç veya çimento katkısı ile yapılmaktadır. Çokça ve İpek (1998) tarafından yapılan çalışmada, atık bir madde olan uçucu külün şişen zeminlerin şişme basıncının düşürülebilmesi için kullanımından bahsedilmektedir.

Yapılan çalışmada potansiyel olarak şişen bir zemin numunesi hazırlanmıştır (A numunesi). Bu numune, % 15 bentonit ve % 85 kaolinden oluşmaktadır. Numunenin su muhtevası % 10 ve kuru birim hacim ağırlığı 16.5 kN/m^3 'tür. Bu şişen zemin numunesine % 3, % 5, % 10, % 15, % 20, % 25 oranında C sınıfı (S: Soma uçucu külü) ve F sınıfı (T: Tunçbilek uçucu külü) uçucu kül ilave edilmiştir.

Bu numunelerin likit limit, plastik limit, özgül ağırlık, hidrometre ve elek analizi deneyleri yapılmış ve numunelerin şişme potansiyelleri tespit edilmiştir (Tablo 3.7). Kimyasal ve mineralojik analiz deneylerinin sonuçları Tablo 3.8 ve 3.9’da verilmiştir. Numuneler yukarıda belirtilen su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkta hazırlandıktan sonra konsolidasyon aletinin halkasının içine statik yük uygulanarak sıkıştırılmış, daha sonra numunenin altına ve üzerine kuru filtre kağıdı ve poroz taşlar yerleştirilmiştir. Konsolidasyon hücresi yükleme aletine yerleştirilmiş, numunenin üzerine yerleştirilen deformasyon saati sıfıra ayarlanmış, numune suya doymun hale getirilmiş, deformasyon saati sıfırda kalacak şekilde yük arttırılarak deformasyonlar engellenmiş ve zaman içinde şişme sona erdiğinde, şişmeyi engellemek için uygulanan maksimum basınç şişme basıncı olarak kaydedilmiştir. Soma ve Tunçbilek uçucu külü katkılı numuneler 7 gün küre tabi tutulmuşlar ve kürün şişme basıncının düşürülmesinde etkinliğine bakılmıştır.

Tablo 3.7 Numunelerin endeks özellikleri (Çokça ve İpek, 1998)

Numune:				Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı	Aktivite (PI / % kil)
	Kil Yüzdesi	Silt Yüzdesi	G _s	LL (%)	PL (%)	PI (%)		
A	90	10	2.65	74	22	52	CH	0.58
3S	89	11	2.64	49	24	25	CL	0.28
5S	88.5	11.5	2.63	48	26	22	CL	0.25
8S	88.5	11.5	2.62	47	26	21	CL	0.24
10S	89	11	2.62	47	28	19	ML	0.21
15S	85.5	14.5	2.6	45	29	17	ML	0.20
20S	88	12	2.59	44	32	12	ML	0.14
25S	82	18	2.53	42	29	13	ML	0.16
3T	88	12	2.59	54	19	35	CH	0.40
5T	87	13	2.62	53	21	32	CH	0.37
8T	87.5	12.5	2.62	52	21	30	CH	0.34
10T	87.5	14.5	2.61	50	22	28	CH-CL	0.33
15T	81	19	2.54	49	22	27	CL	0.33
20T	83.5	16.5	2.53	47	21	26	CL	0.31
25T	80.5	19.5	2.47	46	20	26	CL	0.32

Numunelerin kil muhtevası şişme basıncını etkilemektedir. Tablo 3.7’den de görülebileceği gibi numunenin içindeki uçucu kül miktarı arttıkça; silt yüzdesi artmakta, kil yüzdesi düşmekte, numunenin özgül ağırlığı ve aktivitesi azalmaktadır.

Tablo 3.8 Kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları (Çokça ve İpek, 1998)

Kimyasal Kompozisyon (%)	Kaolin	Bentonit	Soma Uçucu Külü (C-sınıfı)	Tunçbilek Uçucu Külü (F-sınıfı)
MgO	0.03	1.28	1.01	1.66
Al ₂ O ₃	33.03	14.98	22.13	19.44
SiO ₂	49.89	56.19	44.18	58.62
CaO	0.42	2.25	18.98	2.18
Fe ₂ O ₃	1.78	9.45	4.85	10.18
SO ₃	0.13	0.33	3.96	0.36
K ₂ O	1.69	1.19	1.52	1.50
Na ₂ O	0.08	2.41	0.45	0.19
TiO ₂	1.33	1.11	0.98	1.11
Kızdırma Kaybı (LOI)	11.10	1.10	1.19	1.10

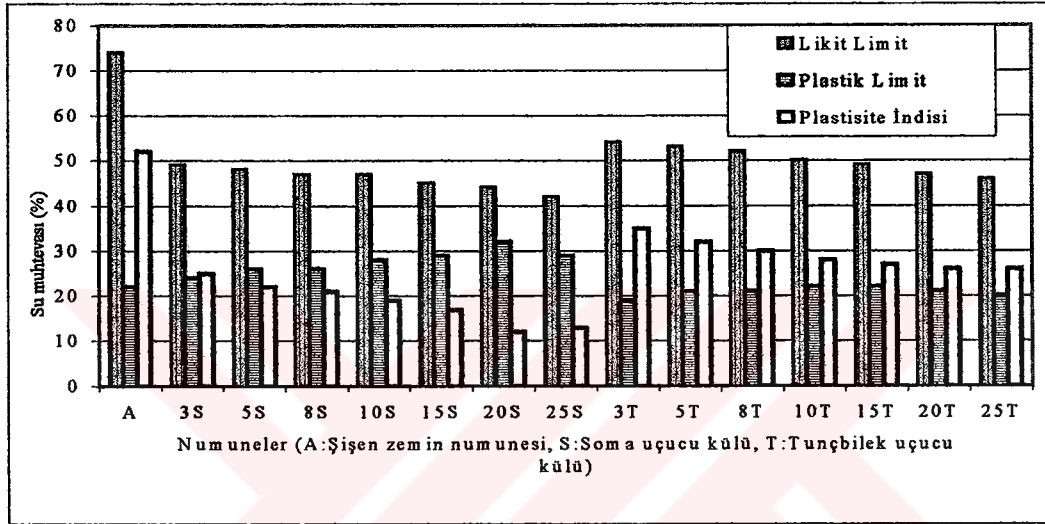
Tablo 3.9 Kullanılan malzemelerin mineralojik analiz sonuçları (Çokça ve İpek, 1998)

Malzeme	Mineraloji
Kaolin	Kaolin, kuvars, illit, feldispat
Bentonit	Smektit, illit, kaolin
Soma uçucu külü (C-sınıfı)	Kuvars, albit, anhidrit, hematit, magnetit, serbest kireç, camsı veya amorf gaz
Tunçbilek uçucu külü (F-sınıfı)	Kuvars, magnetit, camsı veya amorf faz

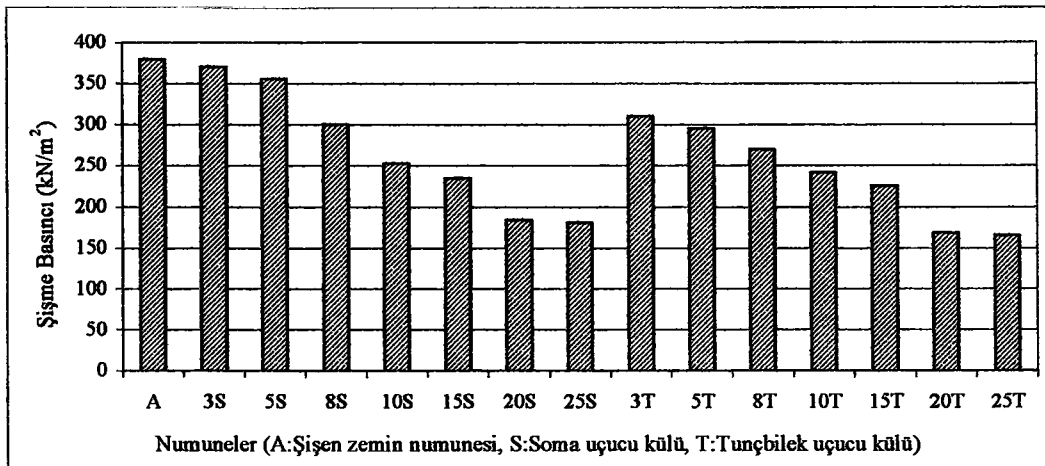
Çokça ve İpek (1998) tarafından yapılmış olan deneysel çalışma sonunda aşağıdaki neticeler elde edilmiştir:

- Uçucu kül katkısının miktarı arttıkça numunelerin içindeki kil ebadındaki parçacık miktarı azalmakta, silt ebadındaki parçacık miktarı artmaktadır.
- Şekil 3.16'dan da görülebileceği gibi uçucu kül katkısının miktarı arttığında likit limit ve plastisite indisi azalmaktadır.
- % 25 Soma uçucu külü katkısı ve % 25 Tunçbilek uçucu külü katkısı, yüksek plastisiteli kil sınıfında olan şişen zemin numunesini sırasıyla düşük plastisiteli silt ve düşük plastisiteli kil sınıfına çekmiştir.
- Uçucu kül katkısının miktarı arttıkça numunelerin aktiviteleri düşmüştür.
- Şekil 3.17'den de görülebileceği gibi uçucu kül katkısının miktarı arttıkça numunelerin şişme basınçları azalmıştır.

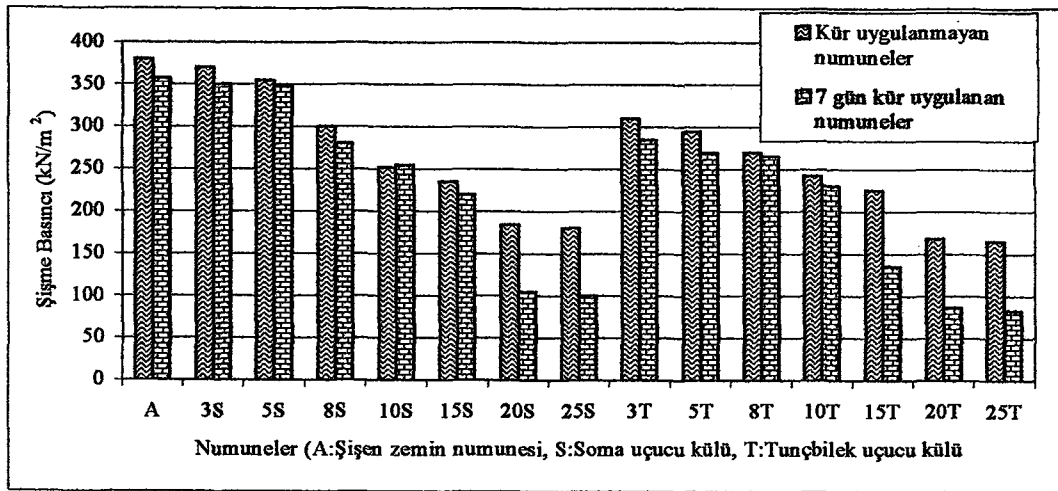
- Şekil 3.18'den de görülebileceği gibi; 7 gün küre tabi tutulan uçucu kül katkılı numunelerin şişme basınçları, küre tabi tutulmayan numunelere göre daha düşük olmuştur. Kürün, şişme basıncını azaltmada olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir.
- % 25 Soma uçucu külü katkısı, şişen zemin numunesinin şişme basıncını; başlangıçta % 53 oranında, 7 günlük kür sonucunda % 74 oranında azaltmıştır. Aynı şekilde % 25 Tunçbilek uçucu külü katkısı, şişen zemin numunesinin şişme basıncını; başlangıçta % 58 oranında, 7 günlük kür sonucunda % 78 oranında azaltmıştır.



Şekil 3.16 Soma ve Tunçbilek uçucu külü ilavesinin zeminin kıvam limitlerine etkisi (Çokça ve İpek, 1998)



Şekil 3.17 Soma ve Tunçbilek uçucu külü ilavesinin zeminin şişme basıncına etkisi (Çokça ve İpek, 1998)



Şekil 3.18 Soma ve Tunçbilek uçucu külü katkılı numunelerin şişme basınçlarına kür etkisi (Çokça ve İpek, 1998)

3.3.3. Uçucu Külün Akıcı Dolgu Olarak Kullanılması

Uçucu külün akıcı dolgu olarak mukavemeti, düşük düzeyde mineral katkı maddeleri ile beraber 0.34 – 8.22 MPa arasında değişmekte ve temel alt dolgularında, köprü ayaklarında, bina inşaatlarında, istinat duvarlarında, altyapı kazılarında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Baykal ve Döven (1996) tarafından yapılan çalışmada, Soma Termik Santrali'nden elde edilen uçucu külün akıcı dolgu olarak kullanımında öngörülen mühendislik performansı incelenmiştir. Akıcı dolgu ile sağlanan 28 günlük serbest basınç mukavemetinin 1035 kPa değerini aşmaması istendiğinden granül malzeme kullanılmamıştır. Dizayn karışımları % 100 kül ve % 95 kül, % 5 kireç olarak teşkil edilmiştir. Dizayn karışımlarının grup isimleri ve buna mukabil kül, kireç ve su muhtevaları Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10 Kül, kireç ve su oranlarına göre grup isimleri (Baykal ve Döven, 1996)

Grup	UK47	UK52	UK55	UK60	UKK50	UKK55	UKK57.5	UKK62.5
Kül (%)	100	100	100	100	95	95	95	95
Kireç (%)	0	0	0	0	5	5	5	5
w/c	0.47	0.52	0.55	0.60	0.50	0.55	0.575	0.625

Soma Termik Santrali'nden elde edilen uçucu külün kimyasal özellikleri ASTM C618 standardı ile karşılaştırılarak Tablo 3.11'de verilmektedir. Elde edilen uçucu külün, % 9.28 CaO muhtevası ile kendi başına çimentolaşma özelliği olduğu belirlenmektedir.

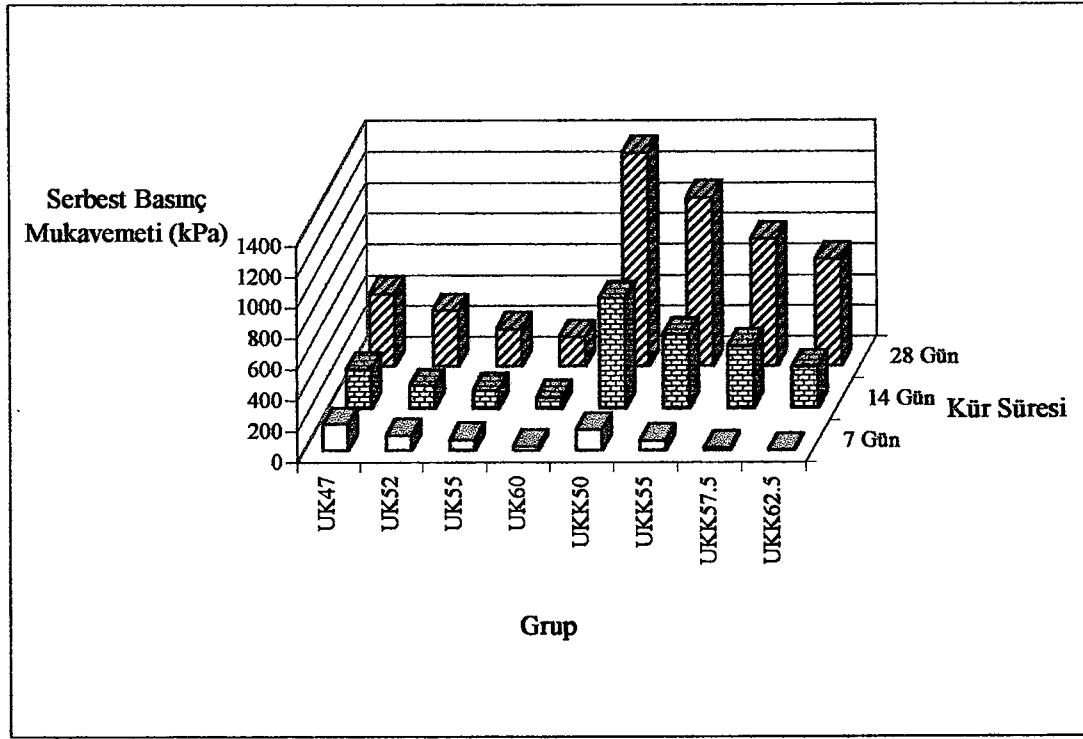
Tablo 3.11 Soma Termik Santrali uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (Baykal ve Döven, 1996)

Oksit (%)	Soma Uçucu Külü	ASTM C618	
		C tipi	F tipi
SiO ₂	50.48		
Al ₂ O ₃	23.74		
Fe ₂ O ₃	5.84		
S+A+F	80.06	>50.0	>70.0
CaO	9.28		
MgO	2.58	<5.0	<5.0
SO ₃	1.41	<5.0	<5.0
Kızdırma Kaybı	2.17	<6.0	<12.0

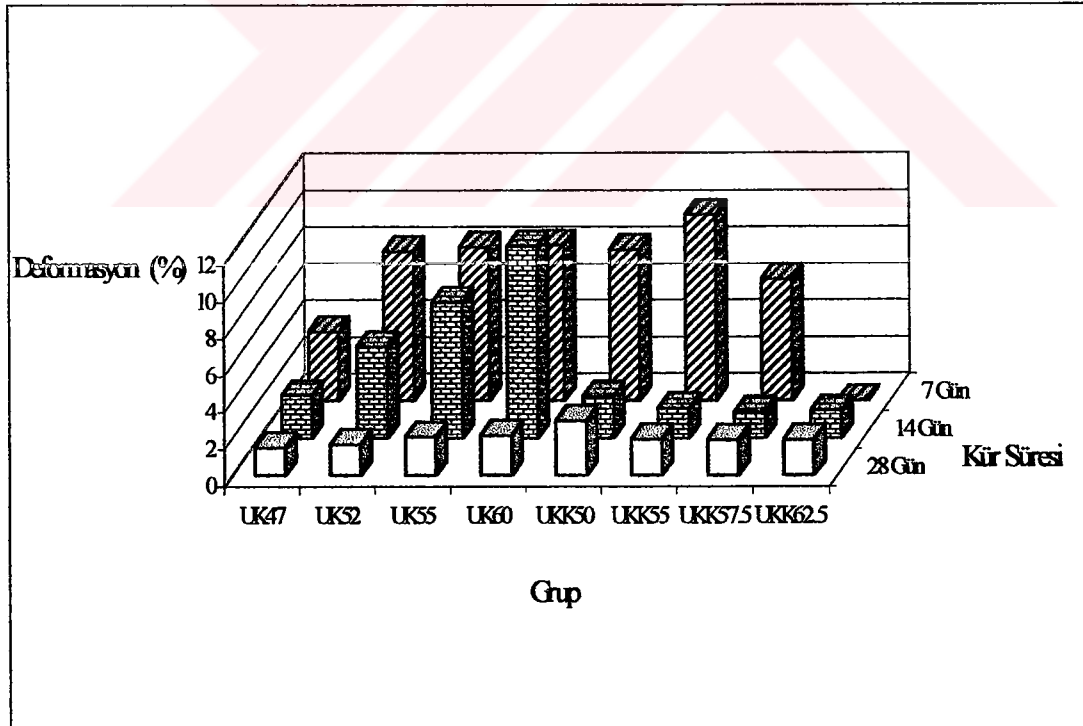
Serbest basınç mukavemeti deneyleri ASTM C942-86 ve ASTM C39 standardına uygun olarak yapılmıştır. Dizayn karışımları ve belirlenen w/c oranları için üçer adet 5 cm çapında, 10 cm boyunda numune hazırlanmış, streç film ve alüminyum folyoya sarılarak 21°C'de 7, 14, ve 28 günlük kürden sonra 0.002 cm/sn deformasyon hızıyla deneye tabi tutulmuşlardır. Sonuçlar Tablo 3.12 ve Şekil 3.19, 3.20, 3.21 ve 3.22'de verilmiştir.

Tablo 3.12 Dizayn karışımlarının 7, 14, 28 günlük serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyon sonuçları (Baykal ve Döven, 1996)

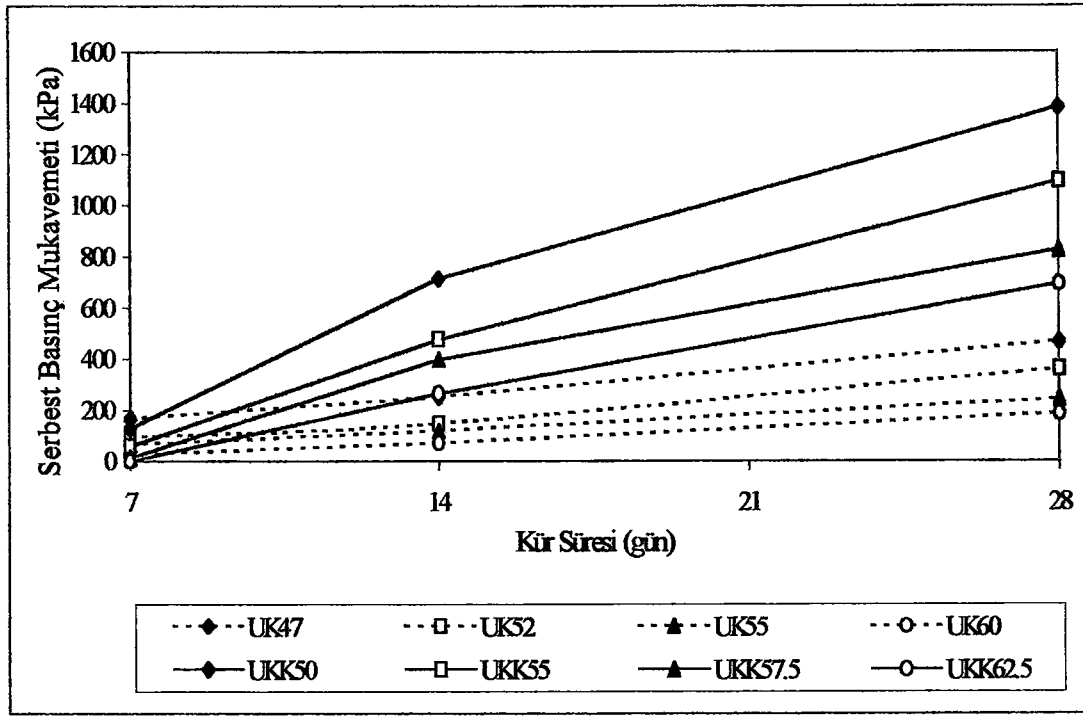
Grup	σ_{ort} (kPa)			Standart Sapma (kPa)			ϵ_{ort} (%)			Standart Sapma (%)		
	7 gün	14 gün	28 gün	7 gün	14 gün	28 gün	7 gün	14 gün	28 gün	7 gün	14 gün	28 gün
UK47	167.1	249.6	468.2	1.2	1.8	62.5	3.74	2.31	1.51	0.74	0.44	0.19
UK52	93.6	146.2	361.4	15.4	9.4	22.4	8.06	4.97	1.70	0.12	1.20	0.12
UK55	65.9	117.0	241.0	3.4	3.5	21.5	8.31	7.35	2.07	0.72	0.16	0.48
UK60	24.3	71.1	186.0	5.1	4.5	10.9	8.45	10.38	2.18	0.28	0.04	0.36
UKK50	128.5	712.8	1383.0	32.6	123.1	43.5	8.19	2.26	2.97	0.29	0.13	0.46
UKK55	58.0	476.5	1094.6	11.2	31.2	36.7	10.08	1.61	1.98	0.49	0.13	0.09
UKK57.5	14.4	397.0	824.8	4.7	52.5	25.8	6.58	1.42	1.93	3.38	0.13	0.34
UKK62.5	-	265.2	691.7	-	36.0	30.8	-	1.47	1.93	-	0.15	0.20



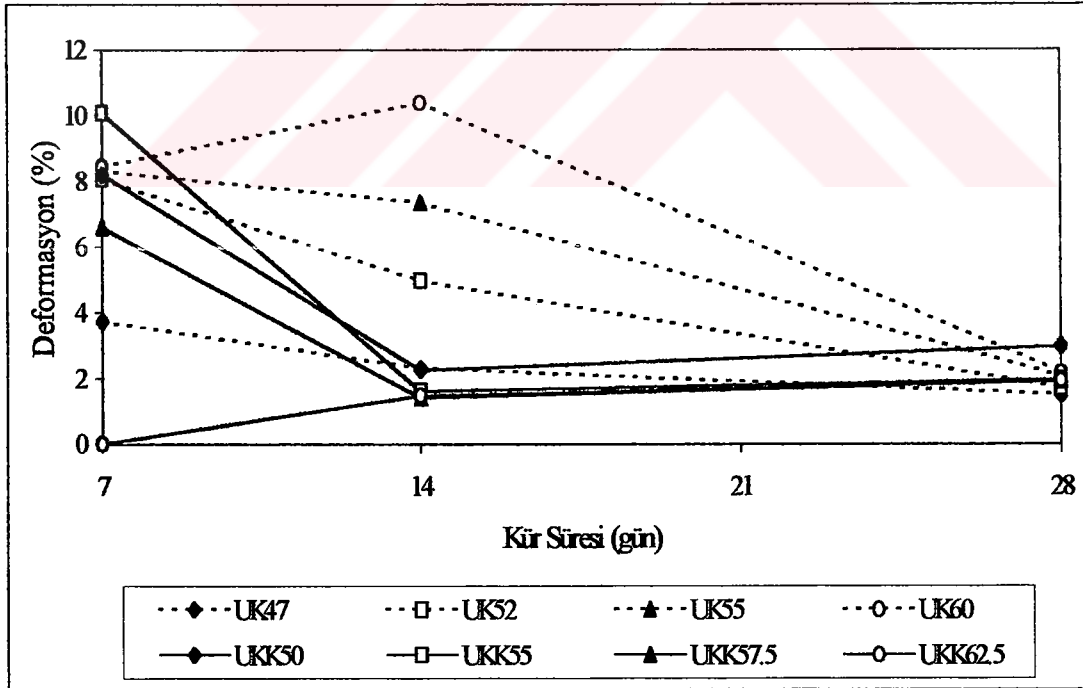
Şekil 3.19 Grupların değişik kür sürelerine göre basınç mukavemeti değerleri (Baykal ve Döven, 1996)



Şekil 3.20 Grupların değişik kür sürelerine göre kırılma anı deformasyon değerleri (Baykal ve Döven, 1996)



Şekil 3.21 Grupların değişik kür sürelerine göre basınç mukavemeti artışları (Baykal ve Döven, 1996)



Şekil 3.22 Grupların değişik kür sürelerine göre kırılma deformasyonu değişimleri (Baykal ve Döven, 1996)

Başlangıç ve bitiş priz sürelerini belirlemek amacı ile kalibre edilmiş cep penetrometresi kullanılmıştır. 5 mm penetrasyon değeri için (ortalama bir insan ağırlığının tek ayak üzerinde sağladığı basınç değeri olan) 50 kPa taşıma gücüne ulaşma zamanı ilk priz süresi olarak, 1 mm penetrasyon değeri için aynı değere ulaşma süresi ise son priz süresi olarak kabul edilmiştir. Deney, her grup numune için üçer adet numune üzerinde, 23°C açık havada tutulmak kaydıyla yapılmıştır. Ölçümler priz süresinin gerçekleşeceği tahmin edilen aralıklarda 15 dakika ara ile alınmıştır. Sonuçlar Tablo 3.13’de verilmektedir. Kuruma büzülmesi ölçümleri, priz sürelerini belirlemekte kullanılan numuneler üzerinde yapılmış, 0.01 mm hassasiyete sahip vernier ile hem numune hem de kalıp üzerinde yapılan sekiz eşit aralıklı ölçüm ile büzülme yüzdesi tespit edilmiştir. Deney her grup için üçer adet numune üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.13’de verilmiştir.

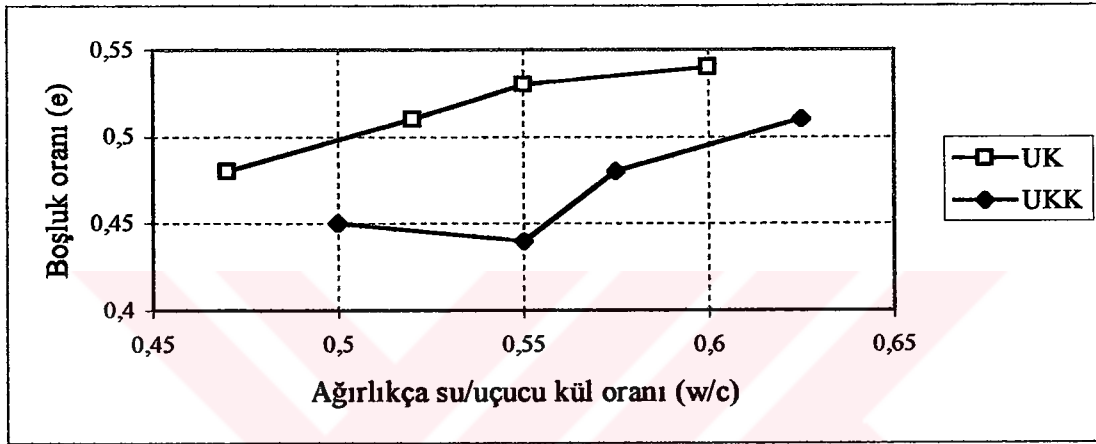
Tablo 3.13 Dizayn karışımlarının ilk ve son priz süreleri ile büzülme yüzdeleri (Baykal ve Döven, 1996)

Grup	Priz Süreleri		Büzülme (%)
	Başlangıç (5 mm)	Bitiş (1 mm)	
UK47	10 saat 30 dakika	27 saat 15 dakika	1.47
UK52	17 saat 30 dakika	36 saat 30 dakika	2.07
UK55	31 saat 15 dakika	56 saat 15 dakika	2.58
UK60	67 saat	128 saat 45 dakika	3.01
UKK50	6 saat 30 dakika	28 saat 45 dakika	6.69
UKK55	14 saat	40 saat 30 dakika	7.95
UKK57.5	22 saat 30 dakika	53 saat	8.32
UKK62.5	33 saat 45 dakika	92 saat 30 dakika	9.87

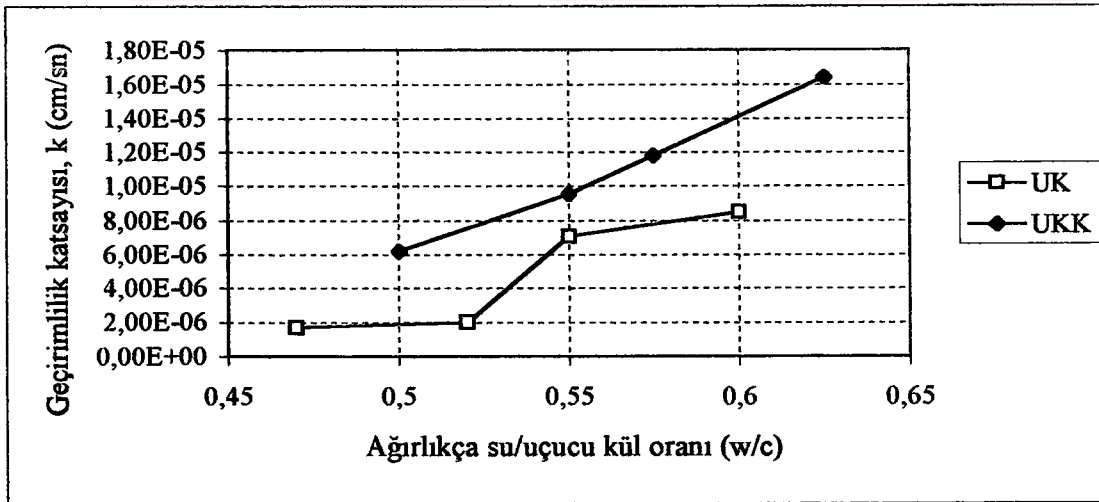
Geçirimlilik katsayıları, ASTM D5084 standardına uygun olarak her grup için 28 gün kür edilmiş ikişer adet numune üzerinde yapılan deneylerle bulunmuştur. Desikatörde su içerisinde vakum uygulanan numuneler, doygunluk dereceleri % 95 olduğunda 70 kPa çevre basıncı ve hidrolik eğimi 200 olacak şekilde deneye tabi tutulmuşlardır. Deneyden sonra aynı numuneler ASTM C642’ye uygun olarak özgül ağırlık deneyine tabi tutulmuş ve boşluk oranları belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 3.14, Şekil 3.23 ve 3.24’de verilmiştir.

Tablo 3.14 Dizayn karışımlarının geçirimlilik katsayısı, özgül ve kuru birim hacim ağırlıkları ve boşluk oranları (Baykal ve Döven, 1996)

Grup	k_{ort} (cm/sn)	G_s	γ_{kuru} (kN/m ³)	e_{ort}
UK47	1.69×10^{-6}	1.60	10.54	0.48
UK52	2.01×10^{-6}	1.58	10.27	0.51
UK55	7.06×10^{-6}	1.58	10.08	0.53
UK60	8.50×10^{-6}	1.57	9.98	0.54
UKK50	6.19×10^{-6}	1.56	10.58	0.45
UKK55	9.56×10^{-6}	1.57	10.71	0.44
UKK57.5	1.18×10^{-6}	1.57	10.35	0.48
UKK62.5	1.64×10^{-6}	1.55	10.06	0.51



Şekil 3.23 Uçucu kül numunelerinin w/c oranı – boşluk oranı ilişkileri (Baykal ve Döven, 1996)



Şekil 3.24 Uçucu kül numunelerinin w/c oranı – geçirimlilik katsayısı ilişkileri (Baykal ve Döven, 1996)

Baykal ve Döven (1996) tarafından yapılan deneyler analiz edildiğinde, aşağıda yer alan sonuçlara varılmaktadır;

- Kullanım alanları itibari ile gerekli serbest basınç mukavemeti açısından, elde edilen uçucu kül yeterlilik sağlamıştır. Ayrıca mukavemetin kazılabilirlik şartnamesini aşmadığı (maksimum basınç dayanımı 1035 kPa olmalı), aşabilecek özellikteki uçucu küller için de, mukavemetin w/c oranı artırılarak kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır.
- Kireç katkılı numunelerde (UKK) ilk yedi gün içerisindeki mukavemet artışı, katkısız numuneler (UK) ile aynı olmaktadır, ancak w/c oranı arttıkça azalmaktadır. Bu sonuç, terleme sonucunda numune üzerinde toplanan suyun yumuşamaya sebep olmasından kaynaklanmaktadır.
- Serbest basınç mukavemeti deneyi sonuçları incelendiğinde, genelde artan su oranı ve kür süresi için standart sapmalar azalmaktadır. Bütün gruplarda kısa dönem birim deformasyonlarının uzun döneme göre fazla olduğu gözlenmektedir. Çimentolaşmanın yeterli mukavemet sağlamadığı bu dönemde, numuneler görünür kohezyonun etkisi ile sünek bir davranış sergilemektedirler. Uzun dönemde ise artan çimentolaşma ile içsel sürtünme açısı artmakta ve gevrek davranış gözlenmektedir.
- Boşluk oranı sadece küllü numunelerde, kireç katkılı olanlara oranla daha yüksektir. Kireç katkılı numunelerde priz süresi boyunca meydana gelen çökme böyle bir sonuca yol açmaktadır. Buna mukabil, geçirimsizlik katsayısı kireç katkılı numuneler için daha yüksektir. Kireç katkısı ile çimentolaşma sırasında daha büyük moleküller ve böylelikle daha büyük gözenekler oluşmakta, bu ise drenaj yolunu kısaltmaktadır. Her iki dizayn karışımı için artan w/c oranı ile boşluk oranı ve geçirimsizlik katsayısı artmaktadır.

3.3.4. Uçucu Kül – Çimento Bulamaçlarının Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması

Uçucu kül – çimento bulamaçları yaklaşık % 4-5 oranında portland çimentosu ile stabilize edilmiş F sınıfı uçucu küllerin yeterli su ilavesiyle akıcı kıvamlı bulamaç haline getirilmesiyle elde edilirler. Karada ve su altında kendi kendine yerine yerleşebilme ve sertleşme özelliğine sahiptirler. Dolgu malzemesi olarak

düşünüldüğünde, birçok konvansiyonel dolgu malzemesinden daha iyi fiziksel özelliklere sahip olup, aynı zamanda daha ekonomik olabilmektedirler.

ACI Committee 229 tanımına göre, taze halde akıcı kıvamlı olup, 28 günlük basınç mukavemeti 8.3 MPa veya daha düşük olan çimento bağlayıcılı malzemelere kontrollü düşük mukavemetli malzemeler (KDMM) denilmektedir. Bu tür malzemeler genellikle düşük mukavemetin istendiği, taşıyıcı olmayan yer altı uygulamalarında kullanıldıkları gibi bazı durumlarda da nihai mukavemetlerinin çevreleyen tabii zemininkinden fazla olmaması amaçlanır. F sınıfı uçucu kül ağırlık oranı olarak % 4-5 oranında portland çimentosu ve yeterince su katarak 200±20 mm çökme (slump) değerine sahip akıcı kıvamlı bulamaçlar KDMM olarak üretilmektedir.

KDMM karışımları genellikle hazır beton santralleri kullanılarak üretilir ve transmikserlerle nakledilip oluklardan akıtılarak yerleştirilir. Bazı durumlarda malzeme damperli kamyonlarla taşınabildiği gibi, bazen hareketli bant veya beton pompası ile de yerleştirme yapılır. Tüm durumlarda yerleştirme sırasında sıkıştırma işlemine gerek olmamaktadır ki bu da bu malzemenin konvansiyonel dolgu malzemelerine olan en önemli üstünlüğü sayılmaktadır.

Bazı durumlarda ise uçucu kül-çimento bulamaçlarına agrega olarak ince kum da katılarak akıcı kıvamlı harçlar üretilmekte ve bu karışımlar K-Krete olarak anılmaktadır. K-Krete karışımları da yeraltındaki boşlukları doldurmak için, erozyon önlemede ve kazıların dolgusunda kullanılmaktadır.

Uçucu kül-çimento bulamaçları, bazik ortam yaratmaları nedeniyle demir ve çeliğin korozyonunu engelleyici rol oynamaktadırlar. Ayrışma ve oturma, uçucu kül-çimento bulamaçlarında pek gözlenmemektedir. Uçucu kül ve çimento danelerinin yaklaşık aynı boyutta olmaları ayrışmayı önlemektedir. Diğer taraftan yerleştirme sonunda bir miktar çökme oluşturma, oturmanın yaklaşık tümü ilk anda oluşmaktadır. Bu da suya doygun bulamaçlarda fazla suyun serbest halde akıp gitmesi ve daneleri sürüklememesi sonucu oluşmaktadır (Özturan, 1990).

KDMM karışımlarının mukavemeti, kullanılan uçucu külün özelliklerine ve çimentonun miktarına göre değişebilmektedir. Su miktarının bir miktar etkisi olmaktadır. Ancak yüksek su oranlarında suyun artışı, mukavemette önemsiz azalma

meydana getirmektedir. Çeşitli uçucu kül-çimento karışımları üzerinde yapılan arazi ve laboratuvar deneylerinin sonuçları Tablo 3.15 ve 3.16’da verilmiştir.

Tablo 3.15 Uçucu kül-çimento bulamaçlarının karışım oranları ve arazi deney sonuçları (Özturan, 1990)

Karışım No:	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6
28 günlük proje mukavemeti (MPa)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.69	0.69
Çimento (kg/m^3)	21	58	94	86	132	162
Uçucu kül (kg/m^3)	846	811	749	685	888	841
Su (kg/m^3)	643	634	624	680	576	572
Yayılma (cm)	22.2	22.2	26.7	42.5	14	14.6
Hava içeriği (%)	0.7	0.8	1.1	0.6	0.9	1.1
Hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	9.4	12.8	9.4	9.4	0	0
Bulamaç sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	35	35.6	32.8	31.7	17.8	30
Yoğunluk (kN/m^3)	15.10	15.03	14.67	14.51	15.95	15.74

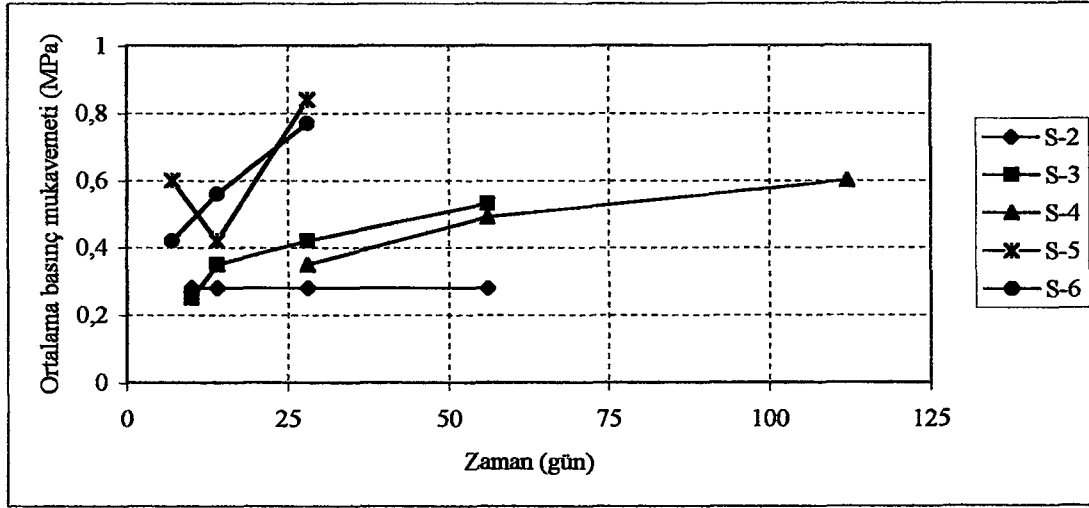
Tablo 3.16 Uçucu kül-çimento bulamaçlarının basınç mukavemetleri (Özturan, 1990)

Karışım No:	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6
28 günlük proje mukavemeti (MPa)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.69	0.69
Deney yaşı (gün)	Ortalama basınç mukavemeti (MPa)					
7	-	-	-	-	0.60	0.42
10	-	0.28	0.25	-	-	-
14	-	0.28	0.35	-	0.42	0.56
28	-	0.28	0.42	0.35	0.84	0.77
56	-	0.28	0.53	0.49	-	-
112	-	-	-	0.60	-	-

Tablo 3.16’den da görüldüğü gibi 30 kg/m^3 ile 90 kg/m^3 arasında değişen miktarda çimento ilavesiyle F sınıfı uçucu kül bulamaçlarında 28 günde 0.35 MPa ile 0.69 MPa arasında değişen mukavemetler elde edilebilmiştir. Ayrıca uçucu kül-çimento bulamaçlarının basınç mukavemetlerinin zamanla değişimi Şekil 3.25’de verilmiştir.

Çimento ile stabilize edilmiş uçucu küller su altında yerleştirme sırasında ve akan su etkisinde erozyon etkisine gayet yüksek direnç göstermektedir. Ayrıca uçucu kül-çimento bulamaçları arazide doygun halde ve sıfırın altındaki sıcaklıklarda gayet tatmin edici sonuçlar vermiştir. Yapılan laboratuvar testleri sonucunda, yeterli donma - çözülme dayanımı için ağırlıkça % 10 çimento kullanımı gereği açığa çıkmakta

fakat Michigan Ulaştırma Departmanı, % 5 çimentolu karışımların da donma-çözülme etkisine iyi dayanım gösterdiğini belirtmektedir (Özturan, 1990).

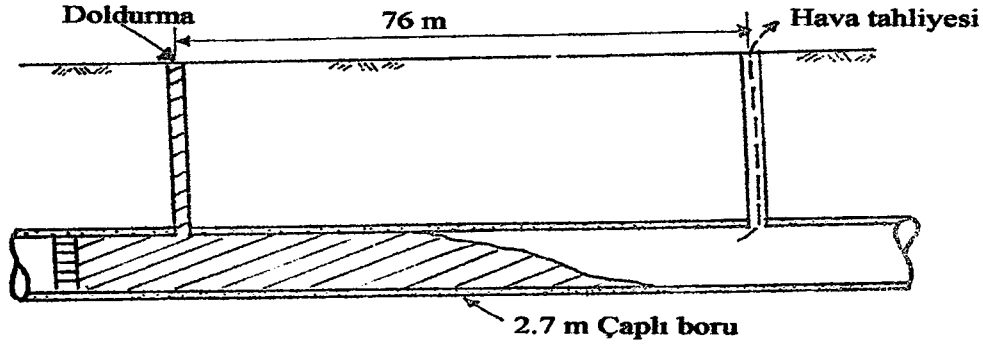


Şekil 3.25 Uçucu kül-çimento bulamaçlarının basınç mukavemetlerinin zamanla değişimi (Özturan, 1990)

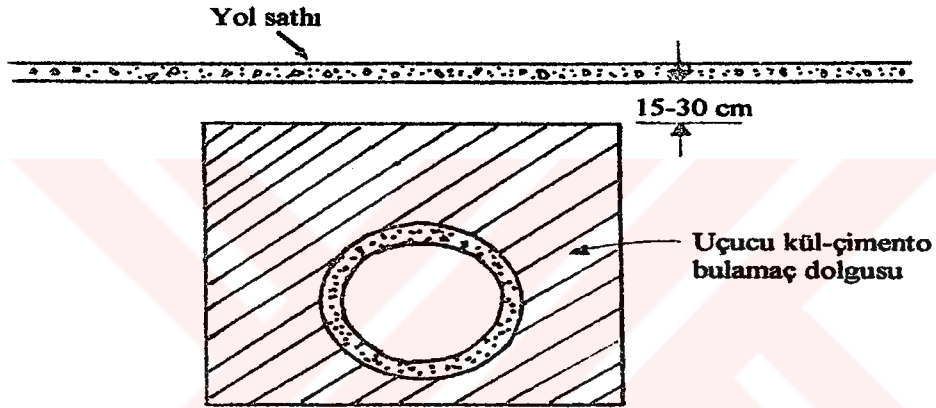
Dolgu kesiti inşaatında dolgu malzemesi olarak uçucu kül-çimento bulamaçlarının kullanımı ilk olarak 1978 yılında Detroit Edison Company tarafından üç hatlı yaklaşık 3.3 km uzunluğunda bir demiryolu inşaatı için gündeme getirildi. % 5 oranında çimento ile stabilize edilen uçucu kül karışımı plastik kıvamda, dozer yardımıyla 1:2 eğimli şevlerle serilebildi. Pilot programın başarısına rağmen demiryolu inşaatından ekonomik nedenlerle vazgeçildiği için proje gerçekleşmedi. Aynı tarihlerde yine Edison firmasının Belle River santralinde soğutma suyu borularının döşenmesi için açılan hendeğin tekrar doldurulmasında uçucu kül-çimento bulamaçları kullanılmış ve yaklaşık 1 milyon dolar ekonomi sağlanmıştır.

Uçucu kül-çimento bulamaçları ve uçucu kül-çimento-kum (K-Krete) harçları; hizmet dışı kalmış yer altındaki kanalizasyon boruları, buhar tünelleri ve yakıt tanklarının doldurulmasında başarıyla kullanılmaktadır. Şekil 3.26'da, 2.7 m çapında bir borunun bu malzeme ile doldurulduğu görülmektedir. Yer altı borularının döşenmesinde de bu malzeme kullanılabilir (Şekil 3.27). Bu tür kazıların genelde dar alanlarda yapılması, konvansiyonel dolgu malzemesinin iyi sıkıştırılamamasına ve daha sonra çökmelere neden olmaktadır. Halbuki uçucu kül-

çimento bulamaçları, yol kaplama seviyesinin 15 ile 30 cm altına kadar doldurularak daha uniform bir taşıma sathı sağlanmaktadır.



Şekil 3.26 Bir borunun uçucu kül-çimento bulamacıyla doldurulması (Özturan, 1990)



Şekil 3.27 Yer altı borularının döşenmesinde uçucu kül-çimento bulamaçlarının kullanılması (Özturan, 1990)

Uçucu kül-çimento bulamaçları, karada ve su içinde kolaylıkla yerine yerleştirilebilen bir malzemedir. Beton teknolojisinde kullanılan araçlarla üretilmekte, taşınmakta ve yerine yerleştirilmektedir. Herhangi bir sıkıştırma işlemine ihtiyaç duyulmadan yerleşmekte ve bir gün içinde trafiğe açılabilir hale gelmektedir. Hafif olması ve yeterli mukavemeti ile yumuşak zeminler üzerindeki dolgularda zaman içindeki oturmaları azaltması açısından avantajlı olmaktadır. Kil mertebesinde geçirimsizliğe sahip olup, erozyon ve donma etkisine dayanıklılığı yüksektir. Malzemenin dezavantajı kabul edilebilecek bazı sınırlamaları ise yüzeyin bir aşınma tabakasıyla kaplanması gereği ve malzemenin maliyetinin uçucu külün temin edilebilme maliyetine bağlı olmasıdır (Özturan, 1990).

3.3.5. Stabilize Edilmiş Uçucu Külün Mikro Yapısının Gelişimi

Her çeşit uçucu kül, kendine has mekanik ve kimyasal karakteristik yapıya sahiptir. Bu yapı, büyük oranda kömür çeşidine ve aynı zamanda kömürün yanma çeşidine yani uçucu külün üretim tekniğine bağlıdır. Uçucu kül uygulamalarının performansı; sadece uçucu külün inceliği gibi mekanik karakteristiklerine bağlı olmayıp, aynı zamanda kimyasal kompozisyonu ve mineralojisine de bağlıdır. Uçucu külün; kimyasal, mineralojik ve mikro yapısal özelliklerinin araştırılması, uçucu külün kullanılmasında faydalı olacak pratik bilgiler sağlayacaktır.

Lav¹ ve Lav² (2000), tarafından yapılan çalışmada kullanılan uçucu kül Eraring Termik Santrali'nden elde edilmiştir. Bu santral, Bayswater'da (Avustralya) bulunan en büyük termik santraldir. Her sene Avustralya'da üretilen toplam uçucu kül miktarının % 15'i (1198000 ton), Eraring Termik Santrali'nden (NSW) elde edilmektedir.

Stabilize edilmemiş ve stabilize edilmiş (çimento veya kireçle) Eraring Termik Santrali (NSW) uçucu külü; x-ışınli floresans spektrometresi (XRF), x-ışını diffraksiyonu (XRD) ve tarayıcı elektron-mikroskop (SEM) yardımıyla külün kimyasal, mineralojik ve mikro yapısal gelişmesinin belirlenmesi amacıyla incelenmiştir. Mikro yapısal ve kimyasal incelemelerin dışında numunelerin dayanım gelişmesi, zamanın fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Stabilize edilmiş numunelerin çimento veya kireç muhtevaları ağırlıkça % 10 oranındadır.

X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF)

Uçucu külün kimyasal kompozisyonu, uçucu külün çeşitli uygulamalar için malzeme kalitesini gösteren özelliklerinden birisidir. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu; tutuşma sırasındaki kayıp dışında, x-ışını floresans spektrometresi yardımıyla belirlenmiştir. Ayrıca 28 günlük kür sonucunda meydana gelen hidratasyonun etkisini gözlemek için çimento veya kireçle stabilize edilen numunelerin de analizi yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.17'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre; Eraring uçucu külü F-sınıfı uçucu kül olup, düşük kalsiyum muhtevasına sahiptir ve tutuşma sırasındaki kaybı çok azdır. Bu durum, kısmi olarak önemlidir çünkü yüksek yanmamış karbon muhtevası, karışımlardaki su gereksinimini arttıracaktır. Farklı bir konu olarak, yüksek miktarda yanmamış karbon

muhtevası betona hava sürüklenmesini sağlayacak ve malzemenin performansını olumsuz yönde etkileyecektir. Bu yüzden Eraring uçucu külü, betonarme yapılarda kullanılmaya elverişlidir.

Çimento veya kireçle stabilize edilmiş numuneler ağırlıkça %15 oranında hidrasyon ürünleri içermektedirler. Çimento veya kirecin katılmasıyla, kalsiyum muhtevası artmıştır. Ayrıca görülmektedir ki; uçucu külün içindeki silis ve alüminyum, mikro yapı oluşturmak için çimento veya kireçle reaksiyona girmiştir.

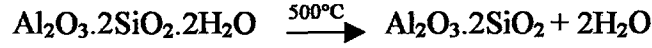
Tablo 3.17 Stabilize edilmemiş ve stabilize edilmiş uçucu külün kimyasal bileşimi (Lav¹ ve Lav², 2000)

Kimyasal Bileşim	Katkısız Uçucu Kül	Kireçle Stabilize Edilmiş Uçucu Kül	Çimentoyla Stabilize Edilmiş Uçucu Kül
SiO ₂	64.65	51.68	52.37
Al ₂ O ₃	24.70	19.37	19.56
Fe ₂ O ₃	3.49	3.01	3.07
CaO	1.61	6.60	5.62
MgO	0.78	0.67	0.70
SO ₃	0.05	0.05	0.11
Na ₂ O	0.58	0.51	0.55
K ₂ O	1.59	1.38	1.55
TiO ₂	0.96	0.84	0.83
SrO	0.04	0.03	0.03
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.07
Mn ₂ O ₃	0.09	0.06	0.07
Tutuşma sırasındaki kayıp	1.28	-	-
Hidrasyon Ürünleri	-	15.71	15.54

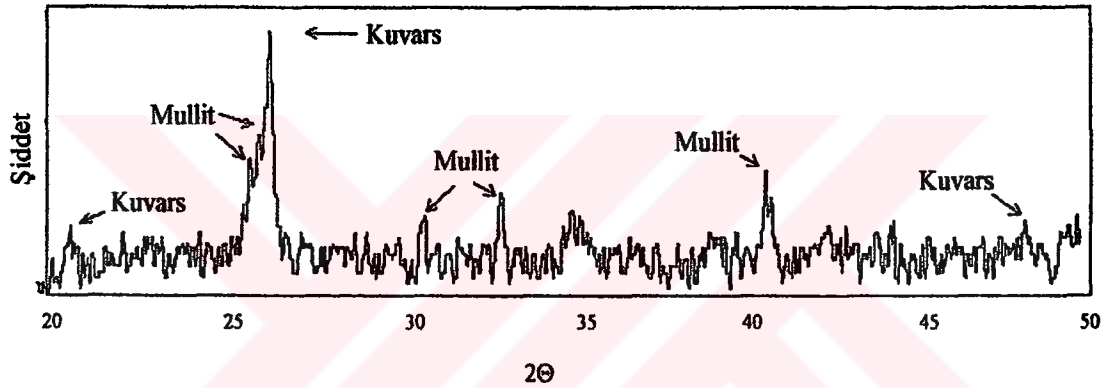
X-Işını Diffraksiyonu (XRD)

Eraring uçucu külünün kristal bileşenleri ve stabilize edilmiş uçucu külün hidrasyon ürünleri Siemens D 500 diffraktometresi yardımıyla ASTM D 934-80'e göre incelenmiştir. XRD modelleri göstermiştir ki, Eraring uçucu külünde öne çıkan kristal fazları Şekil 3.28'de verildiği gibi mullit (Al₆Si₂O₁₃) ve kuvarsdır (SiO₂). Kömürde bulunabilecek dört grup mineral vardır. Bunlar; kuvars, aluminosilikatlar, karbonatlar ve sülfidlerdir. Yanma işlemi sırasında yeni mineraller oluşabilir. Örnek

olarak mullit kömürde mevcut değildir. Mullit, muhtemel olarak aşağıdaki ayrışma reaksiyonu sonucu oluşmaktadır:

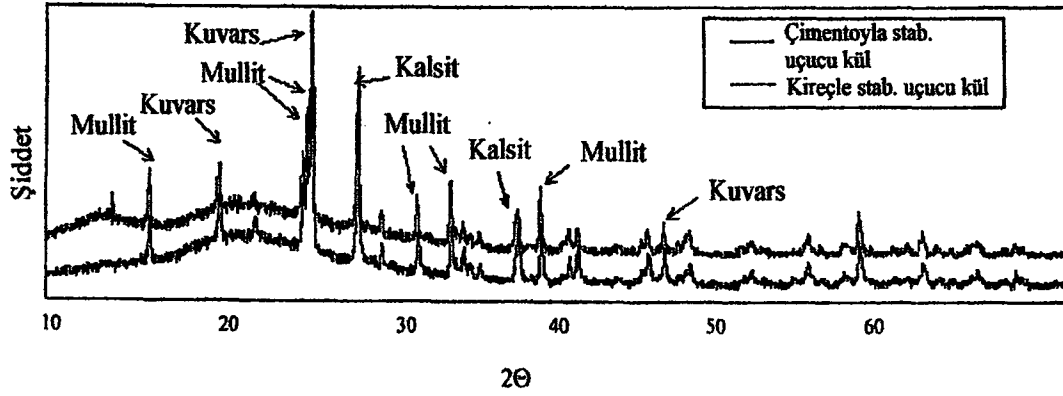


500°C sıcaklıkta, kaolinit suyunu kaybeder, metakaolin haline gelir ve 980°C sıcaklıkta mullit oluşturmak için erir. Soğuma hızı, kristalleşmenin ölçüsünü belirleyen ayrı bir faktördür. Manyetit, hematit gibi uçucu külde bulunabilecek diğer kristal fazları Eraring uçucu külünde bulunmamaktadır.



Şekil 3.28 Stabilize edilmemiş uçucu külün yapısındaki kristal fazlarının XRD modelleriyle bulunması (Lav¹ ve Lav², 2000)

Hidratasyon ürünlerini gözlemek için, çimento veya kireçle stabilize edilmiş uçucu kül de incelenmiştir. Numuneler; 7 gün, 14 gün, 28 gün ve 180 gün küre tabi tutulmuşlardır. Şekil 3.29'dan da görülebileceği gibi; 28 günlük sonuçlara göre, stabilize edilmiş uçucu külde kuvars ve mullitle birlikte sadece kalsit (CaCO_3) ve sönmüş kirecin (Ca(OH)_2) mevcut olduğu açığa çıkmaktadır. Diğer hidratasyon ürünlerinin amorf yapıda olduğu düşünülmektedir. Kalsit, muhtemel olarak havadaki karbon dioksit (CO_2) ile çimento veya kirecin içindeki kalsiyum oksitin (CaO) birleşmesiyle oluşmaktadır. Stabilize edilmiş uçucu külün karbonatlaşması, malzemenin dayanım kazanmasını olumsuz yönde etkilememektedir.



Şekil 3.29 Çimento veya kireçle stabilize edilmiş uçucu külün yapısındaki kristal fazlarının XRD modelleriyle bulunması (Lav¹ ve Lav², 2000)

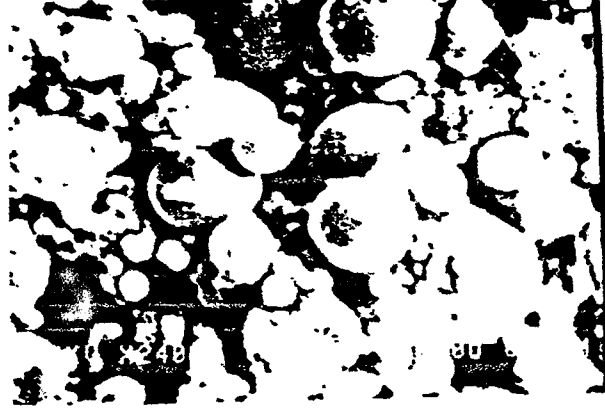
Mikro Yapısal Gelişme

Stabilize edilmiş uçucu külün mühendislik ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli özelliği mikro yapısının gelişme sürecidir. Uçucu kül, çimento veya kirecin reaktif hale gelmesi için suya ihtiyaç vardır. Çimento veya kireçle stabilize edilmiş uçucu kül suyla karıştırıldığında oluşan iki çeşit reaksiyon vardır. Birinci reaksiyon uçucu külün kendi kendine sertleşmesidir ki, bu mekanizma pozolanik reaksiyon olarak bilinir. Diğeri, ortamda çimento veya kireç bulunmasına bağlı olarak oluşan reaksiyon zinciri olup hidrasyon ürünleri oluşturmaktadır. Uçucu külün pozolanik reaktivitesi (kendi kendine sertleşme mekanizması) aşağıdaki faktörlerden etkilenmektedir:

- Mineraloji
- Kimyasal kompozisyon
- İncelik
- Morfoloji
- Tutuşma sırasındaki kayıp

Lav¹ ve Lav² (2000) tarafından yapılan çalışmada, stabilize Eraring uçucu külünün mikro yapısal gelişmesi JEOL JSM-35CF tarayıcı elektron-mikroskopuyla (SEM) incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; çimentoyla stabilize edilmiş uçucu külün ürünleri, hidrate olmuş Portland çimentosunda meydana gelenlerle aynıdır. Ayrıca görülmektedir ki; uçucu kül daneleri, hidrasyon ürünleri için çekirdekleşme sahası oluşturmaktadır. Şekil 3.30'dan da görülebileceği gibi, stabilizasyondan sonra ilk 7

gün içerisinde hidrasyon işareti görülmemektedir. 7 gün sonra, uçucu kül daneleri hidrasyon ürünleri için çok sayıda çekirdekleşme sahası oluşturmuştur (Şekil 3.31).



Şekil 3.30 Uçucu külün çimentoyla stabilize edilişinden sonraki ilk 7 gün içerisindeki mikro yapı (Lav¹ ve Lav², 2000)



Şekil 3.31 Stabilizasyondan 7 gün sonra, uçucu kül danelerinin hidrasyon ürünleri için çekirdekleşme ve büyüme sahası oluşturması (Lav¹ ve Lav², 2000)

Çimentoyla stabilize edilmiş uçucu külde 1 ile 28 günlük periyot sırasında, aşağıdaki mikro yapısal gelişmeler ortaya çıkmıştır:

- Uçucu külü çekirdek oluşturma sahası olarak kullanan etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{CaSO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşmuştur (Şekil 3.32).
- Şekil 3.33'den de görülebileceği gibi, çimentoyla stabilize edilmiş uçucu külün dayanım kazanmasını sağlayan hidrasyon ürünleri oluşmuştur.
- Oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, uçucu kül partiküllerinin etrafını sarmış ve dayanımını arttırmıştır (Şekil 3.34).

- Ayrıca $\text{Ca}(\text{OH})_2$ havadaki CO_2 ile birleşerek karbonatlaşmıştır. Stabilize edilmiş uçucu külde amorf yapıdaki $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ de bulunmaktadır (Şekil 3.35).



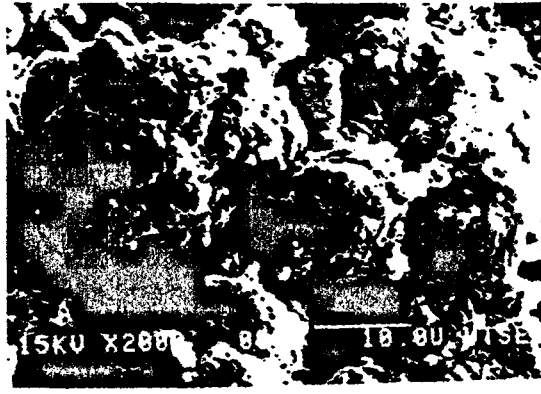
Şekil 3.32 Çimentoyla stabilize edilmiş uçucu külde etrenjit oluşumu (Lav¹ ve Lav², 2000)



Şekil 3.33 Çimentoyla stabilize edilmiş uçucu külde hidratasyon ürünlerinin oluşması (Lav¹ ve Lav², 2000)



Şekil 3.34 Çimentoyla stabilize edilmiş uçucu külde kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) çökmesi (Lav¹ ve Lav², 2000)



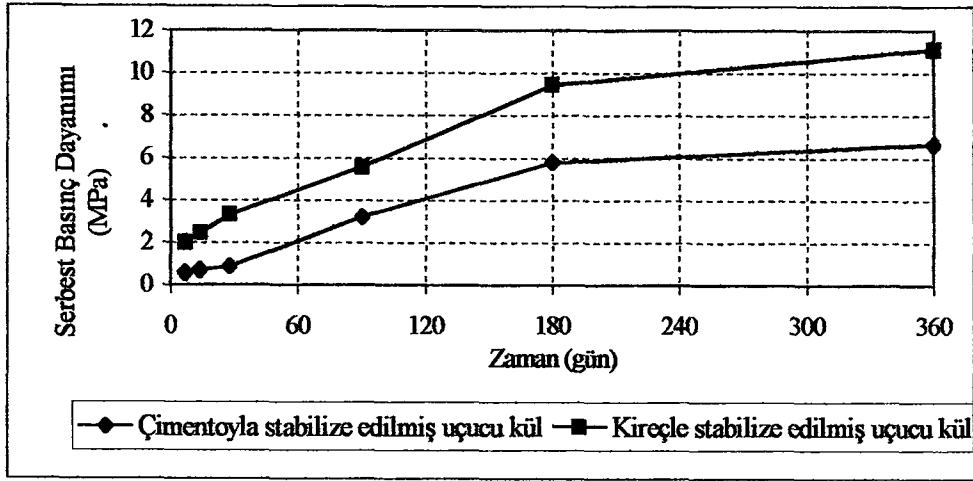
Şekil 3.35 Kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), havadaki karbon dioksitle (CO_2) birleşerek karbonatlaşması (Lav¹ ve Lav², 2000)

Çimento-uçucu kül karışımının erken dayanım kazanmasını, oluşan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile etrenjit sağlar. Çimento stabilizasyonunun olgunlaşma evresinde kalsiyum silikat hidratları uçucu kül partiküllerinin etrafını sarar ve uçucu kül partiküllerinin arasındaki boşluğu doldurur. Bu olay, malzemenin daha yüksek dayanım kazanmasını sağlar.

Kireçle stabilize edilmiş uçucu külün kimyasal kompozisyonu, çimento ile stabilize edilmiş uçucu külün kimyasal kompozisyonuna benzer. Tarayıcı elektron-mikroskoptan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, kireçle stabilize edilmiş uçucu külde bulunan hidratasyon ürünleri çimentoyla yapılan stabilizasyon sonucu oluşan ürünlere benzemektedir. Bununla birlikte tepkimelerin hızı, oranı ve oluşan hidratasyon ürünlerinin miktarı aynıdır.

Serbest Basınç Dayanımı

Uçucu küle katılan çimento ve kirecin etkisi, serbest basınç dayanımı testi kullanılarak saptanmıştır. Şekil 3.36, çimento veya kireçle stabilize edilmiş uçucu külün dayanım gelişmesini göstermektedir. Çimentoyla stabilize edilmiş uçucu kül, kireçle stabilize edilmiş uçucu küle oranla ilk 28 günde daha yüksek dayanım kazanmıştır. İki grup arasındaki dayanım farkı, 360 günlük kür sonuna kadar yaklaşık olarak aynı kalmıştır. İki grubun dayanım kazanma eğrileri aynı karakterdedir. Uçucu külün pozolanik reaktivitesi, özellikle 180. ve 360. günler arasında kendini göstermiştir. Bu zaman aralığında, bütün numuneler dayanımlarını artırma eğilimi içerisine girmişlerdir.



Şekil 3.36 Çimento veya kireçle stabilize edilen uçucu külün dayanımının zamana bağlı artması (Lav¹ ve Lav², 2000)

3.3.6. Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri

Her sene artan enerji ihtiyacını karşılamak için; büyük miktarlarda kömür, termik santrallerde yakılmakta ve geride büyük miktarlarda kömür artığı kalmaktadır. Yakma sırasında ortaya çıkan külün % 80'i ince danelerden meydana gelen uçucu küldür ve hava yardımıyla kolayca uçabilirler. Zehirli maddelerden oluşan uçucu külün güvenli şekilde ortadan kaldırılması için büyük miktarlarda maliyet gerekmektedir ve çevresel, teknik ve boş atık sahası problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu problemleri ortadan kaldırmak için, uçucu külün kullanılabileceği alanlar araştırılmaktadır. Uçucu küllerin geoteknik özellikleri, kullanılmalarında önemli rol oynar. Sivapullaiah ve diğ. (1998) tarafından yapılan çalışmada; farklı uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, mühendislik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Daneli malzemelere uygulanan kuvvetin, bitişik daneler aracılığıyla birbirine iletiildiği çok iyi bilinmektedir. Dane boyutu, özgül yüzey ve danelerin şekli, temas kuvvetlerinin gelişmesinde önemli rol oynar. Sadece kaba dane içeren zeminlerde, daneler arası temas kuvvetleri önemlidir. Eğer zeminler kil ihtiva ediyorsa, daneler arasında elektriksel çekme ve itme kuvvetleri meydana gelecektir. İnce daneli zeminlerin davranışı bu kuvvetler tarafından kontrol edilmektedir. Uçucu küller, herhangi bir elektrik yükü içermez ve davranışları boyut yüzey ve karakteristiklerine bağlıdır. Fakat uçucu küller puzolanik malzemelerdir ve ıslanmalarıyla dayanımları artmaktadır. Dayanımın artması; silis ve kirecin (saf veya katkılı), suyun mevcut

olduğu durumda düşük çözünürlükte kalsiyum silikat meydana getirmek için reaksiyona girmesi sonucu olur.

Sivapullaiah ve diğ. (1998) tarafından yapılan çalışmada, değişik kaynaklardan elde edilen üç çeşit Hindistan uçucu külü kullanılmıştır. Deneyde kullanılan uçucu küller; Karnataka eyaletindeki Gulbarga, Tamilnadu eyaletindeki Neyveli ve Andhra Pradesh eyaletindeki Vijayawada bölgelerinden elde edilmiştir. Elde edilen uçucu küller sırasıyla; Gulbarga uçucu külü (GFA), Neyveli uçucu külü (NFA) ve Vijayawada uçucu külü (VFA) olarak isimlendirilir. Deneyde kullanılan uçucu küllerin temel fiziksel ve mühendislik özellikleri Tablo 3.18’de, kimyasal özellikleri Tablo 3.19’da verilmiştir.

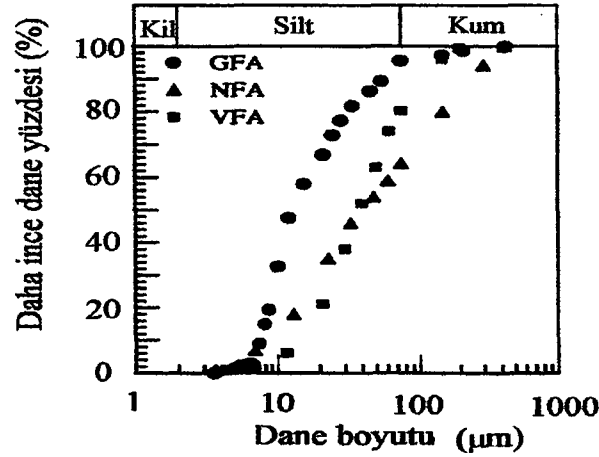
Tablo 3.18 GFA, NFA ve VFA uçucu küllerinin temel özellikleri (Sivapullaiah ve diğ., 1998)

Özellik	GFA	NFA	VFA
Dane özgül ağırlığı (G_s)	2.58	2.67	2.03
Soğurulmuş su muhtevası (%)	1.46	1.03	0.55
Likit limit (%)	62	44	49
Plastik limit (%)	NP	NP	NP
Rötre limiti (%)	52	38	42
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3), (Standart Proktor Testi)	10.1	11.9	9.86
Optimum su muhtevası (%)	52.7	39.6	41.4

Tablo 3.19 GFA, NFA ve VFA uçucu küllerinin kimyasal bileşenleri (Sivapullaiah ve diğ., 1998)

Bileşenler (%)	GFA	NFA	VFA
Toplam SiO_2	51.06	50.40	58.88
Reaktif SiO_2	6.42	4.98	1.84
Al_2O_3	20.29	18.81	29.67
Fe_2O_3	10.82	16.61	5.87
Toplam CaO	7.11	9.00	3.03
Serbest CaO	0.50	3.92	0.86
MgO	2.32	1.41	0.24
TiO_2	0.26	0.28	0.27
K_2O	0.25	0.23	0.28
Na_2O	0.25	0.18	0.21
Tutuşma sırasındaki kayıp	7.19	2.60	1.41

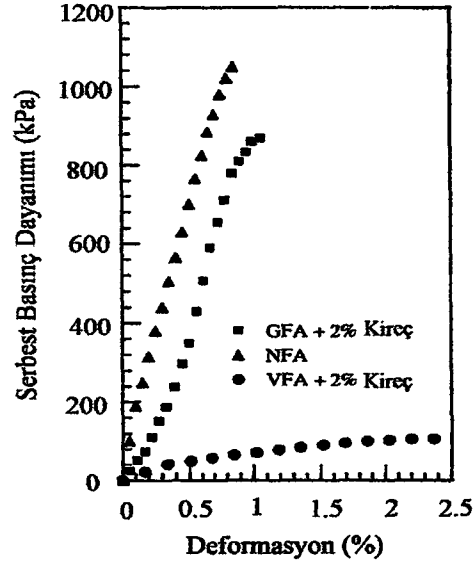
Tablo 3.19'daki reaktif SiO_2 ve serbest CaO , toplam SiO_2 ve toplam CaO miktarının bir kısmını oluşturmaktadır. Uçucu küllerin elektron-mikroskop altında incelenmesi sonucunda NFA uçucu külünün, VFA külüne göre daha kaba yüzey yapısına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Uçucu küllerin dane dağılımı eğrileri Şekil 3.37'de verilmiştir.



Şekil 3.37 GFA,NFA ve VFA uçucu küllerinin dane dağılımı eğrileri (Sivapullaiah ve diğ., 1998)

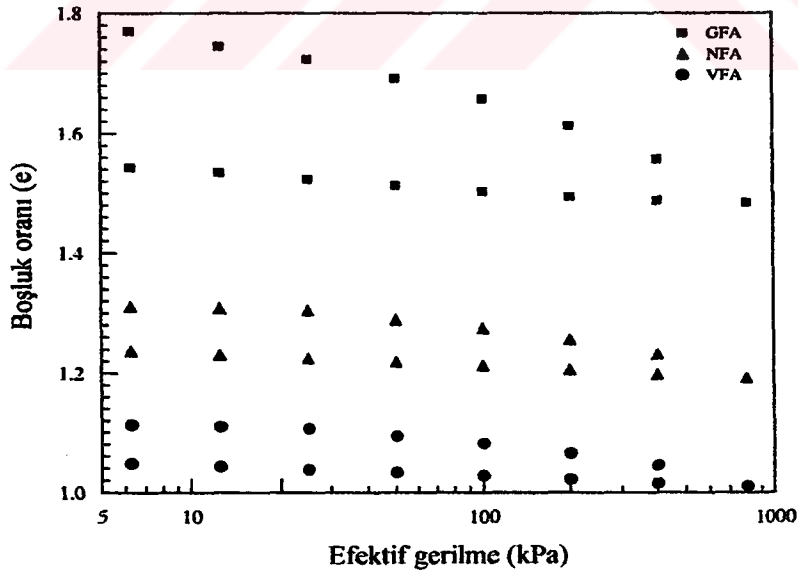
Sivapullaiah ve diğ. (1998); NFA,GFA ve VFA uçucu küllerinin serbest basınç dayanımlarını bulabilmek için testler düzenlemişlerdir. Yapılan deneyler sonucu; NFA uçucu külü, kireç eklemekten bile belirli bir serbest basınç mukavemeti değerine ulaşmıştır. NFA uçucu külünün 1 haftalık kür sonucu elde edilen gerilme-deformasyon eğrisi Şekil 3.38'de verilmiştir. Bununla birlikte GFA ve VFA numuneleri suyun içindeyken dayanım kazanamamış ve göçmüşlerdir. VFA uçucu külü içinde reaktif SiO_2 ve CaO az miktarda bulunmaktadır. Bu yüzden VFA uçucu külü suyla birleştiğinde, küle dayanım kazandıracak bağların gelişmesini sağlayacak hidrolik bağlayıcı (çimento özelliğinde) bileşimler oluşmayacaktır. GFA uçucu külü reaktif SiO_2 ihtiva etmektedir fakat; reaksiyona girip, hidrolik bağlayıcı bileşimler oluşturacak miktarda CaO ihtiva etmemektedir. İçinde yeterli miktarda reaktif SiO_2 ve CaO bulunduran NFA uçucu külünün dayanımı, NFA uçucu külü küre tabi tutulduktan sonra artmıştır. Dayanımlarının artması için, GFA ve VFA uçucu külleri ağırlıkça % 2 oranında kireçle karıştırılmıştır. Kireç eklendikten sonra GFA uçucu külünün dayanımı arttığı halde, VFA uçucu külünün dayanımında çok az bir artış

meydana gelmiştir. Bu olay; uçucu küllerin dayanımının, hem reaktif SiO_2 hem de serbest CaO bulunması halinde artacağını göstermektedir.



Şekil 3.38 GFA, NFA ve VFA uçucu küllerinin serbest basınç dayanımı-deformasyon ilişkileri (Sivapullaiah ve diğ., 1998)

GFA, NFA ve VFA uçucu külleri için boşluk oranı-efektif basınç eğrileri Şekil 3.39'da verilmiştir. Uçucu küllerin sıkışabilirliğinin çok az olduğu ve dane dağılımı benzer olan siltlere yakın özellik gösterdiği söylenebilir.



Şekil 3.39 GFA, NFA ve VFA uçucu külleri için boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi (Sivapullaiah ve diğ., 1998)

Sivapullaiah ve diğ. (1998) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, uçucu küllerin geoteknik özelliklerinin; uçucu küllerin dane boyutları, derecelenmeleri, yüzey karakteristikleri ve kimyasal özellikleri (reaktif SiO_2 ve CaO) ile kontrol edildiği ortaya çıkmıştır. Detaylandırılmış sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Uçucu küllerin kompaksiyon davranışı; dane dağılımı ve yüzey karakteristikleri ile kontrol edilmektedir.
- Hem reaktif SiO_2 hem de CaO ihtiva eden uçucu küller suyla birleştiklerinde hidrolik bağlayıcı (çimento özelliğinde) hale gelip, dayanım kazanmaya başlarlar. Sadece reaktif SiO_2 içeren küller, kireç eklendiği takdirde dayanım kazanmaya başlarlar. İçinde reaktif SiO_2 bulunmayan küller, kireç eklense bile dayanım kazanamazlar.
- Uçucu küllerde konsolidasyon sonucu oluşan sıkışmalar çok küçük değerlere sahiptir ve gerçekte likit limitlerine göre beklenenin çok altındadır. Bunun sebebi; dayanım kazanmayı sağlayan bağlar (CSH) tarafından tutulan suyun, konsolidasyon sırasında dışarı çıkamamasıdır.

3.4. Hafif Dolgu Malzemesi Üretmek Amacıyla Yapılmış Çalışmalar

3.4.1. Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımı

Japonya'daki yol ağının gelişmesi çok sayıda geniş yol açılmasını gerekli kılmıştır. Yeni yapılan yolların inşaatı sırasında istinat duvarları, dolgu ve köprüler yapılmıştır. Eğer istinat duvarlarına ve köprü ayaklarına etkiyen yatay toprak basınçları ile yer altındaki su borularına ve bülzere etkiyen düşey basınç azaltılabilirse, teknik ve ekonomik açılarından kazanç sağlanacaktır. Toprak basıncını azaltmanın bir yolu da kullanılan dolgu malzemelerini hafifletmek ve katılaştırmaktır. Bunun örnekleri; genleşmiş polistiren ve köpük betondur.

Nishikawa ve diğ. (1993) tarafından yapılan çalışmada, köpük karıştırılmış sertleşmiş zemin üretilmiştir. Köpükle karıştırılmış sertleşmiş zemin; volkanik kül, su, çimento ve köpük oluşturan katkı maddesinin karıştırılmasıyla oluşmuştur. Üretilen suni zemin; hafif, dayanımı yeterli ve üzerinde çalışılabilir niteliktedir. Bu malzemenin hafifliği; köpük ve çimento miktarına, çimentonun dayanımına ve içindeki su miktarına bağlıdır. Bu ilişkileri kanıtlamak için çeşitli deneyler yapılmıştır.

Kullanılan volkanik kül, Sapporo (Hokkaido) yakınlarından elde edilmiştir. Volkanik külün dane dağılımı, özgül ağırlığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı Tablo 3.20’de verilmiştir. Köpüğü oluşturmak için, yüzeysel olarak aktif katkı maddeleri kullanılmıştır.

Tablo 3.20 Hafif dolgu malzemesi üretiminde kullanılan Sapporo volkanik külünün fiziksel özellikleri (Nishikawa ve diğ., 1993)

Özgül Ağırlık (G_s)		2.402
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)		16.03
Dane Çapı Dağılımı (%)	Çakıl	17.5
	Kum	50.2
	Silt	26.0
	Kil	6.3

Başlangıç niteliğindeki deneyler göstermiştir ki; ağırlıkça su/volkanik kül oranı (ayarlanmış su oranı) % 100 değerinden büyükse terleme (su kuma) meydana gelmektedir. Su oranı fazla olduğunda; karışımın içindeki su yukarı çıkmakta, çimento ile volkanik kül daneleri çökelmekte ve böylece yüzeyde düşük mukavemetli bir tabaka oluşmaktadır. Daha sonra; yüzeyde oluşan düşük mukavemetli tabakadaki su buharlaşmakta ve yüzeyde çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Böylece yüzeyde çatlaklar oluşmaktadır. Terlemenin meydana gelmemesi için ağırlıkça su/volkanik kül oranının % 100 değerinden küçük olması gerekmektedir. Deneylerde kullanılan köpük karıştırılmış sertleşmiş suni zemin numunelerinin temel karakteristikleri Tablo 3.21 ve 3.22’de verilmiştir.

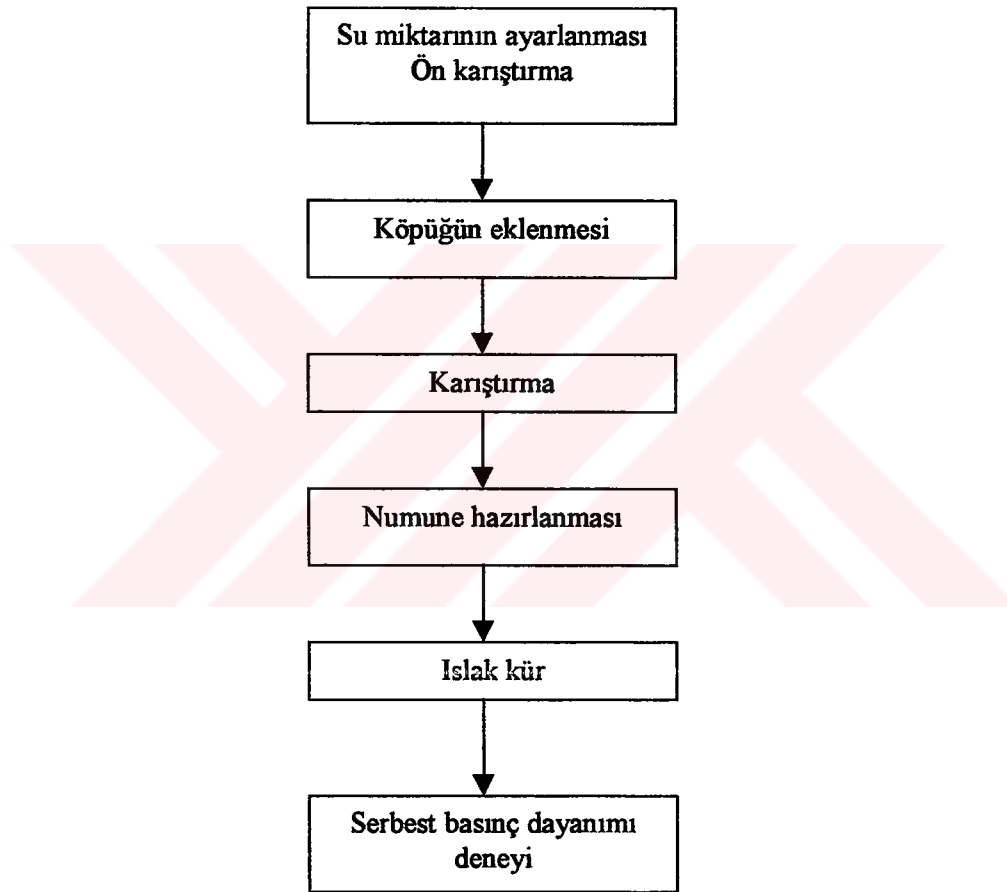
Tablo 3.21 Su/volkanik kül oranı ile çimento dozajı arasındaki ilişki (Nishikawa ve diğ., 1993)

Ağırlıkça su/volkanik kül oranı (%)	Ağırlıkça su/çimento oranı (%)	Çimento Dozajı (kg/m^3)	Notlar:
50	3.8	80	Hedef Yoğunluk: $10 kN/m^3$ *Terlemeye sebep olabilecek su oranı
55	4.1	80	
60	3.7	92	
70	3.7	100	
85	3.7	110	
100	3.7	119	
120*	3.7	128	

Tablo 3.22 Volkanik kül-çimento-köpük karışımının yoğunluğu ile çimento dozajı arasındaki ilişki (Nishikawa ve diğ., 1993)

Hedef Yoğunluk (kN/m ³)	Çimento Dozajı (kg/m ³)	Köpük (%)	Notlar:
16	160	0	Su/çimento oranı=3.7 Ayarlanmış su oranı=%70 Volkanik külün başlangıçtaki su oranı=%31
12	120	28.1	
10	100	40.1	
8	80	52.1	
6	60	64.1	

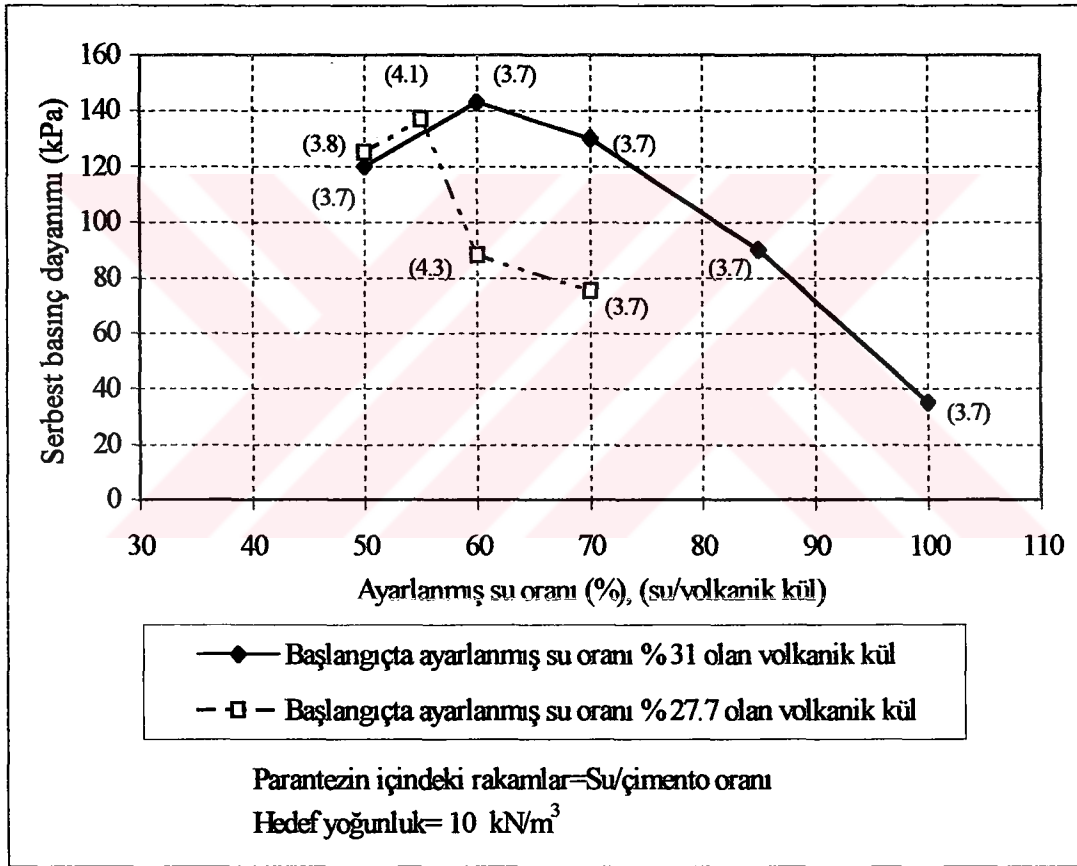
Şekil 3.40, köpük katılmış sertleşmiş suni zeminin üretilmesi ve deney aşamalarının gelişimini göstermektedir.



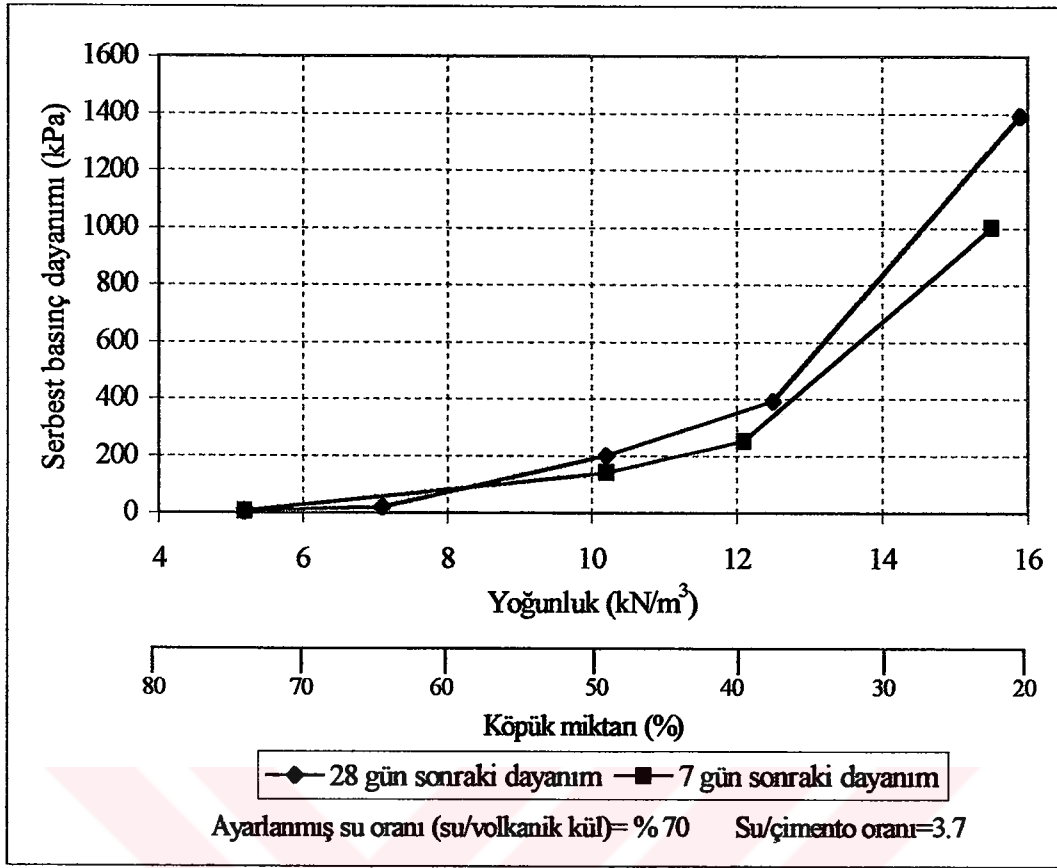
Şekil 3.40 Volkanik kül-çimento-köpük karışımının üretilme aşamaları ve deney yöntemi (Nishikawa ve diğ., 1993)

Şekil 3.41; volkanik kül-çimento-köpük karışımının ayarlanmış su oranıyla, numune hazırlandıktan 7 gün sonraki serbest basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Ayarlanmış su oranı % 55 ile % 60 değerleri arasındayken, karışımın serbest basınç dayanımı maksimum değerine ulaşır. Şekil 3.42; karışımdaki köpük

miktarı değişken ve su/çimento oranı ile ayarlanmış su oranı sabit bir değerde olduğu zaman, volkanik kül-çimento-köpük karışımının yoğunluğu ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Volkanik kül, çimento ve köpük ilk karıştırıldıklarında, karışımın yoğunluğu bir çözeltinin yoğunluğu kadardır. Karışımın içindeki köpük miktarı azaldığında veya karışımın yoğunluğu arttığında, karışımın serbest basınç mukavemeti artacaktır. Değişik yoğunluklarda serbest basınç mukavemetinin değişimi, köpük miktarının bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Daha önceden belirlenmiş standartlara göre, volkanik kül-çimento-köpük karışımının dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için en az 0.15 MPa serbest basınç mukavemetine sahip olması gerekmektedir.

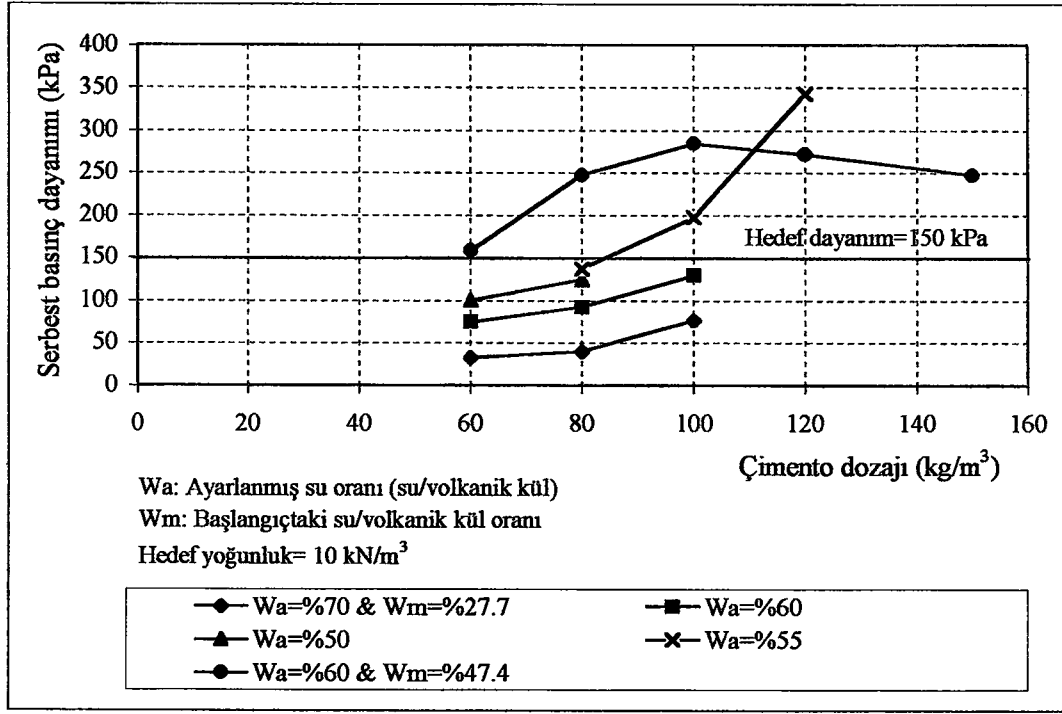


Şekil 3.41 Ayarlanmış su oranı ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki (Nishikawa ve diğ., 1993)



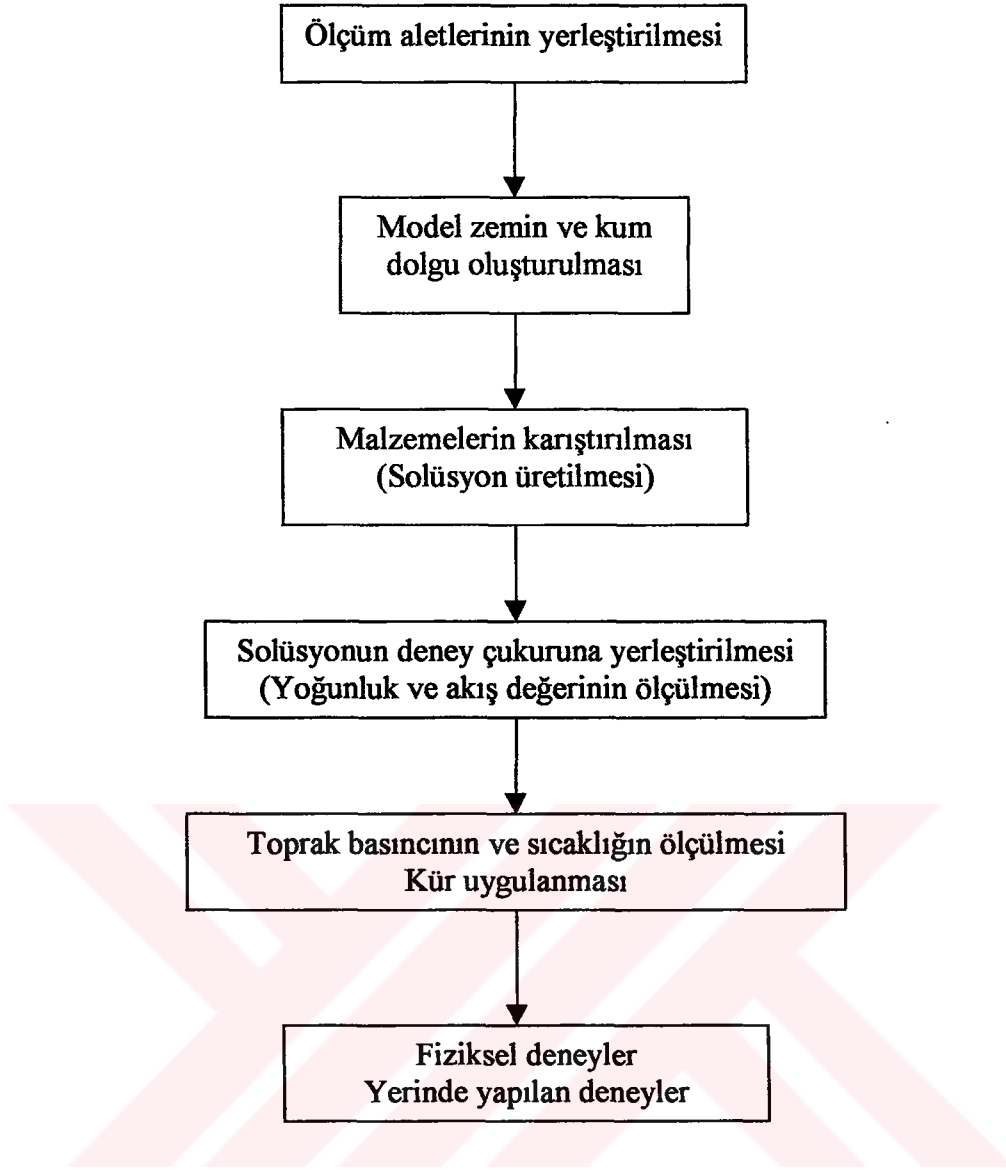
Şekil 3.42 Volkanik kül-çimento-köpük karışımının yoğunluğu ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki (Nishikawa ve diğ., 1993)

Kullanılan çimento miktarı ile malzemenin serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 3.43’de verilmiştir. Deney başlangıcında ayarlanmış su oranının % 27.7 olması halinde; serbest basınç mukavemeti, çimento dozajındaki artış ile birlikte artacaktır. Ayarlanmış su oranı % 55-60 arasında kaldığında, istenen dayanımı sağlayacak çimento miktarı 85-110 kg/m³’tür. Deney başlangıcındaki ayarlanmış su oranı % 47.4 olduğu zaman; önce çimento dozajının artmasıyla dayanım artacak, daha sonra çimento dozajının 100 kg/m³’e ulaşmasıyla dayanım maksimumdan geçip, çimento dozajının daha fazla artması halinde azalacaktır. Çimento dozajına ek olarak başlangıçtaki ayarlanmış su oranı da, karışımın dayanımını etkileyebilir. Deney başlamadan önce, volkanik kül suyla karıştırılarak danelerin suyla ıslanmaları sağlanır. Başlangıçtaki su/volkanik kül oranı (ayarlanmış su oranı), bu şekilde belirlenebilir.



Şekil 3.43 Volkanik kül-çimento-köpük karışımının çimento dozajı ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki (Nishikawa ve diğ., 1993)

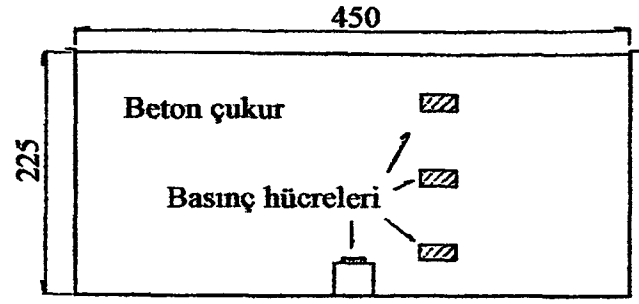
Laboratuvar çalışmasını izleyen aşamada, toprak basınçlarında meydana gelen azalmayı ve volkanik kül-çimento-köpük karışımının kullanılabilirliğini araştırmak için deneyler yapılmıştır. Şekil 3.44, yapılan deneylerin akış diyagramını, Şekil 3.45 de deney çukuru ve kullanılan deney aletlerinin içeriğini göstermektedir. Üç adet deney düzenlenmiştir: Birinci deneyde kum dolgu oluşturulmuş, ikinci ve üçüncü deneyde ise model zemin üzerine volkanik kül-çimento-köpük karışımı yerleştirilmiştir. Sonraki iki deneyde, beklenen karışım yoğunlukları 10 ve 8 kN/m³'tür. İkisinde de ayarlanmış su oranları % 60, çimento dozajları 100 ve 130 kg/m³'tür. Kum dolgu ve model zemin iyice sıkıştırılmış ve kompaksiyon miktarı; kuru birim hacim ağırlık ölçümleri ve İsveç Penetrasyon Testi yardımıyla belirlenmiştir. Solüsyon hazırlanmadan önce ve yerleştirildiği sırada, yoğunluk ve akış değerleri her 30 dakikada bir ölçülmüş ve solüsyonun hedeflenen yoğunlukta olması sağlanmıştır. Solüsyon, iki günü aşan bir sürede ve iki kademede yerleştirilmiştir. Solüsyon, planlanan yüksekliğe kadar yerleştirildikten sonra yüzeyi düzeltilmiştir. Volkanik kül-çimento-köpük karışımı yerleştirildikten sonraki 28 günlük periyot içinde, toprak basınçları ve sıcaklıklar düzenli bir şekilde ölçülmüştür.



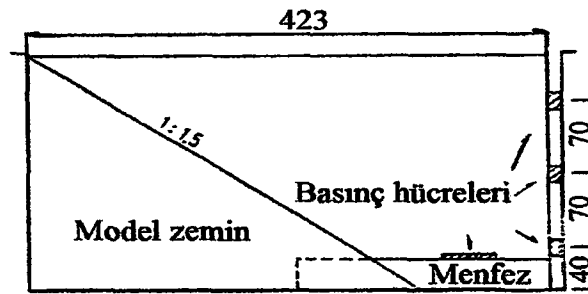
Şekil 3.44 Volkanik kül-çimento-köpük karışımı üzerinde yapılan model deneyleri (Nishikawa ve diğ., 1993)

Volkanik kül-çimento-köpük karışımı, mikser kullanılarak üretilmiştir. Üretim aşamaları aşağıdaki gibidir:

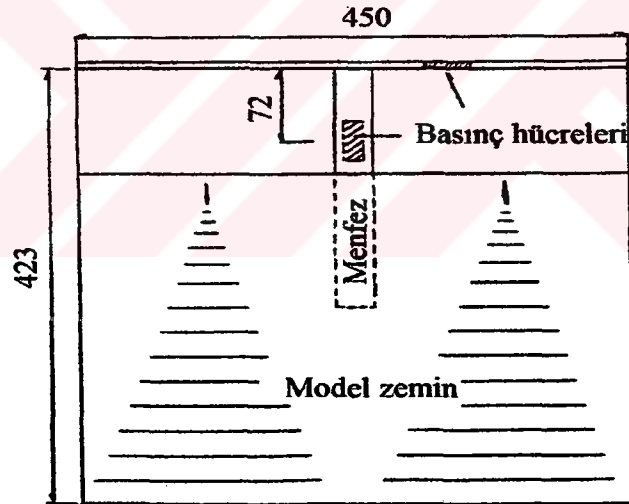
- Başlangıçta; volkanik kül, planlanan su oranını (ayarlanmış su oranı) elde etmek için suyla karıştırılır. Daha sonra mikser, çimento ve köpük meydana getiren malzeme eklenir.
- Solüsyon mikserden çıkarılır, yoğunluk ve akış değerleri ölçülür.
- Solüsyon deney çukuruna pompalanır.



Önden görünüş



Boyuna kesit

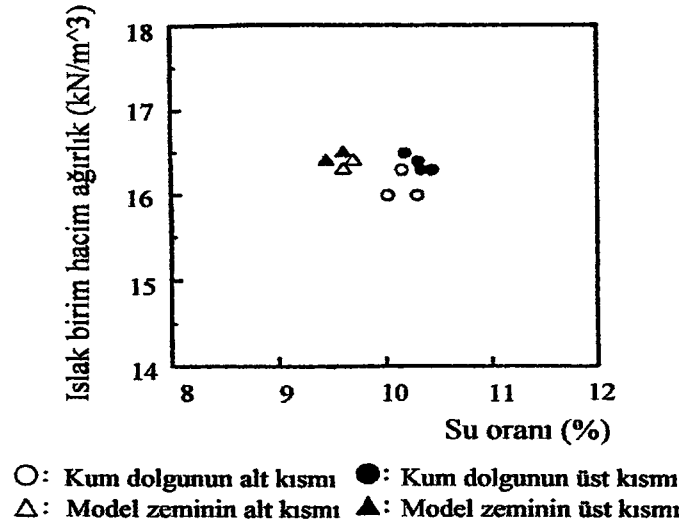


Plan

Şekil 3.45 Deney çukuru ve kullanılan ölçüm aletleri (Nishikawa ve diğ., 1993)
Not: 1 birim=1cm

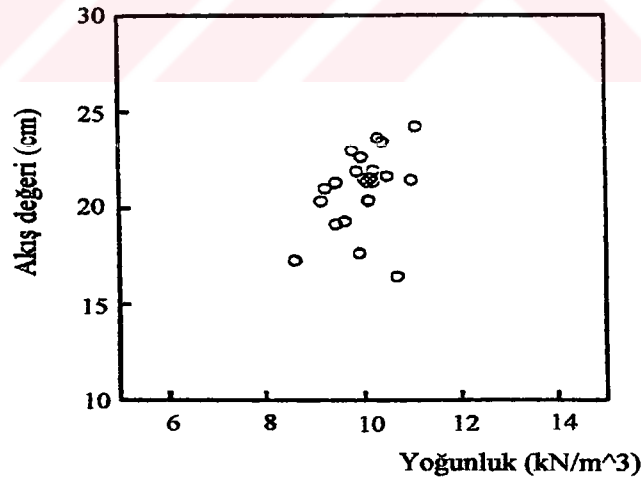
Şekil 3.46; 1.deneyde oluşturulan kum dolgunun ve 2.deneyde teşkil edilen model zeminin yoğunlukları ile su oranları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kum dolgu ve model zeminin yoğunlukları 16 ile 16.5 kN/m^3 arasında değişmektedir. İsveç

Penetrasyon Testi sonuçlarına göre, kum dolgu ve model zeminin homojen ve tamamen sıkışmış olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.46 Islak birim hacim ağırlık ve su oranı (Nishikawa ve diğ., 1993)

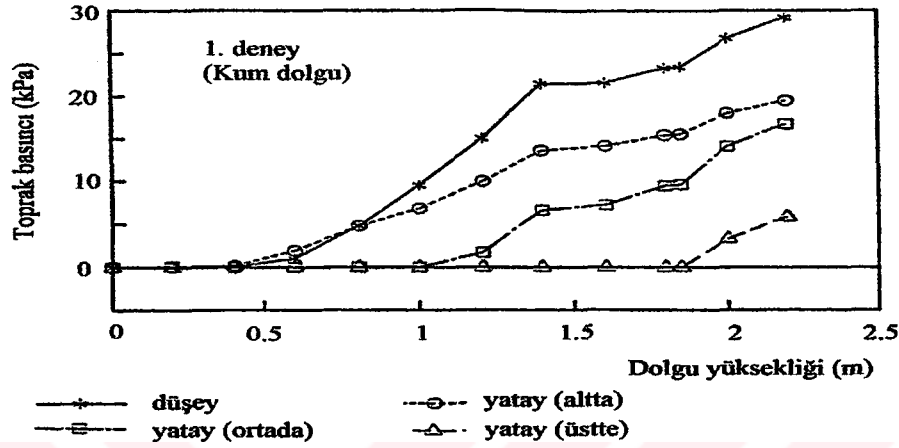
Şekil 3.47, solüsyonun yerleştirilmesi sırasında ölçülen yoğunluk ve akış değerlerini göstermektedir. Yoğunluklar ortalama olarak 9.97 kN/m^3 değerinde olmakla birlikte, $8.6\text{-}11.1 \text{ kN/m}^3$ aralığında değişen değerler de almışlardır. Solüsyonun ortalama yoğunluğu başlangıçta planlanan değere çok yakındır.



Şekil 3.47 Volkanik kül-çimento-köpük solüsyonunun yoğunluk ve akış değerleri (Nishikawa ve diğ., 1993)

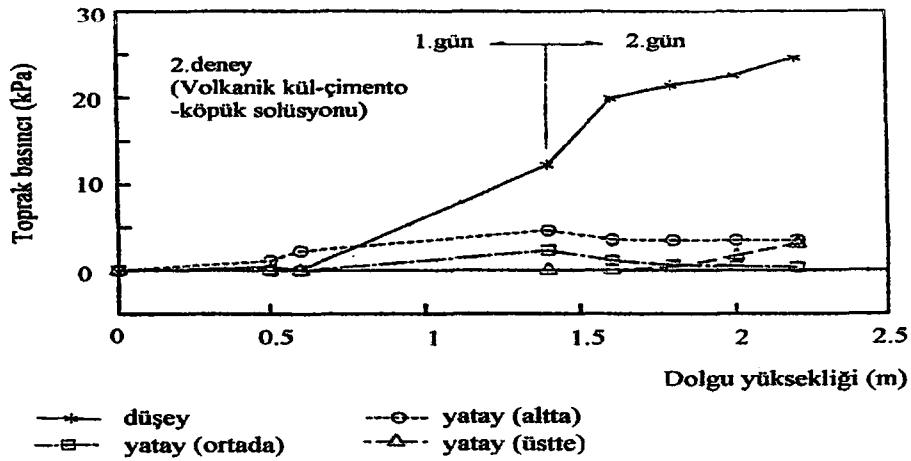
(a) Kum dolgunun meydana getirdiği toprak basıncı: Şekil 3.48, kum dolgunun oluşturulması sırasında kaydedilen düşey ve yatay toprak basıncı değerlerini

göstermektedir. Dolgunun yüksekliği arttıkça, düşey ve yatay toprak basıncı değerleri de artacaktır. 2.25 m yüksekliğindeki dolguda oluşan düşey toprak basıncı, teorik olan 29.3 kPa değerine çok yakındır. Basıncı hücrelerinin yaklaşık olarak tam değerleri gösterdiği düşünülmektedir. Basıncı hücrelerinin gösterdiği yatay toprak basıncı değerleri, teorik değerden % 30 fazladır. Basıncı hücrelerinin etrafındaki zeminin kompaksiyon sırasında sıkışmasının bu sonuca etkidiği düşünülmüştür.

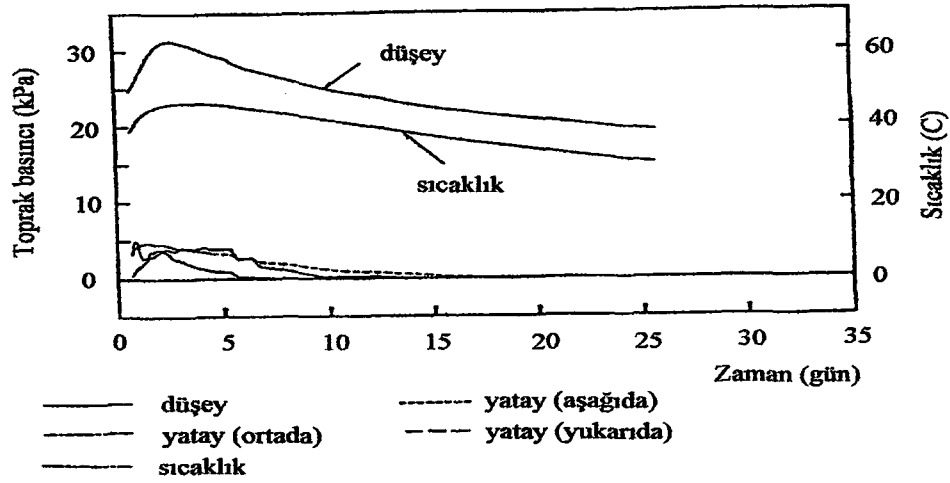


Şekil 3.48 Kum dolgunun (1. deney) meydana getirdiği toprak basıncı (Nishikawa ve diğ., 1993)

(b) Volkanik kül-çimento-köpük solüsyonunun meydana getirdiği toprak basıncı:
Şekil 3.49, 2. deneyde kullanılan solüsyonun meydana getirdiği düşey ve yatay toprak basıncı değerlerini ve Şekil 3.50 de, düşey ve yatay basıncın zamanla değişimini ve kür sıcaklıklarını göstermektedir.



Şekil 3.49 2. deneyde (volkanik kül-çimento-köpük karışımı) oluşan toprak basınçları (Nishikawa ve diğ., 1993)



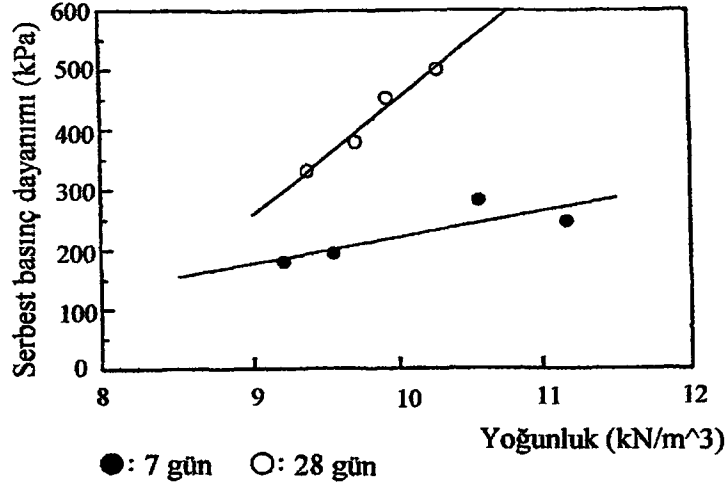
Şekil 3.50 2.deneyde (volkanik kül-çimento-köpük karışımı) toprak basıncı-kür süresi-kür sıcaklığı ilişkisi

Başlangıçta; volkanik kül-çimento-köpük solüsyonundan oluşan dolgunun yüksekliği arttıkça, meydana gelen düşey ve yatay toprak basınçları da artmıştır. Bununla birlikte, iki gün sonra dolgu yüksekliğinde artış olmasına rağmen yatay basınç sabit kalmaktadır. Bu eşsiz olayın, başlangıçta neredeyse sıvı halde bulunan solüsyona bağlı olduğu düşünülmektedir. Solüsyon ilk defa yerine döküldükten sonra katılaşmaya başlamıştır. Başlangıçtan 28 gün sonra ölçülen düşey toprak basıncı değeri 19.4 kPa'dır. Bu değer, solüsyonun yoğunluğu kullanılarak hesaplanan düşey toprak basıncı değerine (18 kPa) yakındır. Solüsyon yerleştirildikten sonra, düşey toprak basıncında meydana gelen değişim eğilimi, kür sıcaklıklarının değişimine bağlanabilir.

Bu olayın aşağıda anlatıldığı gibi oluştuğu düşünülebilir:

- (i) Kür sıcaklığındaki artış, katılaşmış volkanik kül-çimento-köpük karışımı içindeki köpüğün genleşmesini sağlamış ve toprak basıncı, katılaşmanın artmasıyla geçici olarak artmaya başlamıştır.
- (ii) Daha sonra meydana gelen kür sıcaklığındaki azalma, köpüğün büzülmesine neden olmuş ve toprak basıncı azalmıştır. 20 gün sonra, yatay toprak basınçları neredeyse sıfır değerine inmiştir. Bu olayın, katılaşan solüsyonun kendini destekler hale gelmesi sonucu olduğu düşünülebilir. Dolgunun inşası bittikten sonra, tamamlanan yüzey 2 mm kadar çökmüştür.

(c) Fiziksel deneyler: Şekil 3.51 ve Tablo 3.23, volkanik kül-çimento-köpük karışımından alınan numunelerin 7 ve 28 gün sonundaki dayanım-yoğunluk ilişkilerini göstermektedir. Numuneler, streç-film kullanılarak paketlenmiş ve küre tabi tutulmuşlardır. Serbest basınç mukavemeti, 7 gün sonunda 150 kPa değerini geçmiştir ve 28 gün sonunda 330-500 kPa değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.51 Volkanik kül-çimento-köpük karışımının 7 ve 28 gün sonundaki dayanım-yoğunluk ilişkileri (Nishikawa ve diğ., 1993)

Tablo 3.23 Solüsyonun 7 ile 28 gün sonundaki ortalama dayanım ve yoğunlukları (Nishikawa ve diğ., 1993)

	7 gün	28 gün	28 gün/7 gün
Yoğunluk (kN/m³)	10.1	9.8	0.97
Dayanım (kPa)	226	416	1.84

7 ve 28 gün sonunda ölçülen serbest basınç mukavemeti değerleri arasındaki artış farkı % 80 civarındadır. 7 ve 28 gün sonundaki ortalama yoğunluk değerleri yaklaşık aynıdır ve bu değerler solüsyonun başlangıçtaki yoğunluğuna yakındır. Yapılan diğer fiziksel deneylerin sonuçları Tablo 3.24'de verilmiştir.

(d) Arazide yapılan deneyler: Arazide yapılan deneylerin sonuçları Tablo 3.25'de verilmiştir. Deney çukurundan alınan numunelerin yoğunlukları planlanan değerlere yakındır ve solüsyonun yoğunluğu değişmemiştir. Solüsyon çukura yerleştirildikten sonra yoğunluğunda bir azalma meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Çukurdan alınan numunelerin dayanımları, laboratuvar deneylerinde kullanılan numunelerin dayanımlarına göre düşüktür. Bu durumun değişik kür şartlarından kaynaklandığı sanılmaktadır. Arazide yapılan CBR deneylerinden elde edilen değerler, laboratuvar

deneylerinden elde edilen CBR değerlerinden daha büyüktür. Katılaştıran volkanik kül-çimento-köpük karışımının ısı iletkenliği, kumun ısı iletkenliğine yakın değerdedir.

Tablo 3.24 Volkanik kül-çimento-köpük karışımı üzerinde yapılan fiziksel deneylerin sonuçları (Nishikawa ve diğ., 1993)

Test	Sonuçlar			
Serbest basınç (su emmiş)	Dayanım (kPa)	358 (332) 440 (452)	Yoğunluk (kN/m ³)	10.6 (9.4) 10.7 (9.9)
Geçirimsizlik	Geçirimsizlik katsayısı, k (cm/sn)	1.74×10^{-4} 2.44×10^{-4}	Yoğunluk (kN/m ³)	12.9 (10.7) 11.9 (9.8)
CBR	CBR (%)	10.7		
Don kabarması	Kabarma oranı (%)	2.3		

Not: Parantez içindeki değerler, numunelerin su emmesinden veya geçirimsizlik deneyinden önceki değerleri göstermektedir.

Tablo 3.25 Arazide yapılan deneylerin sonucu (Nishikawa ve diğ., 1993)

Araziden alınan numunelerin serbest basınç dayanımları		Alt taraf	Üst taraf	Ortalama
	kPa (28 gün)	252 374 358	362 277 321	324
	Yoğunluk (kN/m ³)	9 9.7 10.2	10.2 10 10.9	9.98
Termal iletkenlik kats.	(W/m.K)		0.37 0.36	
Arazide CBR deneyi	CBR (%)		24 30	

Hafif dolgu malzemesi üretimi için volkanik külün kullanılması konusunda yapılan çalışmalar sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Yapılan deneylerde volkanik kül kullanılmıştır. Volkanik kül; çimento, köpük ve su ile karıştırılmış, oluşan solüsyon zamanla sertleşmiş ve dayanım kazanmıştır. 85-110 kg/m³ (doz) çimento miktarına sahip volkanik kül-çimento-köpük solüsyonu, karıştırıldıktan 7 gün sonra 150 kPa serbest basınç dayanımına erişmiştir. Ağırlıkça su/volkanik kül oranı (ayarlanmış su oranı) % 55-60 arasında kaldığı zaman, serbest basınç dayanımı maksimum değerine ulaşmıştır.
- Dolgu uygulamaları sırasında, solüsyonun amaçlanan yoğunluğu elde edilmiş ve yoğunluğun değişken olmadığı tespit edilmiştir.

- Solüsyon yerleştirildikten 28 gün sonraki yoğunluk ile solüsyonun başlangıçtaki yoğunluğu arasında fark yoktur.
- İçine volkanik kül-çimento-köpük solüsyonu dökülen deneme çukurunun tabanında ölçülen düşey toprak basıncı ile karışımın yoğunluğundan hesaplanan teorik düşey toprak basıncı değerleri birbirine yakındır. Yatay toprak basınçları katılaşma sonucu sıfıra yaklaşmaktadır.
- Volkanik kül-çimento-köpük karışımı, dolgu malzemesi olarak kullanılmaya elverişlidir. Volkanik kül-çimento-köpük karışımı; hafifliği ve dik şevlerde kendini kolayca tutması sayesinde, oluşan toprak basınçlarını azaltacaktır (Nishikawa ve diğ., 1993).



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Yapılan laboratuvar çalışmalarında termik santral uçucu külü kullanılmış ve deneyler iki aşama halinde düzenlenmiştir. Birinci aşamada içine herhangi bir katkı malzemesi eklenmeyen uçucu külün geoteknik özellikleri incelenmiş, ikinci aşamada ise uçucu kül, çimento ve hava sürükleyici katkı malzemesi kullanılarak yeterli mukavemet ve dayanıklılığa sahip hafif dolgu malzemesi üretilmiştir.

4.2. Sadece Uçucu Kül Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu kül, Orhaneli Termik Santrali'nden elde edilmiştir. Orhaneli uçucu külünün (OUK) geoteknik özellikleri belirlenmeden önce, bu özellikleri kontrol eden kimyasal özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

4.2.1. Orhaneli Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri

Daha önce de belirtildiği gibi uçucu küller kimyasal özelliklerine göre F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Orhaneli Termik Santrali'nden elde edilen uçucu külün sınıfının belirlenmesi, malzemenin mühendislik özelliklerinin saptanmasında önemli rol oynayacaktır. OUK'nın kimyasal özellikleri, Set Beton'un kimya laboratuvarlarında yapılan deneylerle belirlenmiştir. OUK'nın kimyasal analiz sonuçları, daha önce elde edilen verilerle karşılaştırılmak üzere Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Orhaneli uçucu külünün (OUK) değişik tarihlerde elde edilen kimyasal analiz sonuçları

Oksit Bileşenler	Ağırlık olarak bileşim (%)		
	Orhaneli (Akman ve Yücel, 1995)	Orhaneli (Yücel, 1997)	Orhaneli (Set Beton, 1999)
SiO ₂	48.8	34.8	32.3
Al ₂ O ₃	19.6	19.4	12.9
Fe ₂ O ₃	6.5	3.9	7.1
CaO	10.1	26.3	31.5
MgO	4.0	1.7	3.9
SO ₃	4.20	6.3	11.40
TiO ₂	-	-	-
K ₂ O	-	1.9	1.20
Na ₂ O	-	2.7	0.34
Serbest CaO	-	-	-
Kızdırma Kaybı	-	-	1.59
Σ (SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	74.9	58.1	52.3
Sınıf ve Kimyasal Bileşim	C sınıfı ve Siliko-kalsik	C sınıfı	C sınıfı ve Sülfokalsik

Tablo 4.1'den de görülebileceği gibi, uçucu küllerin kimyasal özellikleri yakılan kömürün cinsi ve saflığına bağlıdır. Kömür yatakları değiştikçe kömürün cinsi de (az bitümlü-bitümlü-lyinyit) değişecek, bu yüzden elde edilen uçucu külün özellikleri de değişecektir. Orhaneli uçucu külü (OUK), farklı zamanlarda değişik kimyasal bileşime sahip olsa bile, elde edildiği kömürün cinsinin fazla değişmediği ortadadır. OUK; C sınıfı uçucu kül olup, az bitümlü veya linyit kömürünün yakılması sonucu ortaya çıkmaktadır. OUK'nın içerdiği basit oksitlerin ağırlıkça oranları zamanla değişmiş ama uçucu külün cinsi değişmemiş ve C sınıfı olarak kalmıştır. C sınıfı kül, F sınıfından farklı olarak puzolanik özelliklere sahip olmasının yanında, su ile birleştiğinde dayanım kazanma özelliğine de (hidrolik bağlayıcı) sahiptir.

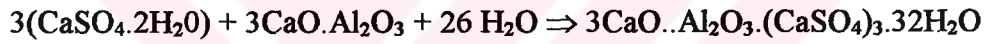
TS 639'da, çimento imal edilirken klinkere veya betona katılacak uçucu küllerin sağlaması gerekli kimyasal özellikler verilmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 Klinkere veya betona katılacak uçucu küllerin sağlaması gerekli kimyasal özellikler (TS 639, 1975)

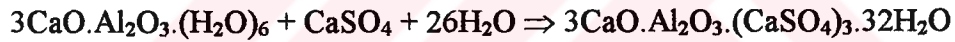
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % en az	70.0
MgO, % en çok	5.0
SO ₃ , % en çok	5.0
Rutubet, % en çok	3.0
Kızdırma kaybı, % en çok	10.0

Deneylerde kullanılan Orhaneli uçucu külü numunesinin, TS 639'da verilen şartlara uymadığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda; uçucu külün zeminde dolgu malzemesi olarak uygunluğu araştırılacağı için, dayanım yönünden sakınca teşkil etmeyeceği düşünülmüştür. Buna rağmen yüksek SO₃ miktarının (%11.40), katılaştırmış uçucu kül dolgularında Candlot tuzu (etrenjit) oluşumuna imkan verebileceği, ortamın katı olması sebebiyle genleşen tuzun, dolguda şişme ve çatlaklar meydana getirebileceği unutulmamalıdır. Etrenjit oluşumu; uçucu külün, çimentoyla karıştırılıp kullanılmasında da aynı sakıncaları yaratacaktır.

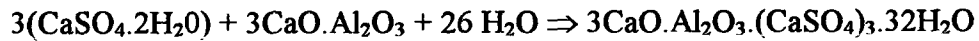
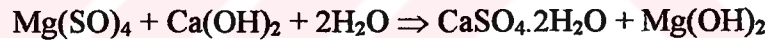
C₃A'nın (3CaO.Al₂O₃) sülfatlarla oluşturduğu reaksiyon (Etrenjit oluşumu), şu şekilde meydana gelir: C₃A hidratlaşınca genellikle C₃A.(H₂O)₆ tuzuna dönüşür. Bu hidrate tuz da C₃A gibi CaSO₄ ile birleşir ve Candlot tuzuna (3CaO.Al₂O₃.(Ca.SO₄)₃.32H₂O) dönüşür. Bu reaksiyonu meydana getiren alçıtaşı oluşumu (CaSO₄.2H₂O) ise SO₃'ün serbest Ca(OH)₂ ile birleşmesiyle meydana gelir. Candlot tuzunun (Etrenjit), sülfat etkisiyle oluşum mekanizmaları aşağıda verilmiştir:



veya



veya



C sınıfı uçucu kül özelliklerine sahip olan Orhaneli uçucu külü, kimyasal bileşim olarak siliko-kalsik ile sülfat-kalsik arasında değişim göstermektedir. Orhaneli uçucu külü; suyla birleşmesi halinde kireçle stabilizasyona gerek kalmadan bağlayıcı özellik göstermektedir.

4.2.2. Orhaneli Uçucu Külünün Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi

4.2.2.1. Elek Analizi

Elek analizi; zeminlerin bir seri standart elekten geçirilmesi ve değişik boyutlar arasında kalan danelerin ağırlık yüzdesinin (toplam kuru ağırlığa oranı) saptanması esasına dayanır. Zemin daneleri büyüktен küçüğe doğru çakıl, kum, silt, kil olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Bu grupları birbirinden ayıran boyut aralıkları değişik sınıflandırma sistemlerinde bazı küçük farklılıklar göstermekle birlikte, yaygın olarak kabul gören sınır değerler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Zeminlerin dane boyutuna göre sınıflandırılması

Zemin Cinsi	Dane Boyutu (mm)
Çakıl	2.00 (veya 4.75) – 75.0
Kum	0.075 – 2.00 (veya 4.75)
Silt	0.002 (veya 0.005) – 0.075
Kil	<0.002 (veya 0.005)

Deneylerde kullanılan eleklerin ebatları Tablo 4.4'te verilmiştir. Sırasıyla zemin, en büyük açıklıklı elekten en küçük açıklıklı eleğe doğru bir seri elekten geçirildiği zaman, birbirini takip eden ve bir elekten geçip öbürünün üzerinde kalan danelerin çap sınırları belirlenmiş olur. Elek analizi; çapı 0.074 mm'den (200 No'lu elek) büyük zemin danelerinin derecelenmesinin belirlenmesi için yapılmaktadır.

Tablo 4.4 Deneyde kullanılan standart elekler

Elek No:	Elek Açıklığı (mm)
4	4.75
10	2.00
20	0.85
40	0.425
60	0.25
100	0.15
200	0.075

Orhaneli uçucu külünün (OUK) granülometri eğrisinin belirlenmesi ve dane boyutları benzer olan zeminlerle kıyaslanabilmesi için elek analizi yapılmıştır. Elek analizi için etüvde kurutulmuş 500 gr OUK numunesi standart eleklerden geçirilmiştir. OUK numunesi çok ince olduğu için 100 No'lu elek dahil olmak üzere,

numunenin % 100'ü bütün eleklerden geçmiştir. Daha sonra uçucu kül numunesi suyla karıştırılarak 200 No'lu elekten elenmiş ve eleğin üstünde kalan kısmın % 1'den az olduğu gözlenmiştir. Elek analizi deneyi üç defa tekrarlanmış ve 200 No'lu eleğin üstünde kalan kısmın % 1'den az olduğu belirlenmiştir. Danelerin belirli bir derecelenmeye sahip olmalarının nedeni; uçucu külün elde edildiği kömürün parçalanma ve yakılma işleminin sabit faktörlere bağlı olmasıdır. Kömürün toz haline getirilişinin ve yakılma işleminin makinelerle yapılması, oluşan uçucu külün sıcak baca gazlarıyla taşınıp, elektrostatik çökelticiler veya siklon ayırıcıları yardımıyla tutulması, uçucu külün dane boyutunun standartlaşmasına yardımcı olmaktadır. Orhaneli uçucu külü numunesinin ağırlıkça % 99'dan fazla kısmının 200 No'lu eleğin altına geçmesi, uçucu küllerin genellikle silt boyutunda olduğunu kanıtlar niteliktedir.

4.2.2.2. Hidrometre Analizi

Granülometri eğrisinin tam olarak belirlenebilmesi için, 200 No'lu eleğin altına geçen numunenin dane çapı dağılımının saptanması gerekir. Bunun için yapılması gereken deneye hidrometre analizi denir. Hidrometre deneyi, danelerin çökme hızlarının dane çapına göre değiştiği kabulüne dayanmaktadır.

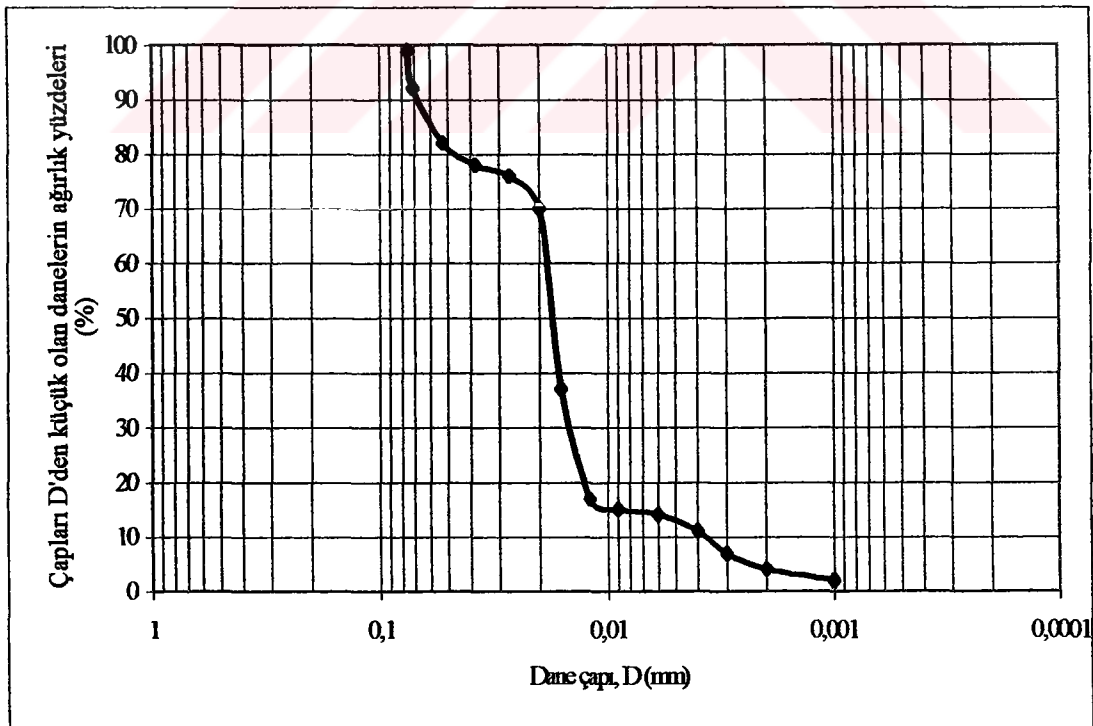
Deneyin yapılabilmesi için; elek analizinde 200 No'lu elekten geçen uçucu kül numunesi etüvde kurutulmuş ve kurumuş numunenin 50 gramı alınıp üstüne 100~150 cl kadar ayrıştırıcı madde (sodyum hexametafosfat, NaPO_3) dökülerek 24 saat bekletilmiştir. Fakat 200 No'lu eleğin altına geçen uçucu kül numunesi suyla birleşmiş olduğu için bağlayıcı özellik kazanmış ve etüve konulup, kurutulduktan sonra iyice sertleşmiştir. Suyla karışan uçucu kül numunesinin etüve konulmasıyla, buhar kürü yapıyor gibi prizinin hızlandığı ve sertleştiği gözlenmiştir. Kil numunelerdeki elektrik yüklerini nötr hale getirerek kil danelerini ayrıştırmak için kullanılan sodyum hexametafosfat, sertleşmiş uçucu kül numunesinin üzerine döküldüğü zaman numunenin çözülmesini sağlamamıştır.

Orhaneli uçucu külü üzerinde yapılan elek analizinden belirlendiği kadarıyla, uçucu kül numunesinin 200 No'lu eleğin üstünde kalan kısmı % 1'den az olduğu için, uçucu kül numunesi suyla yıkanıp 200 No'lu elekten geçirilmeden, doğrudan etüve konulmuştur. Etüvde doğal nemini kaybetmesi sağlanan numuneden, kurutulduktan

sonra 50 gr alınıp, üstüne 100~150 cl kadar sodyum hexametafosfat dökülmüştür. Numune, daha sonra bekletilmeden hidrometre kabı içine bir miktar su ile birlikte konulmuş ve 10-15 dakika kadar basınçlı hava ile karıştırılmıştır. 1000 cl oluncaya kadar üzerine su ilave edildikten sonra hazırlanan süspansiyonun içine hidrometre aleti bırakılarak 0", 15", 30", 1' ve 2' okumaları yapılmıştır (Şekil 4.1). Daha sonra hidrometre aleti kap içinden çıkarılarak başka bir kaba alınmıştır. Hidrometre aleti 4', 8', 15', 30', 1^h, 2^h, 4^h, 8^h ve 24^h okumaları yapılması için her seferinde hidrometre kabına tekrar daldırılmıştır. Orhaneli uçucu külünün granülometri eğrisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Ayrıca hidrometre analizine ait föyler Ek B'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Hidrometre kabı



Şekil 4.2 Orhaneli uçucu külünün (OUK) granülometri eğrisi

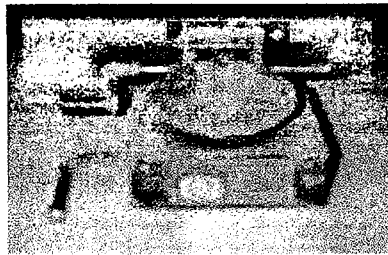
Şekil 4.2’den de görülebileceği gibi; Orhaneli uçucu külü, dane dağılımı oldukça uniform olan silt boyutunda bir malzemedir.

4.2.2.3. Kıvam Limitleri

İnce daneli zeminlerin sınıflandırılmasının kesin olarak yapılabilmesi için gerekli olan diğer bir tanımlama da zeminin kıvam limitleridir. Zeminin viskoz bir sıvıdan, plastik kıvama dönüştüğü su muhtevası değerine “Likit Limit” (w_L), zeminin plastik bir malzemedan yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü su muhtevası değerine “Plastik Limit” (w_P) ve kurumakta olan zeminin hacminin en düşük değere ulaştığı andaki su muhtevası değerine “Rötre Limiti” (w_s) denilmektedir. OUK’nın tam olarak sınıflandırılabilmesi için kıvam limiti deneyleri düzenlenmiştir.

Likit Limit

Önce etüvde kurutulan numune daha sonra 40 No’lu elekten geçirilir. Yeterli miktarda numune (yaklaşık 250 gr) alındıktan sonra porselen bir kapta her seferinde az miktarda su ilave ederek karıştırılır. Daha sonra bir miktar numune alınarak Şekil 4.3’deki gibi bir Casagrande aletinin kasesine spatula yardımıyla sıvanır. Kaseinin tam ortasına Şekil 4.3’deki gibi bir kaşık yardımıyla derinliği 1 cm olan bir yarık açılır. Bundan sonra deney aletinin kolu saniyede 2 düşüş sağlayacak şekilde çevrilir. Casagrande kasesi, kol her çevrildiğinde 1 cm yükseklikten düşecektir. Kol, açılan yarığın 1-1.5 cm kadar kapanmasını sağlayana kadar çevrilir ve bu kapanmayı sağlayacak düşüş sayısı belirlenir. Deneyde en az üç nokta elde edilmeye çalışılır ve her seferinde bir kaba bir miktar numune alınarak tartıldıktan sonra etüve konulur. Hesaplamalar için etüvde kurutulan numuneler tartılır ve su muhtevaları bulunur. Her vuruş sayısına tekabül eden su muhtevası değeri yarı logaritmik tablo üzerinde işaretlenir. Bu noktalardan geçecek şekilde bir çizgi çizilerek 25 vuruşa isabet eden su muhtevası bulunur. Bu su muhtevası numunenin likit limitidir.



Şekil 4.3 Casagrande aleti

Plastik Limit

Likit limit deneyine tabi tutulan numune 24 saat dışarıda bekletildikten sonra, bir mermer üzerinde 3 mm çapında çubuklar oluşuncaya kadar el altında yuvarlanır. Bu duruma gelen numunede (3 mm çapındaki çubuklarda) çatlaklar oluşmaya başladığı an, numune plastik limite ulaşır. Plastik limitteki su muhtevasını belirlemek için çubuklar kaplara yerleştirilip, etüve konur. Kurutulan kaplardaki numuneler tartılır ve numunenin plastik limitini veren su muhtevası değeri bulunur. Daha sonra, numunenin likit limit değerinden plastik limit değeri çıkartılır ve numunenin plastik olarak davrandığı su muhtevası aralığı yani “Plastisite İndisi” bulunur. Bulunan bu değerlerden sonra plastisite indisi-likit limit grafiğinden (Plastisite kartı) yararlanılarak numunenin kesin sınıflandırılması yapılır.

Orhaneli uçucu külünün kıvam limitlerini belirlemek için yapılan deneylerin sonucu Tablo 4.5’de verilmiştir. Yapılan deneylere göre, Orhaneli uçucu külünün plastik özellik göstermediği saptanmıştır. Bunun nedeni; OUK’nın sahip olduğu yüksek CaO (kalsiyum oksit) değeri olarak gösterilebilir. OUK, likit limit deneyinde; su muhtevası azaldıkça kimyasal reaksiyona girme ve katılaşma eğilimi göstermekte, su muhtevası arttıkça da plastik olmayan siltler gibi davranıp suyu yüzeye verme eğilimi göstermektedir.

Tablo 4.5 Orhaneli uçucu külünün kıvam limitleri

Likit Limit, w_L (%)	Plastik Limit, w_p (%)	Plastisite İndisi (I_p)
-	Plastik değil (NP)	-

4.2.2.4. Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)

Orhaneli uçucu külüne ait dane birim hacim ağırlığı iki ayrı yöntemle bulunmuştur. Birinci yöntemde piknometre kabı ve damıtık su, ikinci yöntemde ise; genellikle çimento ve diğer bağlayıcı maddelerin dane birim hacim ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan Le Chatelier şişesi kullanılmıştır.

γ_s ’in Piknometre Kabı Kullanılarak Bulunması

Bu deney, etüvde önceden kurutulan üç ayrı numune üzerinde yapılmıştır. Her numune 50 gr ağırlığındadır. Deneyin yapılabilmesi için piknometre kabı ağzına

kadar su doldurularak tartılır. Daha sonra su boşaltılır ve numune piknometre kabı içine konur. Kabın içinde bulunan numunenin üzerini örtecek kadar su doldurulduktan sonra, piknometre kabı 25-30 dakika vakuma tabi tutulur. Vakum esnasında piknometre kabı her 5 dakikada bir çalkalanır ve danelerin arasındaki boşluklardaki havanın dışarı çıkması sağlanır. Vakum, hava kabarcıklarının su yüzüne çıkması bitinceye kadar uygulanır. Piknometre kabı ağzına kadar tekrar su ile doldurulduktan sonra, içindeki numunenin iyice çökmesi beklenir ve tartılır. Bu deneyde, özgül ağırlığı belli olan damıtık su kullanılır.

γ_s 'in Le Chatelier Şişesi Kullanılarak Bulunması

Le Chatelier şişesi, içinde su bulunmayan gazyağı veya petrol kullanılarak 0 ile 1 mililitre işaretleri arasında bir noktaya kadar doldurulur. Bundan sonra 0.1 mg duyarlılıkla tartılan 45-50 gr uçucu kül numunesi kuru bir cam huniden yavaş yavaş ve dikkat edilerek balon içerisine akıtılır. Numune doldurulurken balon hafifçe çalkalanarak uçucu külün balonun boynuna yapışması önlenir. Bütün uçucu külün balona aktarılmasından sonra huni alınır. Şişenin kapağı kapatılır ve balon kendi eksenini etrafında döndürülerek hava kabarcıklarının sıvı yüzeyine çıkması sağlanır. Bu süre sonunda sıvı hacmi tekrar okunur.

Orhaneli uçucu külünün hidrolik bağlayıcılık özelliği de dikkate alınarak yapılan iki türlü deney yardımıyla elde edilen dane birim hacim ağırlıkları (γ_s) ve özgül ağırlıklar, daha önce elde edilen verilerle karşılaştırılmak üzere Tablo 4.6'da verilmiştir. Ayrıca deneye ait föyler Ek B'de verilmiştir.

Tablo 4.6 Orhaneli uçucu külünün dane birim hacim ağırlığı ve özgül ağırlığı

	Piknometre Deneyi	Le Chatelier Deneyi	Set Beton (1999)	Yücel, 1997	Akman ve Yücel, 1995
γ_s (kN/m ³)	27.08	28.06	28.06	23.54	16.97
G_s	2.76	2.86	2.86	2.4	1.73

Elde edilen sonuçlara göre Orhaneli uçucu külünün dane birim hacim ağırlığının standart bir değeri olmadığı ve uçucu küllerin dane özgül ağırlıklarının genellikle 1.9 ile 2.5 arasında değiştiği gözönüne alınırsa, dane birim hacim ağırlığının diğer uçucu küllere nazaran yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca kömür yatakları değiştikçe, aynı termik santralde üretilen uçucu küllerin dane birim hacim ağırlıkları da zamanla değişmektedir.

4.2.2.5. Kompaksiyon Deneyi

Zemin danelerinin arasındaki boşluklarda bulunan havanın en aza indirilmesi yani zeminin kuru birim hacim ağırlığının maksimum değerine ulaşması; zeminlerin kayma dayanımını ve taşıma gücünü arttıracak, oturmaları minimuma indirecek, geçirimsizliği azaltacak, ayrıca istenmeyen hacim değişikliklerinin kontrol edilmesini sağlayacaktır. Maksimum kuru birim hacim ağırlığın ve bu değerin elde edilmesini sağlayan optimum su muhtevasının bulunması için yapılan deneye kompaksiyon deneyi denir.

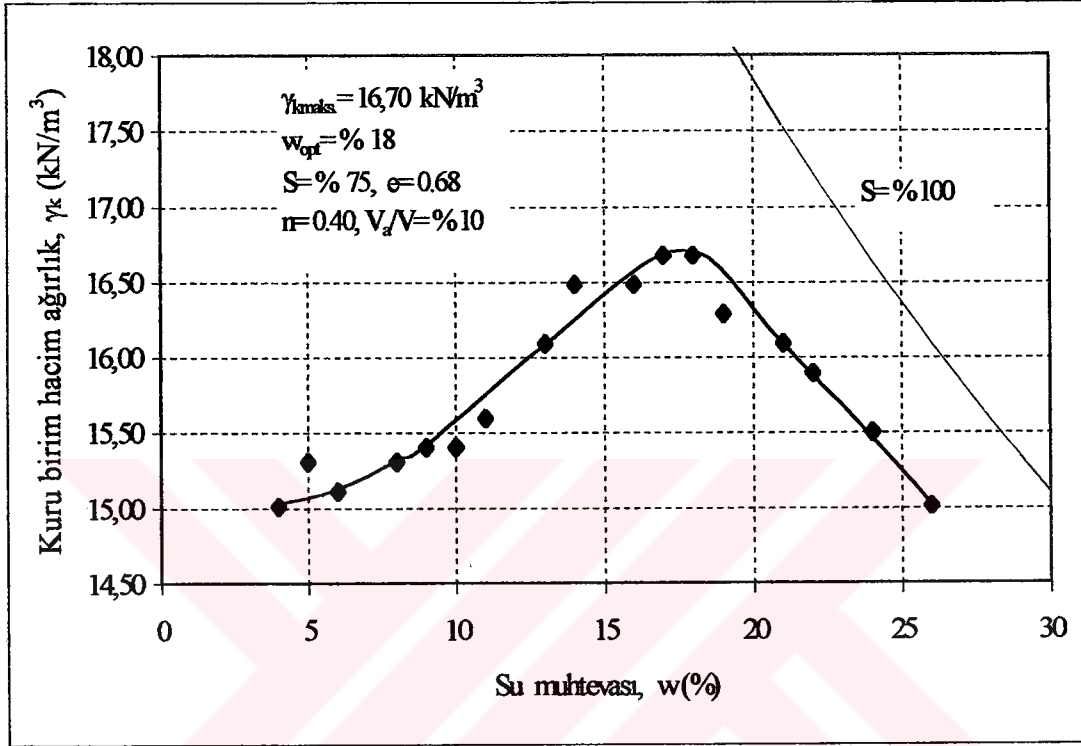
Orhaneli uçucu külünün maksimum kuru birim hacim ağırlığının ve optimum su muhtevasının belirlenmesinde Standart Proktor deneyi kullanılmıştır. Standart Proktor deneyi, Şekil 4.4’de görülen 950 cm³ hacmindeki kabın içine numunenin yükseklikleri eşit 3 tabaka halinde yerleştirilmesi ve 2.5 kg ağırlığındaki tokmağın her tabakaya 30.5 cm yükseklikten 25’er kere düşürülmesi ile yapılır. Bu deneyde kompaksiyon enerjisi 590 kJ/m³’ür.



Şekil 4.4 Standart Proktor kalıbı ve tokmağı

Deney için gerekli uçucu kül numunesi, 50 cm çaplı plastik bir tepsi içinde suyla karıştırılmıştır. Uçucu kül numunesi ile suyun karıştırılması, numunenin her tarafına eşit oranda suyun püskürtülmesi ile yapılmıştır. Deney yapılırken ilave edilen su miktarı her seferinde eşit oranda arttırılmıştır. Numune; su ilave edildikten sonra her seferinde ufak topraklar kalmayacak şekilde 5-10 dakika süresince el ile iyice karıştırılmıştır. Ayrıca uçucu kül numunesi su ile karıştırıldıktan sonra uzun bir süre bekletilirse sertleşecektir. Bu nedenle, deney ara vermeksizin hızlı bir şekilde yapılmıştır. Kompaksiyon uygulandıktan sonra her seferinde kalıp ve numune

birlikte tartılmış, daha sonra kalıbın üst ve alt kısmına yakın bölgeden bir miktar numune alınmış, ağırlığı belirlenmiş ve etüve konulmuştur. Numune ağırlığı düşme eğilimi gösterdiğinde, deneye son verilmiştir. Etüve konulan kaplar 24 saat sonra tekrar tartılmıştır. Orhaneli uçucu külüne ait kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği Şekil 4.5’de, hesaplara ait föyler Ek B’de verilmiştir.



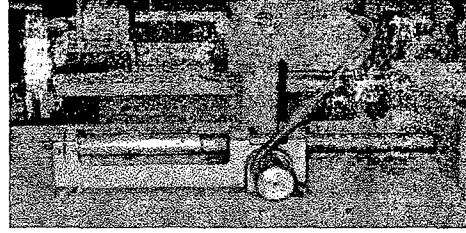
Şekil 4.5 Orhaneli uçucu külüne ait kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası eğrisi

4.2.2.6. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi; çevre basıncı olmaksızın, malzemenin eksenel yüklenmesi sırasında oluşan kayma mukavemetini bulmak için yapılmaktadır. Bu deney için şu varsayımlar yapılmıştır:

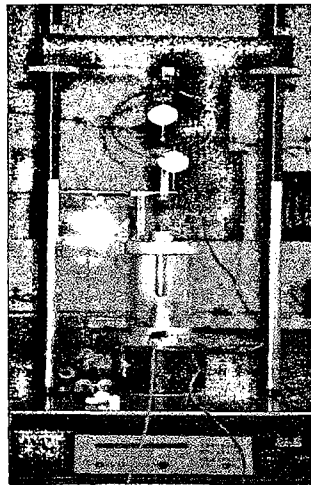
- Numune; fisür, zayıf zon gibi süreksizlikler içermemelidir.
- Numune ince daneli olmalıdır. Çünkü numuneyi çevreleyen negatif çevre gerilmesi, rezidüel boşluk suyu basıncının bir fonksiyonudur.
- Numune hızlı kesilmelidir. Deney, drenajsız koşullarda yapılır ve sonuçlar toplam gerilme cinsindendir.

Optimum su muhtevasında kompaksiyona tabi tutulan Orhaneli uçucu külü numuneleri üzerinde serbest basınç mukavemeti deneyleri düzenlenmiştir. Optimum su muhtevasına ($w_{opt}=0\%18$) sahip numuneler Proktor kalıbından, 38 mm çapındaki tüpler yardımıyla alınmıştır. Numuneler daha sonra Şekil 4.6’da görülen aletle tüplerden çıkarılmıştır.



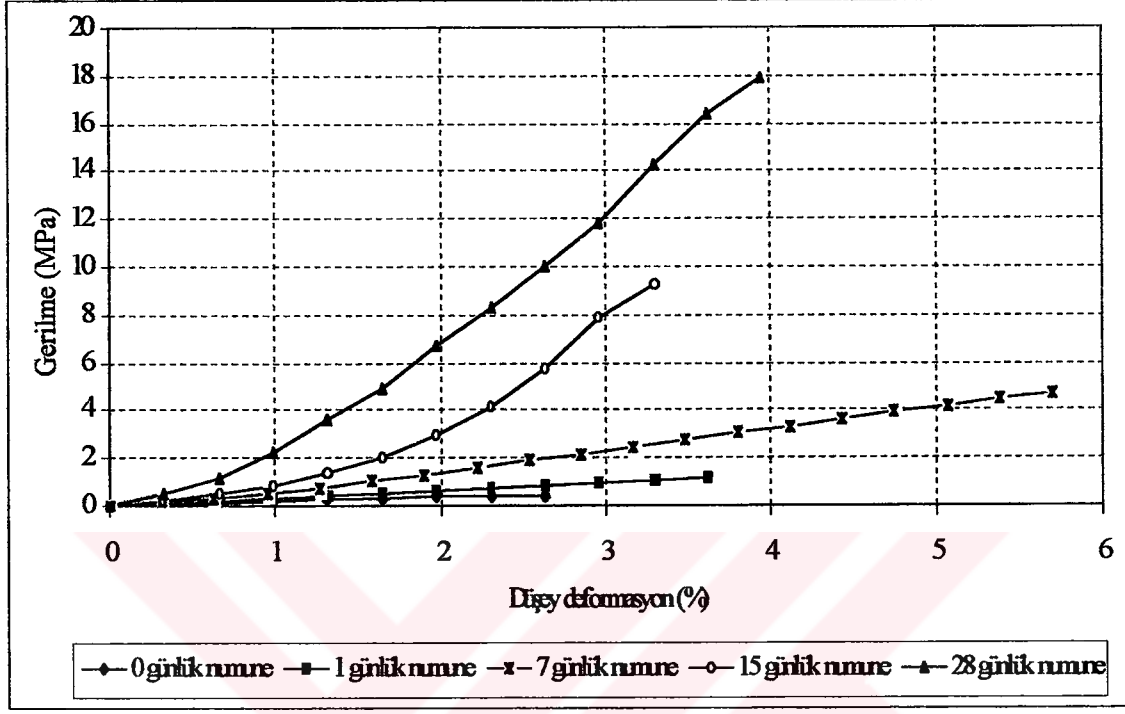
Şekil 4.6 Serbest basınç deneyinde kullanılacak numunenin tüpten çıkarılışı

Numune alma tüplerinden çıkarılan numunelerin bir kısmı hemen deneye tabi tutulmuş, bir kısmı da daha sonra deneye tabi tutulmak üzere streç filme sarılarak nem odasına konulmuştur. Nem odasına konulan numuneler; 1, 7, 15 ve 28 gün küre tabi tutulmuştur. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce traşlanarak gerekli boyutlara getirilmiştir. Serbest basınç deneyleri, Şekil 4.7’de görülen deformasyon kontrollü üç eksenli basınç aletlerinde yapılmıştır. Şekil değiştirmenin belli değerleri için deformasyon saatinden düşey yük değerleri ölçülmüştür. Numunelerin yüklenme hızı 1.5 mm/dakika’dır. Bu deneyde en çok dikkat edilmesi gerekli nokta, numunenin silindirik formda hazırlanması aşamasında örselenmeyi minimum derecede tutmaya çalışmak olmuştur.

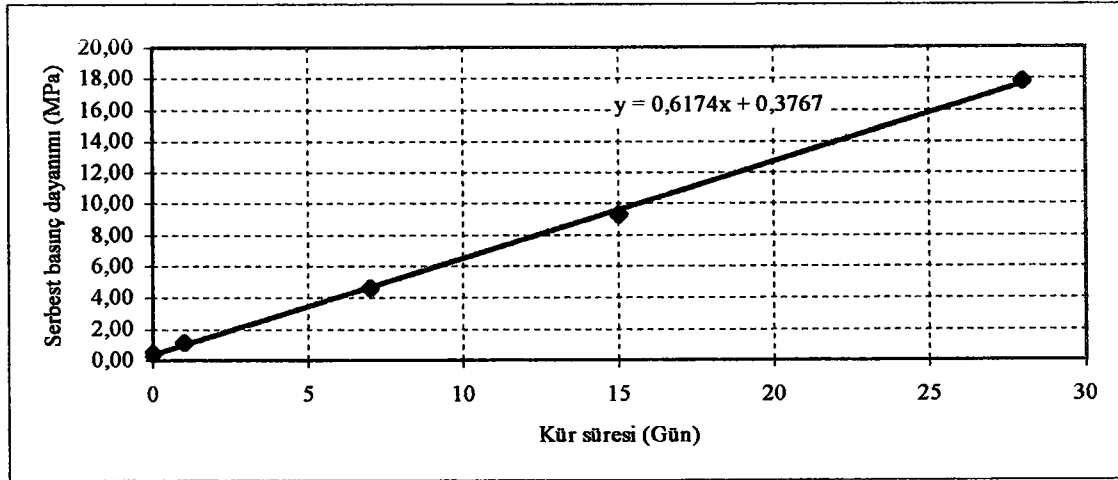


Şekil 4.7 Serbest basınç deneyinde kullanılan üç eksenli basınç aleti

Küre tabi tutulan uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.8’de, serbest basınç dayanımının kür süresine bağlı değişimi Şekil 4.9’da, deneylere ait föyler ise Ek B’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.7’de özetlenmiştir.



Şekil 4.8 Optimum su muhtevasına sahip uçucu kül numunelerinin gerilme – düşey deformasyon eğrilerinin kür süresine bağlı değişimi



Şekil 4.9 Optimum su muhtevasına sahip uçucu kül numunelerinin serbest basınç dayanımlarının kür süresine bağlı değişimi

Tablo 4.7 Proktor deneyinden alınan optimum su muhtevasına sahip uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyinin sonuçları

Kür Süresi (gün)	Optimum Su Muhtevası, w_{opt} (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{kmaks} (kN/m ³)	Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Kırıldığı Andaki Deformasyon, ϵ_f (%)	Young Modülü (Elastisite Modülü) (MPa)	Def. Anındaki Sekant Modülü (MPa)
0	18	16.70	0.44	2.63	21.20	16.64
1	18	16.70	1.12	3.62	34.29	31.03
7	18	16.70	4.66	5.70	78.65	81.78
15	18	16.70	9.30	3.29	300	282.64
28	18	16.70	17.85	3.95	487.66	451.93

Şekil 4.8'den de görülebileceği gibi, kompaksiyona tabi tutulmuş uçucu kül numuneleri kür süresine bağlı olmaksızın gevrek malzeme özelliği göstermişlerdir. Numuneler parçalanmadan önce belirli bir akma sahanlığına veya pik gerilmeye ulaşmamışlardır. Şekil 4.9'dan görülebileceği gibi, küre tabi tutulan uçucu kül numuneleri dayanım kazanmaya devam etmişlerdir. Hidratasyon başlangıcından sonraki 360 günlük periyot içinde uçucu küllerin dayanımlarında belirgin bir artış olduğu göz önüne alınırsa, durumun normal olduğu anlaşılabılır.

4.2.2.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

CBR deneyi; yol inşaatlarında kullanılan zeminlerin taban veya temel altı malzemesi olarak uygunluğunun belirlenmesi için geliştirilmiştir. İkinci Dünya Savaşında havaalanı inşaatlarında da uygulanmıştır. CBR deneyi (ASTM tarafından basitçe taşıma oranı testi denmektedir), belirli su muhtevasına ve birim hacim ağırlığa sahip zeminlerin kayma dayanımını ölçer. CBR deneyi tarafından bir taşıma oranı sayısı belirlenir fakat bu sayı bir zemin türü için sabit olmayıp, zeminin deney sırasındaki su muhtevasına ve kuru birim hacim ağırlığına bağlıdır. CBR deneyi sonucunda elde edilen oran ampirik olup, zeminlerin temel kayma dayanımı parametrelerini (kohezyon vb.) bulmak için kullanılmaz.

CBR değeri (veya basitçe CBR), 19.4 cm² alana sahip penetrasyon pistonunun; belirli su muhtevasına ve birim hacim ağırlığına sahip sıkıştırılmış zemine belirli miktarda batması için gerekli yükün, kırmataştan sıkıştırılarak hazırlanmış standart bir numuneye aynı miktarda batması için gerekli olan yüke oranlanmasıyla bulunur. CBR değerinin bulunuşu Bağıntı 4.1'de verilmiştir:

$$\text{CBR (\%)} = \frac{\text{deneydeki birim yük}}{\text{standart birim yük}} \times 100 \quad (4.1)$$

Bağıntı 4.1'den de görülebileceği gibi CBR sayısı standart birim yüke bağlı bir orandır. Pratikte oran simgesi (%) kullanılmaz ve oran sadece bir sayı olarak yazılır. CBR deneyinde kullanılan standart birim yükler Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8 CBR deneyinde kullanılan standart birim yükler (Bowles, 1988)

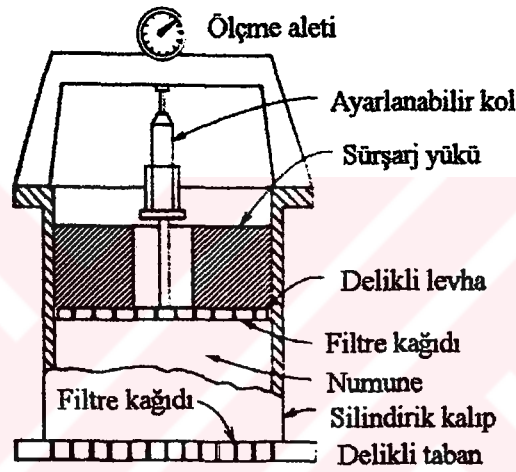
Penetrasyon		Standart Birim Gerilme	
(mm)	(inç)	(MPa)	(psi)
2.5	0.10	6.9	1000
5.0	0.20	10.3	1500
7.5	0.30	13.0	1900
10.0	0.40	16.0	2300
12.7	0.50	18.0	2600

CBR sayısı genellikle 2.5 mm penetrasyon için gerekli yük oranına göre belirlenir. Bununla birlikte eğer 5 mm penetrasyon için gereken CBR değeri daha büyük olursa deney tekrar edilmelidir. Tekrar edilen deney sonunda 5 mm penetrasyon için elde edilen CBR değeri, 2.5 mm penetrasyon için gerekli değere göre büyük çıkarsa, 5 mm penetrasyon için gerekli CBR değeri kullanılmalıdır. CBR deneyleri genellikle Standart veya Modifiye Proktor deneyleri sonucunda elde edilen optimum su muhtevasına ve maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip zeminler üzerinde yapılır. 15.2 cm çapında ve 17.8 cm yüksekliğindeki kalıplarda, Tablo 4.9'da verilen kompaksiyon metotlarından biri uygulanarak numune hazırlanır.

Tablo 4.9 CBR deneyi için numune hazırlanmasında kullanılan metotlar

Metot	Vuruş Sayısı	Tabaka Sayısı	Çekiç Ağırlığı (N)
D 698			
B (ince daneli zemin)	56	3	24.5
D (kaba daneli zemin)	56	3	24.5
D 1557			
B (ince daneli zemin)	56	5	44.5
D (kaba daneli zemin)	56	5	44.5

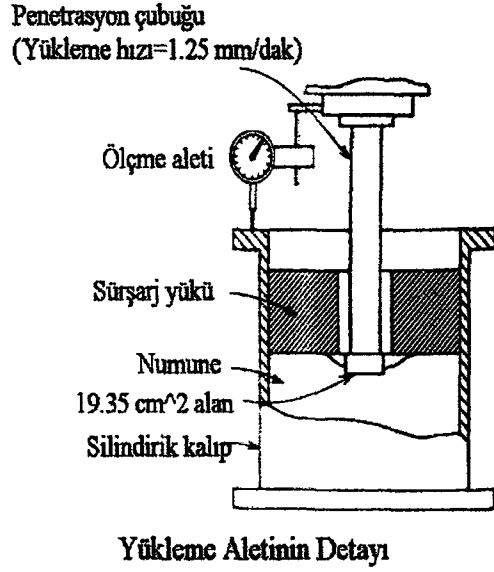
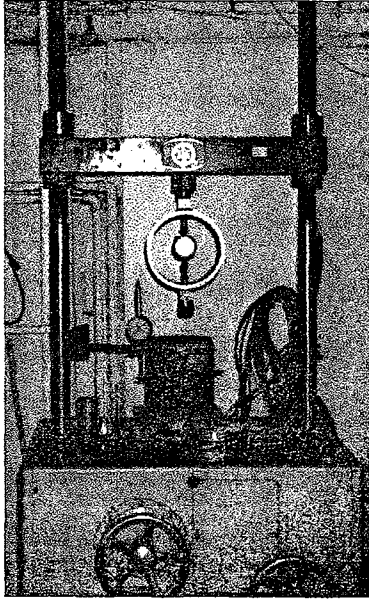
Numune genellikle iki ayrı kalıp halinde sıkıştırılarak hazırlanır. Birinci kalıptaki numune, sıkıştırma uygulandıktan hemen sonra deneye tabi tutulur. İkinci kalıptaki numune 96 saat su altında tutulduktan sonra deneye tabi tutulur. İkinci kalıptaki numune, üzerine arazideki durumu temsil etmek için yaklaşık 44.4 N ağırlığındaki sürşarj yükü konularak su altına konulur. Bu arada numunede meydana gelebilecek kabarmayı ölçmek için, numunenin üzerine 0.01 mm hassaslıkta ölçme yapabilen bir alet konur (Şekil 4.10). 96 saatlik periyot sırasında seçilen zamanlarda kabarma okumaları alınır ve bu periyot sonunda doymun haldeki zeminin CBR değerini bulmak için deney yapılır. Kabarma 96 saatlik periyot sırasında son bulmazsa, kabarma bitene kadar numune su altında tutulur.



Şekil 4.10 Islak CBR deneyinde kabarmanın ölçümü

Numune optimum su muhtevasına sahipken veya suya doymunken yapılan CBR testlerinin her ikisinde de penetrasyon uygulanırken kaplama yüklerini temsil etmek için en az 44.4 N ağırlığındaki sürşarj yükü numunenin üstüne konur. Şekil 4.11’de CBR deneyinde kullanılan yükleme aleti ve yükleme detayı gösterilmiştir. Suya doymun numune üzerinde yapılan deney iki durum hakkında bilgi verir:

- Zemin suya doymun hale gelince kaplamada meydana gelebilecek kabarma saptanır.
- Zemin suya doymun hale gelince taşıma gücünde meydana gelebilecek azalma bulunur.

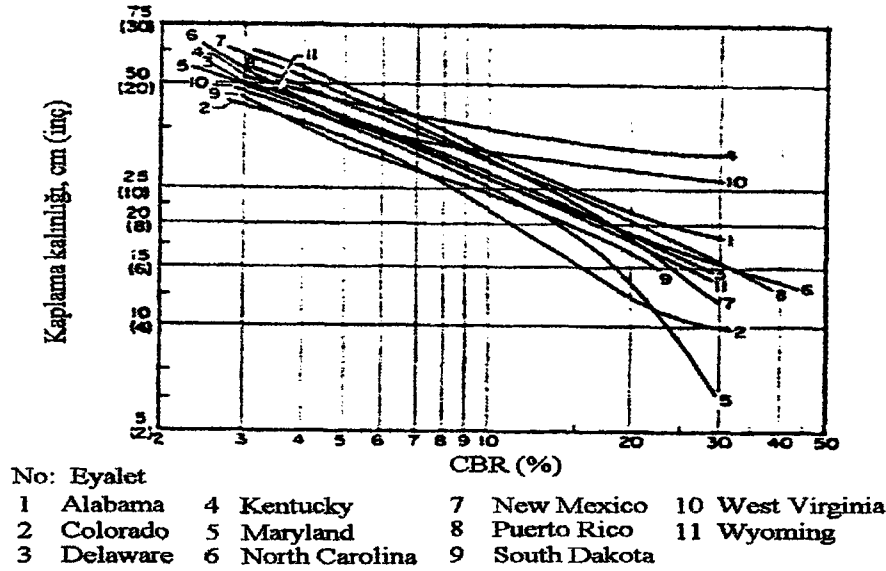


Şekil 4.11 CBR deneyinin yapılışı ve yükleme aletinin detayı

CBR değeri, yol ve havaalanı kaplamalarının altında kullanılan zeminlerin taban malzemesi olarak performansını saptamak için kullanılır. Tablo 4.10, bu konu hakkında genel bir değerlendirme için kullanılabilir. Şekil 4.12’de, Amerika’nın çeşitli eyaletlerinde CBR değerine göre kaplama kalınlıklarının belirlenmesi için hazırlanmış bir grafik görülmektedir.

Tablo 4.10 CBR değerlerinin sınıflandırılması (Bowles, 1988)

CBR Değeri (%)	Genel Değerlendirme	Kullanım Alanı	Sınıflandırma Sistemi	
			Birleşik	AASHTO
0-3	Çok zayıf	Doğal zemin	OH,CH,MH,OL	A5,A6,A7
3-7	Zayıf	Doğal zemin	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6,A7
7-20	Orta	Alt temel	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2,A4,A6,A7
20-50	İyi	Temel veya Alt temel	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A1b,A2-5,A3,A2-6
>50	Çok iyi	Temel	GW,GM	A1a,A2-4,A3

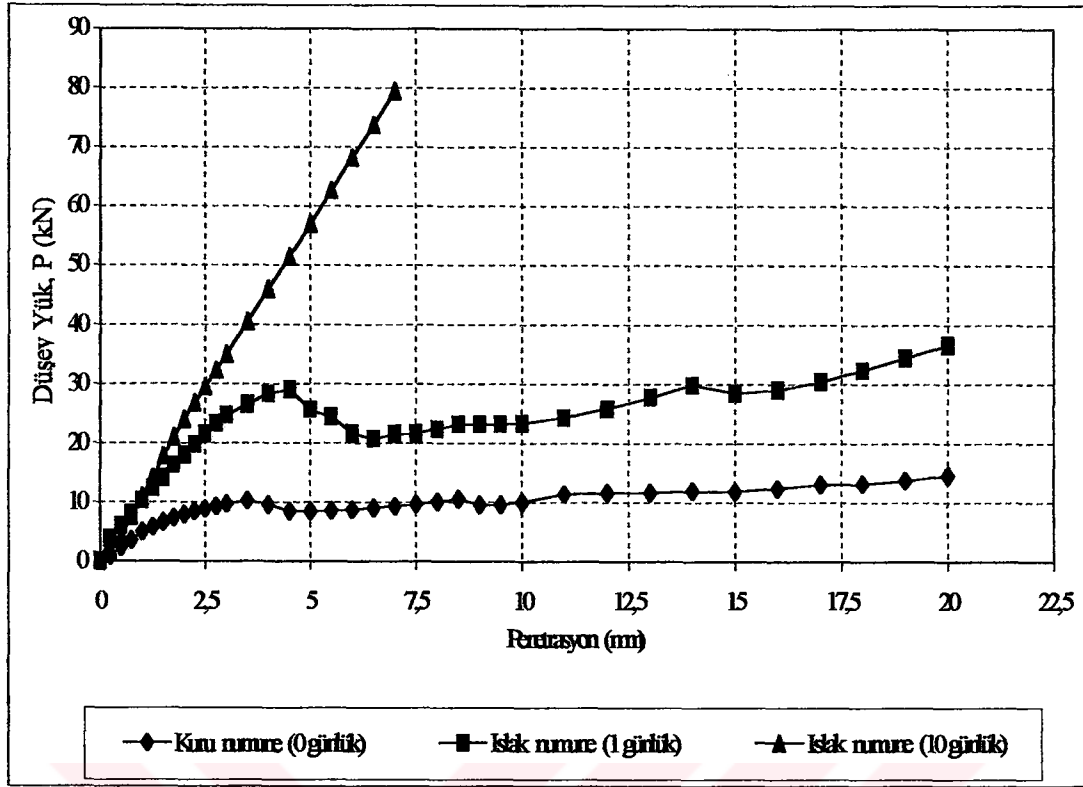


Şekil 4.12 Amerika'nın değişik eyaletlerinde, CBR değerlerine göre kaplama kalınlıklarının belirlenmesi için kullanılan eğriler

Orhaneli uçucu külü üzerinde yapılan CBR deneyinde numunenin hazırlanması için Standart Proktor testinde uygulanan enerji (590 kJ/m^3) kullanılmıştır. Uçucu kül numunesi optimum su muhtevasına sahipken, 24.5 N ağırlığındaki çekiçle her tabakaya 61 kere vurularak 3 tabaka halinde sıkıştırılmıştır. CBR deneyi yapmak için üç ayrı numune hazırlanmış; birinci numune hazırlandıktan hemen sonra deneye tabi tutulmuş, ikinci ve üçüncü numune suda bekletilmiştir. İkinci numune; suda bir gün bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuş, üçüncü numune ise; şişmesi son bulana kadar suda bekletilmiştir. Yapılan CBR deneylerinin sonuçları Tablo 4.11'de, elde edilen düşey yük-penetrasyon eğrileri Şekil 4.13'de, deneye ait föyler ise Ek B'de verilmiştir.

Tablo 4.11 Orhaneli uçucu külü kullanılarak yapılan CBR deneylerinin sonuçları

Numune Çeşidi	Su Muhtevası, w (%)		Doğal Birim Hacim Ağırlık, γ_n (kN/m^3)		CBR (%)	Şişme (%)
	Deneyin başında	Deneyin sonunda	Deneyin başında	Deneyin sonunda		
Kuru numune (0 günlük)	18	18	19.61	19.61	67	-
Islak numune (1 günlük)	18	21	19.66	20.21	160	-
Islak numune (10 günlük)	18	30	19.57	21.49	285	7.2



Şekil 4.13 Orhaneli uçucu külü üzerinde yapılan CBR deneyleri sonucunda elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri

Standart Proktor enerjisi uygulanarak sıkıştırılmış uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda, Orhaneli uçucu külünün CBR değerlerinin çok yüksek olduğu ve zamanla arttığı görülmektedir. Orhaneli uçucu külü; sıkıştırıldığı andan itibaren, iyi derecelenmiş çakıl zeminle kıyaslanabilir taşıma gücüne sahip olmuştur. Orhaneli uçucu külü, optimum su muhtevasında sıkıştırıldıktan sonra mükemmel bir temel malzemesi haline gelmiştir. Orhaneli uçucu külü daha sonra ıslak deneye tabi tutulmuştur. Puzolanik olan ve yüksek CaO muhtevasına sahip olması nedeniyle tek başına hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren Orhaneli uçucu külü, su altında hidratasyona ve dayanım kazanmaya devam etmiştir. Bununla birlikte uçucu kül danelerinin silt boyutunda olması nedeniyle oluşan kapiler gerilme sonucunda su yükselmiş ve daneler arasına giren su malzemenin şişmesine sebep olmuştur. Arazide uçucu kül tabakalarının şişmesini engelleyebilmek için, bu tabakalar altına granül malzeme serilebilir. Tek başına kullanıldığında temel malzemesi olarak gereğinden fazla taşıma gücüne sahip olan Orhaneli uçucu külü, zeminle karıştırıldığında daha ekonomik biçimde kullanılabilir.

4.3. Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Sadece Orhaneli uçucu külü kullanılarak yapılan kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneylerinden, Orhaneli uçucu külünün dayanımının ve taşıma gücünün, kimyasal özellikleri nedeniyle son derece yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte dane birim hacim ağırlığının yüksek oluşu, buna bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlığının ve doğal birim hacim ağırlığının doğal zeminlerle kıyaslanabilir olması, sıkıştırılmış Orhaneli uçucu külünün hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilir nitelikte olmadığını göstermektedir.

Orhaneli uçucu külünün puzolanik ve hidrolik bağlayıcılık özelliğinden faydalanarak, sıkıştırılmış uçucu külün dayanımından ve taşıma gücünden daha düşük dayanıma ve taşıma gücüne sahip olan, yani taşıma gücü doğal zeminlerin taşıma gücüyle kıyaslanabilir hafif dolgu malzemesi üretimine karar verilmiştir. Böyle bir malzemenin, taşıma gücü yüksek olan doğal zeminlere göre en büyük avantajı, çok daha hafif olacak olmasıdır. Üretilecek malzeme aynı zamanda tabiat şartlarına da dayanabilmelidir. Yukarıda anlatılan özelliklere sahip bir malzeme üretebilmek için; termik santral uçucu külü (OUK), çimento, hava sürükleyici katkı maddesi ve su karıştırılmıştır.

4.3.1. Karışımda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

4.3.1.1. Hava Sürükleyici Katkı Maddesi

Hava sürükleyici katkı maddeleri genellikle betona mikroskobik hava kabarcıkları girmesini sağlamak için kullanılırlar. Betona hava kabarcıklarının girmesi; donma-kabarma çevrimlerine uğrayan betonların dayanıklılığını artırır. Aynı zamanda betonun birim hacim ağırlığı büyük ölçüde azalır, taze betonun ayrışması ve plastik rötre azaltılır veya engellenir, aynı zamanda taze betonun işlenebilirliği artar. Hava sürüklenmiş beton, çimento jelinde uniform olarak dağılmış hava kabarcıkları içerir. Betona hava sürüklenmesini sağlayan katkı maddeleri, betonu oluşturan malzemeler karıştırıldıktan sonra veya karıştırma işleminden önce suya katılarak kullanılırlar. Hava sürükleyici katkı maddesi çeşitleri aşağıda verilmiştir:

- Ağaç reçinası tuzları (Vinsol reçinası)
- Alkil aril sülfonatlar

- Linyosülfonatlar
- Alkilbenzen sülfonatları
- Yağlı asit sülfonatları, yağlı asit alkalın sabunları
- Etanolaminler (Trietanolamin vb.)
- Bazı protein esaslı tuzlar
- Polihidroksikarboksilik asitlerin soda sabunları (Kosmatka ve diğ., 1995).

Hava sürükleyici katkı maddeleri, sertleşmiş betonların donma-çözölme dayanıklılığını önemli ölçüde arttıran maddelerdir. A.B.D.'de bir rastlantı sonucu ortaya çıkan bu gerçek (1932), "Vinsol resine" katkı maddesinin bulunmasına ve şartname gereği A.B.D.'nin bütün yol ve havaalanı betonlarında kullanılmasına yol açmıştır. "Vinsol resine", yani Vinsol reçinası; köknar reçinasının damıtılmasından sonra kostik soda (NaOH) ile reaksiyona sokulmasıyla oluşur. Köknar reçinasının damıtılması sonucunda terebentin (neft yağı) ve kolofan ortaya çıkar. Vinsol reçinasının diğeri adı sodyum abietat'tır.

Hava sürükleyici maddelerden bir diğeri de "linyosülfonat"lardır. Kağıt üretiminde selüloz elde etmek için, odun içinde bulunan linyin maddesi, sodyum bisülfite (Na_2SO_3) ile eritilir. Bu işlem sonucu ortaya çıkan siyah sıvı; kalsiyum, sodyum ve amonyum linyosülfonatlar ve şeker içeren bir maddedir. Siyah renkteki bu sıvı; sıcak kostik soda (NaOH) veya klorla birleştirilip fermentasyon yapılır ve şekerden arındırılmaya çalışılır. Ancak bu arıtma işlemini tam yapmak olanaksız olduğundan (Aksi halde linyinin kimyasal yapısı bozulur), % 1 ile % 3 arasında kalan bir miktar şeker, son ürün içinde muhakkak surette vardır.

Linyosülfonatlar anionik türde kollodial tansio-aktif maddelerdir. Molekülleri çok uzun, bir ucu hidrofil (suyla birleşebilen), diğeri ucu hidrofob (sudan kaçan, hava veya yağ ile birleşebilen) olan tansio-aktif maddeler suyun yüzey gerilimini düşürürler, su içinde oluşan hava kabarcıklarının çevresini sararak, hava kabarcıklarının su içinde erimemesini, küresel bir formda kalmasını sağlarlar. Yüzey gerilimi düşen suyun ıslatma yeteneği de artar ve katı maddelerin yüzlerinde suyun emilmesi kolaylaşır. Katı tanelerin yüzeyinde biriken elektrostatik yükler aynı işaretli olduğundan, taneler birbirlerini iterler ve flokülasyonu önlerler.

Hava sürükleyici katkı maddelerinin ikincil etkileri şunlardır:

- Taze betonun plastisitesini arttırırlar.
- Homojen, kohezif bir beton sağlarlar.
- Erken plastik rötreyi azaltırlar.
- Mukavemeti düşürürler.
- Sünme bir miktar artar, hidrolik rötrede fazla değişme olmaz.
- Kılcal su emmeleri azalır.
- Taze betonun işlenebilirliğini arttırırlar.
- Linyosülfonatlar içerdikleri şeker dolayısıyla betonun prizini geciktirirler (Akman, 1990).

Hafif dolgu malzemesi (uçucu kül-çimento-köpük karışımı) üretebilmek için hava sürükleyici malzeme kullanılmıştır. Hava sürükleyici malzemenin kullanılması; uçucu kül-çimento karışımının yoğunluğunu, karışımın içinde kapalı hava kabarcıkları oluşturarak azaltacaktır. Yapılan karışımlarda hava sürükleyici katkı malzemesi olarak Sika firmasının ürettiği Lightcrete I 500 kullanılmıştır. Lightcrete I 500 katkı maddesinin özellikleri hakkında aşağıda bilgi verilmiştir:

- Sarımsı şeffaf renktedir ve yaklaşık 9.81 N/lt yoğunluğa sahiptir.
- Açılmamış ambalajında, dondan ve direkt güneş ışınlarından korunmuş ortamlarda yaklaşık 1 yıl raf ömrüne sahiptir.
- Betonda segregasyon yaratmaz.
- Zehirli ve tehlikeli madde içermez.
- Katkıda bulunan stabilizatör, betondaki hava miktarını işleme ve pompalama sırasında da koruduğundan, betonun hacmi bu işlemler sonunda hep aynı kalır.
- Kullanımı için hiçbir özel ekipman gerekmez.

4.3.1.2. Termik Santral Uçucu Külü

Uçucu kül-çimento-köpük karışımında, Orhaneli termik santralinden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Beton üretiminde de çimentoya ek olarak bağlayıcı malzeme niteliğinde kullanılan uçucu kül, çimentoyla birlikte kullanıldığında değişik etkilere sebep olmaktadır. Hafif dolgu malzemesi üretiminde çimentoyla birlikte kullanılacak uçucu külün meydana getirebileceği etkilerin iyi belirlenmesi gerekir:

- İçinde Portland çimentosuna ek olarak uçucu kül kullanılan betonlarda belirli hava içeriğini elde etmek için gerekli hava sürükleyici katkı malzemesi miktarı,

sadece Portland çimentosundan üretilen betonlarda gerekli olan hava sürükleyici katkı malzemesi miktarından daha fazladır. Gerekli hava sürükleyici katkı malzemesi miktarı genellikle uçucu külün karbon muhtevasına bağlıdır.

- Portland çimentosuna ek olarak kullanılan uçucu kül betonun işlenebilirliğini artırır.
- İçinde uçucu kül kullanılan betonlar genellikle daha az segregasyona uğrarlar.
- Uçucu kül kullanımı hidrasyon ısını azaltır. Büyük hacimler halinde dökülen betonların ısını düşürür ve termik rötrenin azalmasını sağlar.
- Uçucu kül kullanımı betonun priz süresini geciktirir.
- Uçucu kül kullanımı betonun pompalanabilirliğini artırır.
- Kükürt trioksit (SO_3) miktarı % 5'den fazla olan uçucu küller beton üretiminde kullanılırsa Candlot tuzu oluşumuna imkan verebilirler. Bu nedenle TS 639'da, klinkere veya betona katılabilecek uçucu küllerin nitelikleri verilmiştir.
- Uçucu kül kullanımı betonun terlemesini azaltacağı için, beton ani kurumaya maruz kaldığında yüzeyde plastik rötne çatlakları oluşabilir (Kosmatka ve diğ., 1995).

Orhaneli uçucu külü hafif dolgu malzemesi üretiminde çimentoyla birlikte kullanılacağı için, üretilecek hafif dolgu malzemesinin yukarıda verilen etkilere maruz kalması beklenebilir. Bununla birlikte bu etkiler hiçbir zaman betonda oluşan etkilerle aynı seviyede olmayacaktır. Çünkü üretilecek hafif dolgu malzemesindeki çimento dozajı düşük olacak ve agrega kullanılmayacaktır. Orhaneli uçucu külünün kimyasal ve geoteknik özellikleri Bölüm 4.2'de verilmiştir.

4.3.1.3. Portland Çimentosu

Üretilecek uçucu kül – çimento – köpük karışımlarındaki çimento oranını belirleyebilmek için klinker oranı % 100 olan Portland çimentosu (PÇ 42.5) kullanılmıştır. PÇ 42.5'in standart değerleri Tablo 4.12'de, kimyasal özellikleri Tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.12 PÇ 42.5'un standart değerleri

Çimento Tipi	Standart No	Klinker Oranı (%)	Katkı Oranı (%)	Basınç Dayanımları (MPa)		
				2 gün	7 gün	28 gün
PÇ 42.5	TS 18	100	0	20	31.5	42.5

Tablo 4.13 PÇ 42.5'in kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	Oksit Yüzdesi (%)
SiO ₂	19.5
Al ₂ O ₃	5.9
Fe ₂ O ₃	4.2
CaO	61.9
MgO	1.4
SO ₃	2.5
TiO ₂	0.37
K ₂ O	0.62
Na ₂ O	0.17
Serbest CaO	-
Kızdırma kaybı	2.79
Σ (SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	29.6
Özgül Ağırlık (G _s)	3.11

4.3.2. Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Hazırlanması

Kömürün toz haline getirilişinin ve yakılma işleminin makinelerle yapılması, kömürün yakılması sonucunda oluşan uçucu külün elektrostatik çökelticiler yardımıyla tutulması, uçucu külün dane boyutunun fazla değişken olmamasını sağlar. Termik santral uçucu küllerinin dane dağılımı eğrileri birbirlerine çok benzemese de, uçucu kül silt boyutunda bir malzeme olarak tanımlanmaktadır.

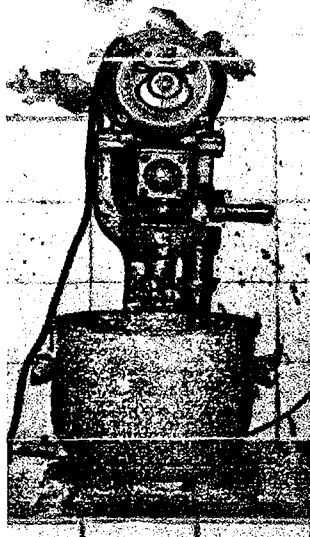
Orhaneli uçucu külünün ortalama dane çapı (D₅₀) 0.018 mm'dir. Portland çimentosu da ince daneli bir malzeme olup, ortalama dane çapı 0.01 mm'dir. İki malzemenin dane boyutlarının birbirine yakın olması nedeniyle karıştırıldıklarında homojen bir çözelti meydana gelir ve karışımda segregasyon oluşmaz. Ayrıca karışımın hafif olması için, çimento – uçucu kül çözeltisinin içinde kapalı boşluklar oluşması gerekmektedir. Bunun sağlanması için karışıma hava sürükleyici katkı maddesi de eklenmiştir. Hava sürükleyici katkı maddesi hem karışımın yoğunluğunu azaltacak hem de segregasyonu önleyecektir. Karışıma çimento katılmasının birinci amacı; malzemenin priz süresini azaltmak, ikinci amacı; belirli dayanımı sağlamak için kullanılacak uçucu kül miktarını daha az miktarda Portland çimentosuyla ikame ederek, karışımın yoğunluğunu azaltmaktır. Uçucu külün kimyasal yapısı nedeniyle yüksek su muhtevalarında bile kayda değer büzülme yapmaması ve üretilecek hafif dolgu malzemesinin dayanımının fazla olmaması istendiğinden, karışıma granül malzeme eklenmemiştir.

Serbest basınç ve CBR deneylerinde kullanılacak numunelerin hazırlanmasından önce çimento, uçucu kül, hava sürükleyici katkı maddesi ve suyun karışım oranlarının belirlenmesi için hazırlık niteliğinde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; yoğunluğu 9.81 kN/m^3 'ün altında ve 7 günlük serbest basınç dayanımı yaklaşık 0.15 MPa olan numunelerin hazırlanması için gerekli karışım oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Hazırlanacak numunelerin karıştırılması için el mikseri kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanması aşamasında ilk olarak hava sürükleyici katkı maddesi suyla 5-10 saniye karıştırılmış, daha sonra çimento-uçucu kül karışımı ilave edilmiş ve çözelti belirli bir süre mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra plastik bardaklara dökülen karışımın, 7 günlük serbest basınç dayanımını bulmak için cep penetrometresi kullanılmıştır. Elde edilen karışımlarda kullanılan malzemelerin ağırlıkça oranları, yoğunlukları ve cep penetrometresi ile saptanan serbest basınç dayanımı değerleri Tablo 4.14'de verilmiştir.

Tablo 4.14 Hafif dolgu malzemesi üretmek için yapılan hazırlık niteliğindeki deneylerin sonuçları

Ağırlıkça Oran (%)				Karıştırma Süresi (dak)	Akıcı Haldeki Yoğunluk (kN/m^3)	7 Gün Sonraki Yoğunluk (kN/m^3)	Serbest Basınç Dayanımı, q_u (MPa)			
PÇ 42.5	OUK	Hava S. K. M.	Su				Alt	Orta	Üst	Ortalama
10	40	0.5	49.5	2.5	10.79	9.81	0.26	0.21	-	0.24
10	40	0.8	49.2	2.5	8.83	7.85	0.15	0.14	0.12	0.14
10	45	0.5	44.5	1.5	10.89	9.91	0.3	0.24	0.17	0.24
9	46	0.5	44.5	1.5	11.09	10.1	0.3	0.24	0.18	0.24
8	47	0.5	44.5	1.5	10.79	10.01	0.24	0.22	0.17	0.21
7	48	0.5	44.5	1.5	10.79	9.91	0.24	0.2	0.16	0.2
6	49	0.5	44.5	1.5	10.89	10.01	0.21	0.19	0.15	0.18
5	50	0.5	44.5	1.5	10.59	9.71	0.17	0.18	0.14	0.16
10	47.5	0.5	42	1.5	11.38	10.4	0.39	0.34	0.29	0.34
9	48.5	0.5	42	1.5	11.18	10.2	0.37	0.34	0.25	0.32
8	49.5	0.5	42	1.5	10.99	10.2	0.3	0.28	0.21	0.26
7	50.5	0.5	42	1.5	10.89	10.1	0.3	0.26	0.18	0.25
6	51.5	0.5	42	1.5	11.09	10.4	0.27	0.24	0.16	0.22
5	52.5	0.5	42	1.5	10.99	10.4	0.2	0.2	0.14	0.18
-	55	0.5	44.5	1.5	10.69	9.91	0	0	0	0
55	-	0.5	44.5	1.5	9.81	9.03	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5
10	45	0.8	44.2	1.5	9.91	8.93	0.26	0.24	0.25	0.25
9	46	0.8	44.2	1.5	9.81	8.93	0.2	0.21	0.23	0.21
8	47	0.8	44.2	1.5	9.81	8.93	0.18	0.2	0.21	0.2
7	48	0.8	44.2	1.5	10.69	9.91	0.23	0.25	0.21	0.23
6	49	0.8	44.2	1.5	10.89	10.01	0.2	0.22	0.2	0.21
5	50	0.8	44.2	1.5	10.30	9.42	0.14	0.15	0.15	0.15
-	55	0.8	44.2	1.5	10.79	10.01	0	0	0	0
55	-	0.8	44.2	1.5	9.71	8.83	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5

El mikseri ile hazırlanan uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının yüzeyinde düşük dayanımlı köpük tabakası oluşmuş, bu nedenle karışım yeterli homojenliğe ulaşamamıştır. Ayrıca karıştırma süresinin uzatılması, yoğunluğun yeterli derecede düşürülmesini sağlayamamıştır. Hazırlık aşamasında karışım oranlarının kararlaştırılmasını sağlamak için kullanılan el mikseri genel fikir vermekle birlikte çözeltinin yeterli derecede karışmasını sağlayamamıştır. Bunun en önemli nedeni; el mikserinde çözeltinin karışmasını sağlayan çubuğun sadece kendi eksenini etrafında dönmesi, kabın eksenini etrafında dönmemesidir. Bu durum, betonyer veya araç mikserlerindeki karıştırma şeklini temsil etmemekte ve karıştırma işleminin etkili olmasını engellemektedir. Bununla birlikte, hava sürükleyici katkı maddesinin etkili biçimde kullanılabilmesi için karıştırma şekli ve süresinin önemi büyüktür. El mikseri yerine Şekil 4.14’de görülen mikserin kullanılması daha gerçekçi olacaktır. Bunun nedeni, kullanılacak mikserin hem kendi eksenini hem de çözeltinin içine konulduğu kabın etrafında dönebilmesidir. Karıştırma biçiminin değişmesi sebebiyle, hazırlık niteliğindeki deneylerde elde edilen karışım oranları kullanılarak yeni deneyler yapılmıştır. Yapılan yeni deneylerle yoğunluğu 9.81 kN/m^3 ’ün altında ve 7 günlük serbest basınç dayanımı 0.15 MPa olan homojen karışımlar üretilmeye çalışılmıştır. Daha sonra, elde edilen karışımların karakteristik özelliklerini belirlemek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarındaki ağırlıkça malzeme oranları Tablo 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.14 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının hazırlanmasında kullanılan mikser

Tablo 4.15 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının içinde kullanılan malzemelerin ağırlıkça ve hacimce oranları

Karışım No	Karışımı Üretmek İçin Kullanılan Malzemelerin Ağırlıkça Oranları (%)				Optimum Karıştırma Süresi (dak)	Karışım Akıcı Haldeyken İçindekilerin Mutlak Hacimce Oranı (%)				
	PÇ 42.5	OUK	H.S.K.M.	Su		PÇ 42.5	OUK	H.S.K.M.	Su	Hava
1	6	49	0.8	44.2	30	1	9.3	0.4	23.9	65.4
2	8	47	0.8	44.2	30	1.4	9.0	0.5	24.3	64.8
3	10	45	0.8	44.2	30	1.7	8.5	0.4	23.9	65.5
4	12	43	0.8	44.2	30	2.1	8.1	0.4	23.9	65.5
5	14	41	0.8	44.2	30	2.5	8.0	0.4	24.8	64.3
6	16	39	0.8	44.2	30	2.9	7.6	0.4	24.8	64.3
7	18	37	0.8	44.2	30	3.3	7.4	0.5	25.2	63.6
8	20	35	0.8	44.2	30	3.7	7.0	0.5	25.2	63.6
9	22	33	0.8	44.2	30	4.1	6.7	0.5	25.6	63.1
10	24	31	0.8	44.2	30	4.2	5.9	0.4	23.9	65.6
11	26	29	0.8	44.2	30	4.4	5.4	0.4	23.4	66.4
12	27.5	27.5	0.8	44.2	30	4.8	5.2	0.4	23.9	65.7

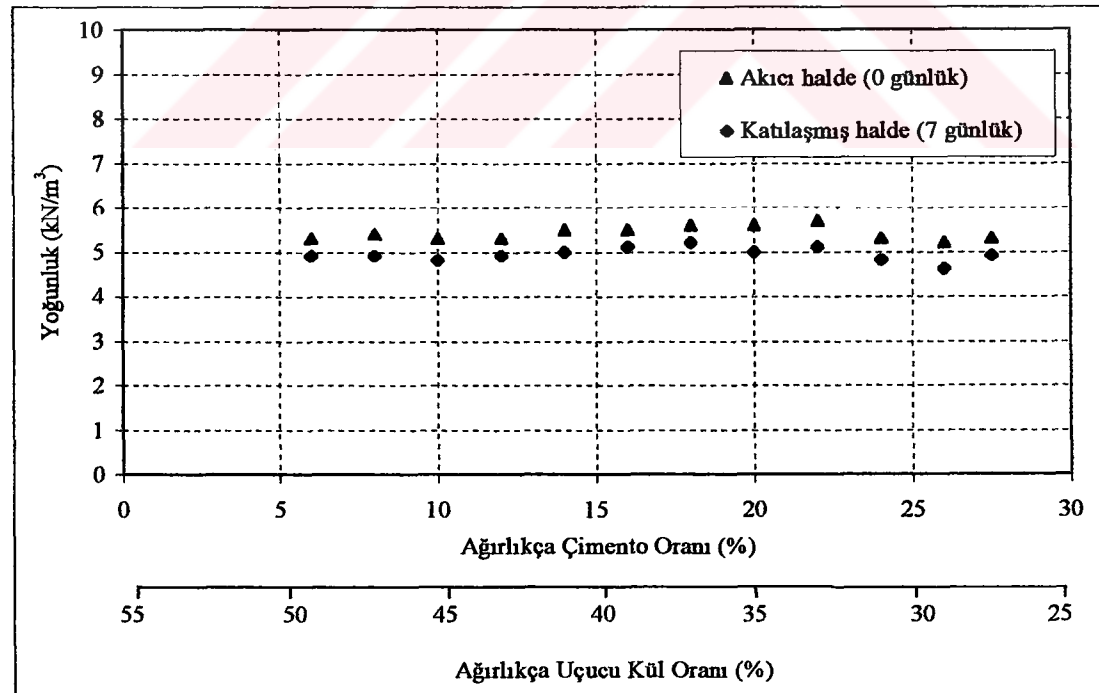
Uçucu kül – çimento – köpük karışımı hazırlanmadan önce, su ve hava sürükleyici katkı maddesi mikserde 5-10 saniye karıştırılmış ve içine katı madde karışımı (uçucu kül ve çimento) eklenmiştir. Daha sonra malzemeler mikserde 30 dakika birlikte karıştırılmıştır. En uygun karıştırma süresi, karışımın yoğunluğunun zamana bağlı değişimi gözönüne alınarak belirlenmiştir. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı, akışkan haldeyken maksimum yoğunluğa sahiptir. Karışım katılaştıkça yoğunluğu azalacaktır. Tablo 4.16’da, üretilen karışımların akışkan durumdaki ve katı haldeki (üretildikten 7 gün sonraki) yoğunlukları ve bunlarla ilgili değerler verilmiştir.

Tablo 4.16 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının yoğunlukları

Karışım No	Akışkan Haldeki Yoğunluk (kN/m ³)	Ortalama Yoğunluk (kN/m ³)	Standart Sapma (kN/m ³)	7 Gün Sonraki Yoğunluk (kN/m ³)	Ortalama Yoğunluk (kN/m ³)	Standart Sapma (kN/m ³)
1	5.30	5.41	0.15	4.91	4.94	0.15
2	5.40			4.91		
3	5.30			4.81		
4	5.30			4.91		
5	5.49			5.0		
6	5.49			5.10		
7	5.59			5.20		
8	5.59			5.0		
9	5.69			5.10		
10	5.30			4.81		
11	5.20			4.61		
12	5.30			4.91		

Tablo 4.16’da, üretilen karışımların yoğunluklarıyla ilgili standart sapma değerleri de verilmiştir. Üretilen uçucu kül – çimento – köpük karışımlarındaki ağırlıkça çimento/uçucu kül oranları farklı değerler aldığı için, karışımların yoğunluklarının da farklı sınıflandırılması beklenebilir. Bununla birlikte, çimento ve uçucu külün dane birim hacim ağırlıklarının ve dane boyutlarının birbirine yakın değerlere sahip olması ve karışımlarda kullanılan toplam katı madde, hava sürükleyici malzeme ve su miktarının sabit kalması karışımların yoğunluklarının birlikte değerlendirilmesine imkan verir. Şekil 4.15’de; uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının yoğunluklarının, ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranlarına bağlı değişimi, karışımların akıcı ve katılaşmış (7 günlük) halleri için birlikte verilmiştir.

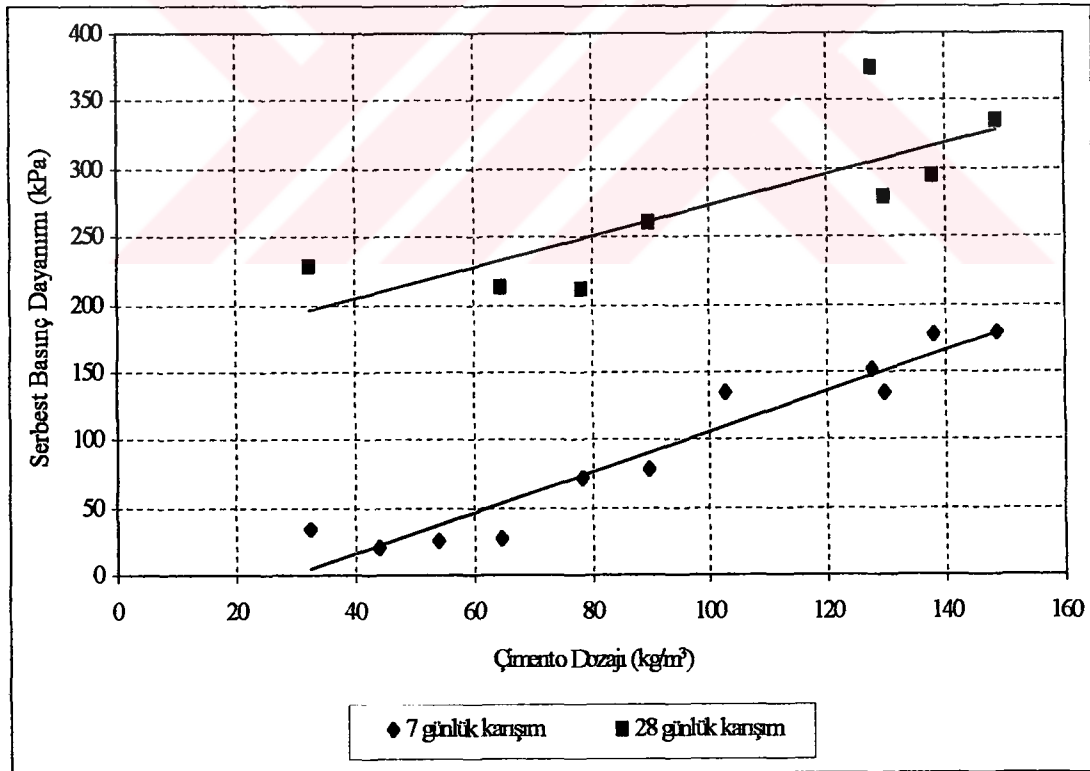
Çimento ve uçucu kül suyla birleştiklerinde (hidratasyon süreci), ekzotermik reaksiyon meydana gelir ve ısı açığa çıkar. Bu nedenle karışımdaki suyun bir kısmı buharlaşacaktır. Bununla birlikte suyun geri kalan kısmı bağlayıcı jelleri (tobermorit vb.) oluşturup, karışımın katılaşmasını ve dayanım kazanmasını sağlayacaktır. Katılaştıran karışımın suya doygun haldeki birim hacim ağırlığı, akışkan haldeki yoğunluğundan fazla olmayacaktır. Bunun nedeni, karışımın üretildiği andan itibaren içinde bulunan kapalı hava kabarcıklarıdır.



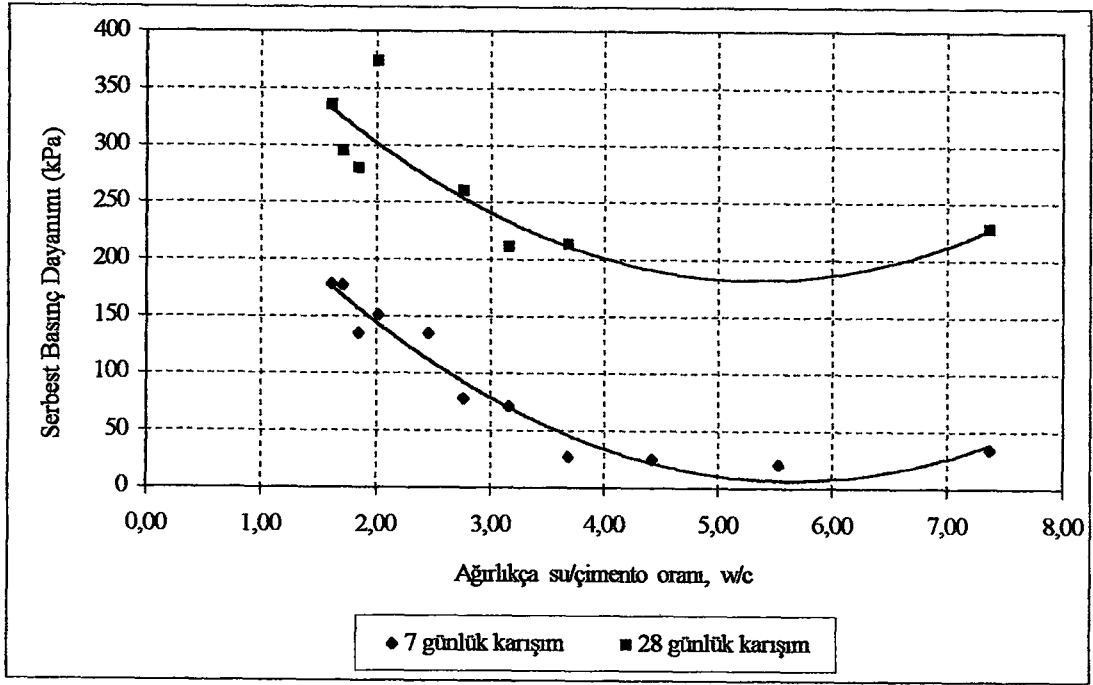
Şekil 4.15 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının yoğunluklarının ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi

4.3.3. Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımı Kullanılarak Yapılan Serbest Basınç Deneyleri

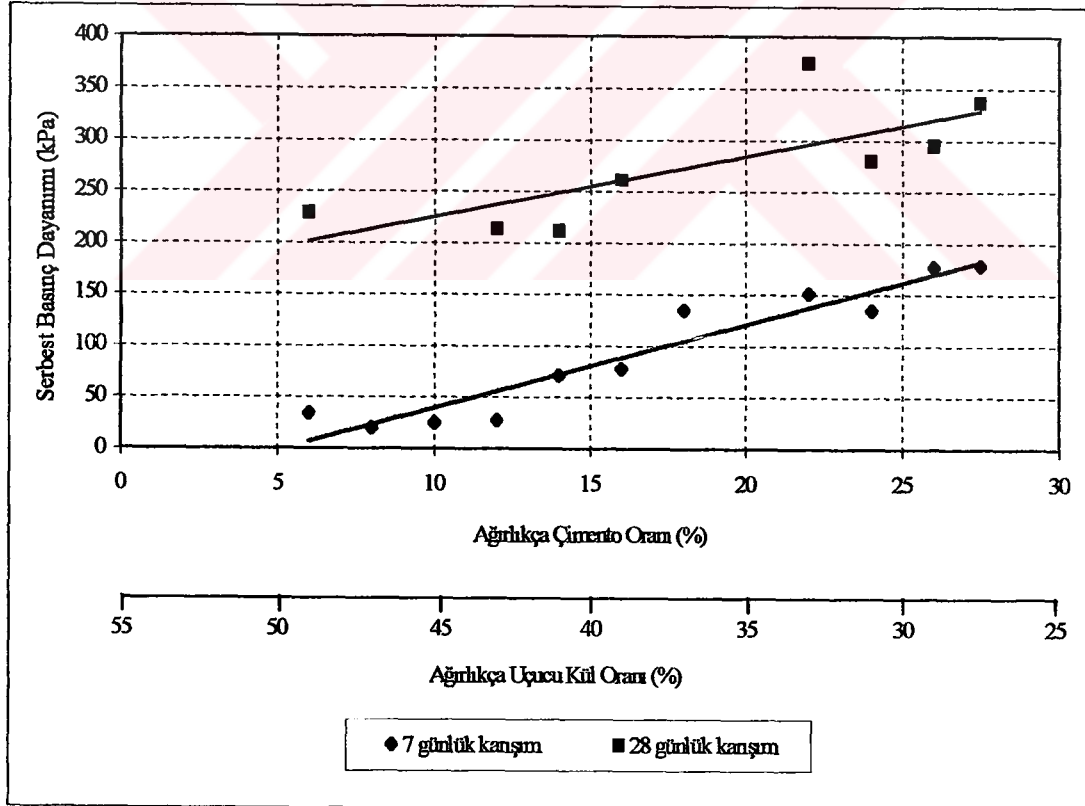
Tablo 4.15’de verilen karışım oranları kullanılarak üretilen uçucu kül – çimento – köpük karışımları su sızdırmaz kalıplara döküldükten sonra 7 gün nem odasında bekletilmiştir. 7 gün sonra, katılaştıran karışımlardan 38 mm çapındaki tüpler yardımıyla numune alınmıştır. Numune alma tüplerinden çıkarılan numunelerin bir kısmı hemen deneye tabi tutulmuş, bir kısmı da 28 gün sonra deneye tabi tutulmak üzere streç filme sarılarak nem odasına konulmuştur. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce traşlanarak gerekli boyutlara getirilmiştir. Serbest basınç deneyleri, üç eksenli basınç aletlerinde 1.5 mm/dak yükleme hızı altında yapılmıştır. Uçucu kül – çimento – köpük karışımları üzerinde yapılan serbest basınç deneylerine ait grafikler Ek C’de verilmiştir. Üretilen karışımların 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının çimento dozajına bağlı değişimi Şekil 4.16’da, ağırlıkça su/çimento oranına bağlı değişimi Şekil 4.17’de, ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.16 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının çimento dozajına bağlı değişimi



Şekil 4.17 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının ağırlıkça su/çimento oranına bağlı değişimi

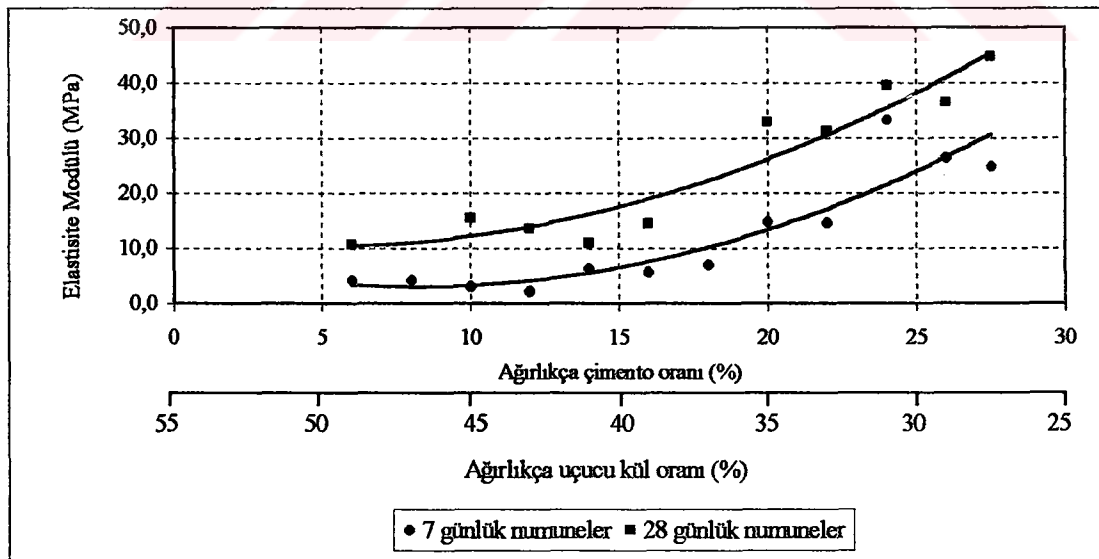


Şekil 4.18 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi

Yapılan serbest basınç dayanımı deneylerinden elde edilen gerilme – düşey deformasyon eğrilerinden, karışımların 7 ve 28 günlük Elastisite (Young) modülleri ve gerilmenin maksimum değerine ulaştığı andaki deformasyon (ϵ_f) değerleri bulunmuştur. Tablo 4.17’de, karışımların Elastisite modülü (E) ve ϵ_f değerleri birlikte verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.19’da, üretilen karışımların Elastisite modülü değerlerinin ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi verilmiştir.

Tablo 4.17 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 ve 28 günlük Elastisite modülü (E) ve ϵ_f değerleri

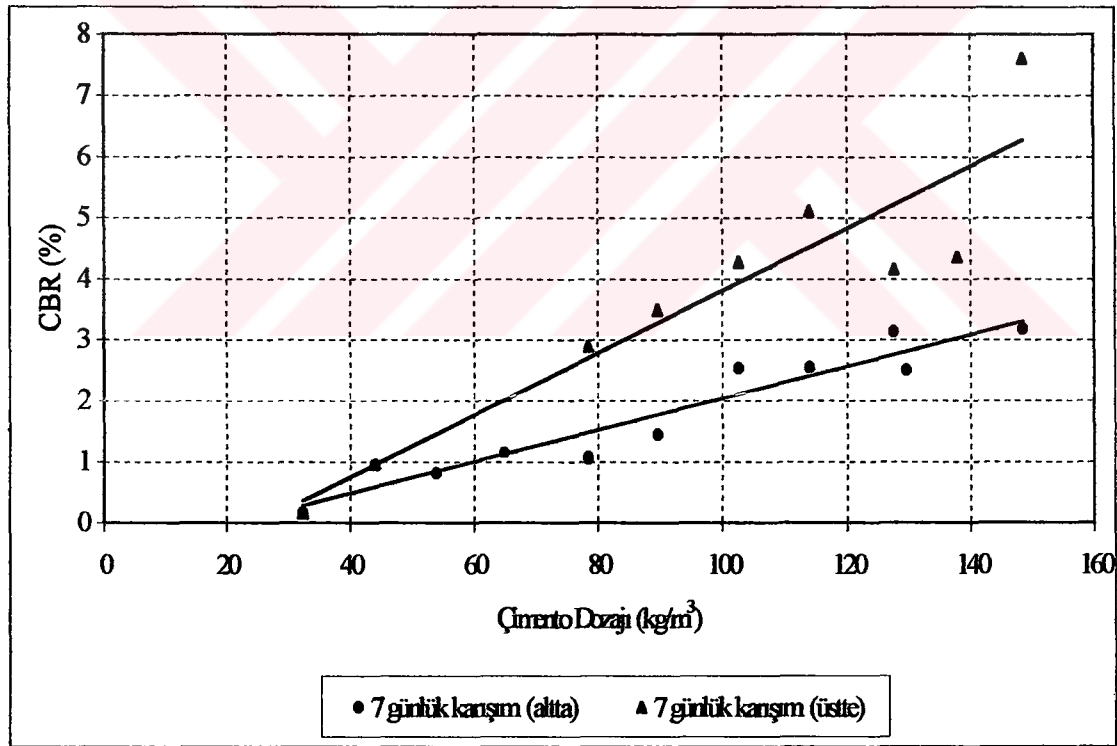
Karışım No:	7 günlük Elastisite modülü, E (MPa)			7 günlük ϵ_f (%)			28 günlük E (MPa)	28 günlük ϵ_f (%)
	1.deney:	2.deney:	E_{ort}	1.deney:	2.deney:	ϵ_{fort}	E_{ort}	ϵ_{fort}
1	5.20	2.97	4.09	1.32	2.30	1.81	10.71	3.0
2	1.64	6.54	4.09	2.0	2.96	2.48	-	-
3	1.49	4.61	3.05	-	2	2	15.43	2.96
4	2.08	2.23	2.16	-	2.30	2.3	13.58	2.96
5	6.24	-	6.24	1.64	-	1.64	10.90	2.96
6	6.84	4.90	5.87	1.32	1.64	1.48	14.42	1.97
7	5.11	8.61	6.86	-	2.30	2.3	-	-
8	14.72	-	14.72	1.32	-	1.32	32.85	1.32
9	13.87	16.05	14.96	2.15	1.97	2.06	31.21	1.32
10	33.29	-	33.29	1.32	-	1.32	39.39	1.32
11	26.31	-	26.31	0.66	-	0.66	36.56	1.64
12	25.57	23.93	24.75	1.32	1.64	1.48	44.74	0.99



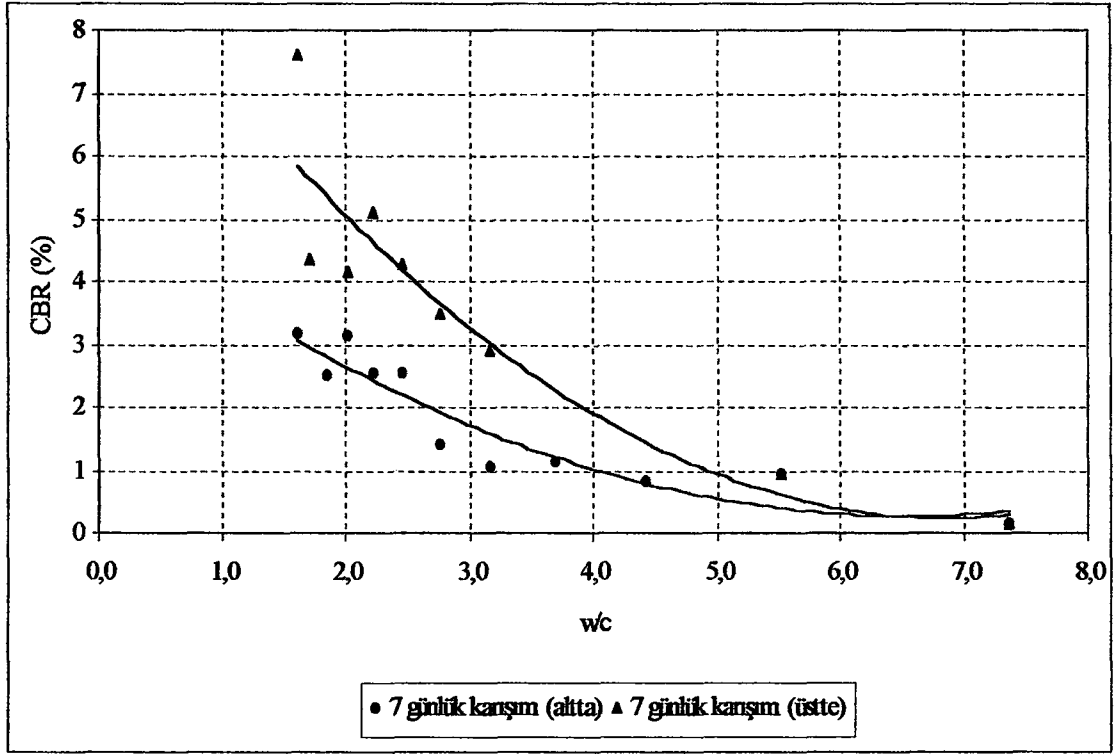
Şekil 4.19 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 ve 28 günlük Elastisite modüllerinin, ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi

4.3.4. Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımı Kullanılarak Yapılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyleri

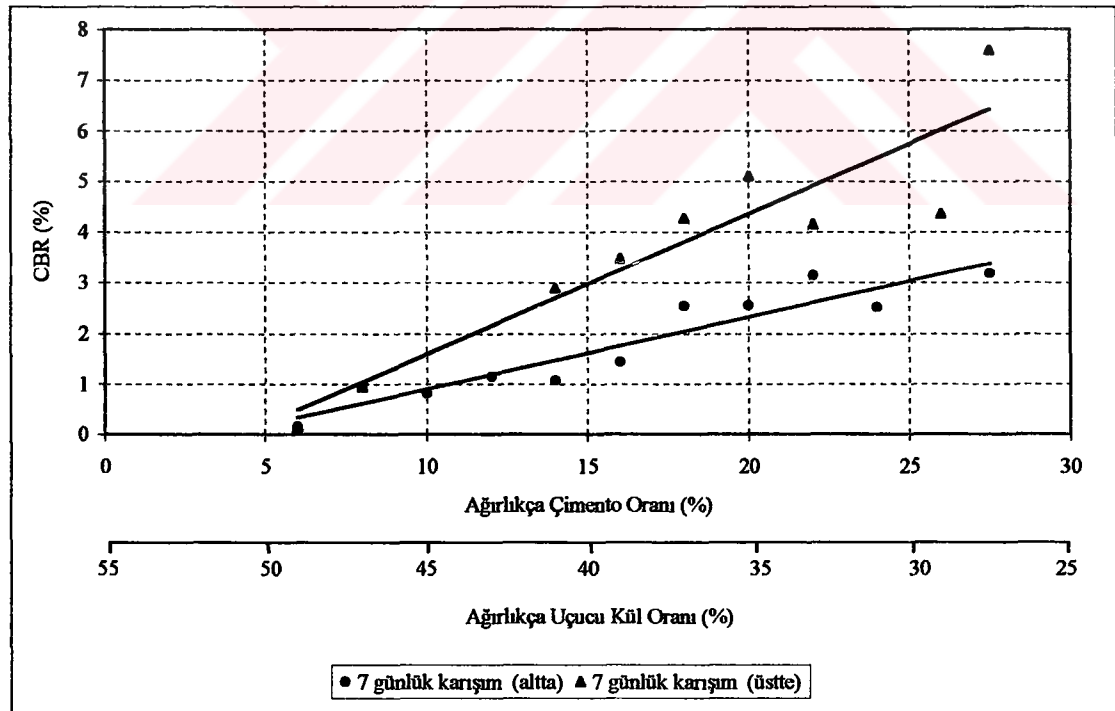
Daha önce Tablo 4.15’de verilmiş olan karışım oranları kullanılarak üretilen uçucu kül – çimento – köpük karışımları, su sızdırmazlığı sağlanan Modifiye Proktor kalıplarına döküldükten sonra nem odasına konulmuştur. Numuneler, 7 gün sonra CBR deneyine tabi tutulmak üzere nem odasında bekletilmiştir. Katılan numuneler üzerinde 7 gün sonra CBR deneyi yapılmıştır. Yüklemeler her numune için, kalıbın alt ve üst tarafında olmak üzere iki defa yapılmıştır. CBR deneyleri 1.5 mm/dak yükleme hızı altında yapılmıştır. Uçucu kül – çimento – köpük karışımları üzerinde yapılan CBR deneylerine ait grafikler Ek C’de verilmiştir. Üretilen karışımların 7 günlük CBR değerlerinin çimento dozajına bağlı değişimi Şekil 4.20’de, ağırlıkça su/çimento oranına bağlı değişimi Şekil 4.21’de, ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.20 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 günlük CBR değerlerinin çimento dozajına bağlı değişimi



Şekil 4.21 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 günlük CBR değerlerinin ağırlıkça su/çimento oranına bağlı değişimi



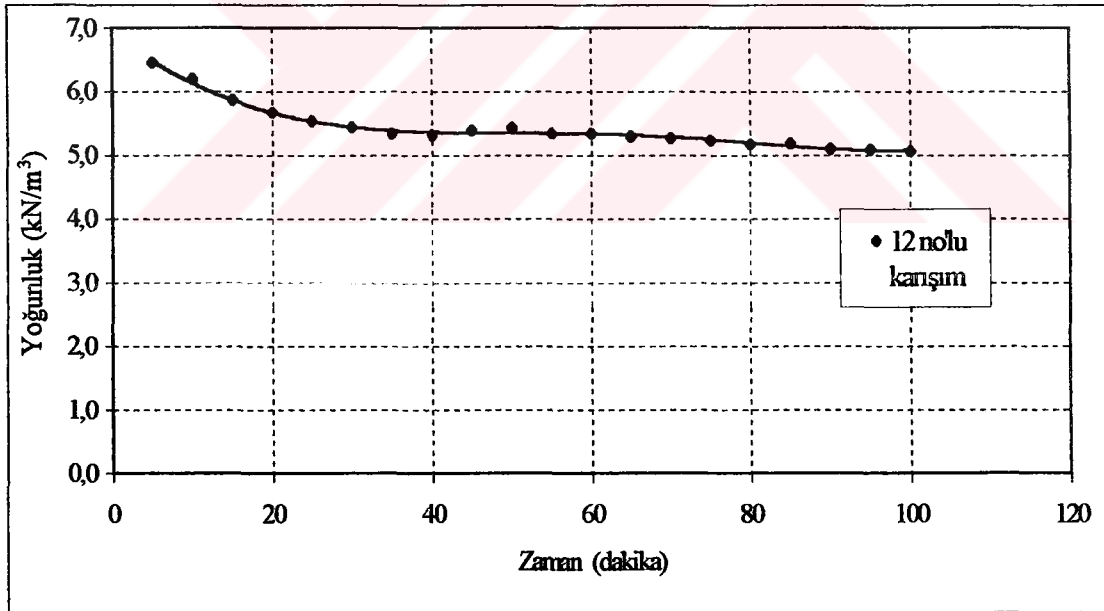
Şekil 4.22 Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının 7 günlük CBR değerlerinin çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi

4.4. Belirlenen (12 No'lu) Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımı Üzerinde Yapılan Deneyler

Uçucu kül – çimento – köpük karışımları kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, üretilen karışımların serbest basınç dayanımlarının çimento ve uçucu kül miktarına bağlı değişimleri elde edilmiş, karışımların uygulanabilirliği hakkında bilgi edinilmiştir. Karışımların stabilitesi ve mekanik özellikleri hakkında daha ayrıntılı bilgi edinebilmek için, hazırlık niteliğinde yapılan deneylerde kullanılan karışım oranlarından biri seçilerek çok sayıda numune üretilmesine karar verilmiştir. Uygulama kolaylığı açısından, ağırlıkça çimento ve uçucu kül miktarının eşit olarak kullanıldığı 12 no'lu karışımın üretilmesine karar verilmiştir.

4.4.1. Belirlenen Karışımın Bazı Fiziksel Özellikleri

12 no'lu karışımın üretilmesi sırasında optimum karıştırma süresi saptanmış, karışımın yoğunluğunun karıştırma süresine bağlı değişimi Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının yoğunluğunun karıştırma süresine bağlı değişimi

Üretilen karışım akıcı kıvamda olduğu için, işlenebilirliğinin belirlenmesinde çökme deneyleri (Slump veya VeBe) kullanılamamıştır. Karışımın kıvamının tam olarak belirlenebilmesi için iki grup deney düzenlenmiştir. Başlangıçta karışım belirli

boyutlara sahip koni şeklindeki kalıplara dökülmüş; 30 dakika sonra 1.grubun, 60 dakika sonra 2.grubun kalıpları kaldırılmış ve numunelerin yayılma çapları ölçülmüştür. Ölçülen değerler Tablo 4.18’de verilmiştir.

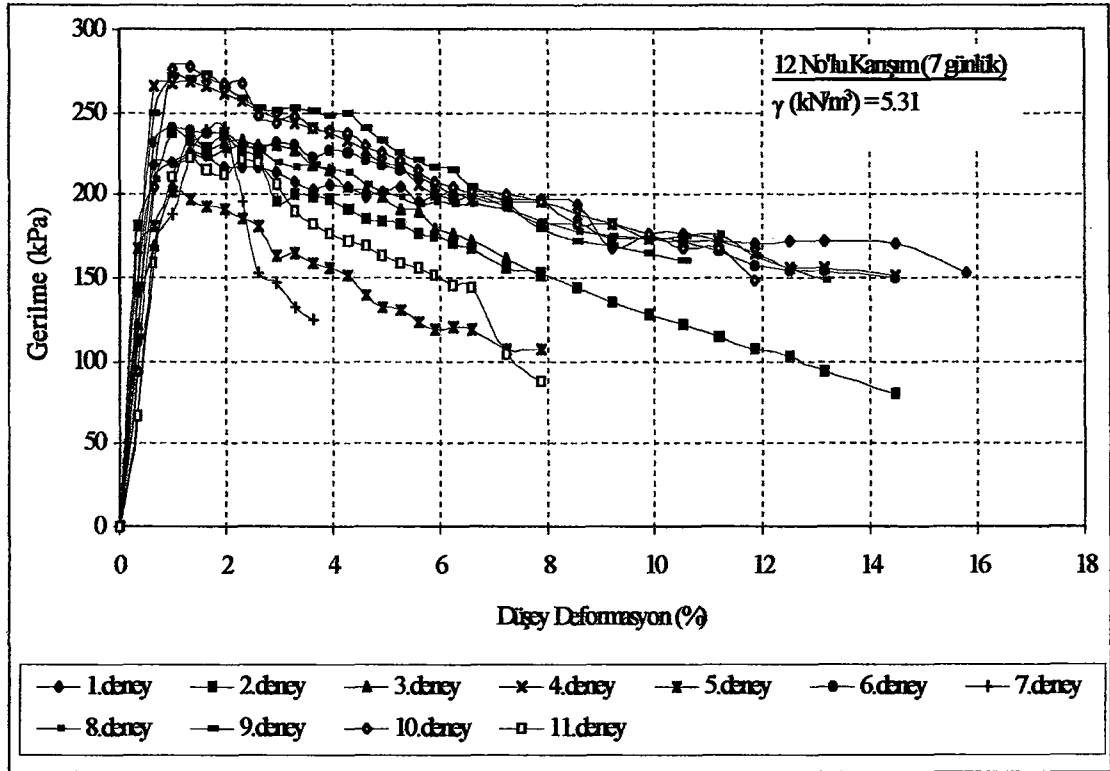
Tablo 4.18 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının kıvamının belirlenmesinde kullanılan yayılma deneyinin sonuçları

Numune No:	30 dakika sonra yayılma çapı (cm):		60 dakika sonra yayılma çapı (cm):	
	X yönünde	Y yönünde	X yönünde	Y yönünde
1	12.2	12	11.4	11.1
2	12	12	11.3	11.2
3	11.7	11.9	11.1	10.9
4	12.1	12.1	11.1	11.2
Ortalama yayılma çapı (cm):	12	12	11.23	11.1
Başlangıçtaki çapa göre artış (%):	20	20	12.3	11
Not: Numunenin başlangıçtaki üst çapı= 7 cm, alt çapı=10 cm, yüksekliği=5 cm				

Kalıpları üretimden 60 dakika sonra kaldırılan numunelerin yayılma çapları, kalıpları 30 dakika sonra kaldırılan numunelerin yayılma çaplarına göre daha az olmuştur. Bunun nedeni karışımın prizini almaya başlamasıdır.

4.4.2. Belirlenen Karışım Kullanılarak Yapılan Serbest Basınç Deneyleri

Daha önce üretilen 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde çok sayıda deney yaparak istatistiksel veriler elde etmek için ağırlıkça karışım oranı 12 no’lu karışımınkiyle aynı olan çok sayıda numune üretilmiştir. Numuneler daha sonra Bölüm 4.3.3’de anlatıldığı gibi deney yapılmaya hazır hale getirilmiş ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4.24’de; 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının üretiminden 7 gün sonra yapılan deneylerle elde edilen gerilme – düşey deformasyon eğrileri gösterilmiştir. Tablo 4.19’da, 12 no’lu karışım kullanılarak yapılan 11 deneyden elde edilen 7 günlük serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Tablo 4.20’de ise, 12 no’lu karışımın 7 günlük gerilme – düşey deformasyon bağıntıları kullanılarak elde edilen Elastisite modülü (E) ve gerilmenin maksimuma ulaştığı andaki düşey deformasyon (ϵ_f) değerleri birlikte verilmiştir.



Şekil 4.24 12 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımının üretiminden 7 gün sonra yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme - düşey deformasyon eğrileri

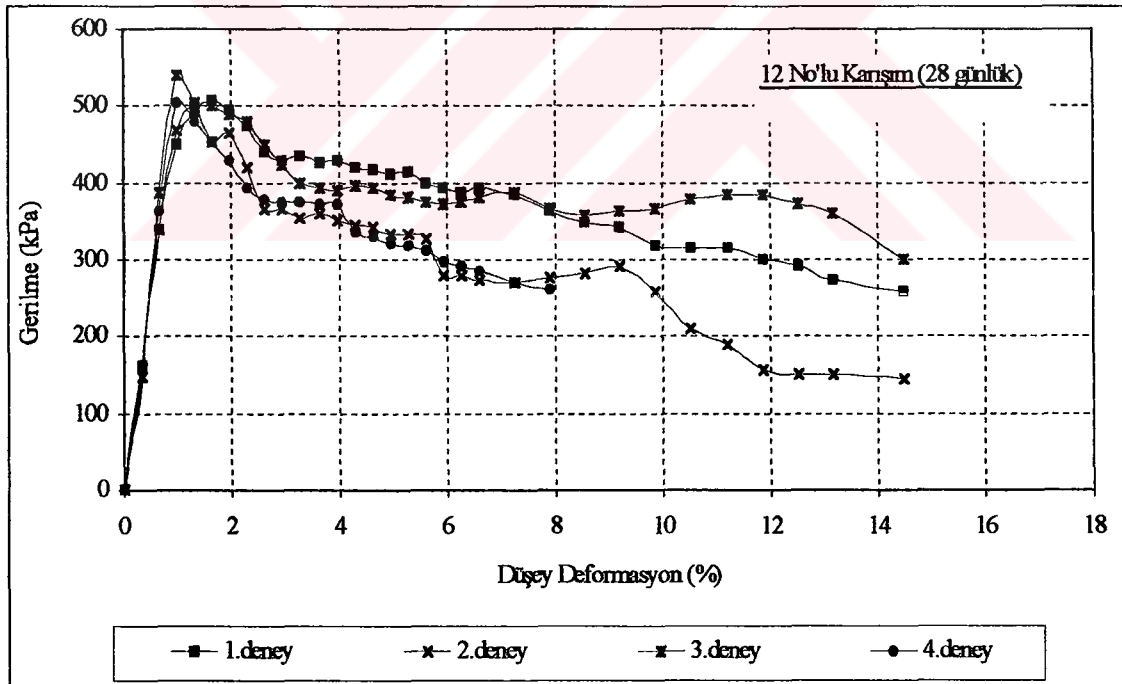
Tablo 4.19 12 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımının 7 günlük serbest basınç dayanımı değerleri

Deney No:	12 No'lu Karışım (7 Günlük)		
	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Standart Sapma (kPa)	Ortalama / Karakteristik Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
1	225.63	32.15	231.21 / 199.07
2	238.38		
3	236.42		
4	268.79		
5	202.09		
6	240.35		
7	240.35		
8	230.54		
9	273.70		
10	278.60		
11	222.69		

Tablo 4.20 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının 7 günlük Elastisite modülü (E) ve ϵ_f değerleri

Deney No:	12 No'lu Karışım			12 No'lu Karışım		
	7 Günlük Elastisite Modülü, E (kPa)	Standart Sapma (kPa)	Ortalama / Karakteristik Elastisite Modülü (kPa)	7 Günlük ϵ_f değeri (%)	Standart Sapma (%)	Ortalama / Karakteristik ϵ_f (%)
1	33146	7137.5	28675.5 / 21538	1.32	0.40	1.41 / 1.01
2	24079			0.99		
3	17911			1.32		
4	40280			1.32		
5	20413			0.99		
6	35078			0.99		
7	25565			1.97		
8	31808			2.30		
9	37902			1.64		
10	27944			1.32		
11	21305			1.32		

Şekil 4.25'de; 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının üretiminden 28 gün sonra yapılan deneylerle elde edilen gerilme – düşey deformasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.25 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının üretiminden 28 gün sonra yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme – düşey deformasyon eğrileri

Tablo 4.21’de, 12 no’lu karışım kullanılarak yapılan 4 deneyden elde edilen 28 günlük serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Tablo 4.22’de ise, 12 no’lu karışımın 28 günlük gerilme – düşey deformasyon bağıntıları kullanılarak elde edilen Elastisite modülü (E) ve gerilmenin maksimuma ulaştığı andaki düşey deformasyon (ϵ_f) değerleri birlikte verilmiştir. 12 no’lu karışım kullanılarak yapılan 7 ve 28 günlük serbest basınç deneylerine ait grafikler Ek D’de verilmiştir.

Tablo 4.21 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının 28 günlük serbest basınç dayanımı değerleri

Deney No:	12 No’lu Karışım (28 Günlük)		
	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Standart Sapma (kPa)	Ortalama / Karakteristik Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
1	505.2	17.2	512.3 / 495.1
2	497.4		
3	541.5		
4	505.2		

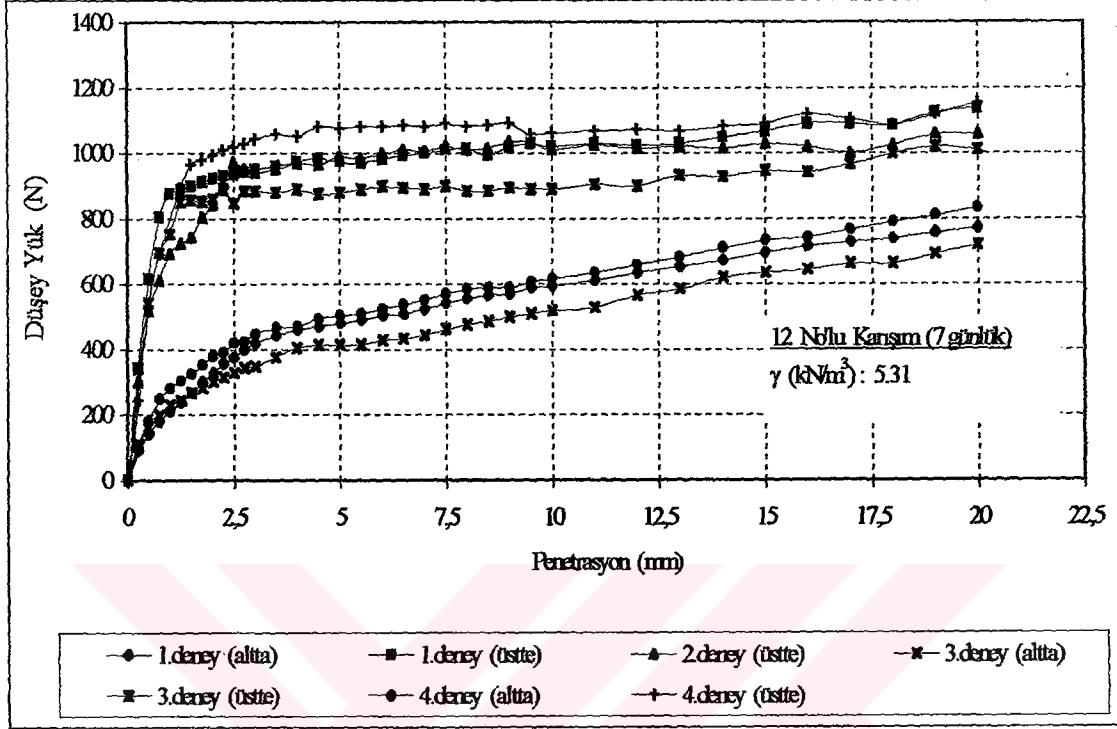
Tablo 4.22 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının 28 günlük Elastisite modülü (E) ve ϵ_f değerleri

Deney No:	12 No’lu Karışım			12 No’lu Karışım		
	28 Günlük Elastisite Modülü, E (kPa)	Standart Sapma (kPa)	Ortalama / Karakteristik Elastisite Modülü (kPa)	28 Günlük ϵ_f değeri (%)	Standart Sapma (%)	Ortalama / Karakteristik ϵ_f (%)
1	45582	3505.8	49669.3 / 46163.6	1.64	0.27	1.24 / 0.97
2	47365			1.32		
3	54698			0.99		
4	51032			0.99		

4.4.3. Belirlenen Karışım Kullanılarak Yapılan CBR Deneyleri

12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde çok sayıda CBR deneyi yaparak, üretilen hafif dolgu malzemesinin davranışı hakkında bilgi edinebilmek için ağırlıkça karışım oranı 12 no’lu karışımınkiyle aynı olan çok sayıda numune üretilmiştir. Numuneler daha sonra Bölüm 4.3.4’de anlatıldığı gibi deney yapılmaya hazır hale getirilmiş ve CBR deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4.26’da; 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının üretiminden 7 gün sonra yapılan deneylerle

elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri gösterilmiştir. Tablo 4.23’de, 12 no’lu karışım kullanılarak yapılan 4 deneyden elde edilen 7 günlük CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değerleri verilmiştir.

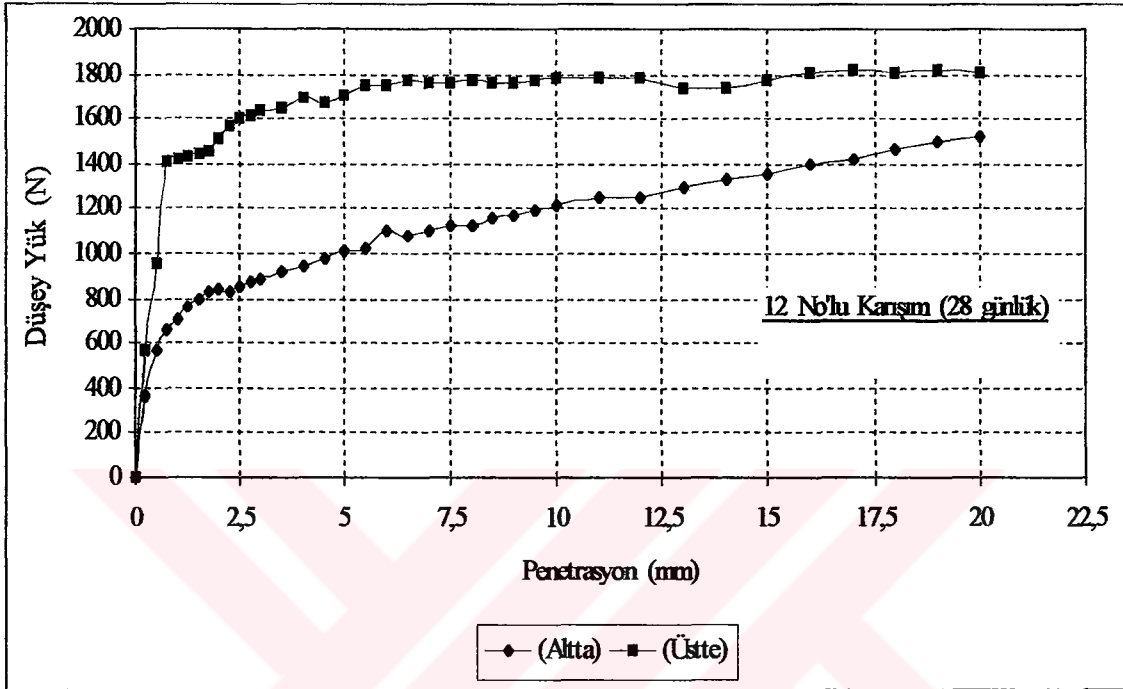


Şekil 4.26 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının üretiminden 7 gün sonra yapılan CBR deneylerinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

Tablo 4.23 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının 7 günlük CBR değerleri

Deney No:	12 No’lu Karışım (7 Günlük)					
	Kalıbın Alt Kısımında:			Kalıbın Üst Kısımında:		
	CBR (%)	Standart Sapma (%)	Ortalama / Karakteristik CBR Değeri (%)	CBR (%)	Standart Sapma (%)	Ortalama / Karakteristik CBR Değeri (%)
1	2.82	0.27	2.80 / 2.53	7	0.48	7.06 / 6.58
2				7.25		
3	2.46			6.33		
4	3.13			7.64		

Şekil 4.27’de; 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının üretiminden 28 gün sonra yapılan deneylerle elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri gösterilmiştir. Tablo 4.24’de, 12 no’lu karışım kullanılarak yapılan deneyden elde edilen 28 günlük CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değeri verilmiştir. 12 no’lu karışım kullanılarak yapılan 7 ve 28 günlük CBR deneylerine ait grafikler Ek D’de verilmiştir.



Şekil 4.27 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının üretiminden 28 gün sonra yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri

Tablo 4.24 12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının 28 günlük CBR değeri

Deney No:	12 No’lu Karışım (28 Günlük)	
	Kalıbın Alt Kısımında CBR (%)	Kalıbın Üst Kısımında CBR (%)
1	6.40	12

4.4.4. Belirlenen Karışım Kullanılarak Yapılan Geçirimsilik Deneyleri

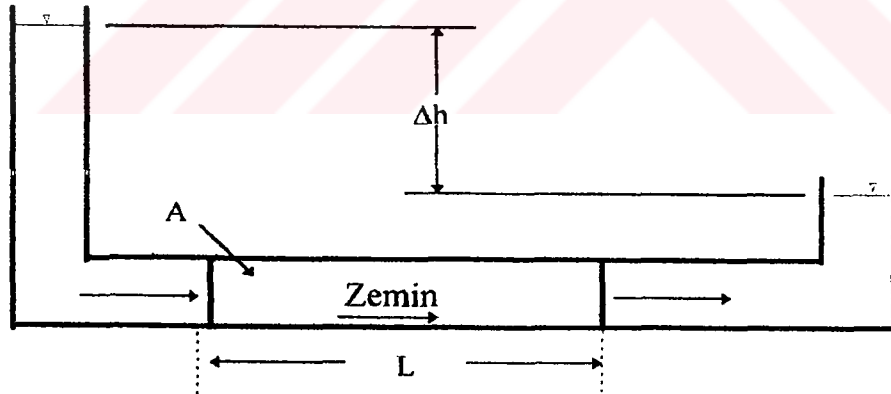
Zeminlerde su; adsorbe, kimyasal bağlı, etüvde kuruyan, drenajla giderilebilen serbest ve kapiler su olarak beş ayrı şekilde bulunabilir. Zemin içindeki suyun akışı laminar olarak kabul edilebilir. Bu durum için Darcy'nin (1856) önerdiği hız denklemi Bağıntı 4.2'deki gibidir.

$$V = k \times i \quad (4.2)$$

Denklemdaki i , Darcy'nin tanımladığı hız gradyanıdır. Bu denklem süreklilik denklemi ile geliştirilerek Bağıntı 4.3'e ulaşılır.

$$q = V \times A = k \times i \times A = k \times \frac{\Delta h}{L} \times A \quad (4.3)$$

Bağıntı 4.3, deneysel olarak Şekil 4.28 düzeneğinden elde edilmiştir. Denklemden V ; hız, q ; akışkanın debisi, A ; numunenin enkesit alanı, k ise geçirimsilik (permeabilite) katsayısıdır.



Şekil 4.28 Sızma hızı şematik gösterimi

Laboratuvarında yapılan permeabilite deneylerinde sonucu etkileyen faktörler, test düzeneğinde sıkışan hava kabarcıkları, suya doygunluğun % 100 seviyeye ulaşmaması, ısı değişmesi, kum ve siltlerde yapılan deneylerde ince danelerin hareketi olarak sıralanabilir (Holtz ve Kovacs, 1981).

Permeabilite (geçirimsizlik) katsayısı zeminlerin dane çapı dağılımına göre değişiklik gösterir. Tablo 4.25’de, k katsayısının büyüklüğünün zemin cinsine bağlı değişimi verilmiştir.

Tablo 4.25 Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre permeabilite katsayısı için tipik değerler

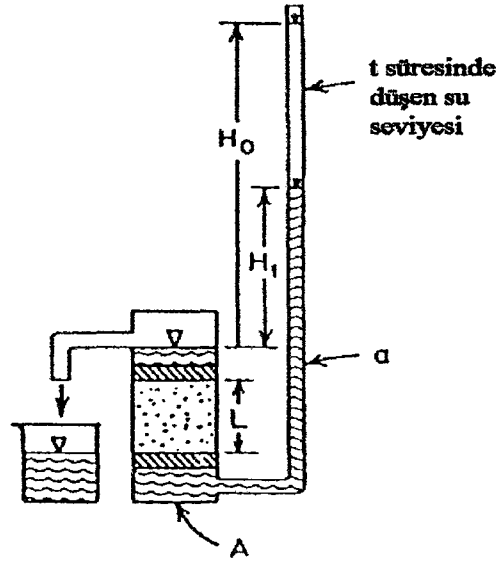
k sınır değerleri				
cm/s	10^2	10^0	10^{-3}	10^{-7}
m/s	10^0	10^{-2}	10^{-5}	10^{-9}
	Temiz çakıl GW, GP	Temiz çakıl ve kum karışımları GW, GP, GM, SW, SP	Kum – silt karışımları SM, SL, SC	Killer

Lambe ve Whitman (1969), permeabilitenin zemine ait olan beş özellikten etkilendiğini göstermişlerdir. Bu özellikler sırasıyla; dane boyutu, boşluk oranı, dane çapı dağılımı, dane dokusu ve zeminin doygunluk derecesidir. Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre sınıflandırılması pratikte mühendislik kullanımı için önemlidir. Tablo 4.26’da zeminlerin permeabilite katsayısına göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 4.26 Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre sınıflandırılması (Terzaghi ve Peck, 1962)

Permeabilite Derecesi:	Permeabilite Katsayısı, k (cm/sn)
Yüksek	10^{-1} üzeri
Orta	$10^{-1} - 10^{-3}$
Düşük	$10^{-3} - 10^{-5}$
Çok düşük	$10^{-5} - 10^{-7}$
Pratik olarak geçirimsiz	10^{-7} ’den az

Laboratuvarda hazırlanan 12 no’lu karışımın geçirimsizlik katsayısının (k) bulunması için düşen seviyeli permeametre aleti kullanılmıştır. Düşen seviyeli permeametre aleti; geçirimsizliği düşük ince daneli zeminlerin geçirimsizlik katsayısının bulunmasında kullanılmaktadır. Şekil 4.29’da düşen seviyeli permeametre aleti şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.29 Düşen seviyeli permeametre aleti

Düşen seviyeli permeametre aletiyle yapılan deneylerde permeabilite (geçirimsizlik) katsayısının hesaplanmasında Bağntı 4.4 kullanılır.

$$k = \frac{a \times L}{A \times t} \times \ln \frac{H_0}{H_1} \quad (4.4)$$

Bağntı 4.4’de, a ; okumaların alındığı cam tüpün enkesit alanı, L ; zemin numunesinin yüksekliği, A ; zemin numunesinin enkesit alanı, t ; su seviyesinin H_0 ’dan H_1 ’e düşmesi için gerekli süre, H_0 ; deneyin başındaki hidrolik yükseklik, H_1 ; deney sonundaki hidrolik yüksekliktir.

12 no’lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üretildikten sonra iki ayrı permametre kabına konulup; biri 7 gün, diğeri 28 gün nem odasında bekletilmiştir. Böylece kür süresinin permeabiliteye olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Tablo 4.27’de verilmiştir. Deneye ait föyler Ek D’de verilmiştir.

Tablo 4.27 12 no’lu uçucu kül – çimento - köpük karışımının 7 ve 28 günlük permeabilite katsayısı değerleri

Karışım No:	7 Günlük Permeabilite Katsayısı, k (cm/sn)	28 Günlük Permeabilite Katsayısı, k (cm/sn)
12	1.23×10^{-6}	1.45×10^{-7}

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bütün dünyada termik şantrallerin sayısının hızla artmasıyla, termik şantrallerin atık ürünü olan uçucu kül çevre için tehlike oluşturmaya başlamış ve uçucu kül için yeni kullanım alanları aranmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmada uçucu külün geoteknik mühendisliğinde kullanılabilirliği iki aşamada incelenmiştir. Bursa'nın Orhaneli Termik Santralinden elde edilen uçucu külün (OUK) geoteknik özellikleri incelenmiş, daha sonra uçucu kül – çimento – köpük karışımının hafif dolgu malzemesi olarak uygunluğu araştırılmıştır.

Birinci aşamada OUK'nın kimyasal ve geoteknik özellikleri incelenmiş ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Uçucu küllerin mühendislik özelliklerini, kimyasal bileşimleri kontrol etmektedir. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri; kömür cinsi ve saflığı, toz haline gelme derecesi, kazan tipi ve yanma şekline bağlıdır. OUK; puzolanik özellikleri yanında, tek başına da hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahiptir. OUK, C sınıfı uçucu küldür ve az bitümlü veya linyit kömürünün yakılmasıyla ortaya çıkar. C sınıfı uçucu kül olan ve değişik tarihlerde siliko – kalsik ve sülfü – kalsik uçucu kül özelliğinde kimyasal bileşime sahip olan OUK, kireç veya çimentoyla stabilizasyona gerek kalmadan bağlayıcı özellik göstermektedir. OUK farklı zamanlarda değişik kimyasal bileşimlere sahip olsa da, elde edildiği kömürün cinsi fazla değişmemektedir. OUK'nın yüksek CaO muhtevasının, uçucu külün hidrolik bağlayıcılığını arttırdığı gözlenmiştir.
- OUK'nın sahip olduğu yüksek SO₃ muhtevası, beton üretiminde çimentoyla birlikte kullanılmasına engel oluşturmaktadır. TS 639 ve TS 640'da uçucu küllerin SO₃ muhtevasının ağırlıkça % 5'i geçmesi halinde çimentoya katılmaması, katılması halinde uzun vadede betonda Candlot tuzu (Etrenjit) oluşumuna imkan verebileceği belirtilmektedir. Hacim artması nedeniyle betonda çatlaklar oluşmasına imkan veren Candlot tuzu oluşumu üstyapı inşaatında

tehlike yaratabilir. Bununla birlikte OUK'nın zemin stabilizasyonunda ve zemin yapılarında dolgu malzemesi olarak kullanılması daha uygun olacaktır. Aynı şekilde, yüksek SO_3 muhtevasına sahip (sülfo – kalsik) uçucu küllerin beton üretiminde kullanılmaları sakıncalı olacak, zemin yapılarında dolgu malzemesi olarak kullanılmaları uygun olacaktır.

- Aynı kömür yatağından elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve buna bağlı olarak cinsleri değişebildiği için, uçucu küllerin kimyasal bileşimleri kullanılmadan önce belirlenmelidir.
- Hem reaktif SiO_2 hem de CaO ihtiva eden uçucu küller suyla birleştiklerinde bağlayıcı hale gelip, dayanım kazanmaya başlarlar. Sadece reaktif SiO_2 içeren küller, kireç eklendiği zaman dayanım kazanmaya başlarlar. İçinde reaktif SiO_2 bulunmayan küller, kireç eklense bile dayanım kazanamazlar. OUK, C sınıfı kül olduğu için zemin iyileştirmesi amacıyla katkısız kullanılabilir. Bununla birlikte F sınıfı küller de kireç veya çimento katılarak aynı şekilde kullanılabilir.
- OUK kullanılarak yapılan elek analizi ve hidrometre analizi sonucunda, OUK'nın silt boyutunda oldukça uniform bir malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Literatürde de uçucu küllerin genel olarak silt boyutunda bir malzeme olduğu belirtilmektedir. Uçucu küllerin elde edildiği kömürün toz haline getirilişinin ve yakılma işleminin makinelerle yapılması, uçucu külün elektrostatik çökticiler veya siklon ayırıcıları yardımıyla tutulması dane boyutunu standart hale getirmektedir.
- OUK'nın kıvam limitlerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda, OUK'nın yüksek CaO ihtiva etmesi sebebiyle plastik davranmadığı, suyla karıştırıldıktan sonra kısa sürede reaksiyona girerek (hidratasyon) katılaşmaya başladığı gözlenmiştir.
- OUK'nın dane birim hacim ağırlığı, hem piknometre kabı hem de Le Chatelier şişesi kullanılarak bulunmuştur. Piknometre kabı ve su kullanılarak uygulanan birinci yöntemde, OUK'nın yüksek CaO muhtevası sebebiyle piknometre kabı içindeki suyla reaksiyona girebileceği düşünülmüştür. Bu nedenle Le Chatelier şişesi ve gazyağı kullanılarak ikinci defa dane birim hacim ağırlığı bulunmuştur. OUK'nın özgül ağırlığı (G_s); piknometre deneyi sonunda 2.76, Le Chatelier

deneyi sonunda 2.86 bulunmuştur. Termik santral uçucu küllerinin özgül ağırlıklarının genellikle 1.9 ile 2.5 arasında değiştiği dikkate alınırsa, OUK'nın özgül ağırlığının diğer uçucu küllere nazaran yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Literatürde, OUK'nın özgül ağırlığı hakkında farklı değerler verilmiştir. Buradan anlaşılmaktadır ki, uçucu küllerin kimyasal bileşimleri değiştikçe özgül ağırlıkları da değişmektedir.

- OUK numunesi üzerinde yapılan kompaksiyon deneyi sonucunda, optimum su muhtevası % 18, maksimum kuru birim hacim ağırlık 16.68 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. OUK'nın dane birim hacim ağırlığının yüksek olması sebebiyle, maksimum kuru birim hacim ağırlığı da diğer uçucu küllerle karşılaştırıldığında hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği açısından yüksek çıkmıştır. Doğal zeminlerin Standart Proktor enerjisi uygulanarak kompaksiyona tabi tutulmasıyla elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığa göre avantaj sağlamamaktadır.
- Optimum su muhtevasında Standart Proktor enerjisi uygulanarak sıkıştırıldıktan sonra nem odasında küre tabi tutulan OUK numunelerinde zamanla mukavemet artışı gözlenmiştir. 28 gün küre tabi tutulan numunelerin serbest basınç dayanımları, 7 gün küre tabi tutulan numunelerin serbest basınç dayanımlarından yaklaşık 4 kat daha büyük elde edilmiştir. Sıradan beton çeşitleri 7 gün sonunda 28 günlük mukavemetin % 70'ine ulaşırken, bu oran sıkıştırılmış uçucu kül numunelerde % 25 olarak belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış OUK'nın 28 gün küre tabi tutulduktan sonra yapılan serbest basınç deneyi sonucunda 17.85 MPa serbest basınç dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Uçucu küllerin 360 güne kadar belirli mukavemet artışına sahip olduğu bilindiği için bu dayanımın daha yüksek değerlere çıkması beklenebilir.
- 1, 7, 15 ve 28 gün küre tabi tutulan sıkıştırılmış uçucu kül numunelerinin hepsi serbest basınç deneyinde gevrek kırılma göstermişlerdir. Uçucu kül numuneleri maksimum dayanımlarına ulaştıkları noktalarda, belirli bir kırılma düzlemi göstermeden aniden parçalanmışlardır.
- Standart Proktor enerjisi uygulanarak sıkıştırılmış uçucu kül numuneleri kullanılarak yapılan deneyler sonucunda OUK'nın CBR değerlerinin çok yüksek olduğu anlaşılmıştır. OUK; sıkıştırıldığı andan itibaren iyi derecelenmiş çakılla

kıyaslanabilir taşıma gücüne sahip olmuştur ($CBR = \% 67$) . Islak deneye tabi tutulan OUK numunesinin, 10 gün su altında bekledikten sonra CBR değeri % 285'e ulaşmıştır. Pozolanik olan ve yüksek CaO muhtevasına sahip olması nedeniyle tek başına hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren OUK, su altında hidratasyona ve dayanım kazanmaya devam etmiştir. Bununla birlikte sıkıştırıldıktan sonra hemen ıslak deneye tabi tutulan OUK numunesinde % 7.2 oranında şişme meydana gelmiştir. Bunun nedeni; OUK numunesinin hidratasyon sürecinin başlangıcında, numunenin dayanım kazanmasına izin vermeden ıslak deneye tabi tutulması ve uçucu kül danelerinin silt boyutunda olması nedeniyle oluşan kapiler gerilme sonucunda yükselen suyun daneler arasına girerek malzemenin şişmesine neden olmasıdır. Hidratasyon sürecini tamamlayan uçucu kül numunesinde oluşan bağlayıcı jeller, su geçirimsizliğini sağlayacak, boşlukları dolduracak dolayısıyla numunenin şişmesini engelleyecektir. Tek başına kullanıldığında temel altı malzemesi olarak gereğinden fazla taşıma gücüne sahip olan OUK, zeminle karıştırılarak daha ekonomik biçimde kullanılabilir.

OUK'nın; maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve dane birim hacim ağırlığının yüksek oluşu, tek başına hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmasını elverişsiz kılar. Bununla birlikte, elde edilen serbest basınç dayanımı ve CBR değerlerinin yüksek oluşu, aynı zamanda yüksek hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olması, OUK'nın çimento ve hava sürükleyici madde katkısıyla hafif dolgu malzemesi üretiminde kullanılmasını sağlamıştır.

OUK, çimento ve hava sürükleyici katkı maddesi kullanılarak yapılan ön deneyler sonucunda homojen, zemin dolgularında kullanmak için yeterli mukavemet ve dayanıklılığa sahip uçucu kül – çimento – köpük karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımların genel özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarında kullanılan ağırlıkça katı madde oranı % 55, su oranı % 44.2, hava sürükleyici katkı maddesi oranı % 0.8'dir.
- Karışımlarda katı madde olarak çimento ve OUK kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan ağırlıkça toplam katı madde oranı her zaman sabit kalmış, bununla birlikte ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranları kendi aralarında değişmiştir.

Ağırlıkça çimento oranı en az % 6, en çok % 27.5 olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça uçucu kül oranı en az % 27.5, en çok % 49 olarak kullanılmıştır.

- Karışımlarda çimento ve uçucu kül dışında herhangi bir agrega kullanılmamıştır. Bunun nedeni, karışımların dayanımlarının gereksiz yere yüksek oluşunun istenmemesi ve homojenliğinin sağlanmasıdır.
- Kullanılan toplam katı madde miktarındaki çimento oranı arttıkça, karışımların mukavemetinde artış gözlenmiştir. Uçucu kül – çimento – köpük karışımlarında kullanılan ağırlıkça çimento oranı % 22.5 (130 kg/m^3) ve uçucu kül oranı % 32.5 (175 kg/m^3) olduğunda, karışımların 7 günlük serbest basınç dayanımı 150 kPa ve 28 günlük serbest basınç dayanımı 300 kPa olarak bulunmuştur. Karışımlarda kullanılan ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranları kendi aralarında değişse bile, ağırlıkça toplam katı madde oranı sabit kaldığı için karışımların yoğunluğu değişmemiştir.
- Elde edilen bütün uçucu kül – çimento – köpük karışımlarının üretimden 7 gün sonraki yoğunlukları 5.20 ile 5.60 kN/m^3 arasında değişmektedir. Mikserde optimum karıştırma süresi 30 dakika olarak bulunmuş, bu karıştırma süresi aşılsa bile karışımın yoğunluğunun stabil kalıp fazla değişmediği gözlenmiştir.
- Üretilen uçucu kül – çimento – köpük karışımlarında kullanılan hava sürükleyici katkı maddesi kolay temin edilebilir ve karışımın şantiyede üretilmesine imkan verir. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı akıcıdır ve kolaylıkla pompalanabilir.
- Üretilen uçucu kül – çimento – köpük karışımlarında kullanılan toplam katı madde miktarı değiştirilerek, uçucu kül oranının arttırılması ve çimento miktarının azaltılmasıyla daha ekonomik karışımlar elde edilebilir. Bununla birlikte; kullanılan çimento miktarını azaltarak dayanımın değişmemesini sağlamak için, kullanılan toplam katı madde (uçucu kül) miktarını arttırmak gerekecek böylece karışımın yoğunluğu da artacaktır.
- F sınıfı uçucu küllere de CaO katılarak, C sınıfı uçucu kül olan OUK gibi hafif dolgu malzemesi üretiminde kullanılmaları sağlanabilir. İçinde reaktif SiO_2

bulunan bütün uçucu kül çeşitleri, çimento ve hava sürükleyici katkı maddesiyle karıştırılarak hafif dolgu malzemesi üretiminde kullanılabilirler.

- Ağırlıkça toplam katı madde oranı % 55 olan ve katı madde miktarının % 50'sini uçucu külün, % 50'sini çimentonun oluşturduğu uçucu kül – çimento – köpük karışımı (12 no'lu karışım) üzerinde yapılan deney sonuçları, diğer hafif dolgu malzemelerinin fiziksel ve mühendislik özellikleriyle karşılaştırmak için Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Uçucu kül – çimento – köpük karışımının diğer hafif dolgu malzemeleriyle karşılaştırılması

Özellikler	Genleşmiş Polistiren Köpük	Ekstrude Polistiren Köpük	Volkanik Kül – Çimento – Köpük Karışımı	OUK – Çimento – Köpük Karışımı (12 No'lu Karışım)
Basınç Dayanımı (kPa)	(20 – 100)* (70 – 190)**	(140 – 370)* (250 – 670)**	150' 350"	200' 500"
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	0.15 – 0.30	0.28 – 0.55	11.0	5.20 – 5.60
Proje Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	1.00	-	-	6.00
Permeabilite Katsayısı, k (cm/sn)	-	-	(2.1 × 10 ⁻⁴)"	(1.23×10 ⁻⁶)' (1.45×10 ⁻⁷)"
CBR (%)	< 2	2 – 5	10.7"	2.5' (altta) 6.5' (üstte) 6.4" (altta) 12" (üstte)
Not: OUK – çimento – köpük karışımında ağırlıkça karışım oranları (C=%27.5, OUK=%27.5, Su=%44.2, Hava sürükleyici katkı maddesi=% 0.8)				
(*) % 1 deformasyonda				
(**) % 10 deformasyonda				
(') Üretimden sonra 7 gün nem odasında bekletilen numune				
(') Üretimden sonra 28 gün nem odasında bekletilen numune				

Uçucu kül – çimento – köpük karışımından oluşan numuneler üretildikten sonra 7 gün nem odasında bekletilmiş, daha sonra bir kısmı dışarıda bırakılmış, bir kısmı da suya konulmuştur. Üretildikten sonra 1 yıl kadar gözlenen numunelerde herhangi bir bozulma tespit edilmemiştir. Uçucu kül ve çimentonun, hava sürükleyici katkı maddesiyle birlikte kullanılması karışım üzerinde ters etki yaratmamış, karışım hidratasyonu tamamladıktan sonra da stabilitesini korumuştur. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı katılaşıırken ve daha sonra yüklendiğinde oluşabilecek çatlamalar,

karışıma atık malzeme lifleri (çelik, cam, plastik vb.) katılarak engellenebilir ve malzemenin esnekliği arttırılabilir.

Uçucu kül – çimento – köpük karışımı; çok yumuşak ve konsolidasyonu devam eden zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturularak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde, dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılabilir. Uçucu kül – çimento – köpük karışımı kullanılan yerlerde yatay basınçlar, karışımın hafifliği ve katılaştıktan sonra kendini tutması sebebiyle azalacaktır. Karışımın birim hacim ağırlığı doğal zeminlerin birim hacim ağırlığının dörtte birine eşit olduğu için, dolgu olarak kullanılması halinde alttaki zeminde oluşacak düşey basıncı, doğal dolgu malzemelerine göre dörtte birine indirecektir. Ayrıca uçucu kül – çimento – köpük karışımının maliyeti diğer hafif dolgu malzemelerine göre çok daha uygundur.

Dünyanın birçok ülkesinde önemli miktarlarda üretilen uçucu kül, birçok inşaat malzemesinin üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde de yılda 15 milyon tonun üzerinde uçucu kül üretilmekte ve bunun çok az bir kısmından faydalanılmaktadır. Uçucu kül – çimento – köpük karışımının hafif dolgu malzemesi olarak kullanılması hem uçucu kül tüketimi için yeni alanlar oluşturacak hem de geoteknik mühendisliğinde birçok probleme yeni çözüm yolları getirecektir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, I. and Lovell, C.W. , 1992.** Use of Waste Products in Highway Construction, Proceedings of the Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, Çeşme, Turkey, 25-27 May, pp. 409-418, Eds. Usmen, M.A. and Acar, Y.B. , A.A. Balkema, Rotterdam.
- Akman, M.S. , 1990.** Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Akman, M.S. , 1993.** Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 18-19 Kasım, s. 9-22, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi.
- Akman, M.S. and İlhan, T. , 1997.** Level of Nuclear Hazard in Mortars Containing Fly Ash, 1st International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, İstanbul, Turkey, 6-9 November, pp. 84-90.
- Akman, M.S. and Yücel, K.T. , 1995.** Efficiency Factors of Turkish C Class Fly Ashes, 11th European Ready Mixed Concrete Congress, İstanbul, Turkey, 21-23 June, pp. 390-396.
- Aksoy, İ.H. , 1992.** Uçucu Külün Geoteknikte Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 21-23 Ekim, s. 248-259.
- Aksoy, İ.H. , 1998.** Polistiren Köpüğün Hafif Dolgu Olarak Kullanılması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 22-23 Ekim, Cilt 2, s. 428-437.
- American Coal Ash Association, 1997.** 1996 Coal Combustion Product-Production and Use, Alexandria, Virginia.
- Baykal, G. ve Döven, A.G. , 1996.** Uçucu Külün Akıcı Dolgu Olarak Geoteknik Uygulamaları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 24-25 Ekim, s. 453-464.
- Baykal, G. , Özturan, T. , Savaş, M. ve Ramadan, K. , 1993.** Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 18-19 Kasım, s. 89-102.
- Bosscher, P.J. , Edil, T.B. and Kuraoka, S. , 1997.** Design of Highway Embankments Using Tire Chips, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, April 1997, Vol. 123, No. 4, pp. 295-304.

- Bowles, J. E.**, 1988. Engineering Properties of Soils and Their Measurement, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Brandl, H.**, 1995. Fly Ash as Fill Material for Highway Embankments, Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen, Denmark, 28 May-1 June, Vol. 2.
- Carlsten, P.**, 1995. Construction Methods for Roads in Peatland Areas, Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen, Denmark, 28 May-1 June, Vol. 8.
- Çokça, E. ve İpek, T.**, 1998. Kireç, Çimento, C ve F-Sınıfı Uçucu Kül Katkısının Şişen Bir Zeminin Şişme Basıncına Etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 22-23 Ekim, s. 450-459.
- Erdoğan, T.Y.**, 1993. Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 18-19 Kasım, s. 1-8.
- Erdoğan, T.Y. ve Parla B.**, 1993. Yüksek-Kireçli Uçucu Küllerin Beton Basıncı Dayanımları, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 18-19 Kasım, s. 79-89, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi.
- Erdoğan, T.Y.**, 1998. Hava Sürüklenmiş Betonun Özellikleri ve Kullanımı, İnşaat Mühendisliği ve Teknoloji Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Yayın No: 28, s. 59-78.
- Flaate, K.**, 1989. The Geotechnique of Superlight Materials, The Art and Science of Geotechnical Engineering, A Volume Honoring Ralph B. Peck, pp. 193-205, Eds. Cording, E.J., Hall, W.J., Halmiwanger, J.D., Hendron, A.J. and Mesri, G., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hausmann, M.R.**, 1990. Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill Publishing Company, Singapore.
- Hayashi, Y., Suzuki, A. and Kitazono, Y.**, 1998. Effect of Soil Properties on the Improvement with Foam and Cement Milk, Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, 7-11 September, Vol. 2, pp. 637-642, Eds. Pinto, P.S.S., A.A. Balkema, Rotterdam.
- Hecht, N.L. and Duvall, D.S.**, 1975. Characterization and Utilization of Municipal and Utility Sludges and Ashes: Volume 3 - Utility Coal Ash, National Environmental Research Center, U.S. Environmental Protection Agency.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D.**, 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

- Humphrey, D.N. and Manion, W.P. , 1992.** Properties of Tire Chips for Lightweight Fill, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE, Geotechnical Special Publication No. 30, New Orleans, Louisiana, 25-28 February, Vol. 2, pp. 1344-1355, Eds. Borden, R.H. , Holtz, R.D. and Juran, I. , New York.
- Humphrey, D.N. , Sandford, T.C. , Cribbs, M.M. and Manion, W.P. , 1993.** Shear Strength and Compressibility of Tire Chips for Use as Retaining Wall Backfill, 72nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, January.
- Humphrey, D.N. and Eaton, R.A. , 1993.** Tire Chips as Subgrade Insulation- Field Trial, Proceedings of the Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-Products for Construction of Highway Facilities, Federal Highway Administration, Denver, Colorado, October.
- Humphrey, D.N. and Nickels, W.L. , 1997.** Effect of Tire Chips as Lightweight Fill on Pavement Performance, Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 6-12 September, Vol. 3, pp. 1617-1620.
- Joshi, R.C. , Duncan, D.M. and McMaster, H.M. , 1975.** New and Conventional Engineering Uses of Fly Ash, Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 101, TE4, pp. 791-806.
- Kosmatka, S.H. , Panarese, W.C. , Gissing, K.D. and MacLeod, N.F. , 1995.** Design and Control of Concrete Mixtures, Canadian Portland Cement Association Engineering Bulletin.
- Kurbetçi, Ş. ve Öztekin, E. , 1993.** Uçucu Küllü Betonlara Hızlandırılmış Kür Uygulaması, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 18-19 Kasım, s. 45-57, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi.
- Lambe, T. W. and Whitman R. V. , 1969.** Soil Mechanics, John Wiley & Sons, U.S.A.
- Lav, A. H. , 1997.** Characterisation of Stabilised Eraring Fly Ash as a Pavement Base Material, PhD Thesis, University of Technology, Sydney.
- Lav, A. H. and Lav, M. A. , 2000.** Microstructural Development of Stabilised Fly Ash as a Pavement Base Material, Journal of Materials and Civil Engineering, ASCE, May 2000, pp. 157-163.
- Leonards, G.A. and Bailey, B. , 1982.** Pulverized Coal Ash as Structural Fill, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 108, GT4, pp. 517-531.
- Lovell, C.W. , Ke, T.C. , Huang, W.H. and Lovell, J.E. , 1991.** Bottom Ash as Highway Material, Presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.

- Moulton, L. K. , 1973. Bottom Ash and Boiler Slag, Proceedings of the Third International Ash Utilization Symposium, U.S. Bureau of Mines, Information Circular No. 8640, Washington D.C.**
- Nishikawa, J. , Matsuda, Y. , Mihara, N. , Kuwabara, M. , Murata, M. and Kusakabe, F. , 1993. Volcanic Ash Treated with Foam and Cement for Lightweight Filling Materials, Proceedings of the Conference Engineered Fills' 93, Newcastle upon Tyne, England, 15-17 September, pp. 340-355, Eds. Clarke, B.G. , Jones, C.J.F.P. and Moffat, A.I.B. , Thomas Telford.**
- Önalp, A. ve Özocak, A. , 1998. Geoteknik Sözlüğü, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ekim 1998.**
- Özturan, T. , 1990. Uçucu Kül-Çimento Bulamaçlarının Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Üçüncü Ulusal Kongresi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 25-26 Ekim, Cilt 2, s. 373-385.**
- Poran, C.J. and Ahtchi-Ali, F. , 1989. Properties of Solid Waste Incinerator Fly Ash, Journal of Geotechnical Engineering, August 1989, Vol. 115, No. 8, pp. 1118-1133.**
- Rahman, M.A. , 1987. Effects of Cement-Rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lateritic Soils, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, June 1987, Vol. 27, No. 2, pp. 61-65.**
- Read, J. , Dodson, T. and Thomas, J. , 1991. Experimental Project- Use of Shredded Tires for Lightweight Fill, Oregon Department of Transportation, Post- Construction Report for Project No. DTFH-71-90-501-OR-11, Salem, Oregon.**
- Rohde, H. L. , Martin, J. P. And Cheng, S. C. , 1992. Effects of Drainage Conditions on Subgrade and Slope Stability of Fly Ash Embankments, Environmental Geotechnology, pp. 445-452, Eds. Usmen & Acar, Balkema, Rotterdam.**
- Sanders, R.L. and Snowdon, R.A. , 1993. Polystyrene as an Ultra-Lightweight Engineered Fill, Proceedings of the Conference Engineered Fills' 93, Newcastle upon Tyne, England, 15-17 September, pp. 281-301, Eds. Clarke, B.G. , Jones C.J.F.P. and Moffat, A.I.B. , Thomas Telford.**
- Schnormeier, R. , 1992. Recycled Tire Rubber in Asphalt, 71st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.**
- Schuster, R.L. and Krizek, R.J. , 1978. Landslides Analysis and Control, National Academy of Sciences, Washington D.C. , Special Report 176, pp. 181-183.**
- Short, A. and Kinniburgh, W. , 1982. Lightweight Concrete, Applied Science Publishers Ltd. , London.**

- Sivapullaiah, P.V. , Prashanth, J.P. and Sridharan, A. , 1996.** Effect of Fly Ash on the Index Properties of Black Cotton Soil, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, March 1996, Vol. 36, No.1, pp. 97-103.
- Sivapullaiah, P.V. , Sridharan, A. and Prashanth, J.P. , 1998.** Geotechnical Properties of Some Indian Fly Ashes, Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, 7-11 September, Vol. 2, pp. 627-632, Eds. Pinto, P.S.S. , A.A. Balkema, Rotterdam.
- Tan, O. ve İyisan, R. , 1996.** Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 24-25 Ekim, Cilt 2, s. 417-425.
- Terzaghi K. and Peck R. B. , 1962.** Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, U.S.A.
- Toth, P.S. , Chan, H.T. and Cragg, C.B. , 1988.** Coal Ash as Structural Fill with Special Reference to Ontario Experience, Canadian Geotechnical Journal 25, pp. 694-704.
- TS-639, 1975.** Uçucu Küller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS-640, 1975.** Uçucu Küllü Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tsuchida, T. , Okumura, T. , Takeuchi, D. And Kishida, T. , 1996.** Development of Light-Weight Fill from Dredgings, Proceedings of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, 5-8 November, Vol. 1, pp. 415-420.
- Usmen, M.A. , Baradan, B. and Yazıcı, Ş. , 1992.** Geotechnical and Geoenviromental Properties of Stabilized Lignite Fly Ash, Proceedings of the Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, Çeşme, Turkey, 25-27 May, pp. 419-427, Eds. Usmen, M.A. and Acar, Y.B. , A.A. Balkema, Rotterdam.
- Yücel, K.T. , 1997.** Pompa Betonlarında İşlenebilirliğin Harç Fazının Reolojisine Dayanarak Belirlenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



EK A

Tablo A.1 Bazı Türkiye uçucu küllerinin kimyasal bileşimleri ve özgül ağırlıkları

Uçucu Külün Üretildiği Termik Santral	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Serbest CaO (%)	Kızdırma Kaybı (%)	(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) (%)	G _s (Özgöl Ağırlık)
Afşin-Elbistan (Akman, 1993)	33.9	12.5	5.9	35.5	0.8	7.2	-	-	1.90	-	1.6	52.3	
Afşin-Elbistan (Tokay, 1993)	27.4	12.8	5.5	47.0	2.5	6.2	0.70	-	-	-	2.4	45.7	
Afşin-Elbistan (Akman, 1995)	24.0	9.6	5.3	44.3	2.5	9.5	-	-	-	14.5	-	38.3	2.65
Çatalağzı (Tokay, 1993)	56.8	24.1	6.8	1.4	2.4	2.9	1.10	-	-	-	0.6	87.7	
Çayırhan (Yücel, 1997)	43.4	14.2	8.4	14.2	4.6	5.8	-	2.2	-	-	-	66.0	2.30
Orhaneli (Akman, 1995)	48.8	19.6	6.5	10.1	4.0	4.20	-	-	-	-	-	74.9	1.73
Orhaneli (Yücel, 1997)	34.8	19.4	3.9	26.3	1.7	6.3	-	1.9	2.7	-	-	58.1	2.40
Orhaneli (Set Beton, 1999)	32.3	12.9	7.1	31.5	3.9	11.4	-	1.20	0.34	-	1.59	52.3	2.86
Seytömer (Akman, 1993)	46.7	13.8	11.7	12.3	4.7	5.5	-	-	2.80	-	1.4	72.2	
Seytömer (Öztekin ve Kurbetçi, 1993)	48.8	19.6	9.5	10.1	4.2	4.2	-	1.46	0.22	-	1.0	77.9	
Seytömer (Akman, 1995)	48.2	17.5	12.2	7.7	5.5	3.90	-	-	-	5.0	-	77.9	1.80
Seytömer (Tokay, 1993)	40.6	9.1	7.7	19.9	8.1	10.6	-	-	-	-	1.4	57.4	
Seytömer (Yücel, 1997)	46.7	16.8	9.8	12.4	4.6	2.9	-	2.7	2.8	-	-	73.3	2.1

Uçucu Külün Üretildiği Termik Santral	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Serbest CaO (%)	Kızdırma Kaybı (%)	(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) (%)	G _s (Özgül Ağırlık)
Soma (Baykal ve diğ., 1993)	26.5	51.4	1.9	14.0	2.0	2.9	-	-	-	-	0.7	79.8	2.62
Soma (Baykal ve Döven, 1996)	50.5	23.7	5.8	9.3	2.6	1.4	-	-	-	-	2.17	80.1	
Soma (Çokça ve İpek, 1998)	44.2	22.1	4.9	19.0	1.0	3.96	0.98	1.52	0.45	-	1.19	79.8	2.62
Soma-B (Usmen, 1992)	42.4	27.6	5.5	22.9	2.0	1.83	-	-	-	-	0.76	75.5	2.33
Soma-B (Akman, 1993)	42.7	20.2	4.0	24.5	1.3	4.4	-	-	1.10	-	0.6	66.9	
Soma-B (Erdoğan ve Parla, 1993)	48.1	24.9	6.4	14.5	2.7	1.8	-	-	-	-	0.7	79.4	
Soma-B (Tokyay, 1993)	39.8	22.3	4.4	25.4	1.9	4.8	0.6	-	-	-	0.4	66.5	
Tunçbilek (Akman, 1993)	58.3	22.1	9.7	2.1	4.8	0.4	-	-	2.50	-	1.9	90.1	
Tunçbilek (Erdoğan ve Parla, 1993)	57.3	29.1	3.7	2.8	4.3	0.4	-	-	-	-	2.3	90.1	
Tunçbilek (Tokyay, 1993)	56.4	23.0	10.1	2.1	3.3	0.4	-	-	-	-	1.1	89.5	
Tunçbilek (Çokça, 1998)	58.6	19.4	10.2	2.2	1.7	0.36	1.11	1.50	0.19	-	1.1	88.2	
Yatağan (Usmen, 1992)	43.4	27.7	11.2	12.7	3.7	1.90	-	-	-	-	0.52	82.3	2.33
Yatağan (Tokyay, 1993)	51.2	22.9	7.8	13.0	2.8	0.3	0.9	-	-	-	0.4	81.9	



İ.T.Ü ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.1 OUK üzerinde yapılan piknometre deneyi

Numune cinsi: Termik santral uçucu külü			
Numunenin geldiği yer : Orhaneli Termik Santrali			
Piknometre No:	55	76	58
Piknometre Ağırlığı (gr)	28.8	31.1	27.2
Kuru Numune Ağırlığı, W_1 (gr)	50	50	50
Su+Piknometre Ağırlığı, W_2 (gr)	483.1	420	483.1
W_1+W_2 (gr)	533.1	470	533.1
Su+Piknometre+Numune Ağırlığı, W_3 (gr)	515.1	451.8	515
$W_1+W_2-W_3$ (gr)	18	18.2	18.1
$G_s = \frac{W_1}{W_1 + W_2 - W_3}$	2.78	2.75	2.76
Ortalama G_s (Özgül Ağırlık)	2.76		
Ortalama γ_s (kN/m ³)	27.08		

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.2 OUK üzerinde yapılan elek analizi

Numune cinsi: Termik santral uçucu külü				
Numunenin geldiği yer: Orhaneli Termik Santrali				
Kuru numune ağırlığı: 250 gr				
Elek No:	Delik Çapı: (mm)	Eleğin Üstünde Kalan: (gr)	Elekten Geçen:	
			(gr)	(%)
40	0.420	-	250	100
70	0.210	-	250	100
100	0.149	-	250	100
200	0.075	1.52	249	99

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.3 OUK üzerinde yapılan hidrometre analizi

Numune cinsi: Termik santral uçucu külü Numunenin geldiği yer: Orhaneli Termik Santrali Dane özgül ağırlığı: 2.86 Alman kuru numune ağırlığı: 50 gr Dane birim hacim ağırlığa bağlı düzeltme faktörü: 0.96 (Bowles, 1988) Ayrıştırıcı madde: NaPO ₃ (sodyum hexametafosfat) Ayrıştırıcı madde düzeltmesi (C _d): +2.5 Menisküs düzeltmesi (C _m): 1 Su sıcaklığı: 22°C Sıcaklık düzeltmesi (C _T): +0.40							
Geçen Zaman (dakika)	Hidrometre Okuması R _s	Düzeltilmiş Hidrometre Okuması (R _c)	Alınan Numuneye Göre Yüzde (%)	Menisküs Düzeltmesi Yapılan Okuma (R)	Efektif Derinlik, H _e (cm)	Dane Çapı, D (mm)	Ana Numuneye Göre Yüzde (%)
0.25	50.5	48.4	92.9	51.5	7.93	0.071	92
0.50	45.5	43.4	83.3	46.5	8.74	0.053	82
1	43	40.9	78.5	44	9.15	0.038	78
2	42	39.9	76.6	43	9.31	0.027	76
4	39	36.9	70.9	40	9.80	0.020	70
8	21.5	19.4	37.3	22.5	12.64	0.016	37
15	11	8.9	17.1	12	14.35	0.012	17
30	10	7.9	15.2	11	14.51	0.009	15
60	9.5	7.4	14.2	10.5	14.59	0.006	14
120	8	5.9	11.3	9	14.84	0.004	11
240	6	3.9	7.5	7	15.16	0.003	7
480	4	1.9	3.7	5	15.49	0.002	4
1440	3	0.9	1.7	4	15.65	0.001	2
$R_c = R_s - C_d + C_T$ Alınan numuneye göre yüzde = $(R_c \times a) / W_s$ $H_e = 16.3 - (0.1625 \times R)$ $D = K \times \sqrt{\frac{H_e}{t}}$ $K = 0.0126$ (Bowles, 1988) Ana numuneye göre yüzde = $((R_c \times a) / W_s) \times 0.99$							

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.4 OUK üzerinde yapılan Standart Proktor Testi

Numune cinsi: Termik santral uçucu külü													
Numunenin geldiği yer: Orhaneli Termik Santrali													
Proktor kalıbının hacmi: 947.39 cm ³													
Proktor kalıbının ağırlığı: 4400 gr													
Tabaka sayısı: 3													
Tokmak ağırlığı: 2.495 kg													
Düşüş yüksekliği: 30.5 cm													
Vuruş adedi: 25													
Deney No:	1		2		3		4		5		6		
Islak Num.+ Kalıp (gr)	5910		5945		5950		5990		6020		6035		
Kalıp (gr)	4400		4400		4400		4400		4400		4400		
Islak Num. (gr)	1510		1545		1550		1590		1620		1635		
Birim Hacim Ağ. (gr/cm ³)	1.59		1.63		1.64		1.68		1.71		1.73		
Kap No.	54	18	11	28	38	2	50	75	68	88	19	87	
Islak Num. + Dara (gr)	62.3	68.6	63.7	67.4	68.7	72.9	72.8	76.1	92.7	90.8	81.9	87.0	
Kuru Num. + Dara (gr)	61.4	66.9	61.4	64.9	66.9	71.0	69.2	72.2	87.2	85.6	76.8	81.5	
Su Miktarı (gr)	1.4	1.7	2.3	2.5	1.8	1.9	3.6	3.9	5.5	5.2	5.1	5.5	
Dara (gr)	22.6	23.8	22.6	22.1	29.4	30.1	24.9	22.8	25.4	25.4	23.5	24.8	
Kuru Numune (gr)	38.8	43.1	38.8	42.8	37.5	40.9	44.3	49.4	61.8	60.2	53.3	56.7	
Su Muh.	0.04	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	
Ortalama Su Muh. (gr)	0.04		0.06		0.05		0.08		0.09		0.10		
Kuru Birim Hacim Ağ. (gr/cm ³)	1.53		1.54		1.56		1.56		1.57		1.57		

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Deney No:	7		8		9		10		11		12	
Islak Num.+ Kalıp (gr)	6080		6150		6210		6250		6290		6300	
Kalıp (gr)	4400		4400		4400		4400		4400		4400	
Islak Num. (gr)	1680		1750		1810		1850		1890		1900	
Birim Hacim Ağ. (gr/cm ³)	1.77		1.85		1.91		1.95		1.99		2.01	
Kap No.	47	70	16	35	53	64	4	90	50	77	11	12
Islak Num. + Dara (gr)	78.2	93.2	99.6	97.4	83.9	86.0	86.1	88.7	79.9	92.5	83.5	99.3
Kuru Num. + Dara (gr)	72.8	86.2	91.0	89.0	76.1	78.2	77.6	79.9	72.0	82.5	74.2	88.0
Su Miktarı (gr)	5.4	7.0	8.6	8.4	7.8	7.8	8.5	8.8	7.9	10.0	9.3	11.3
Dara (gr)	23.4	22.9	25.6	25	21.1	23.0	23.2	25.1	24.9	25.1	22.6	24.9
Kuru Numune (gr)	49.4	63.3	65.4	64.0	55	55.2	54.4	54.8	47.1	57.4	51.6	63.1
Su Muh.	0.11	0.11	0.13	0.13	0.14	0.14	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18
Ortalama Su Muh. (gr)	0.11		0.13		0.14		0.16		0.17		0.18	
Kuru Birim Hacim Ağ. (gr/cm ³)	1.59		1.64		1.68		1.68		1.70		1.70	

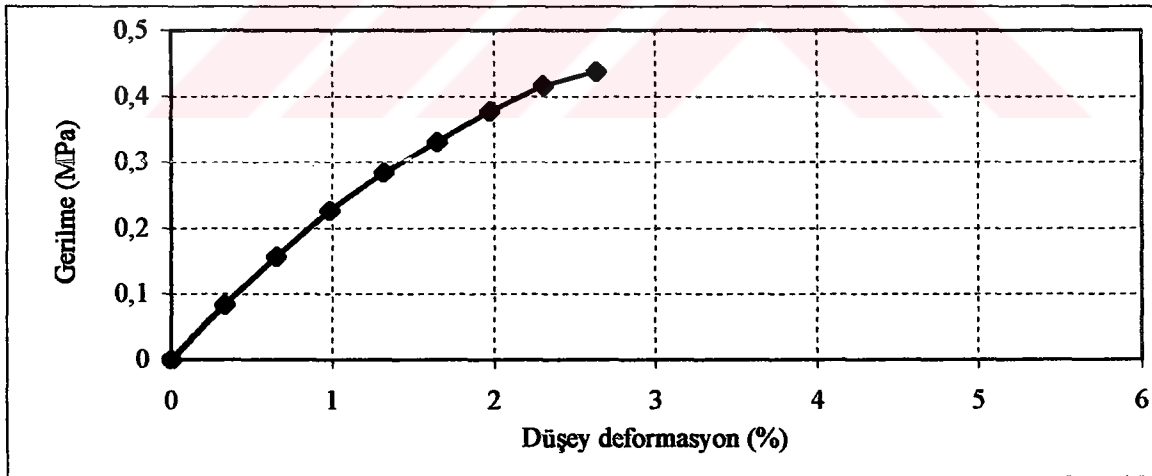
İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Deney No:	13		14		15		16		17	
Islak Num.+ Kalıp (gr)	6280		6280		6275		6260		6230	
Kalıp (gr)	4400		4400		4400		4400		4400	
Islak Num. (gr)	1880		1880		1875		1860		1830	
Birim Hacim Ağ. (gr/cm ³)	1.98		1.98		1.98		1.96		1.93	
Kap No.	35	90	43	99	11	48	317	324	16	330
Islak Num. + Dara (gr)	94.8	102.5	88.7	95.1	95.1	100.6	103.9	105.3	130.6	138.6
Kuru Num. + Dara (gr)	83.5	90.2	78.2	83.5	84.3	88.6	89.5	91.2	110.7	116.6
Su Miktarı (gr)	11.3	12.3	10.5	11.6	10.8	12	14.4	14.1	19.9	22
Dara (gr)	25.0	25.1	27.4	26.8	33.8	33.1	29.9	32.6	34.5	31.8
Kuru Numune (gr)	58.5	65.1	50.8	56.7	50.5	55.5	59.6	58.6	76.2	84.8
Su Muh.	0.19	0.19	0.21	0.21	0.22	0.22	0.24	0.24	0.26	0.26
Ortalama Su Muh. (gr)	0.19		0.21		0.22		0.24		0.26	
Kuru Birim Hacim Ağ. (gr/cm ³)	1.66		1.64		1.62		1.58		1.53	

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.5 0 günlük (kür uygulanmayan) OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyi

0 Günlük Numune						
Başlangıç:						
H: 76 mm D: 38 mm A_0 : 11.34 cm ² w: % 18 Yükleme hızı (v): 1.5 mm/dak						
Ring faktörü: 0.1404 kg/div						
Düşey Deplasman:		Düşey Yük:		Düşey	Düzeltilmiş Alan,	Gerilme
Okuma	mm	Okuma	kgf	Deformasyon (%):	A_i (cm ²):	σ (kg/cm ²):
0	0	0	0	0	11,341	0
25	0,25	70	9,83	0,33	11,378	0,86
50	0,5	130	18,25	0,66	11,416	1,60
75	0,75	188	26,40	0,99	11,454	2,30
100	1	237	33,27	1,32	11,492	2,90
125	1,25	277	38,89	1,64	11,531	3,37
150	1,5	317	44,51	1,97	11,569	3,85
175	1,75	350	49,14	2,30	11,608	4,23
200	2	370	51,95	2,63	11,648	4,46
Not: Numune; düşey yükün uygulanması sırasında aniden parçalanmıştır (Gevrek kırılma).						



Şekil B.1 0 günlük (kür uygulanmayan) OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.6 1 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyi

1 Günlük Numune

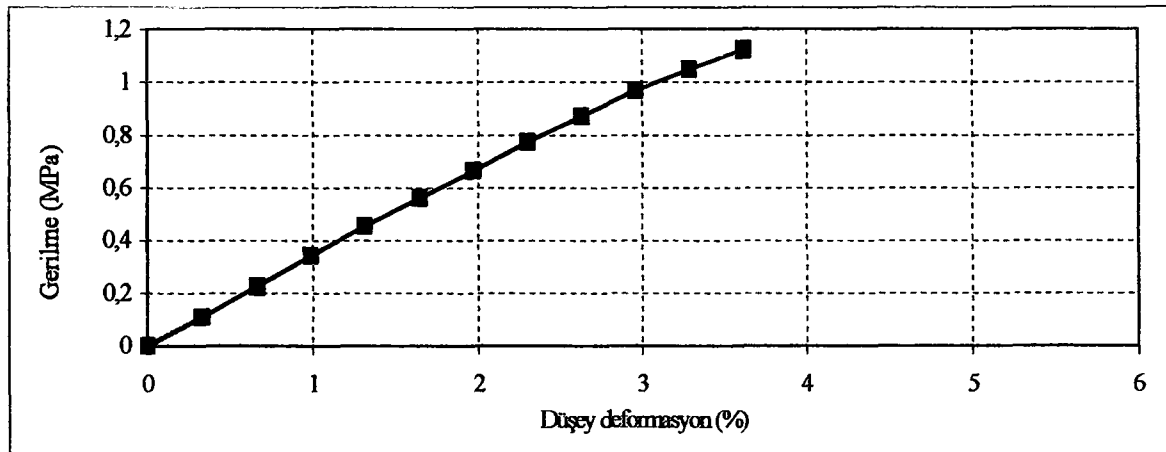
Başlangıç:

H: 76 mm D: 38 mm A_0 : 11.34 cm² w: % 18 Yükleme hızı (v): 1.5 mm/dak

Ring faktörü: 0.1404 kg/div

Düşey Deplasman:		Düşey Yük:		Düşey		Düzeltilmiş Alan, A _i (cm ²):		Gerilme σ (kg/cm ²):
Okuma	mm	Okuma	kgf	Deformasyon (%):				
0	0	0	0	0		11,341		0
25	0,25	90	12,64	0,33		11,378		1,11
50	0,5	185	25,97	0,66		11,416		2,28
75	0,75	284	39,87	0,99		11,454		3,48
100	1	380	53,35	1,32		11,492		4,64
125	1,25	470	65,99	1,64		11,531		5,72
150	1,5	557	78,20	1,97		11,569		6,76
175	1,75	650	91,26	2,30		11,608		7,86
200	2	735	103,19	2,63		11,648		8,86
225	2,25	820	115,13	2,96		11,687		9,85
250	2,5	890	124,96	3,29		11,727		10,66
275	2,75	960	134,78	3,62		11,77		11,45

Not: Numune; düşey yükün uygulanması sırasında aniden parçalanmıştır (Gevrek kırılma).



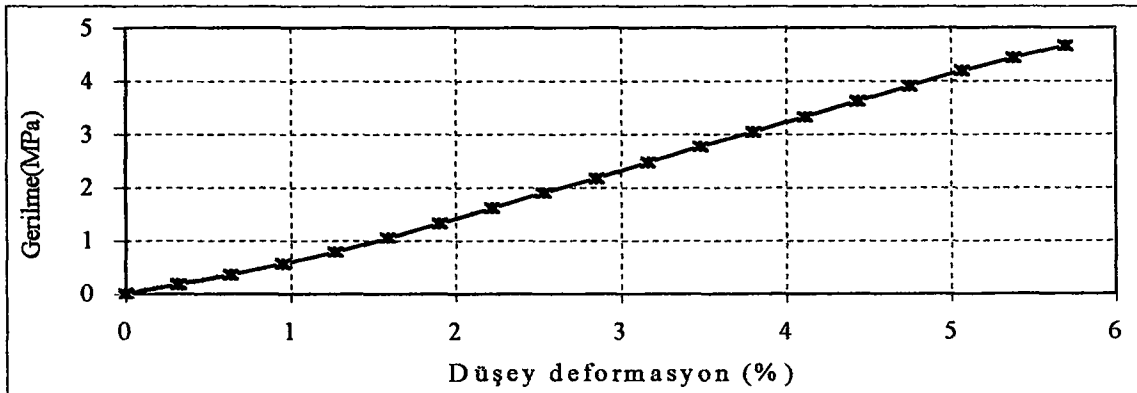
Şekil B.2 1 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.7 7 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyi

7 Günlük Numune								
Başlangıç:								
H: 79 mm D: 38 mm A_0 : 11.34 cm ² w: % 18 Yükleme hızı (v): 1.5 mm/dak								
Ring faktörü: 0.364 kg/div								
Düşey Deplasman:		Düşey Yük:		Düşey		Düzeltilmiş Alan,		Gerilme,
Okuma	mm	Okuma	kgf	Deformasyon (%):		A_s (cm ²):		σ (kg/cm ²):
0	0	0	0	0		11,341		0
25	0,25	55	20,02	0,32		11,377		1,76
50	0,5	113	41,13	0,63		11,413		3,60
75	0,75	180	65,52	0,95		11,450		5,72
100	1	252	91,73	1,27		11,486		7,99
125	1,25	340	123,76	1,58		11,523		10,74
150	1,5	430	156,52	1,90		11,561		13,54
175	1,75	523	190,37	2,22		11,598		16,41
200	2	617	224,59	2,53		11,636		19,30
225	2,25	710	258,44	2,85		11,673		22,14
250	2,5	810	294,84	3,16		11,712		25,17
275	2,75	910	331,24	3,48		11,750		28,19
300	3	1003	365,09	3,80		11,789		30,97
325	3,25	1100	400,40	4,11		11,828		33,85
350	3,5	1200	436,80	4,43		11,867		36,81
375	3,75	1300	473,20	4,75		11,906		39,74
400	4	1400	509,60	5,06		11,946		42,66
425	4,25	1490	542,36	5,38		11,986		45,25
450	4,5	1570	571,48	5,70		12,026		47,52

Not: Numune; düşey yükün uygulanması sırasında aniden parçalanmıştır (Gevrek kırılma).



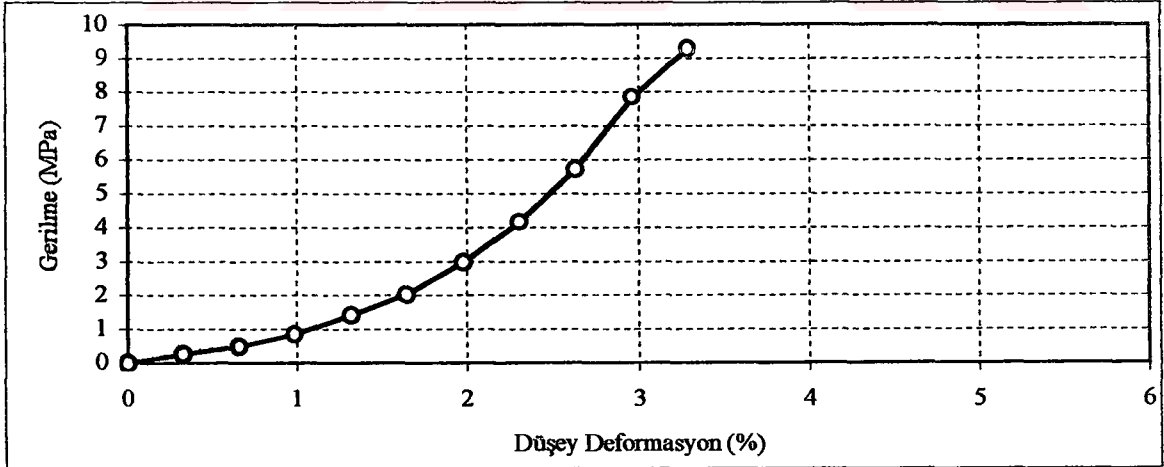
Şekil B.3 7 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.8 15 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyi

15 Günlük Numune								
Başlangıç:								
H: 79 mm D: 38 mm A_0 : 11.34 cm ² w: % 18 Yükleme hızı (v): 1.5 mm/dak								
Ring faktörü: 4.6707 kg/div								
Düşey Deplasman:		Düşey Yük:		Düşey		Düzeltilmiş Alan,		Gerilme,
Okuma	mm	Okuma	kgf	Deformasyon (%):		A_i (cm ²):		σ (kg/cm ²):
0	0	0	0	0		11,341		0
25	0,25	6	28,02	0,33		11,378		2,46
50	0,5	12	56,05	0,66		11,416		4,91
75	0,75	21	98,08	0,99		11,454		8,56
100	1	35	163,47	1,32		11,492		14,22
125	1,25	51	238,21	1,64		11,531		20,66
150	1,5	75	350,30	1,97		11,569		30,28
175	1,75	105	490,42	2,30		11,608		42,25
200	2	145	677,25	2,63		11,648		58,15
225	2,25	200	934,14	2,96		11,687		79,93
250	2,5	238	1111,63	3,29		11,727		94,79

Not: Numune; düşey yükün uygulanması sırasında aniden parçalanmıştır (Gevrek kırılma).



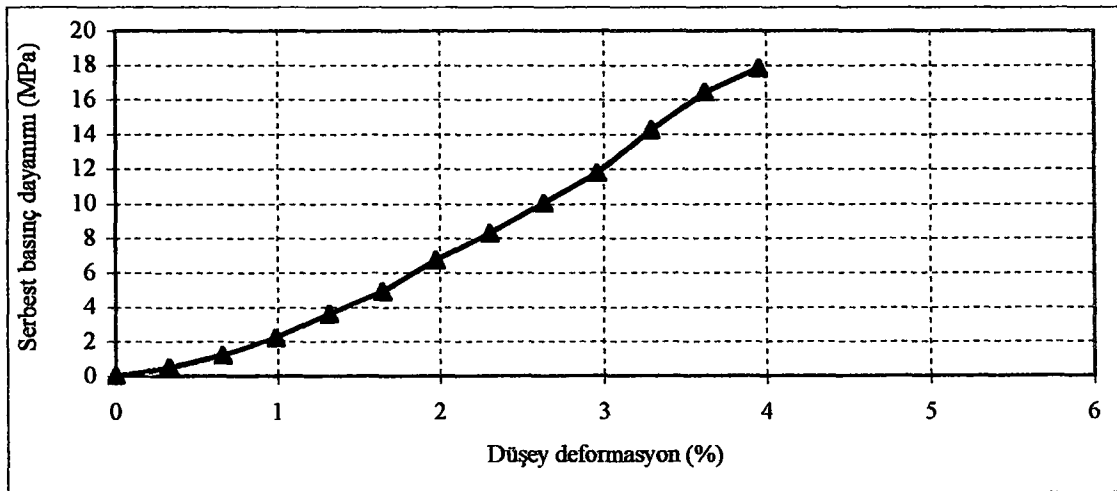
Şekil B.4 15 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.9 28 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyi

28 Günlük Numune								
Başlangıç:								
H: 79 mm D: 38 mm A_0 : 11.34 cm ² w: % 18 Yükleme hızı (v): 1.5 mm/dak								
Ring faktörü: 4.6707 kg/div								
Düşey Deplasman:		Düşey Yük:		Düşey		Düzeltilmiş Alan,		Gerilme,
Okuma	mm	Okuma	kgf	Deformasyon (%):		A_i (cm ²):		σ (kg/cm ²):
0	0	0	0	0		11,341		0
25	0,25	12	56,05	0,33		11,378		4,93
50	0,5	30	140,12	0,66		11,416		12,27
75	0,75	55	256,89	0,99		11,454		22,43
100	1	90	420,36	1,32		11,492		36,58
125	1,25	123	574,50	1,64		11,531		49,82
150	1,5	170	794,02	1,97		11,569		68,63
175	1,75	210	980,85	2,30		11,608		84,50
200	2	255	1191,03	2,63		11,648		102,26
225	2,25	300	1401,21	2,96		11,687		119,89
250	2,5	365	1704,81	3,29		11,727		145,38
275	2,75	422	1971,04	3,62		11,767		167,51
300	3	460	2148,52	3,95		11,807		181,97

Not: Numune; düşey yükün uygulanması sırasında aniden parçalanmıştır (Gevrek kırılma).



Şekil B.5 28 gün küre tabi tutulan OUK numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrisi

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.10 0 günlük OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyi

Kuru (0 günlük) Numune							
Kalıp ağırlığı: 4140 gr							
Kalıp+numune ağırlığı: 8745 gr							
Kalıp yüksekliği: 17.8 cm Kalıp çapı: 15.2 cm Disk yüksekliği: 5.1 cm							
Kalıp hacmi: 2303.35 cm ³							
$\gamma_n = 19.61 \text{ kN/m}^3$ $w = w_{opt} = \% 18$ $\gamma_k = 16.62 \text{ kN/m}^3$							
Ring faktörü= 4.6707 kg/div							
Deformasyon:		Kuvvet Halkası:		Penetrasyon: (mm)		Düşey Yük: (kg)	
0	650	0	198	0	6,5	0	924,80
25	700	22	204	0,25	7	102,76	952,82
50	750	50	212	0,5	7,5	233,54	990,19
75	800	79	221	0,75	8	368,99	1032,22
100	850	108	230	1	8,5	504,44	1074,26
125	900	128	210	1,25	9	597,85	980,85
150	950	146	208	1,5	9,5	681,92	971,51
175	1000	160	218	1,75	10	747,31	1018,21
200	1100	173	248	2	11	808,03	1158,33
225	1200	185	255	2,25	12	864,08	1191,03
250	1300	195	253	2,5	13	910,79	1181,69
275	1400	204	259	2,75	14	952,82	1209,71
300	1500	212	257	3	15	990,19	1200,37
350	1600	225	268	3,5	16	1050,91	1251,75
400	1700	210	284	4	17	980,85	1326,48
450	1800	186	289	4,5	18	868,75	1349,83
500	1900	186	301	5	19	868,75	1405,88
550	2000	188	317	5,5	20	878,09	1480,61
600		192		6		896,77	

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.11 1 gün su altında bekletilmiş OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyi

<u>Islak (1 günlük) Numune</u>							
<u>Başlangıç:</u>							
Kalıp ağırlığı: 4140 gr							
Kalıp+numune ağırlığı: 8755 gr							
Kalıp yüksekliği: 17.8 cm Kalıp çapı: 15.2 cm Disk yüksekliği: 5.1 cm							
Kalıp hacmi: 2303.35 cm ³							
$\gamma_n = 19.66 \text{ kN/m}^3$ $w = w_{opt} = \% 18$ $\gamma_k = 16.66 \text{ kN/m}^3$							
<u>Suda 1 gün bekletildikten sonra (Islak numune):</u>							
Kalıp+numune ağırlığı: 8875 gr							
$\gamma_n = 20.21 \text{ kN/m}^3$ $w = \% 21$ $\gamma_k = 16.66 \text{ kN/m}^3$							
Ring faktörü= 4.6707 kg/div							
Deformasyon:		Kuvvet Halkası:		Penetrasyon: (mm)		Düşey Yük: (kg)	
0	650	0	452	0	6,5	0	2111,16
25	700	85	470	0,25	7	397,01	2195,23
50	750	130	473	0,5	7,5	607,19	2209,24
75	800	176	487	0,75	8	822,04	2274,63
100	850	223	505	1	8,5	1041,57	2358,70
125	900	268	505	1,25	9	1251,75	2358,70
150	950	310	505	1,5	9,5	1447,92	2358,70
175	1000	350	509	1,75	10	1634,75	2377,39
200	1100	390	531	2	11	1821,57	2480,14
225	1200	430	562	2,25	12	2008,40	2624,93
250	1300	468	604	2,5	13	2185,89	2821,10
275	1400	508	650	2,75	14	2372,72	3035,96
300	1500	540	620,5	3	15	2522,18	2898,17
350	1600	577	634	3,5	16	2694,99	2961,22
400	1700	617	662	4	17	2881,82	3092,00
450	1800	632	704	4,5	18	2951,88	3288,17
500	1900	556	750	5	19	2596,91	3503,03
550	2000	534	799	5,5	20	2494,15	3731,89
600		473		6		2209,24	

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

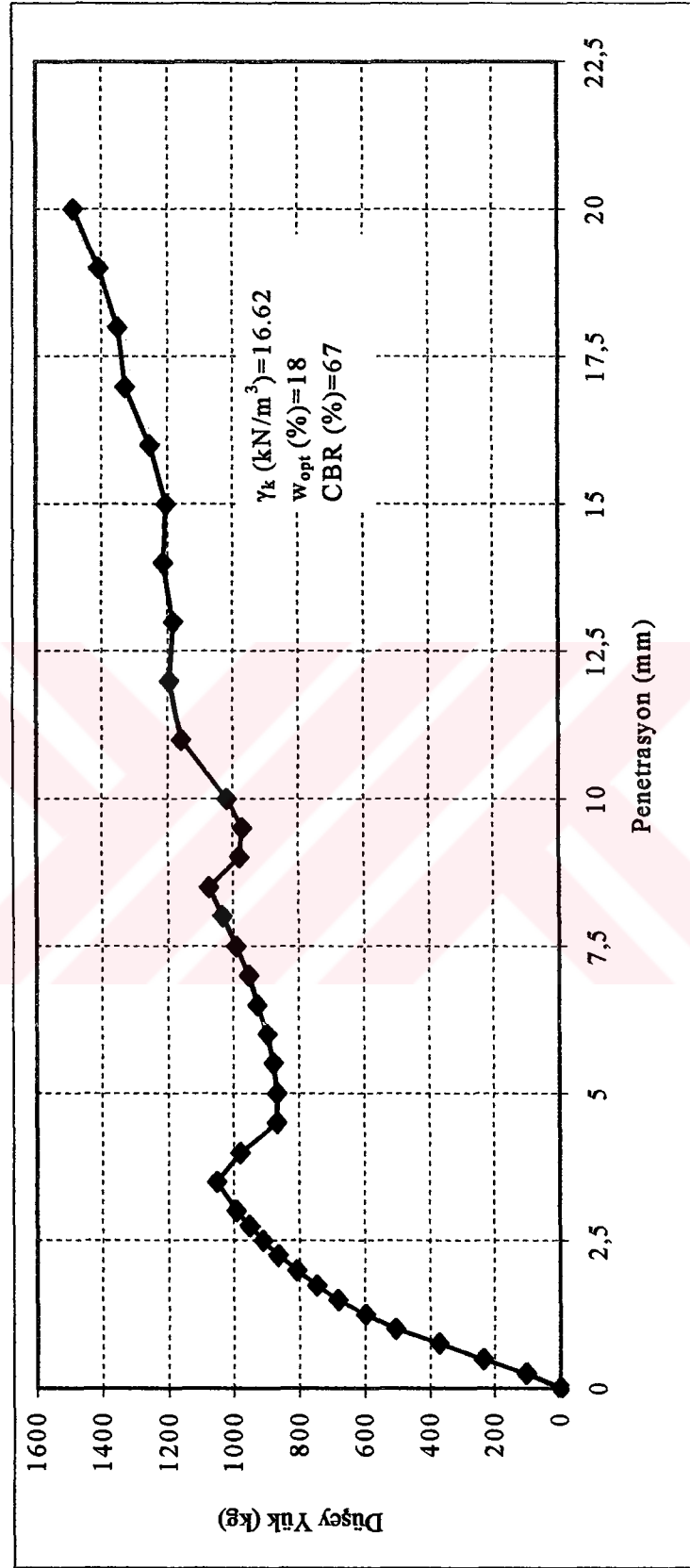
Tablo B.12 10 gün su altında bekletilmiş OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyi

<u>Islak (10 günlük) Numune</u>							
<u>Başlangıç:</u>							
Kalıp ağırlığı: 4140 gr							
Kalıp+numune ağırlığı: 8735 gr							
Kalıp yüksekliği: 17.8 cm Kalıp çapı: 15.2 cm Disk yüksekliği: 5.1 cm							
Kalıp hacmi: 2303.35 cm ³							
$\gamma_n = 19.57 \text{ kN/m}^3$ $w = w_{opt} = \% 18$ $\gamma_k = 16.58 \text{ kN/m}^3$							
<u>Suda 10 gün bekletildikten sonra (Islak numune):</u>							
Kalıp+numune ağırlığı: 9185 gr							
$\gamma_n = 21.49 \text{ kN/m}^3$ $w = \% 30$ $\gamma_k = 16.58 \text{ kN/m}^3$							
Ring faktörü= 4.6707 kg/div							
Deformasyon:		Kuvvet Halkası:		Penetrasyon: (mm)		Düşey Yük: (kg)	
0		0		0		0	
25		34		0,25		158,80	
50		95		0,5		443,72	
75		165		0,75		770,67	
100		240		1		1120,97	
125		310		1,25		1447,92	
150		388		1,5		1812,23	
175		457		1,75		2134,51	
200		523		2		2442,78	
225		585		2,25		2732,36	
250		645		2,5		3012,60	
275		706		2,75		3297,51	
300		762		3		3559,07	
350		885		3,5		4133,57	
400		1005		4		4694,05	
450		1122		4,5		5240,53	
500		1245		5		5815,02	
550		1368		5,5		6389,52	
600		1488		6		6950,00	
650		1610		6,5		7519,83	
700		1735		7		8103,66	

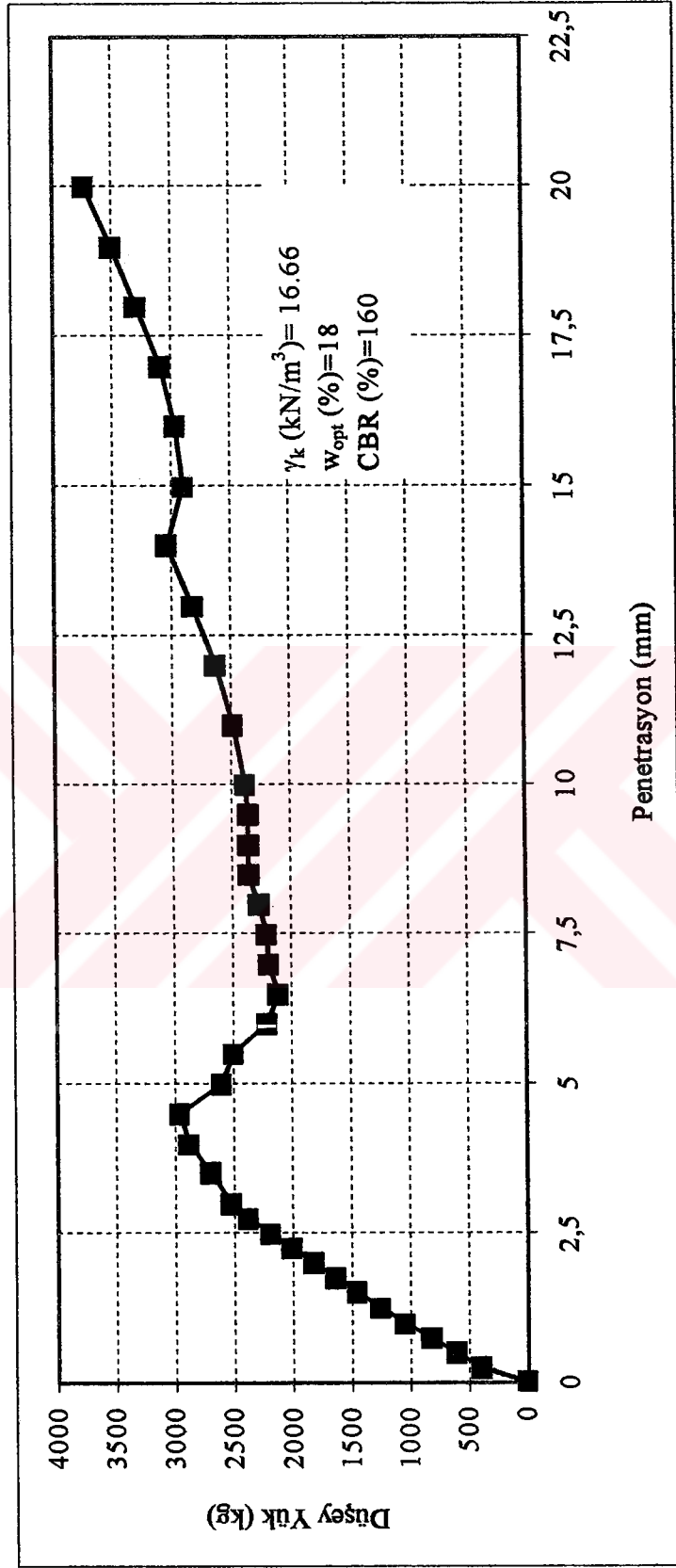
İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo B.13 10 gün su altında bekletilmiş OUK numunesinin şişme değeri

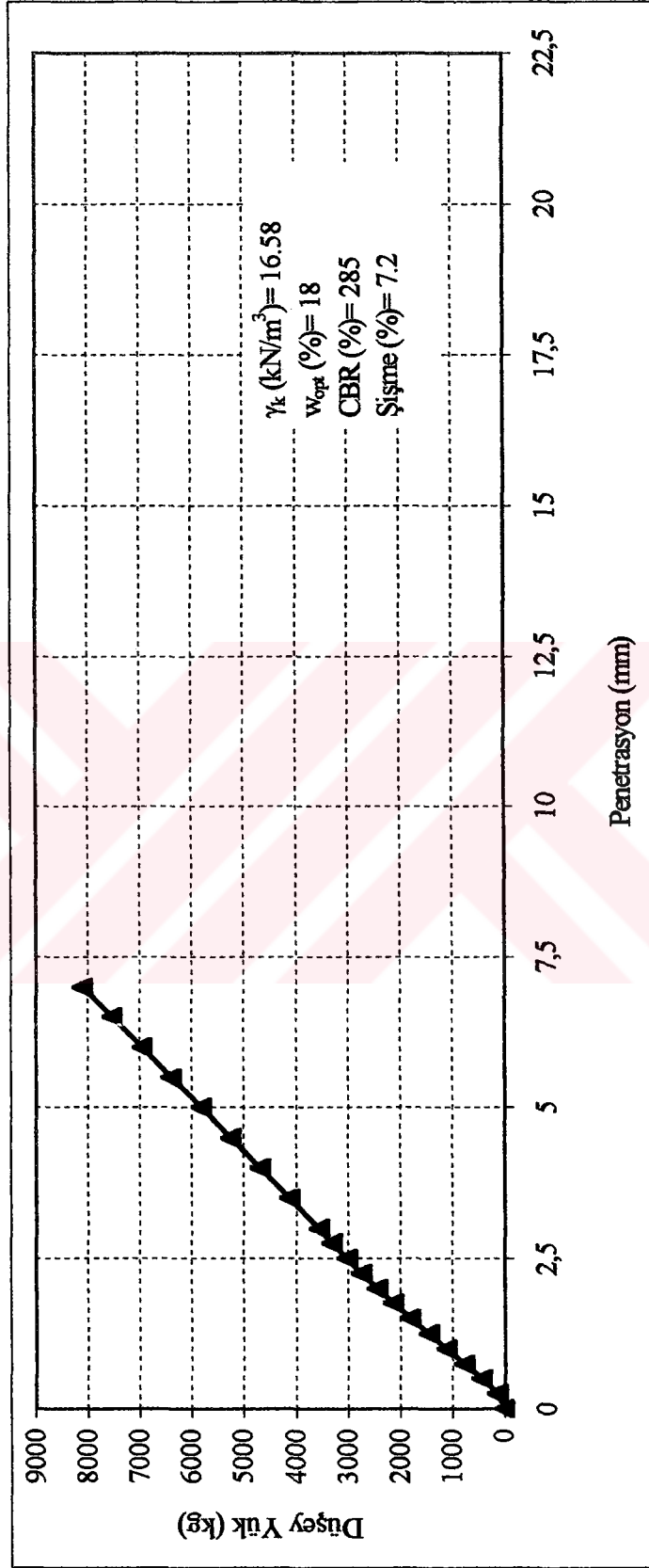
Islak (10 günlük) Numune					
Şişme okuması:					
Tarih:	Saat:	Şişme, mm (1/100):	Tarih:	Saat:	Şişme, mm (1/100):
24.11.1998	14.44	-13	30.11.1998	9.41	638
	14.48	-14.5		11.43	647
	14.55	-15.5		17.43	682
	15.10	-16	1.12.1998	9.57	752
	15.25	-16.5		11.50	758
	15.40	-17		17.00	776
	16.40	-18	2.12.1998	9.50	826
	17.40	-18		11.58	831
25.11.1998	13.00	17.5		17.26	844
	14.00	21	3.12.1998	9.33	876.5
	14.40	22		11.40	880
	16.00	24.5		13.10	882.5
	17.00	26		14.20	885.5
	18.00	28		15.20	887
	18.30	29		16.20	888.5
26.11.1998	9.40	69		17.20	889.5
	10.40	73	4.12.1998	10.40	912
	12.40	79		11.40	914.5
	13.40	84		12.50	915
	14.40	87.5		13.50	915.5
	15.40	91			
	16.40	94.5			
	17.40	99			
27.11.1998	9.40	189.5			
	11.00	197			
	11.40	200.5			
	12.40	207			
	13.40	214.5			
	14.40	220.5			
	16.03	231			
	16.23	233			
10 gün sonunda numunede meydana gelen şişme (%) = $\frac{9.16}{127} \times 100 = 7.2$					



Şekil B.6 0 günlük (kür uygulanmamış) OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrisi



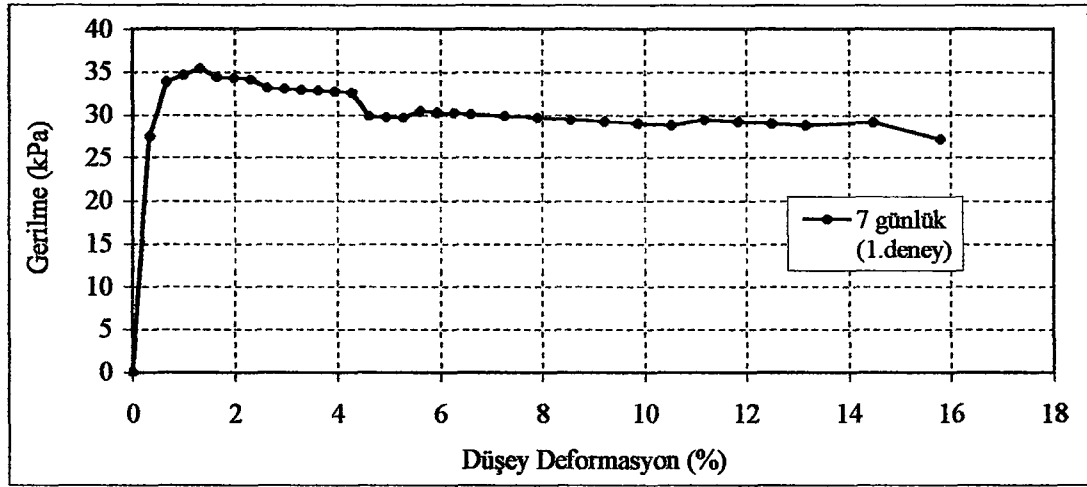
Şekil B.7 1 gün su altında bırakılmış OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrisi



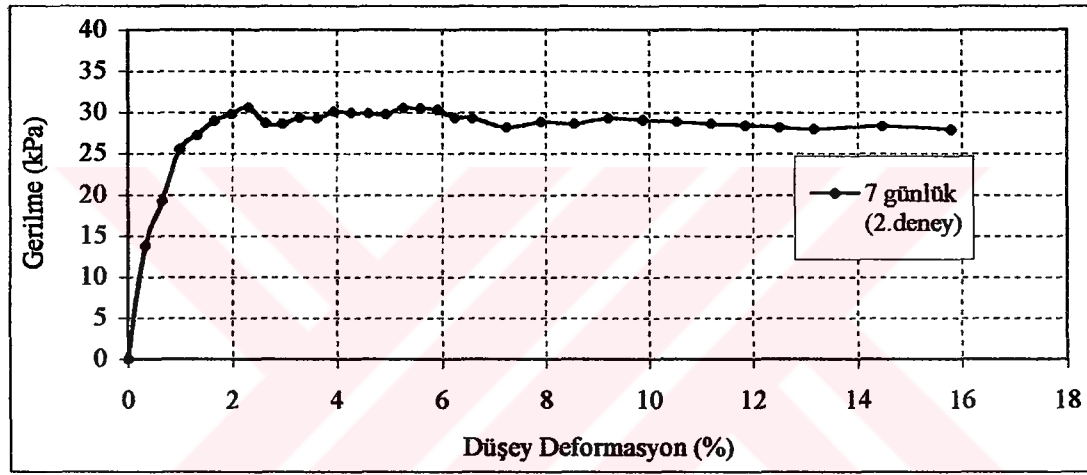
Şekil B.8 10 gün su altında bırakılmış OUK numunesi üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrisi



EK C

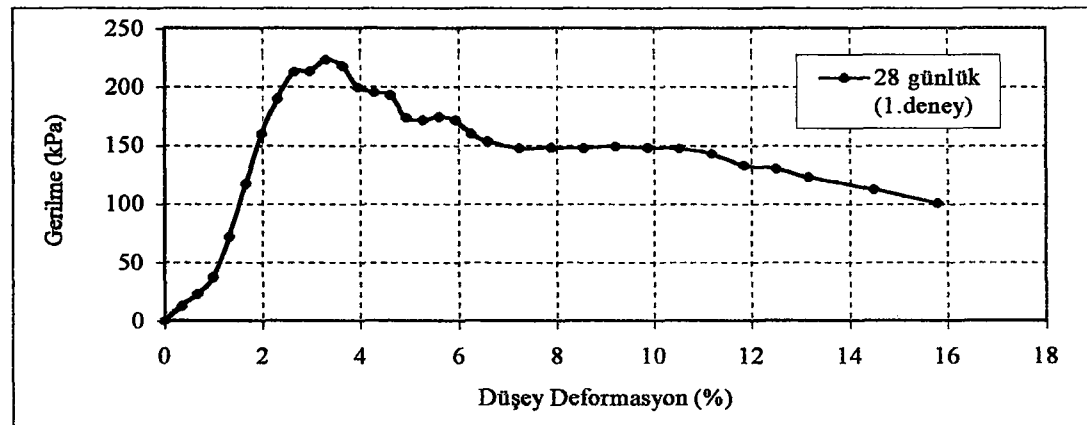


(a)

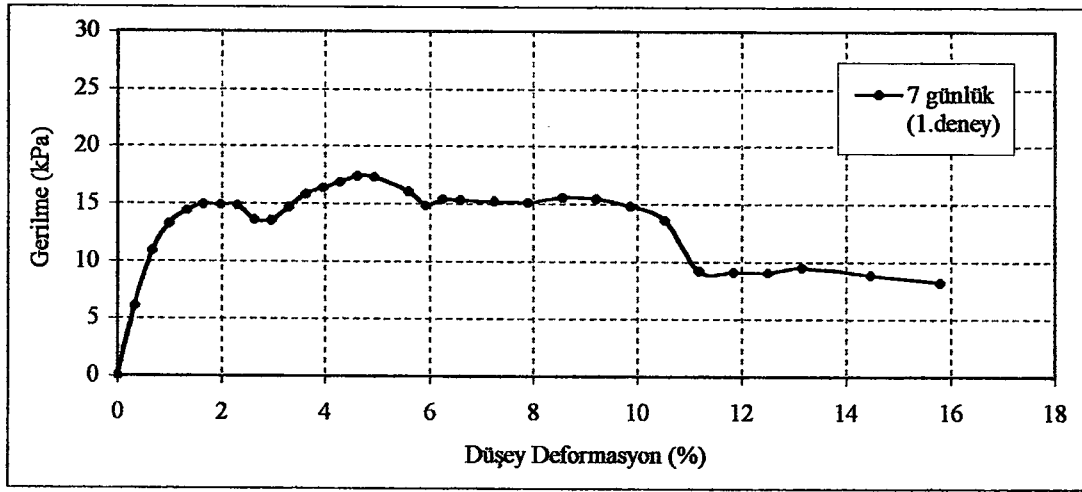


(b)

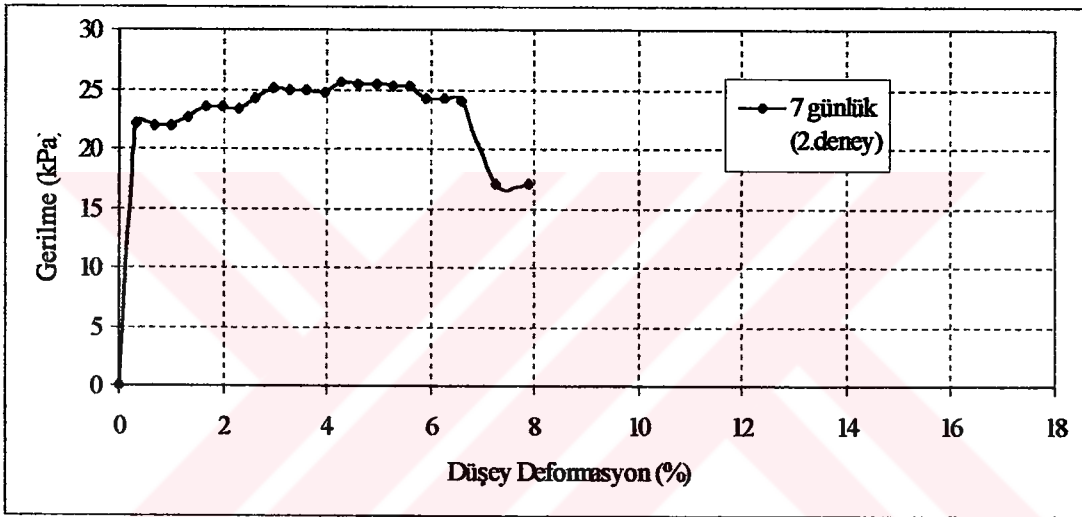
Şekil C.1 7 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



Şekil C.2 28 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri

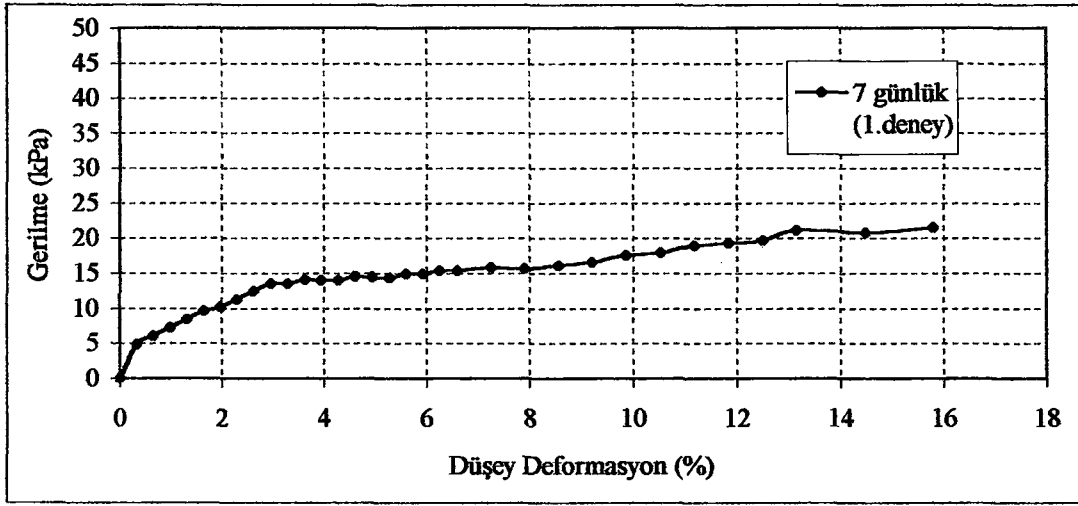


(a)

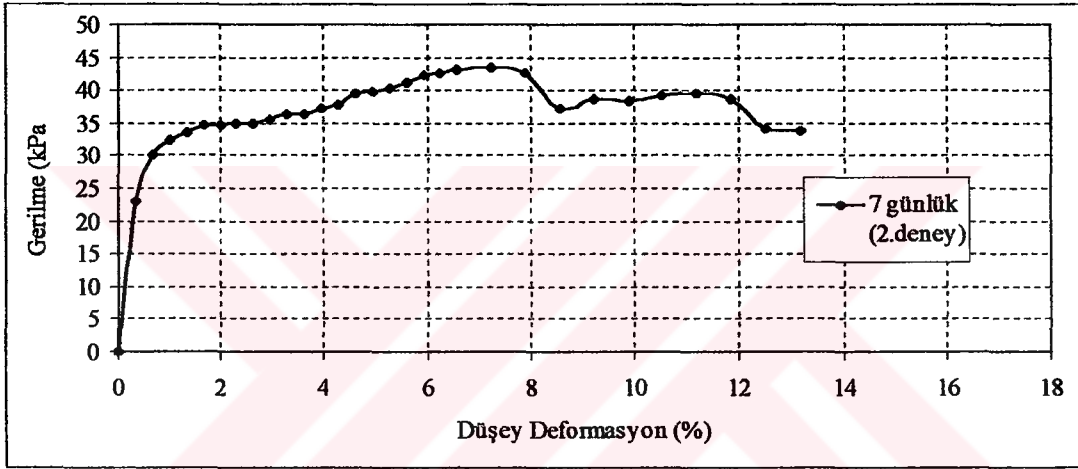


(b)

Şekil C.3 7 gün küre tabi tutulmuş 2 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri

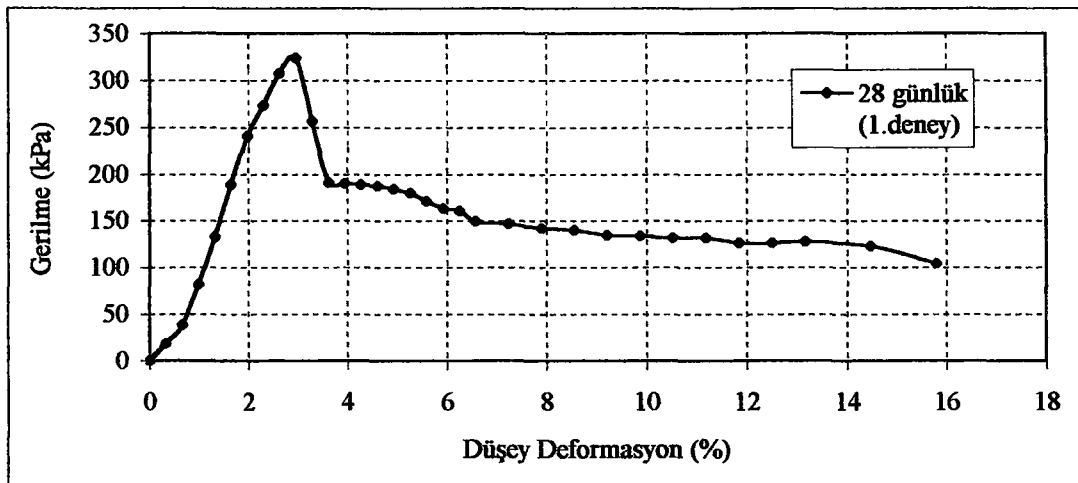


(a)

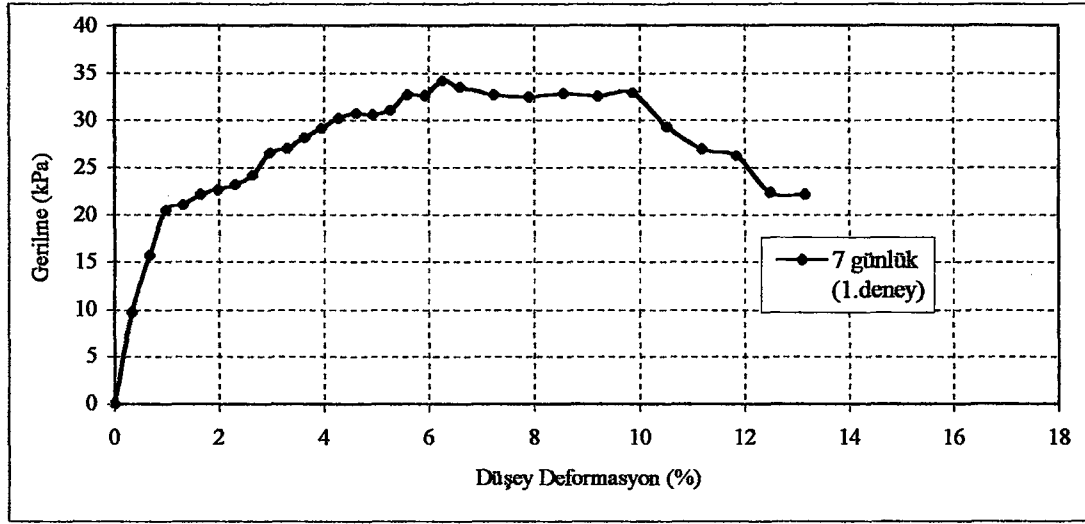


(b)

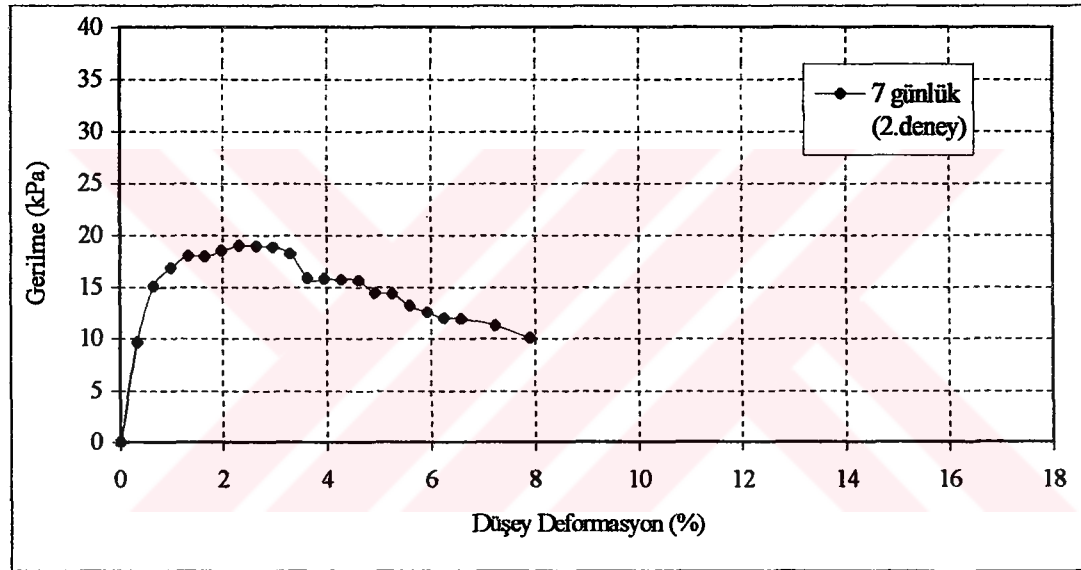
Şekil C.4 7 gün küre tabi tutulmuş 3 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



Şekil C.5 28 gün küre tabi tutulmuş 3 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri

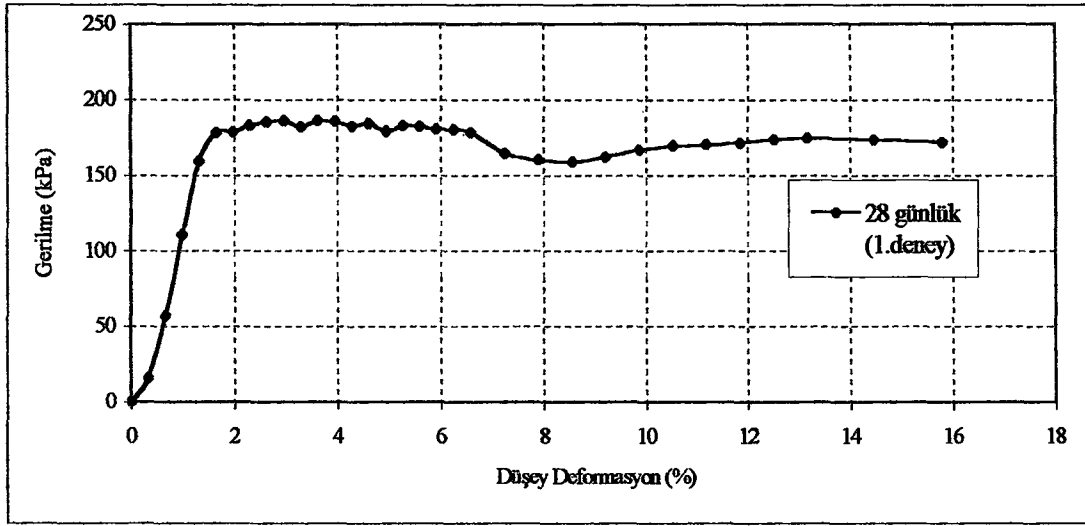


(a)

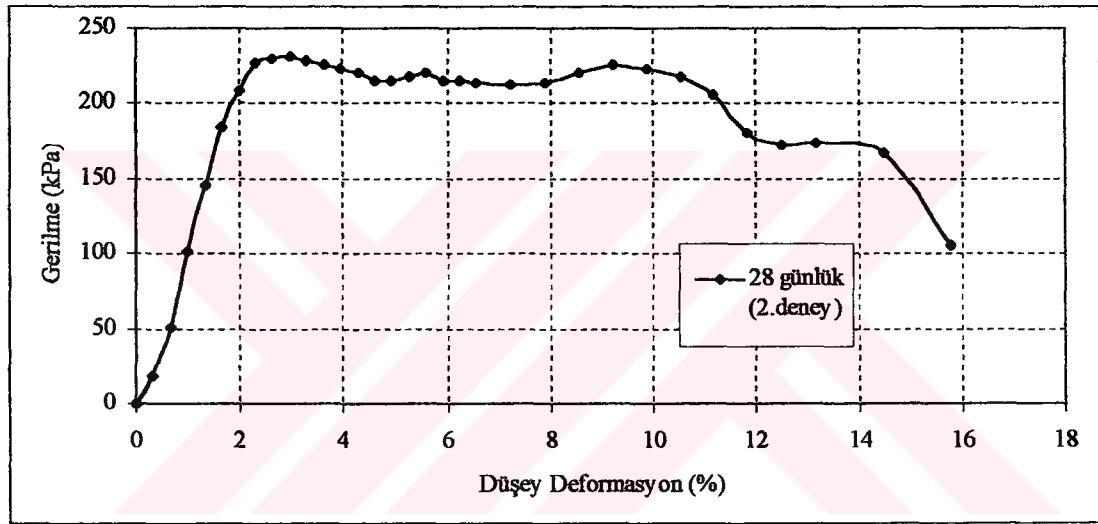


(b)

Şekil C.6 7 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri

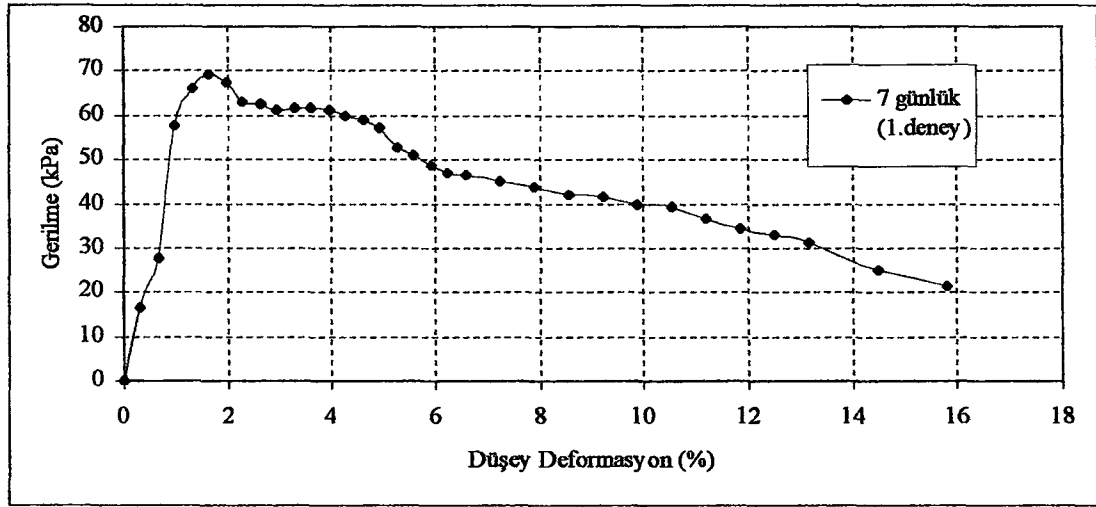


(a)

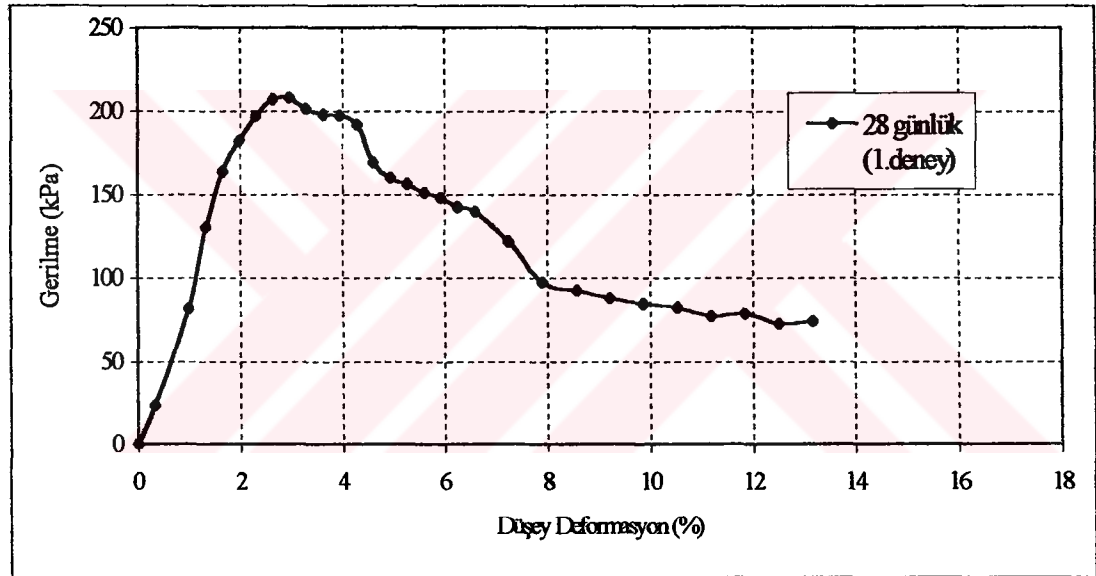


(b)

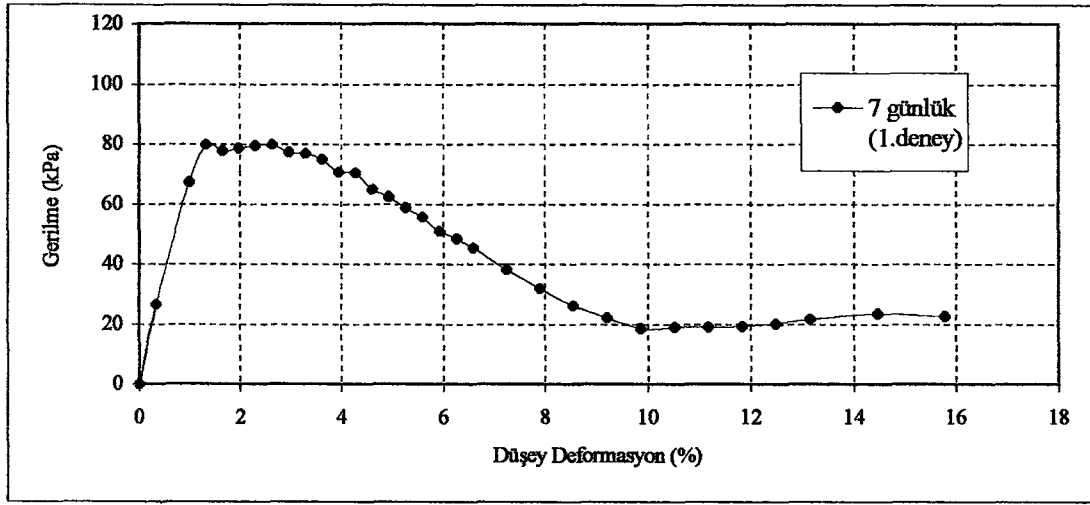
Şekil C.7 28 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



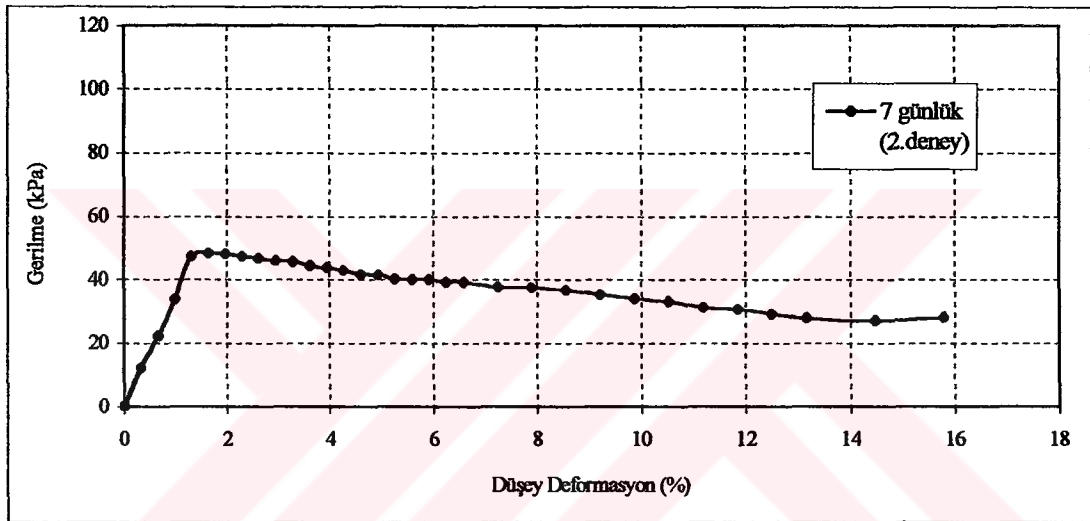
Şekil C.8 7 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



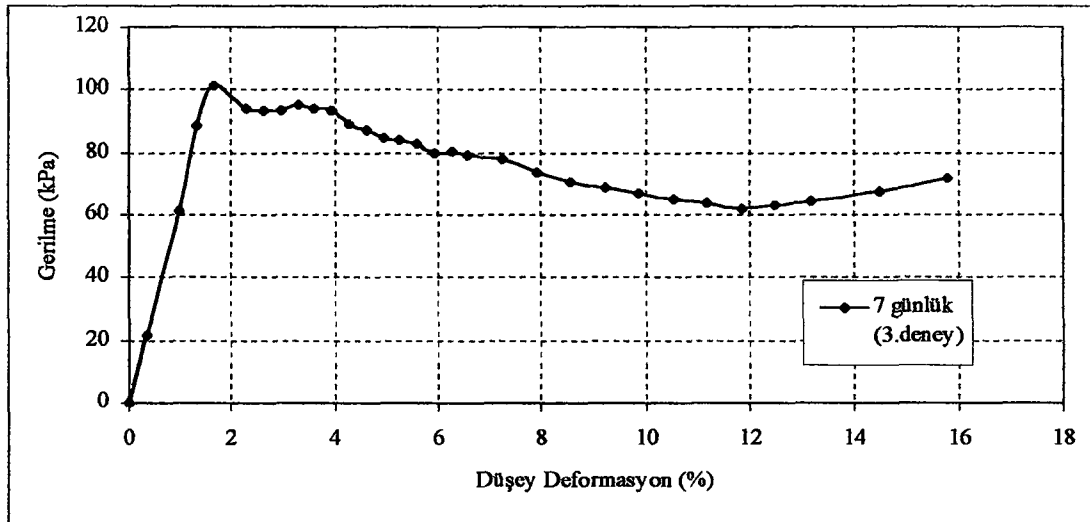
Şekil C.9 28 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

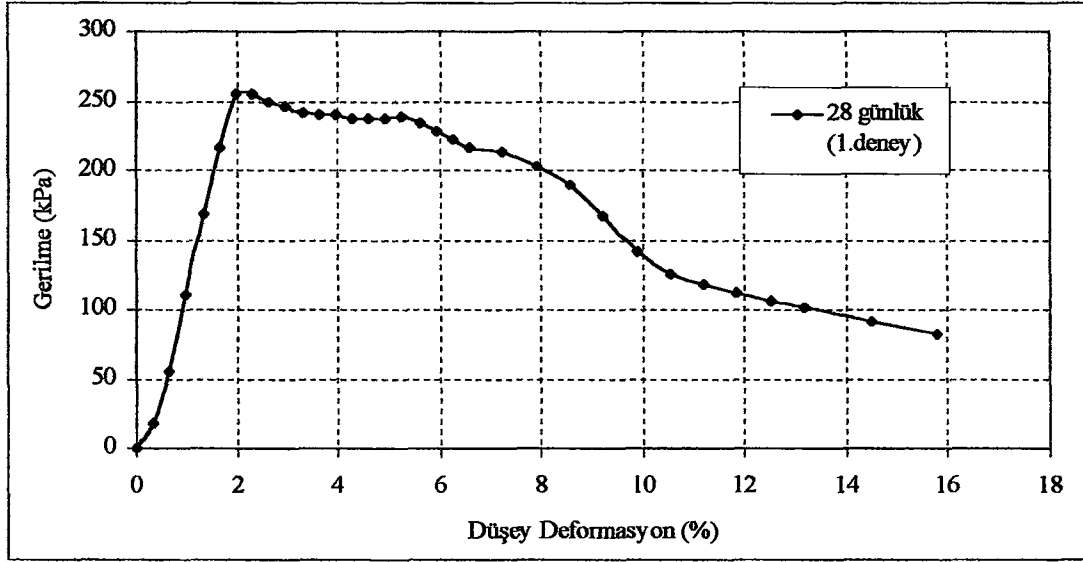


(b)

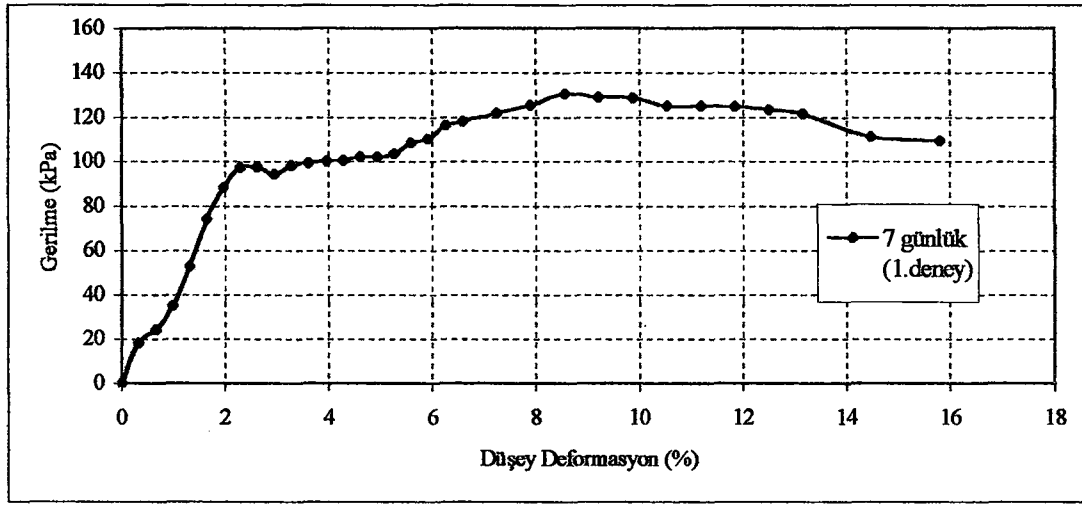


(c)

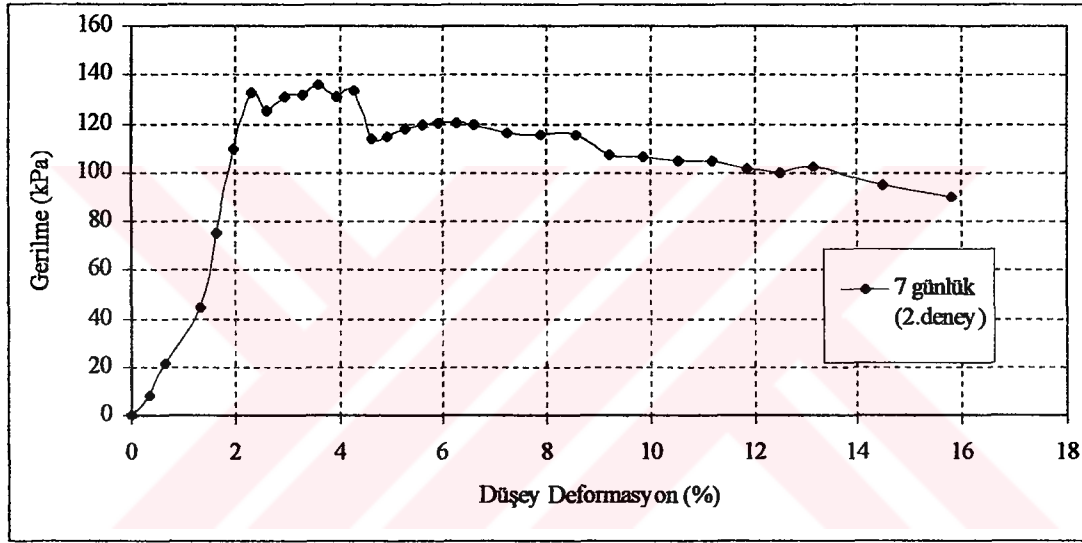
Şekil C.10 7 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



Şekil C.11 28 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri

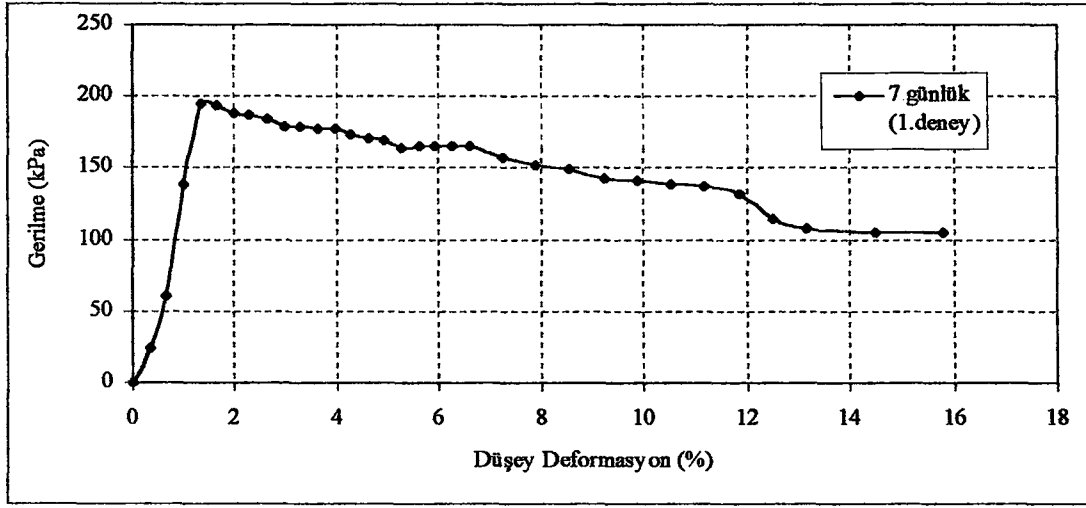


(a)

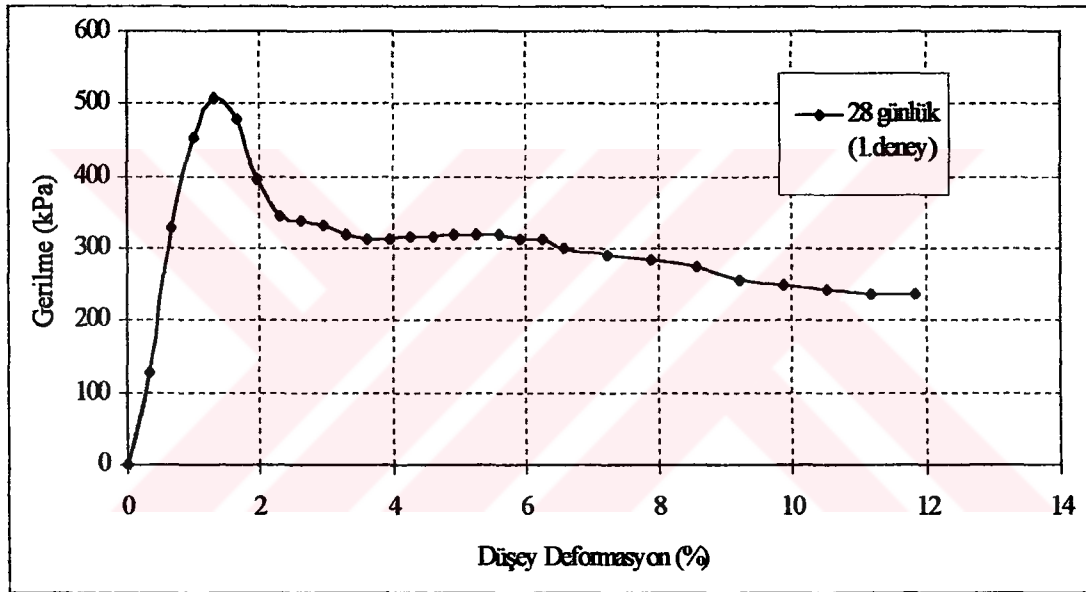


(b)

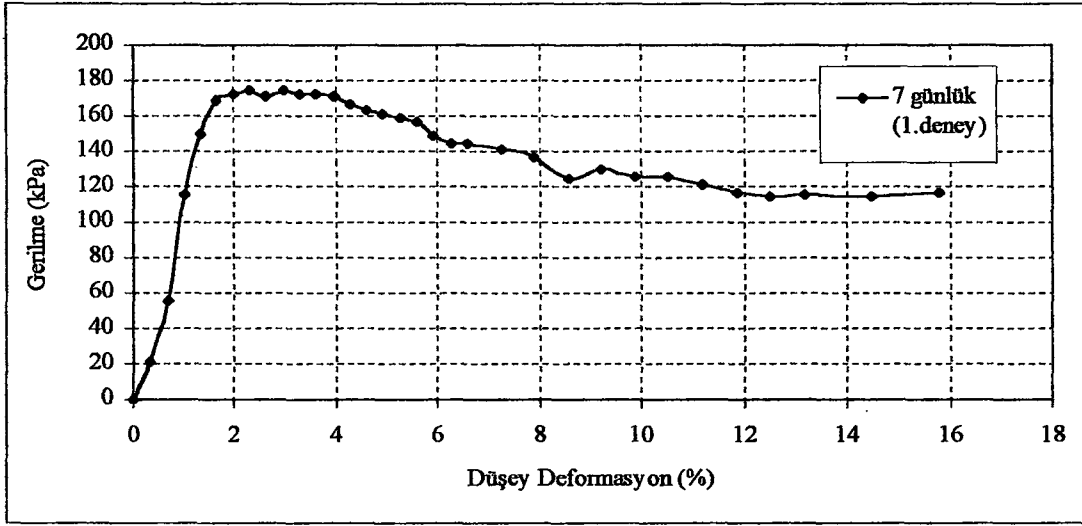
Şekil C.12 7 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



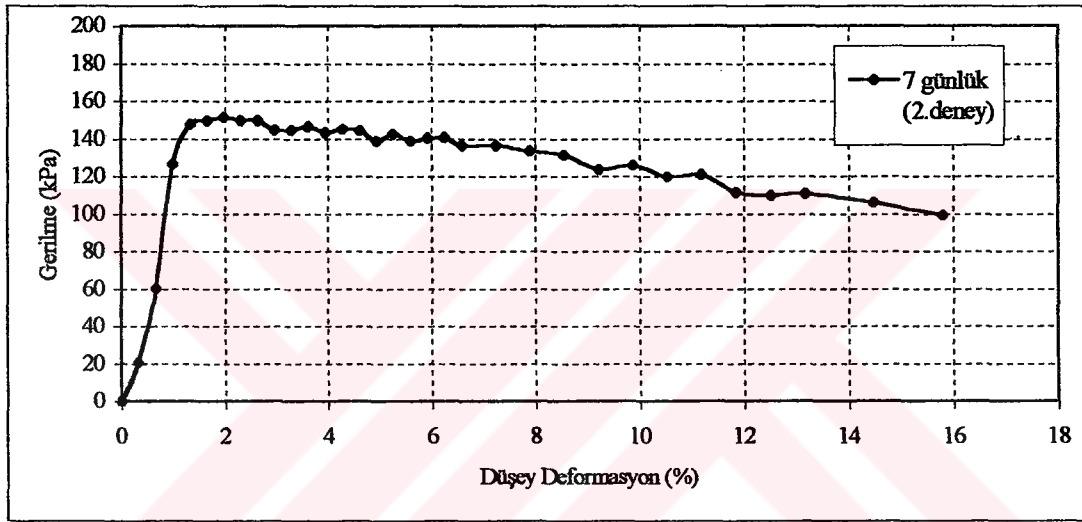
Şekil C.13 7 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



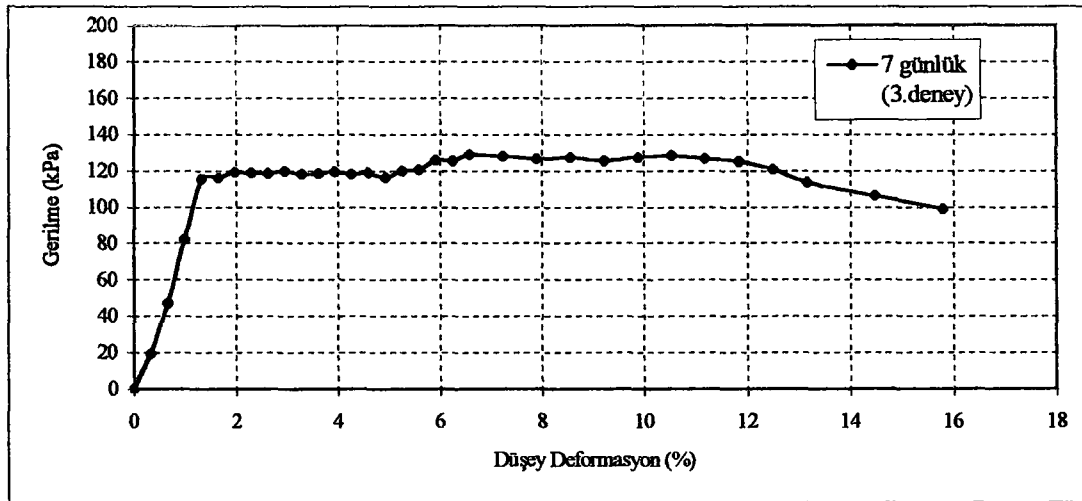
Şekil C.14 28 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



(a)

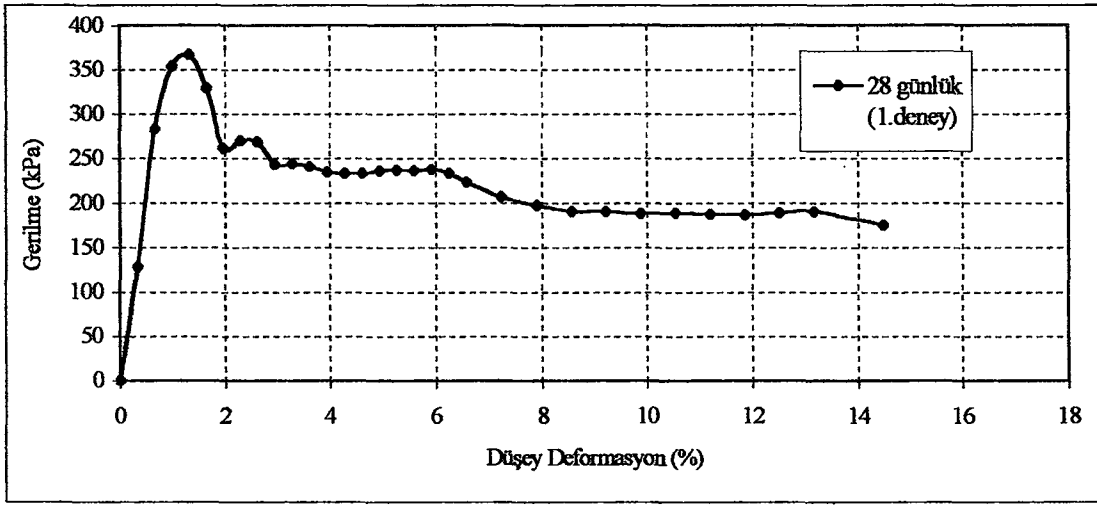


(b)

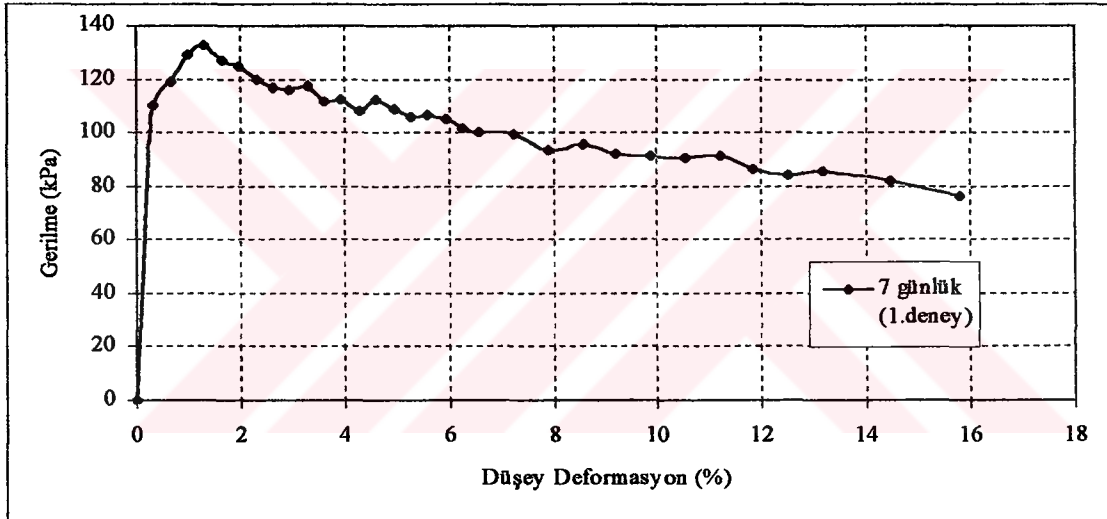


(c)

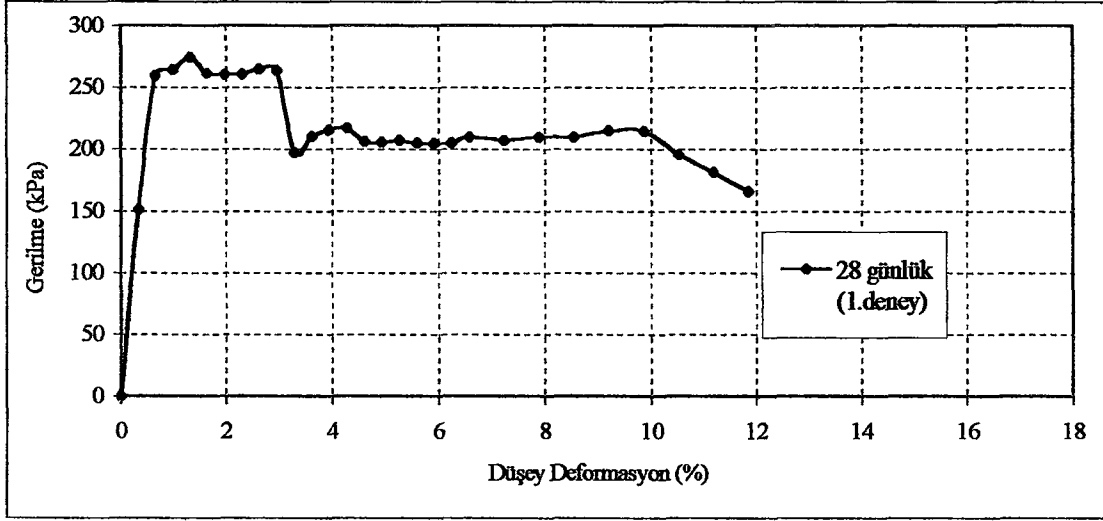
Şekil C.15 7 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



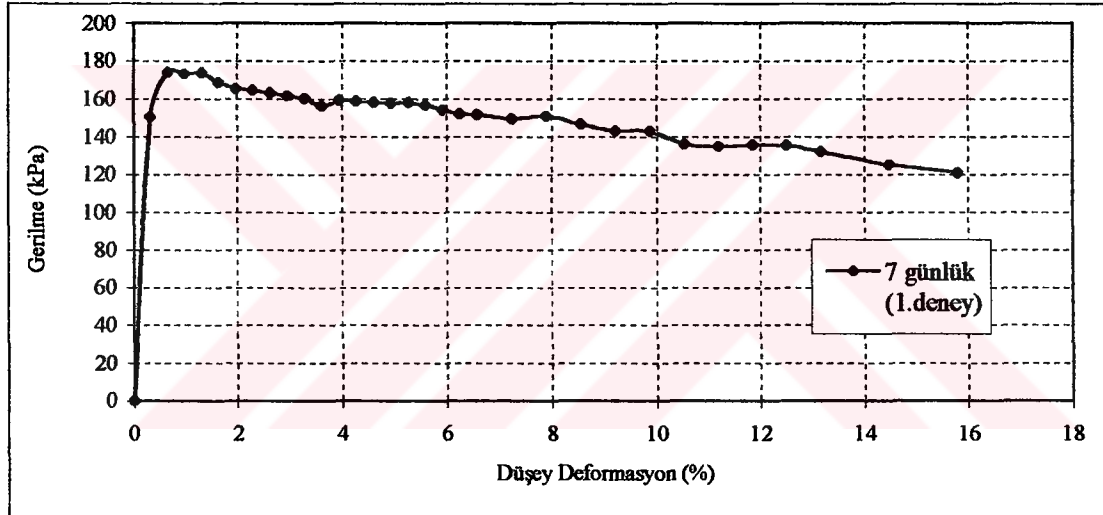
Şekil C.16 28 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



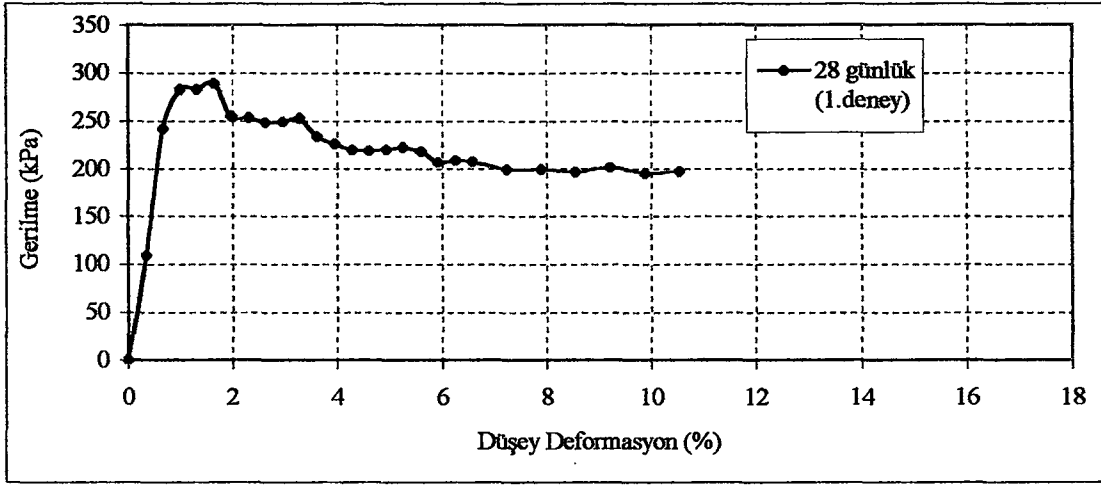
Şekil C.17 7 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



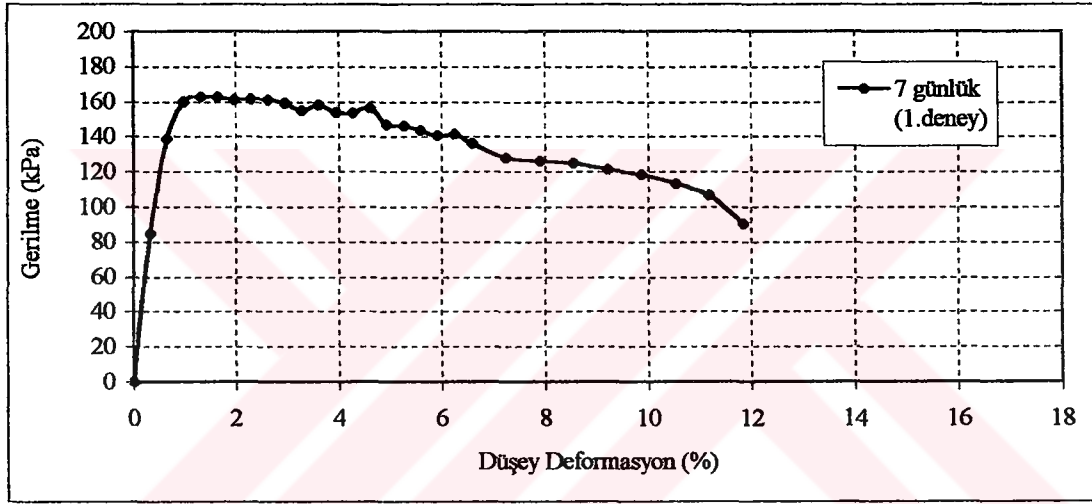
Şekil C.18 28 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



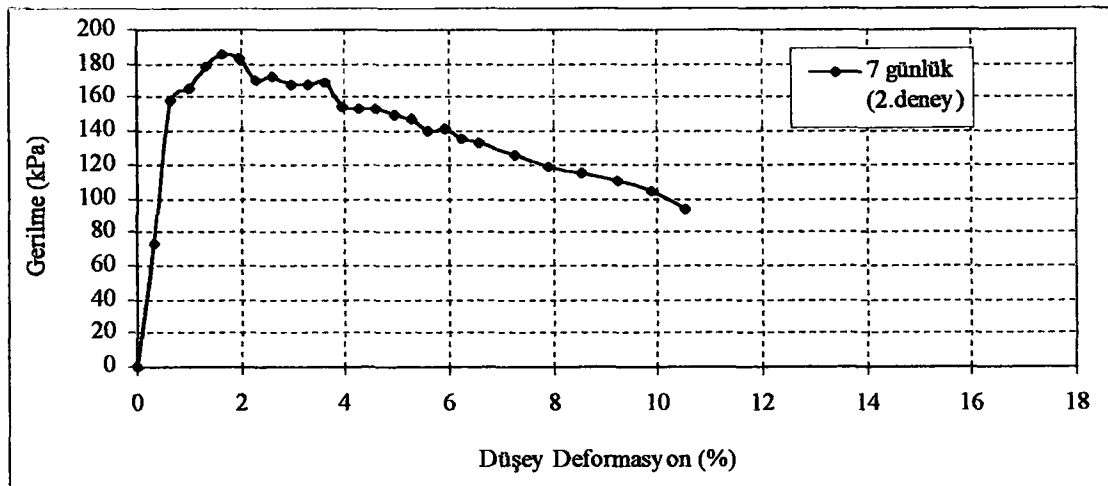
Şekil C.19 7 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



Şekil C.20 28 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri

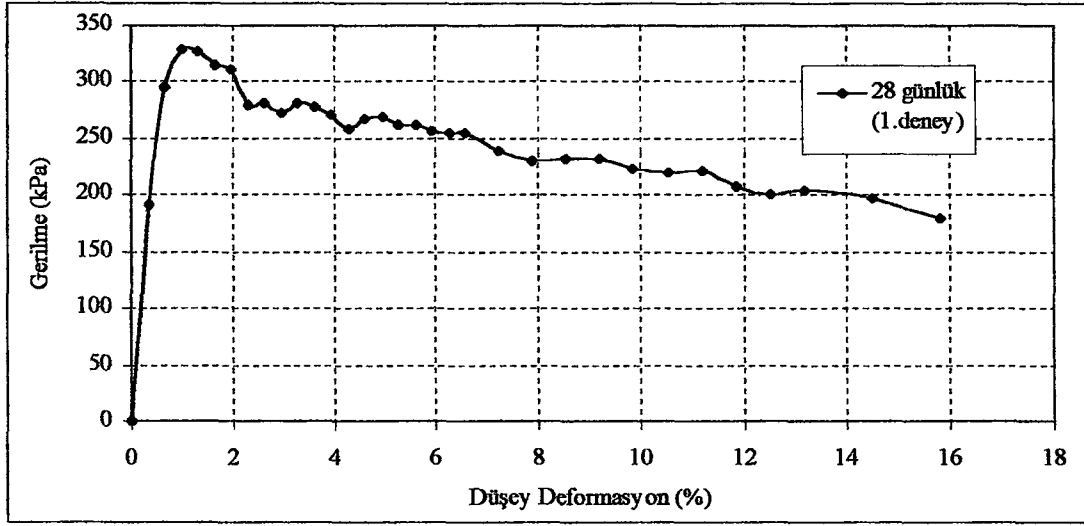


(a)

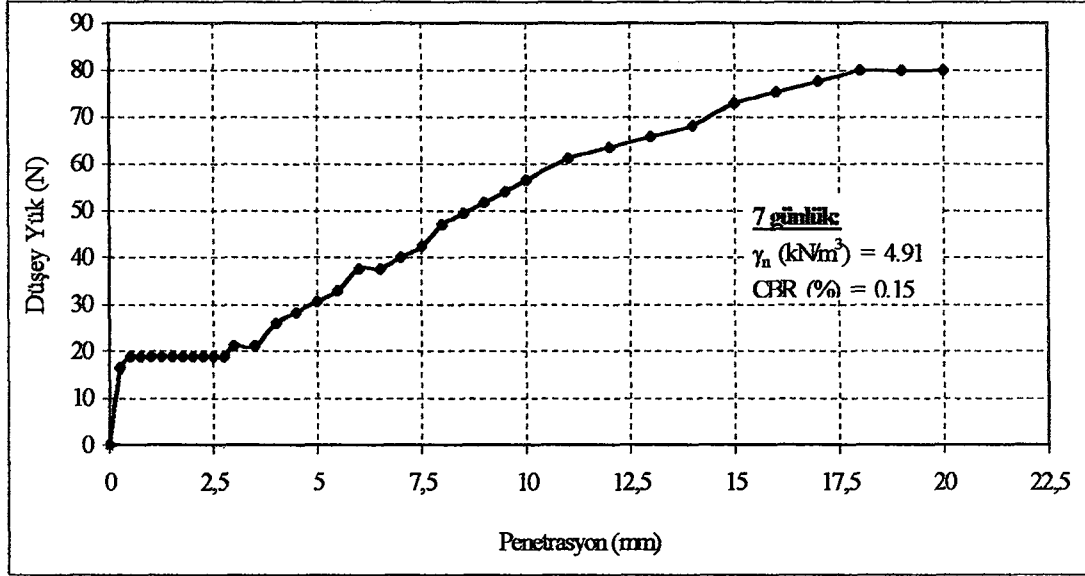


(b)

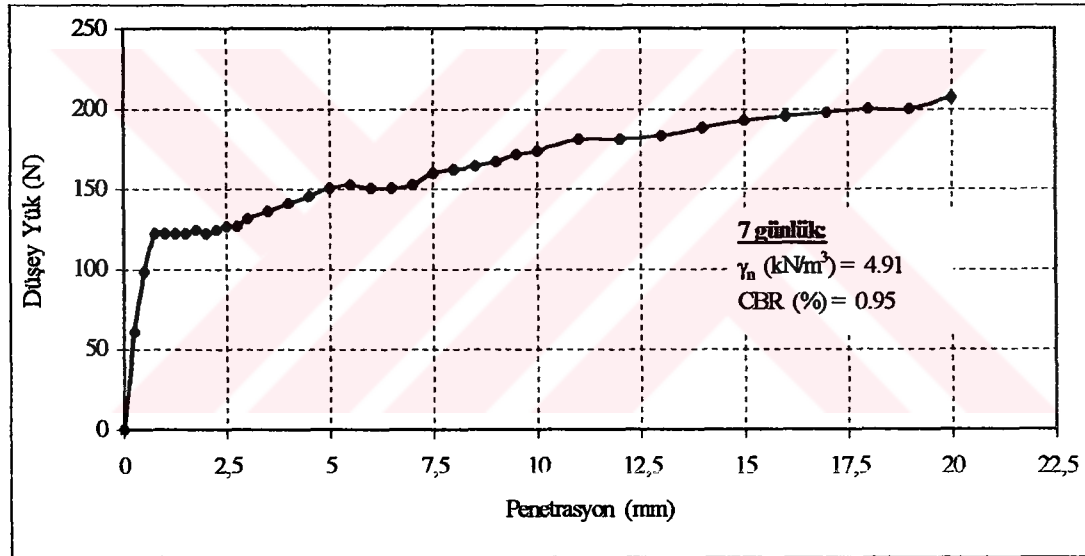
Şekil C.21 7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



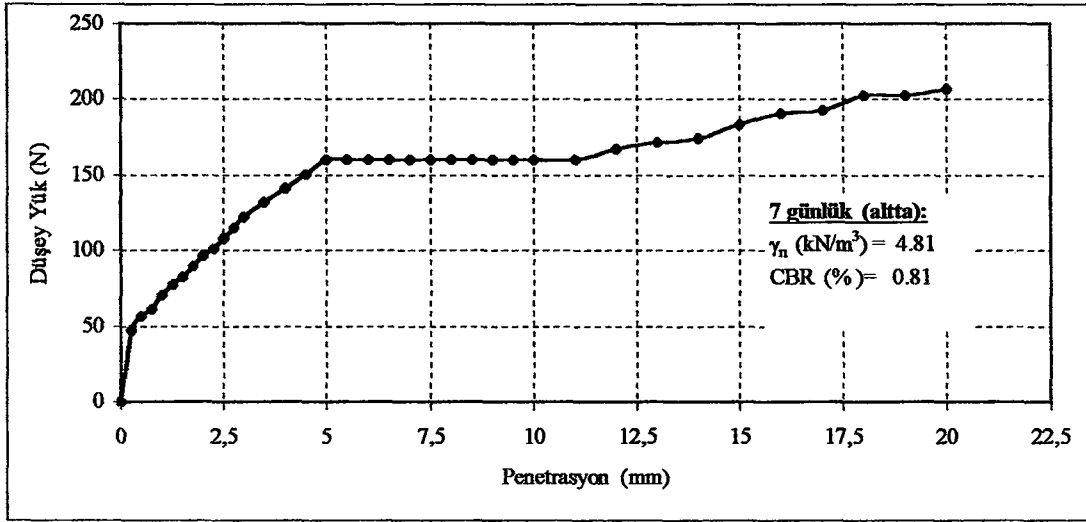
Şekil C.22 28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül - çimento - köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



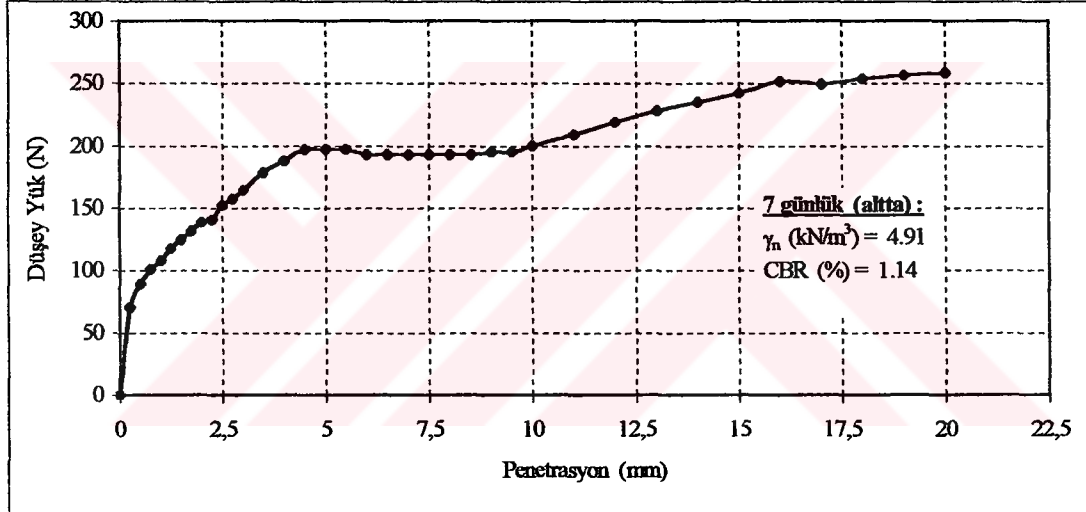
Şekil C.23 7 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri



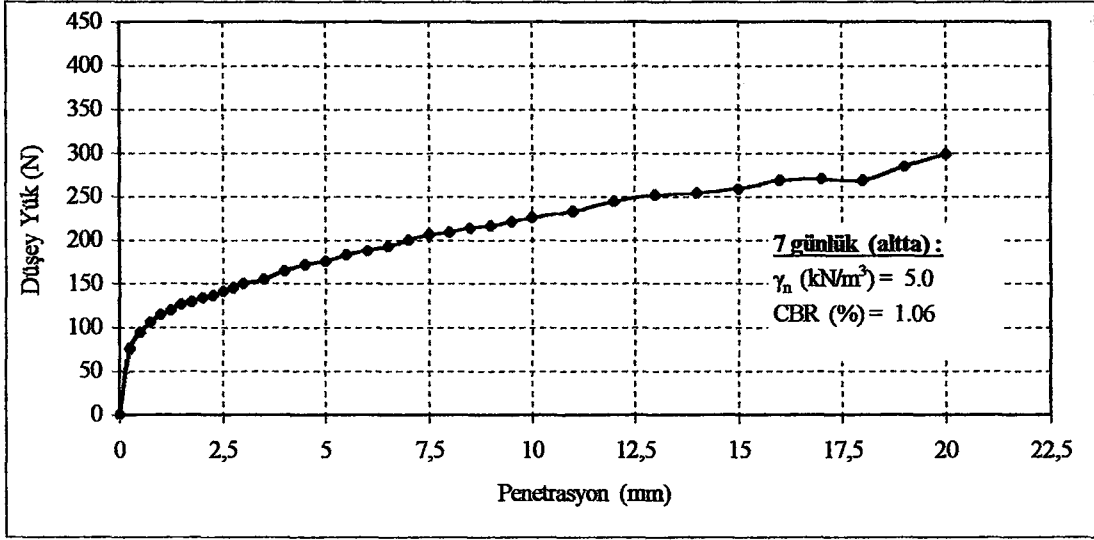
Şekil C.24 7 gün küre tabi tutulmuş 2 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri



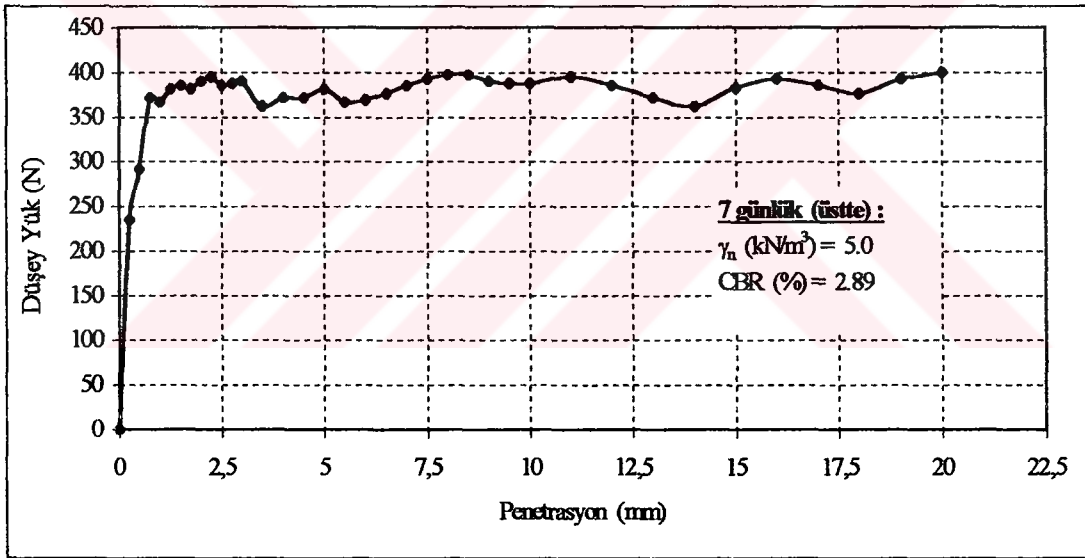
Şekil C.25 7 gün küre tabi tutulmuş 3 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri



Şekil C.26 7 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

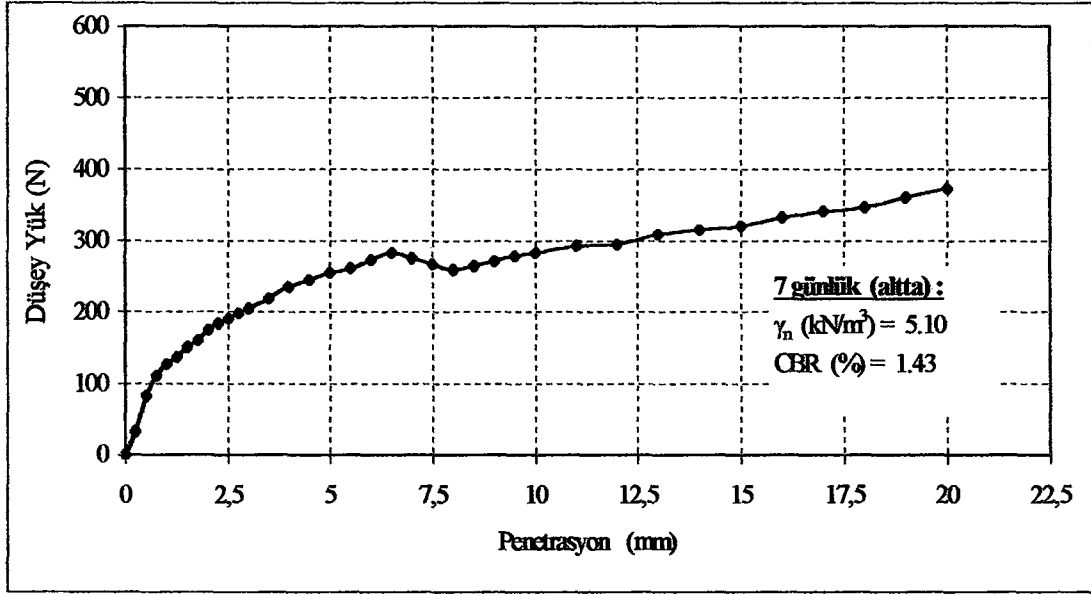


(a)

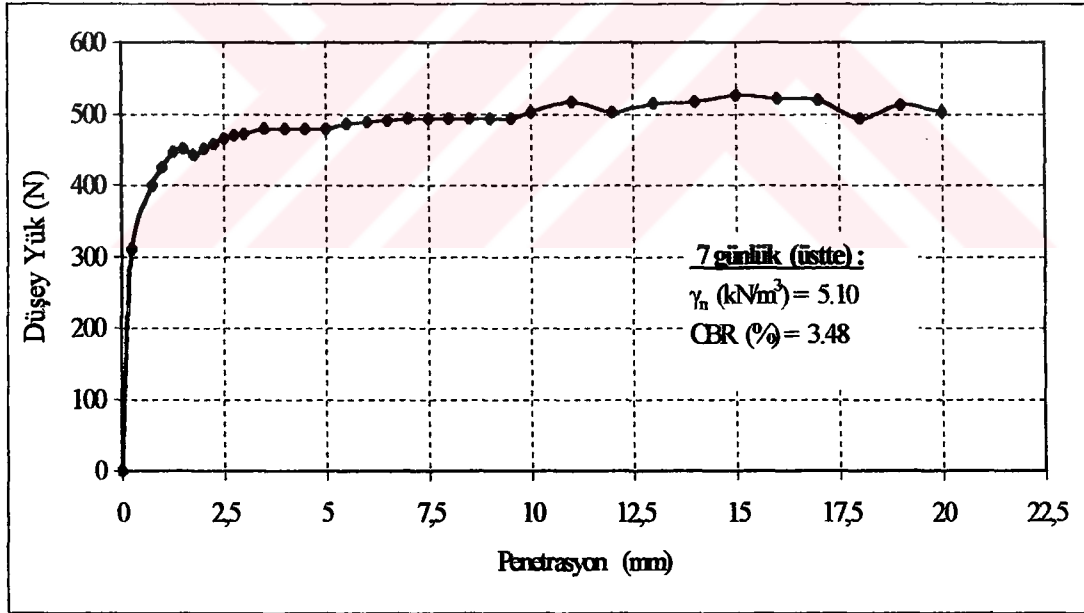


(b)

Şekil C.27 7 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

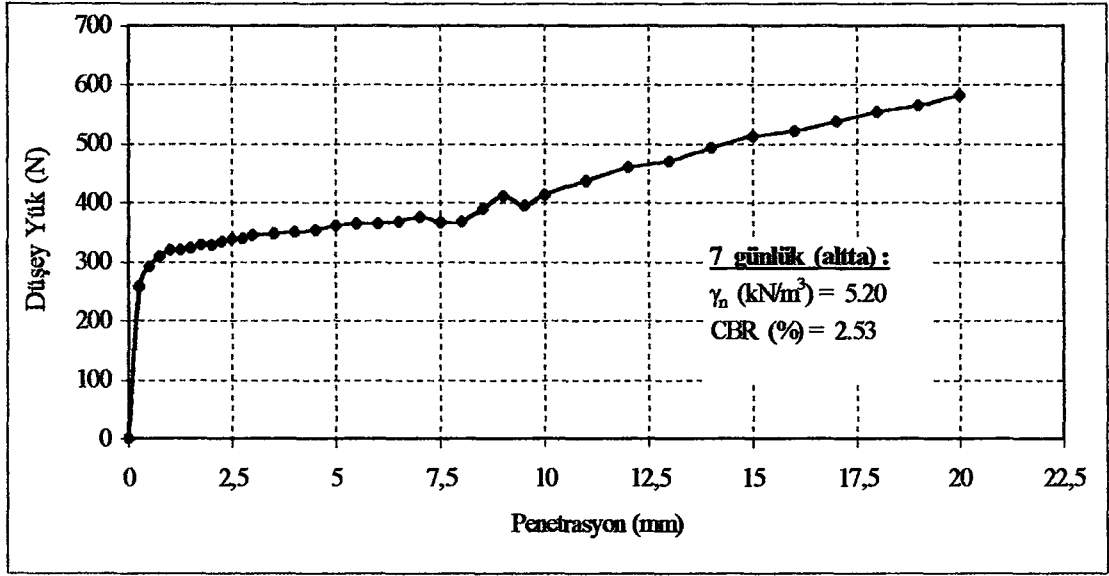


(a)

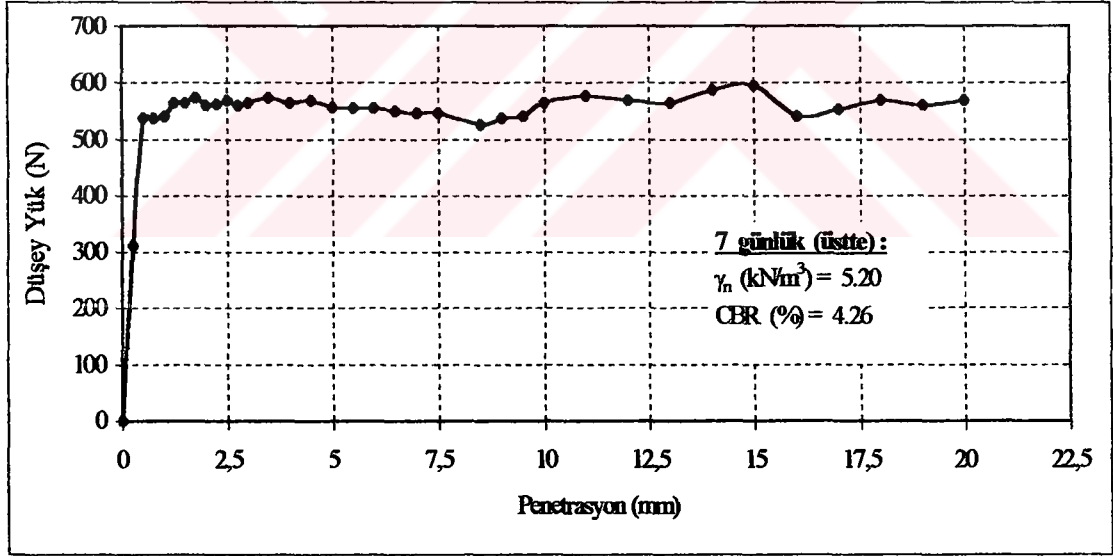


(b)

Şekil C.28 7 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

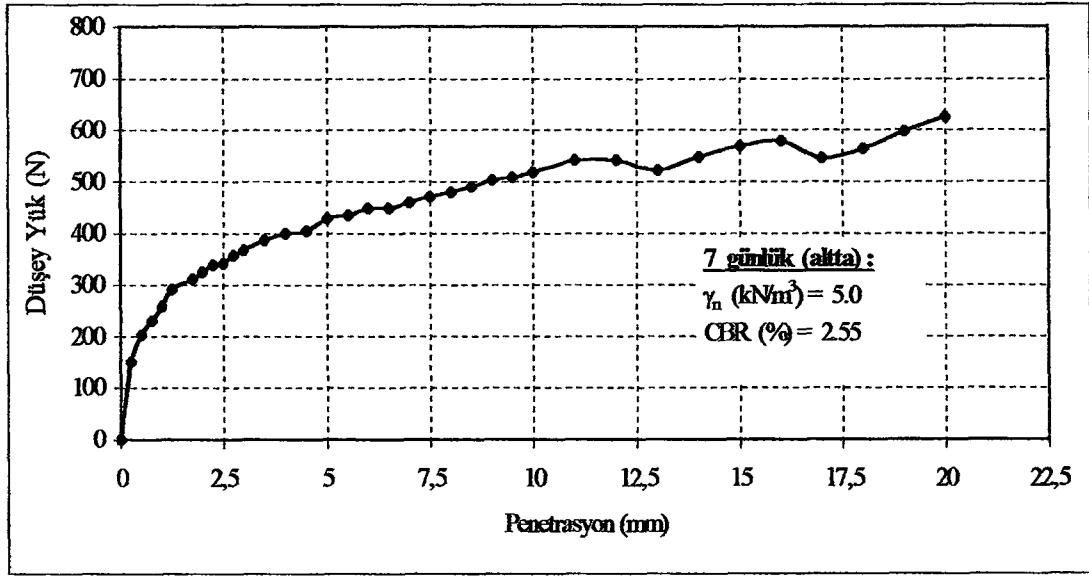


(a)

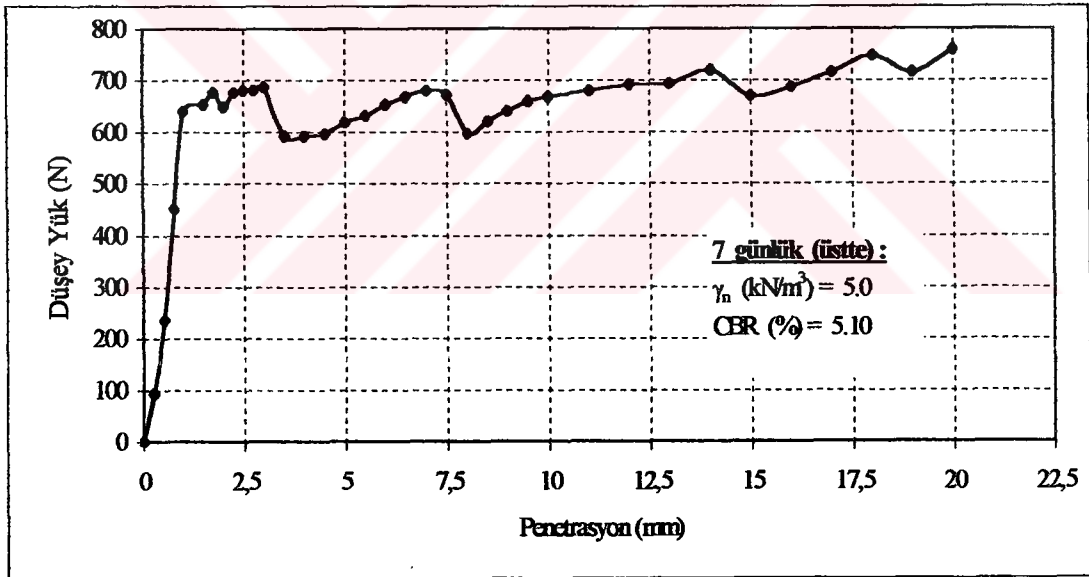


(b)

Şekil C.29 7 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

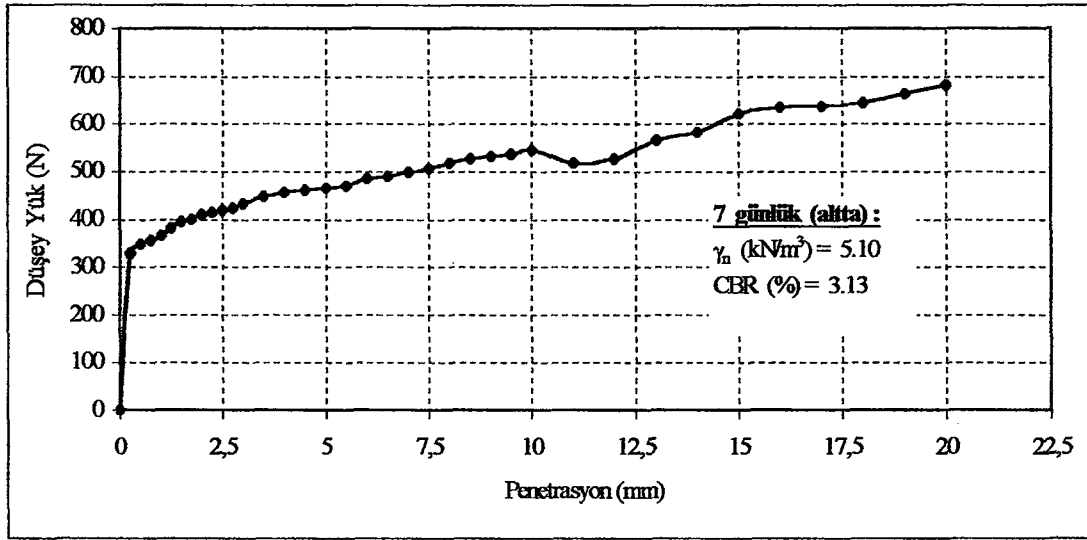


(a)

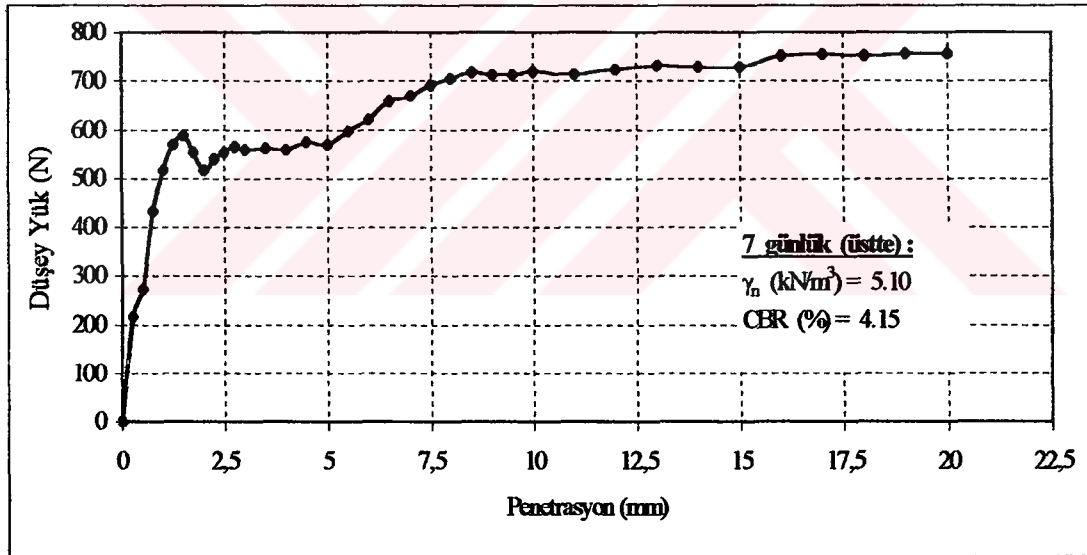


(b)

Şekil C.30 7 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

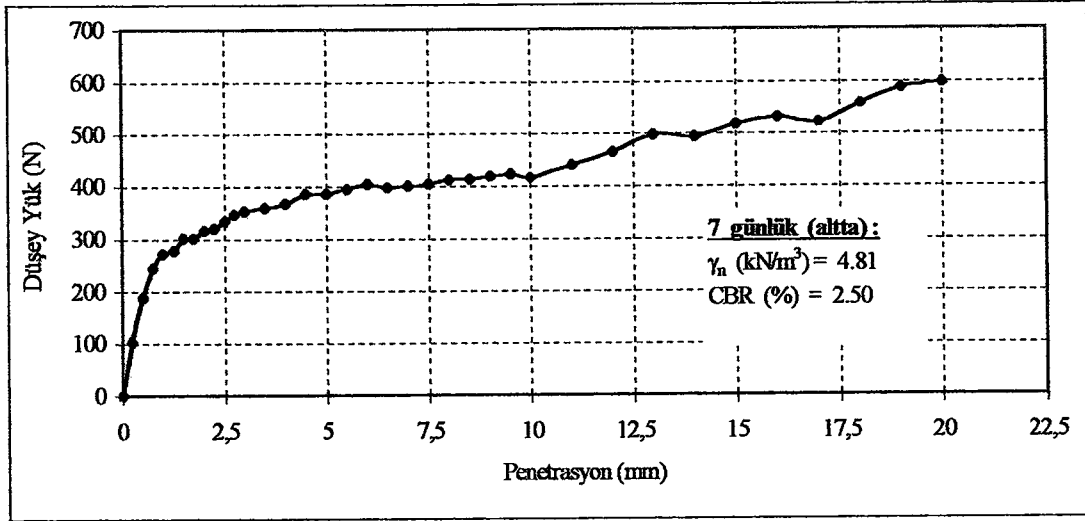


(a)

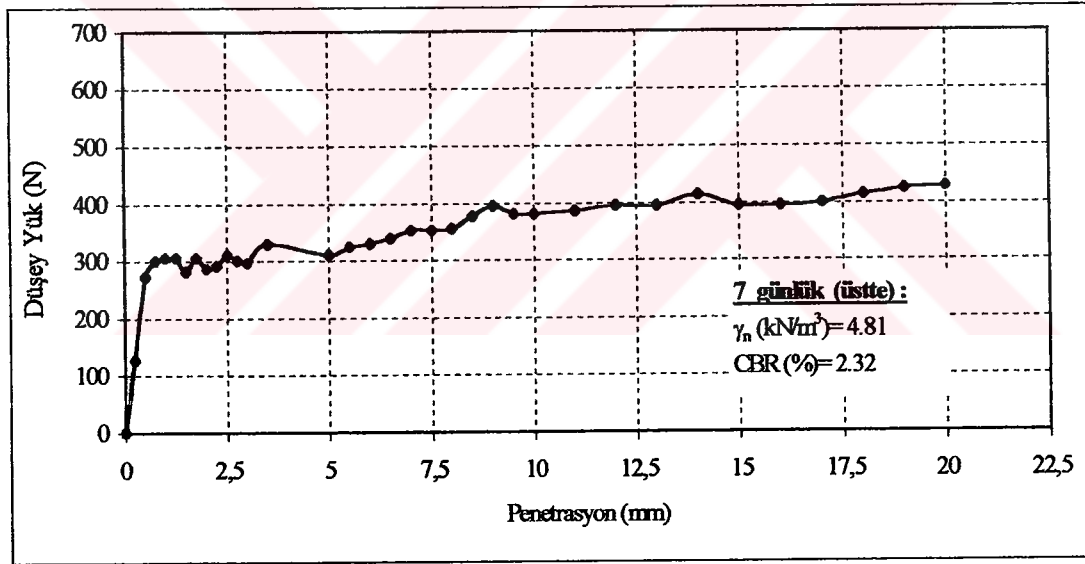


(b)

Şekil C.31 7 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

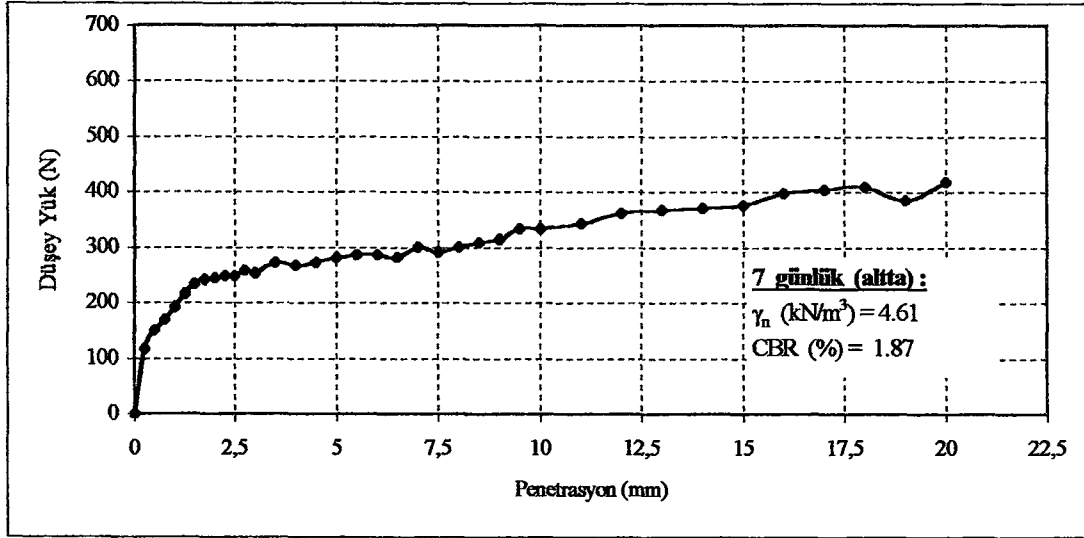


(a)

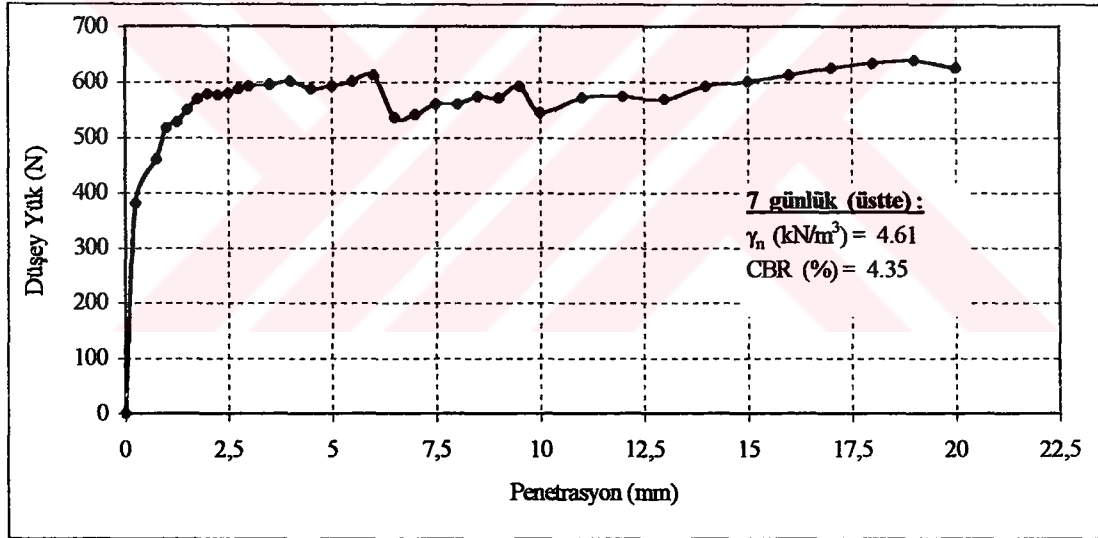


(b)

Şekil C.32 7 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri

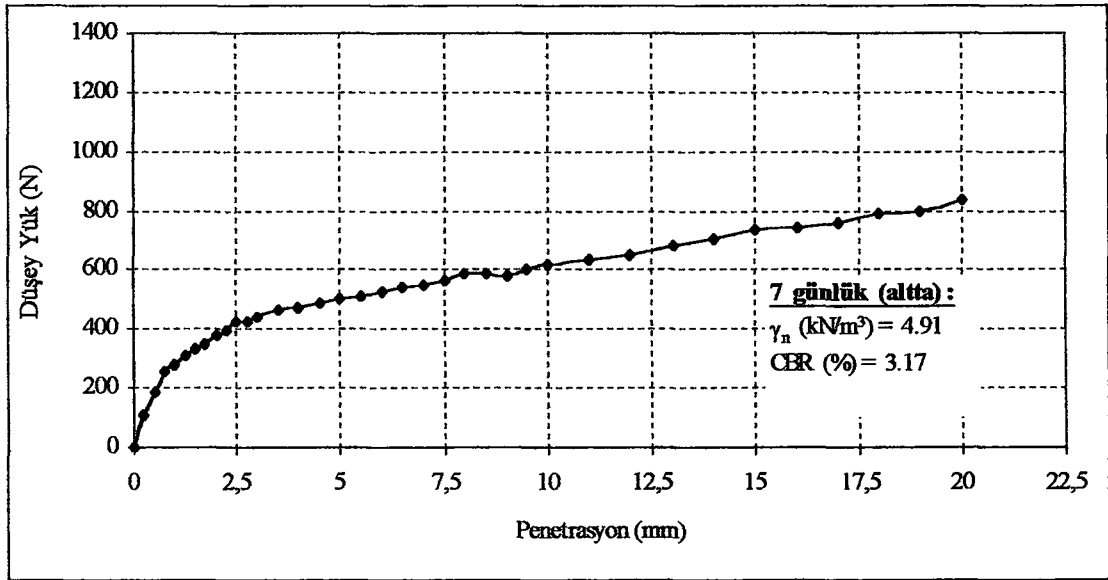


(a)

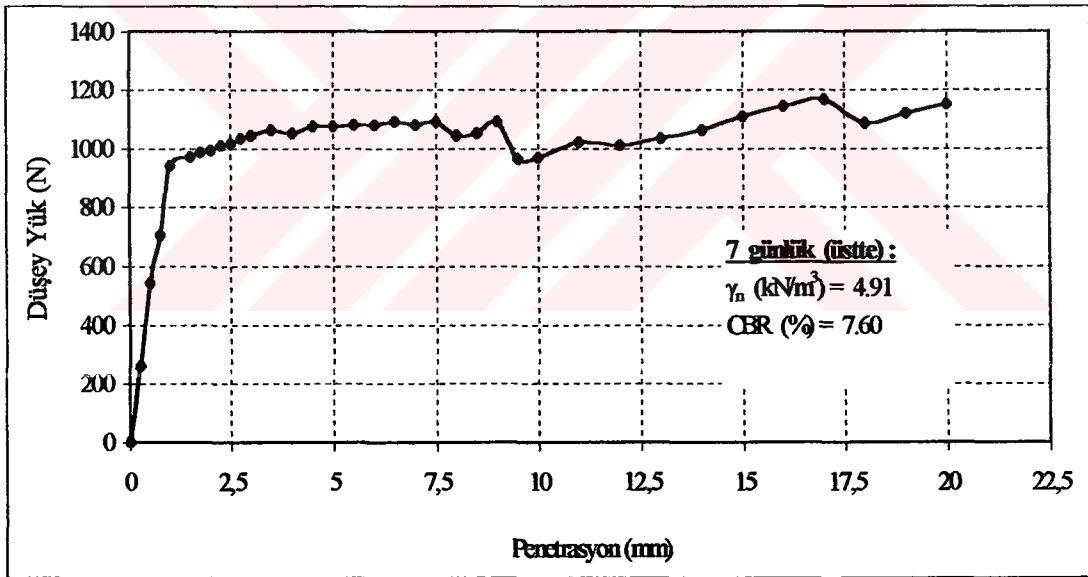


(b)

Şekil C.33 7 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri



(a)

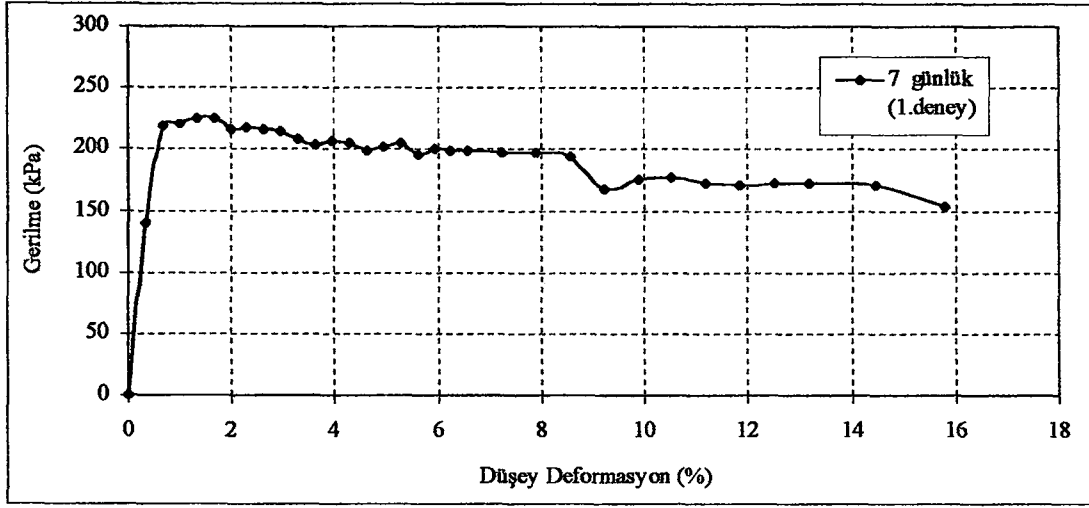


(b)

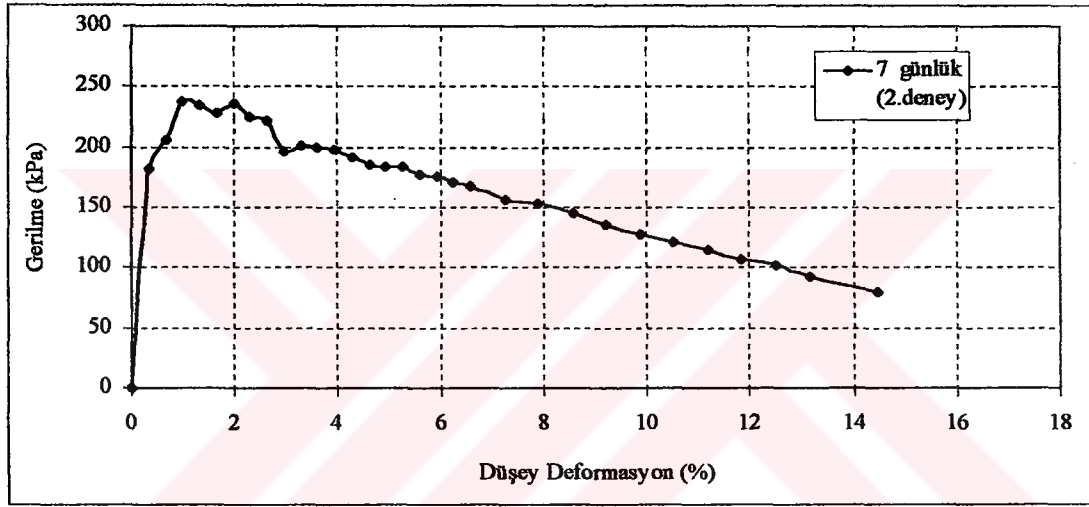
Şekil C.34 7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük - penetrasyon eğrileri



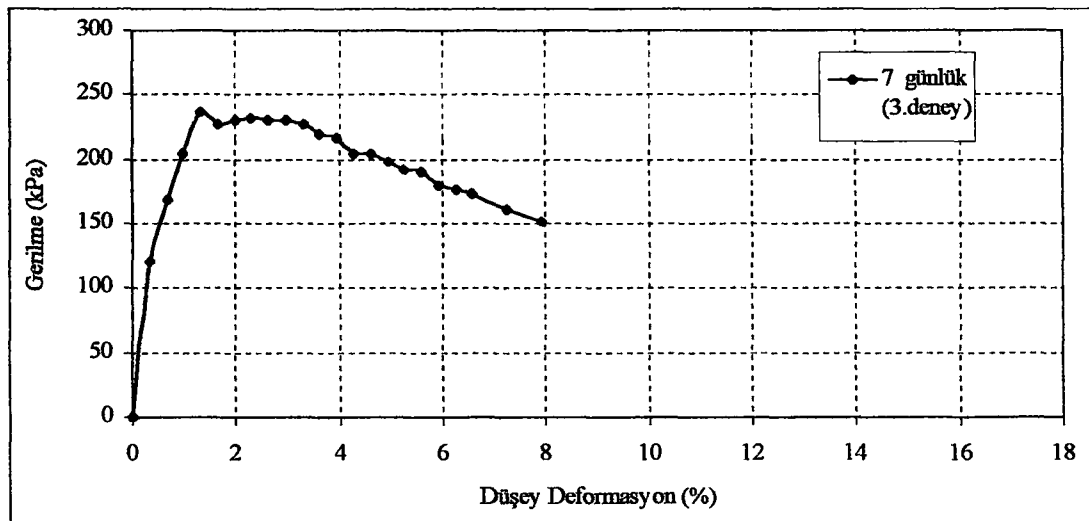
EK D



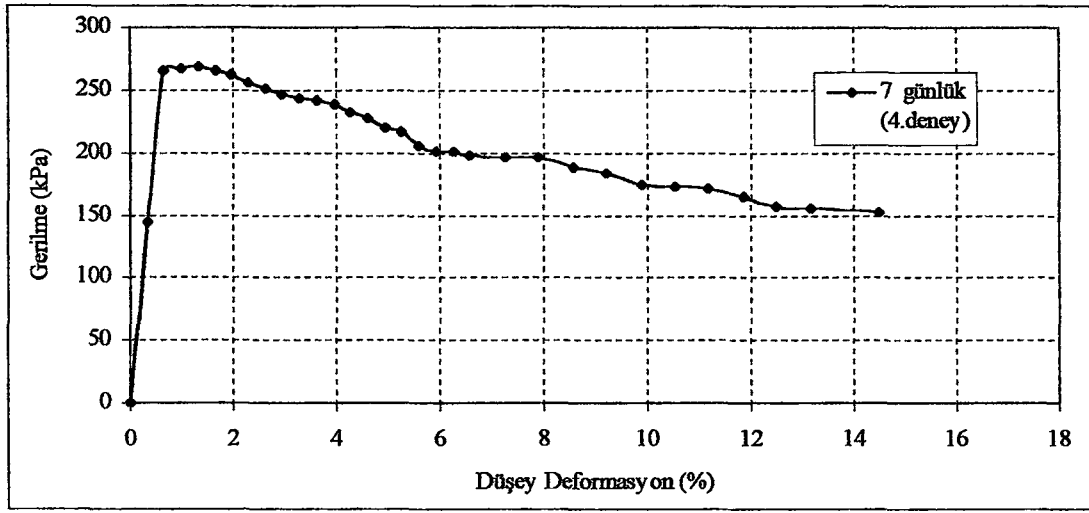
(a)



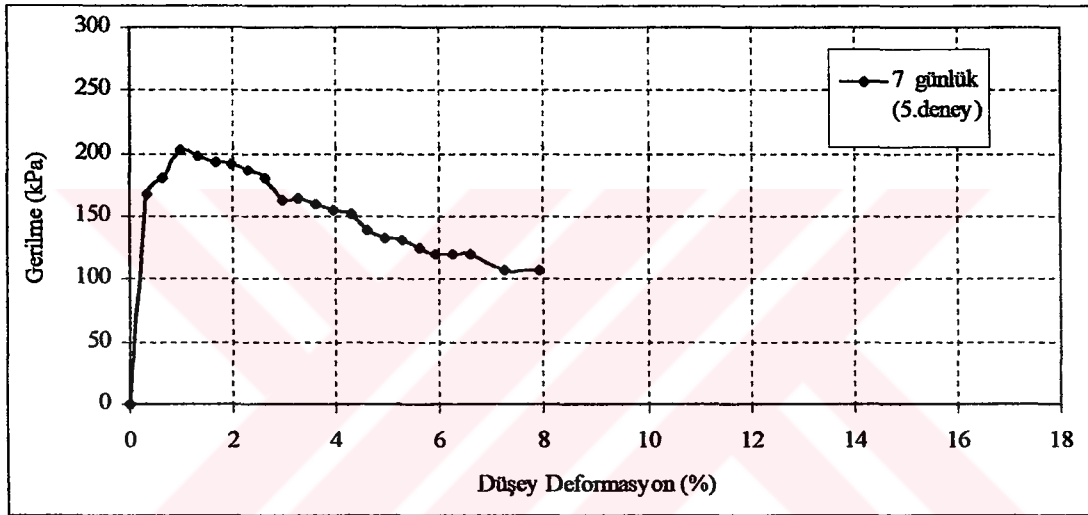
(b)



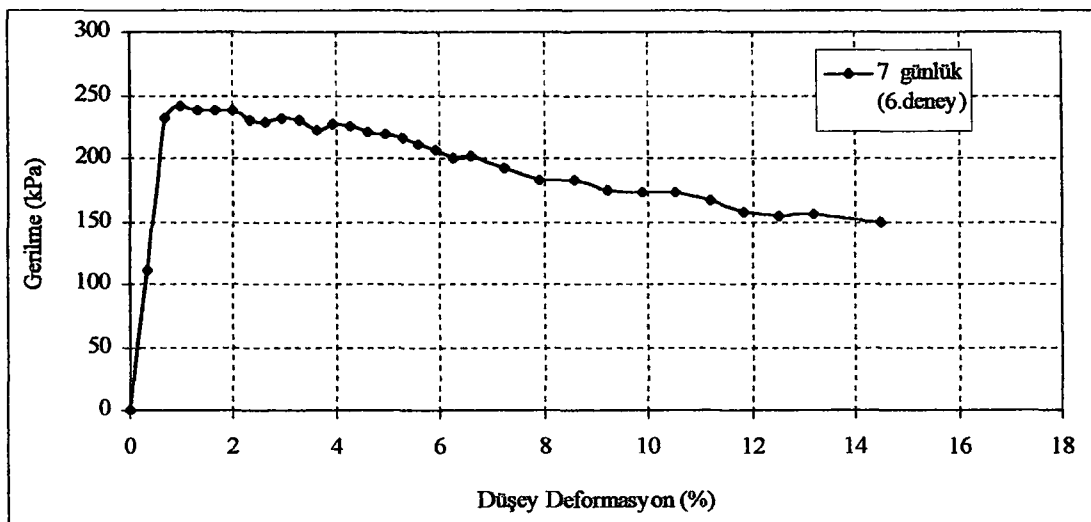
(c)



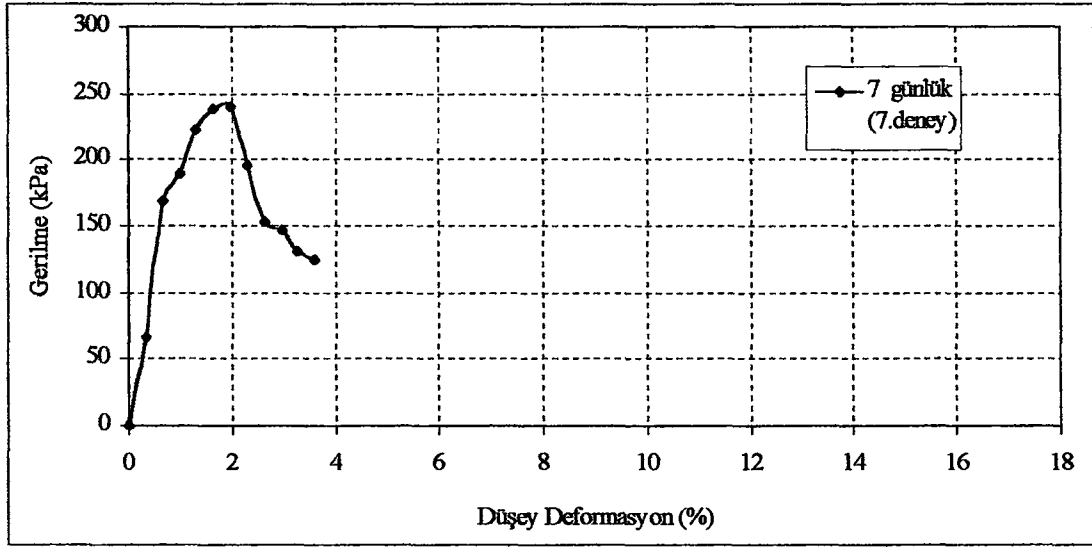
(d)



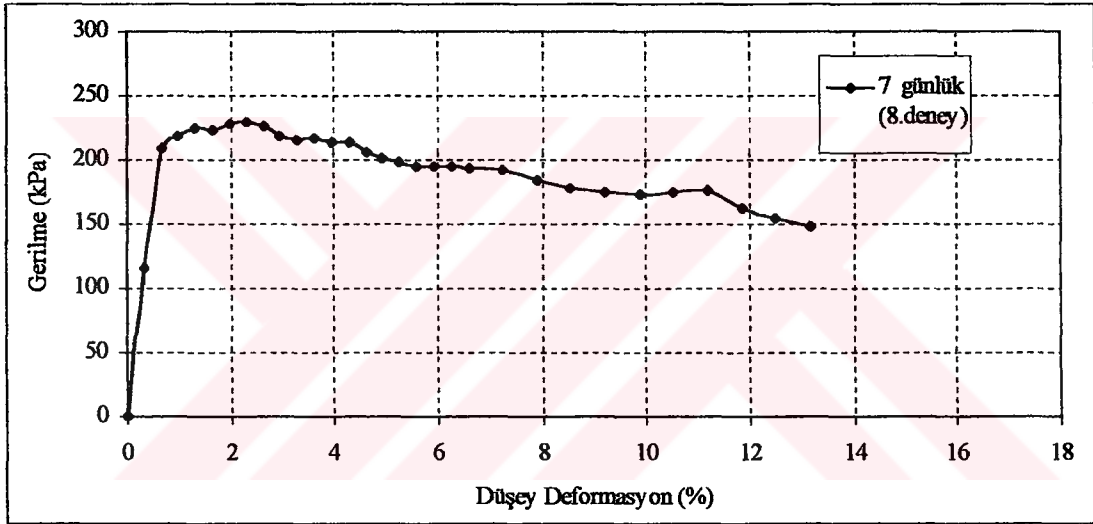
(e)



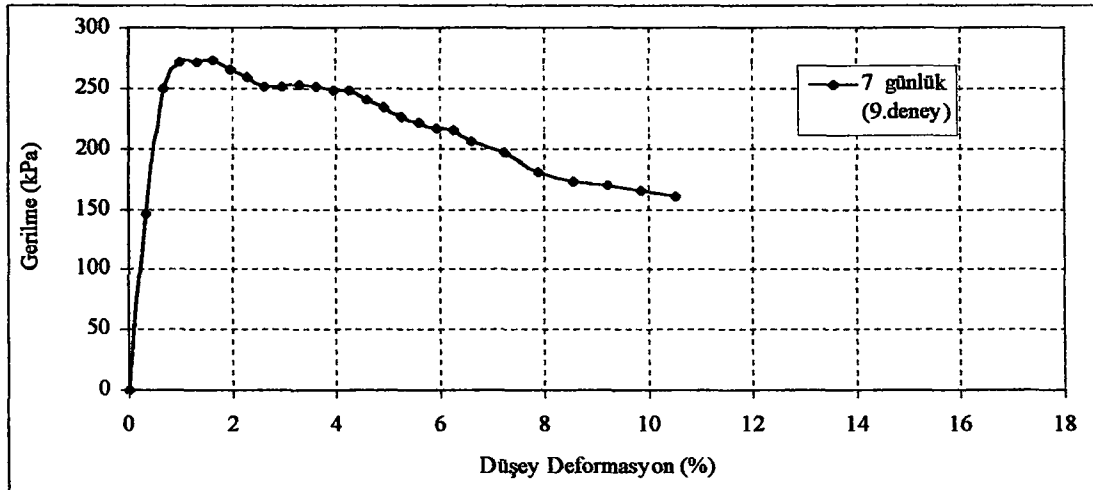
(f)



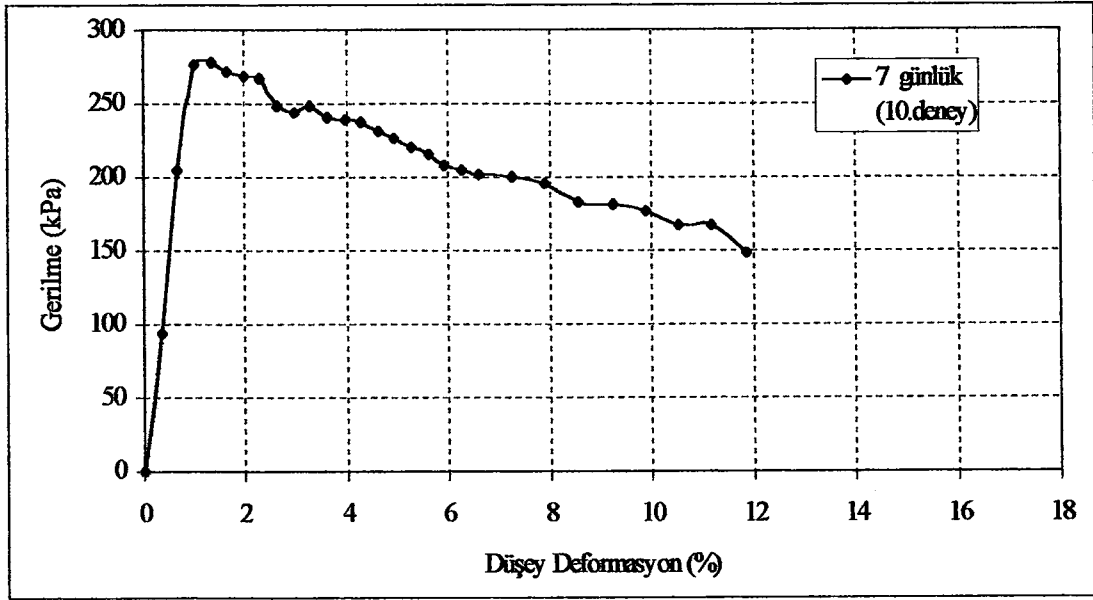
(g)



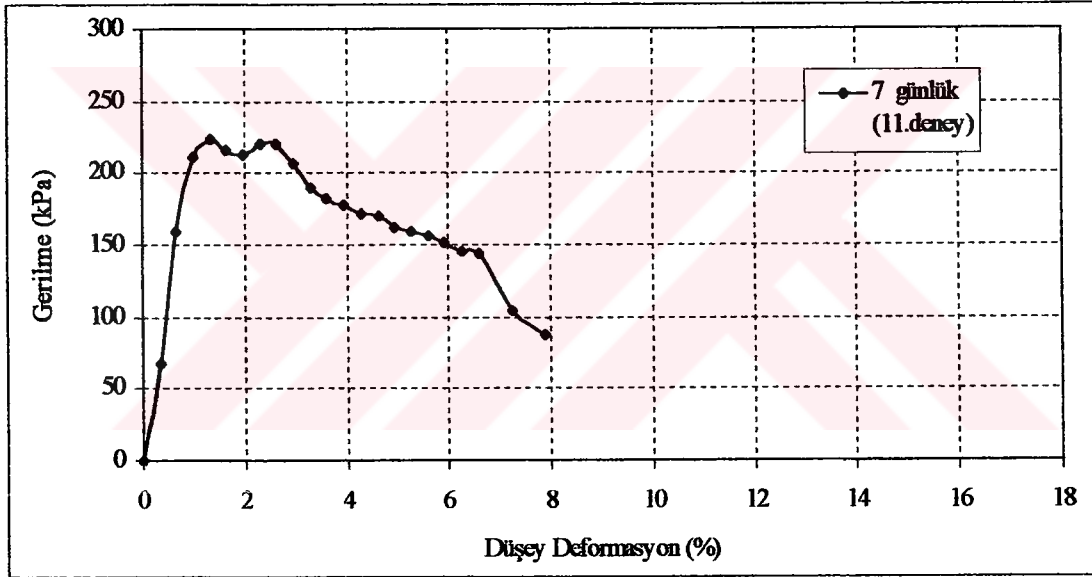
(h)



(i)

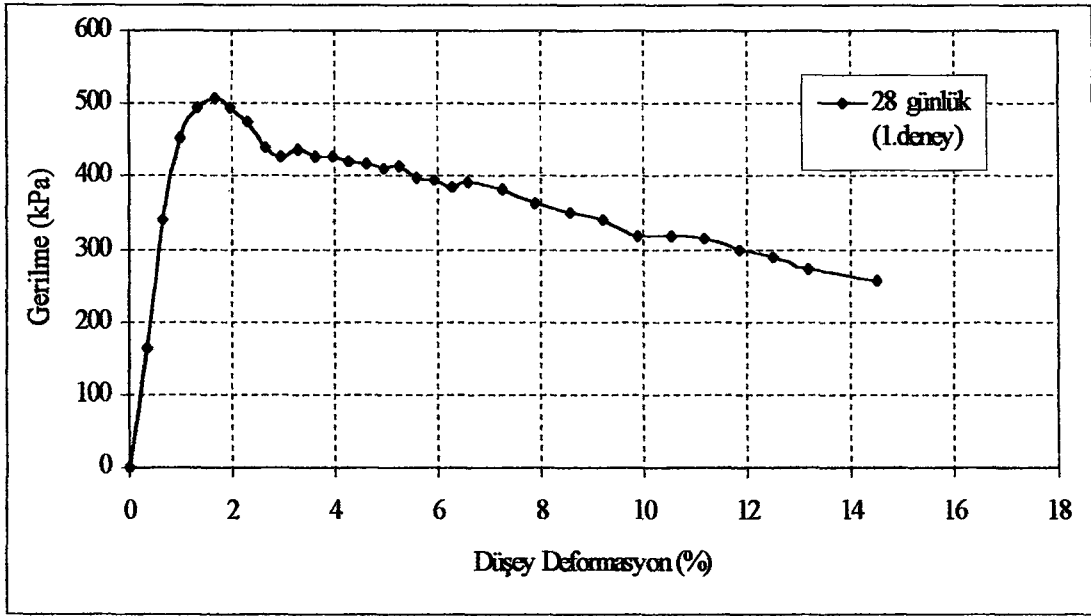


(j)

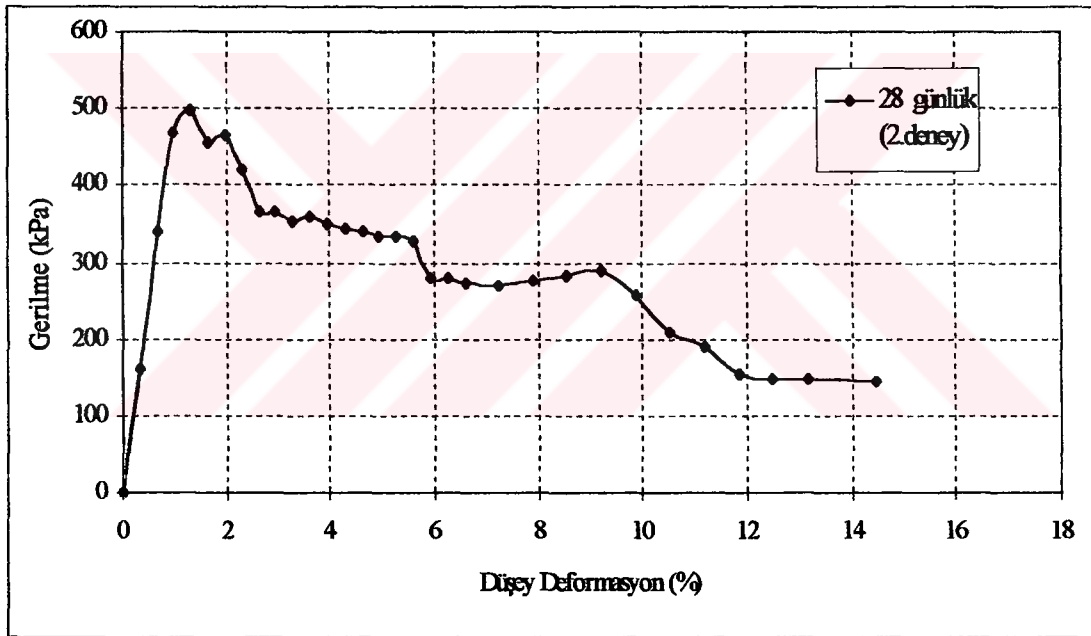


(k)

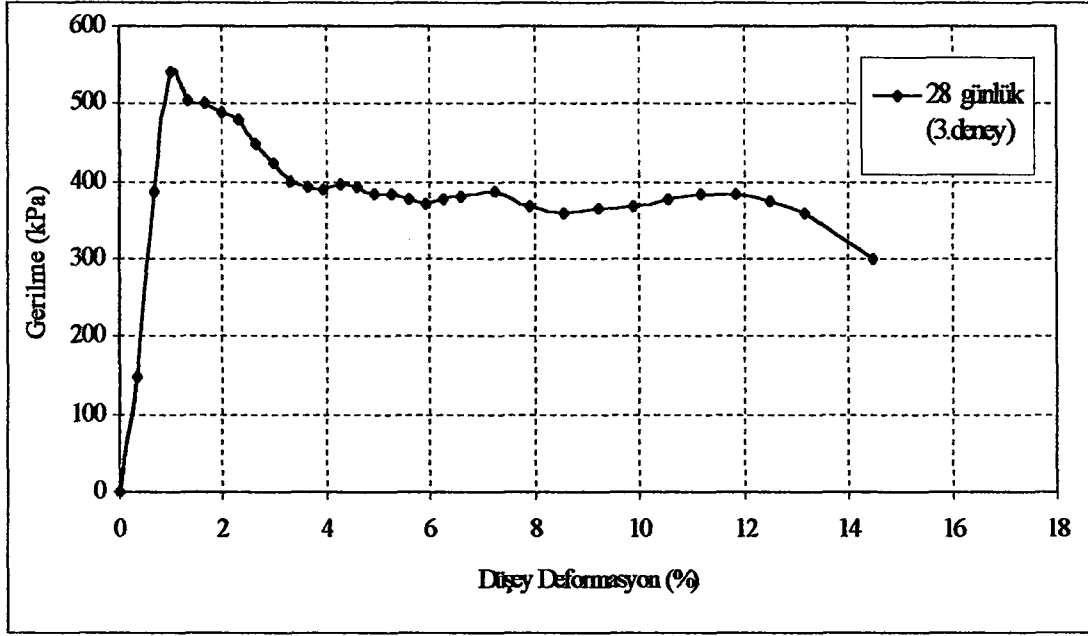
Şekil D.1 7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



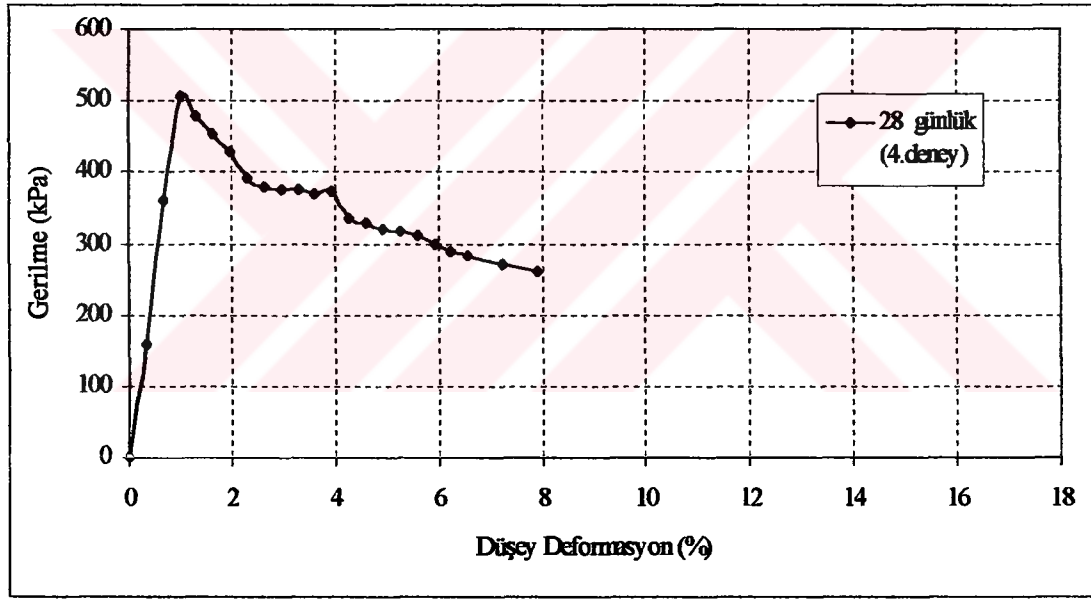
(a)



(b)

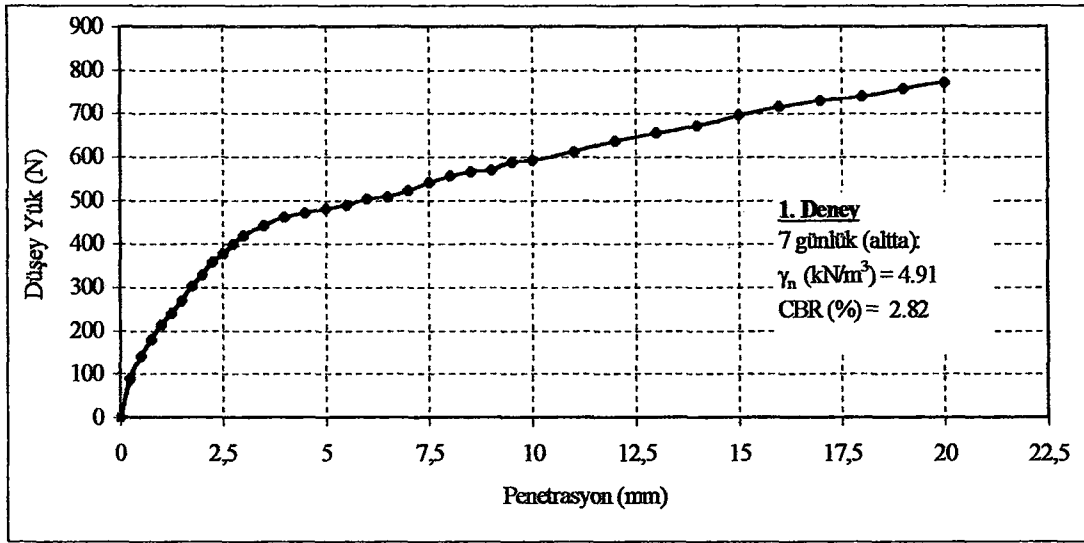


(c)

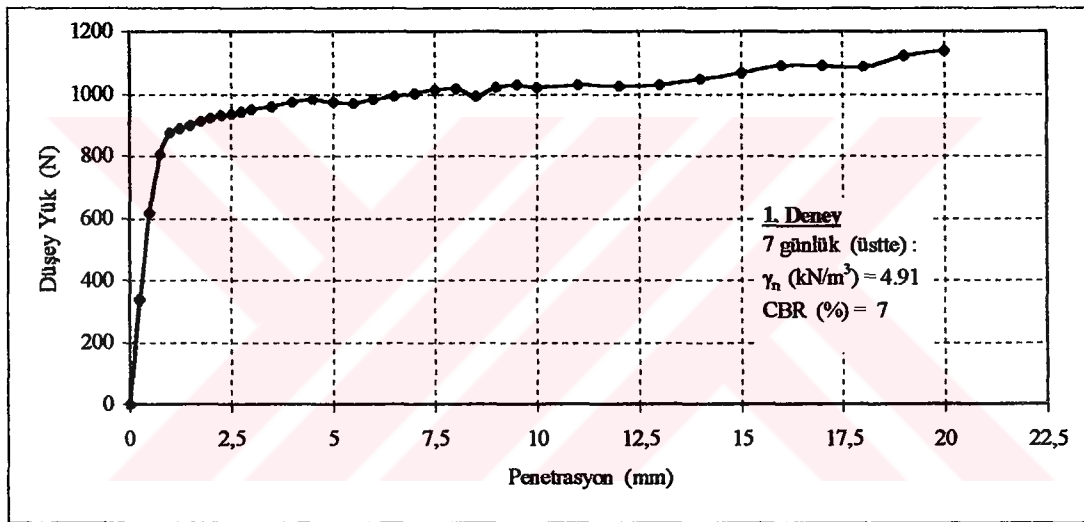


(d)

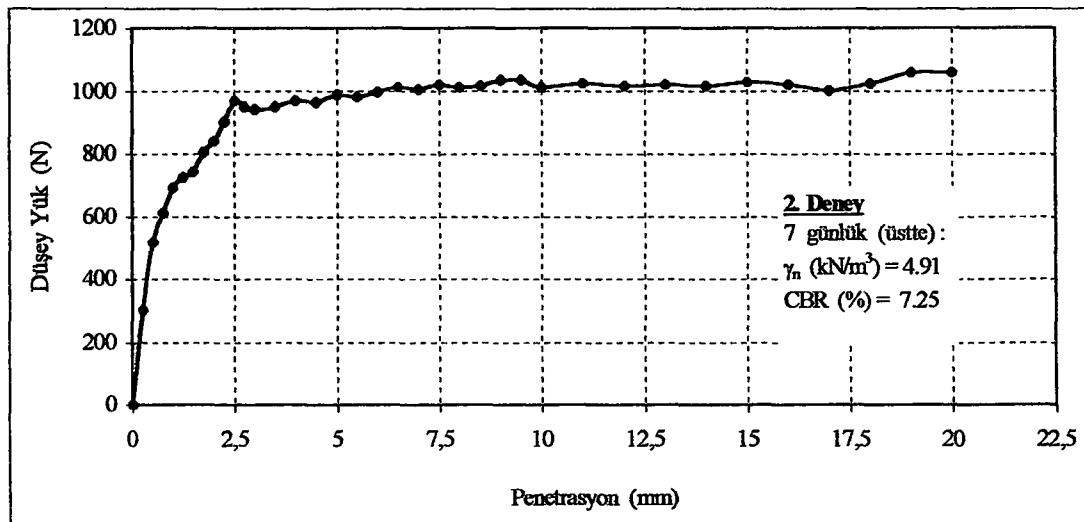
Şekil D.2 28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



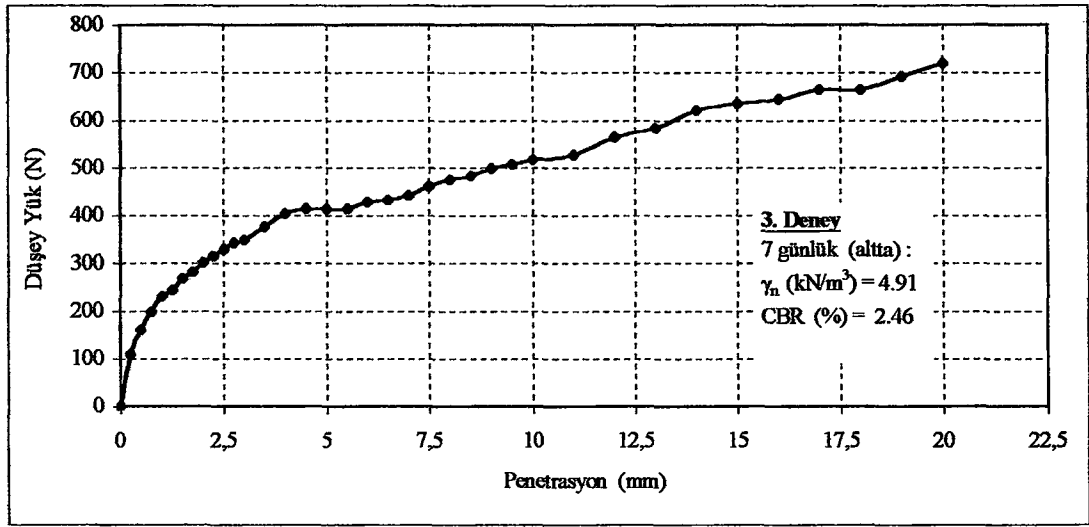
(a)



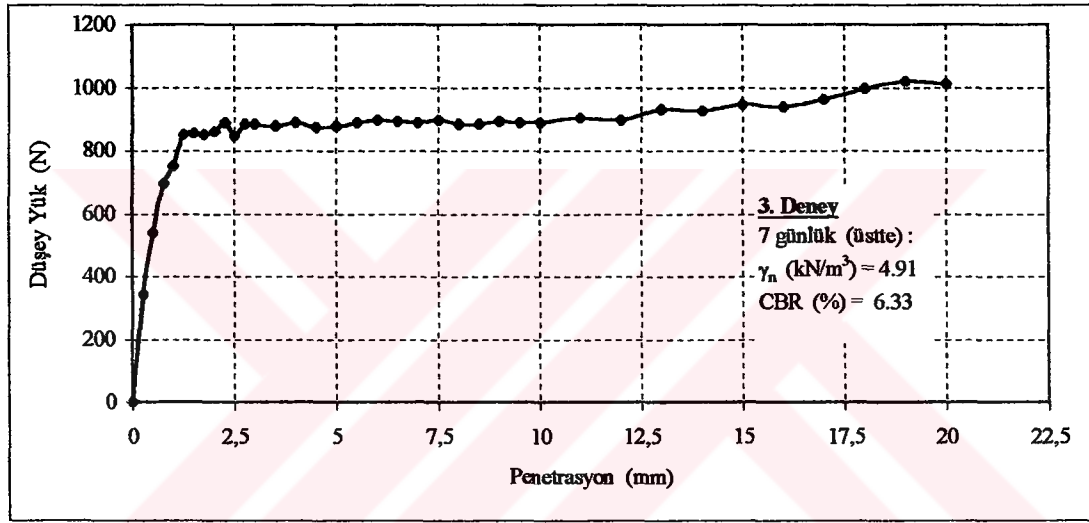
(b)



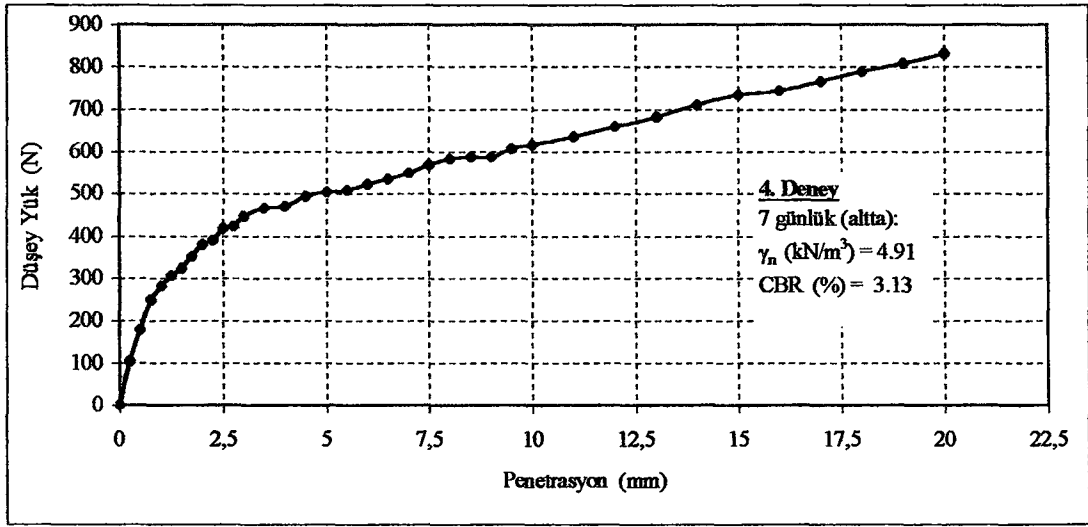
(c)



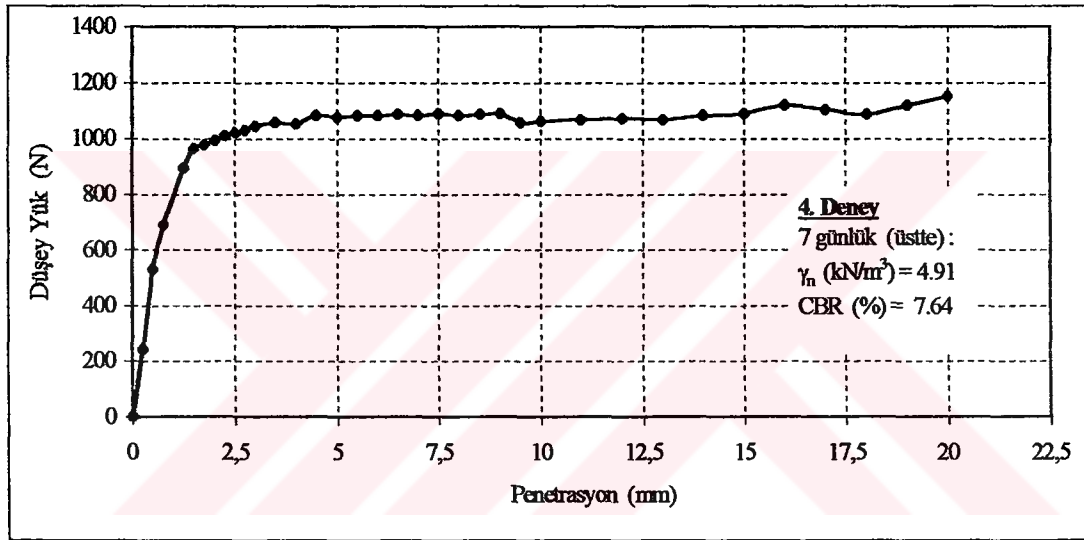
(d)



(e)

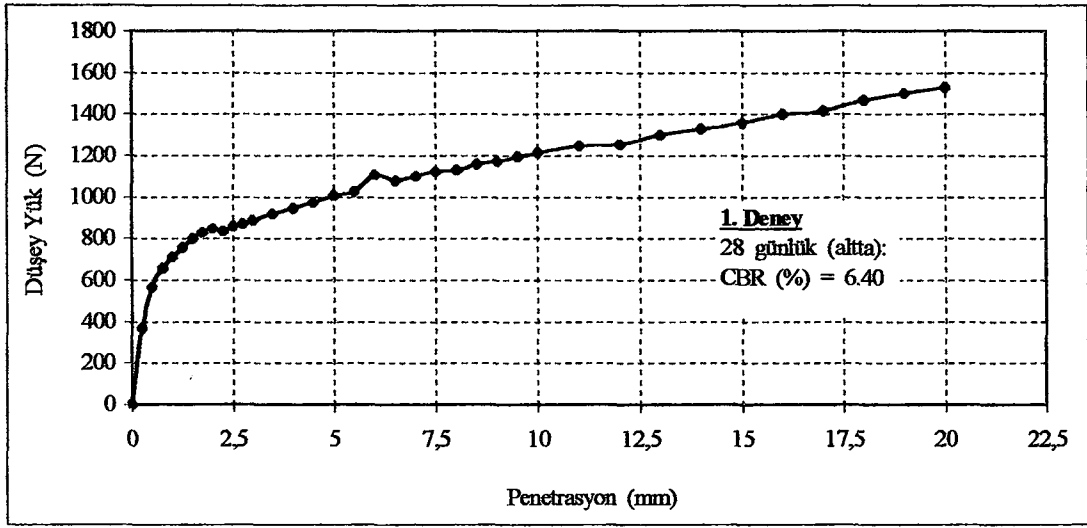


(f)

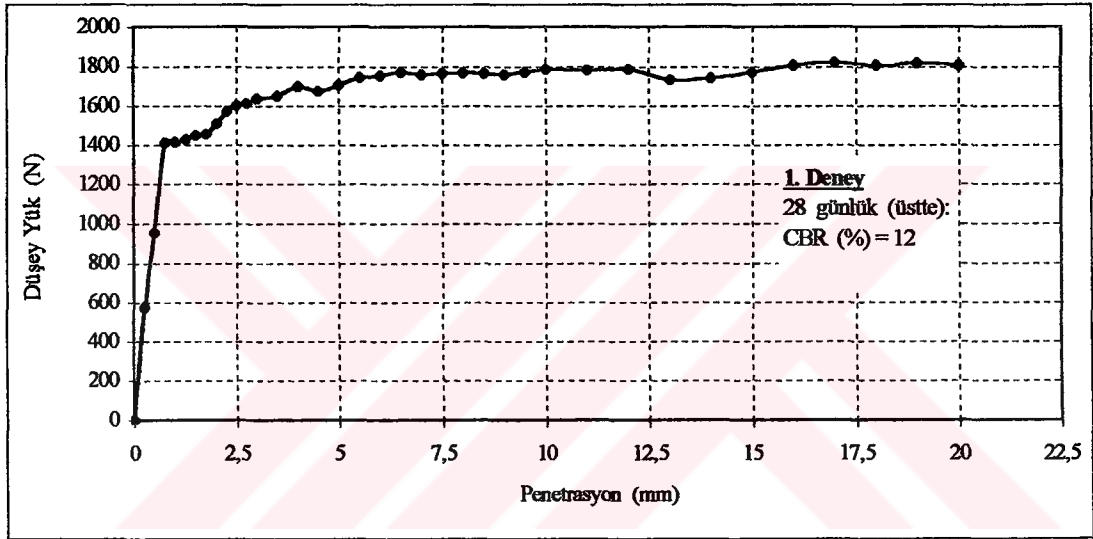


(g)

Şekil D.3 7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri



(a)



(b)

Şekil D.4 28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımı üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri

Tablo D.1 7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının permeabilite katsayısının bulunması

Belirlenen (12 no'lu) karışımın üretimden 7 gün sonraki permeabilite katsayısının**(k_{ort7}) düşen seviyeli permeametre kabı yardımıyla bulunması:**

1.deney:							
t_2 (dak):	t_1 (dak):	H_1 (cm):	H_2 (cm):	a (cm ²):	A (cm ²):	L (cm):	k (cm/sn):
10	0	89,5	88,5	0,5	78,5	10	1,19279E-06
20	10	88,5	87,4	0,5	78,5	10	1,32774E-06
30	20	87,4	86,4	0,5	78,5	10	1,22161E-06
40	30	86,4	85,4	0,5	78,5	10	1,23584E-06
50	40	85,4	84,5	0,5	78,5	10	1,12469E-06
							1,22053E-06

2.deney:							
t_2 (dak):	t_1 (dak):	H_1 (cm):	H_2 (cm):	a (cm ²):	A (cm ²):	L (cm):	k (cm/sn):
10	0	89,5	88,4	0,5	78,5	10	1,31281E-06
20	10	88,4	87,3	0,5	78,5	10	1,32925E-06
30	20	87,3	86,3	0,5	78,5	10	1,22302E-06
40	30	86,3	85,3	0,5	78,5	10	1,23728E-06
50	40	85,3	84,4	0,5	78,5	10	1,12601E-06
							1,24567E-06

3.deney:							
t_2 (dak):	t_1 (dak):	H_1 (cm):	H_2 (cm):	a (cm ²):	A (cm ²):	L (cm):	k (cm/sn):
15	0	89,5	87,9	0,5	78,5	10	1,27663E-06
20	15	87,9	87,4	0,5	78,5	10	1,21115E-06
30	20	87,4	86,3	0,5	78,5	10	1,34455E-06
40	30	86,3	85,4	0,5	78,5	10	1,1129E-06
50	40	85,4	84,5	0,5	78,5	10	1,12469E-06
							1,21398E-06

7 gün sonunda elde edilen ortalama permeabilite katsayısı, k_{ort7} (cm/sn):	1,22673E-06
--	-------------

İ.T.Ü. ZEMİN MEKANİĞİ
LABORATUVARI

Tablo D.2 28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – köpük karışımının permeabilite katsayısının bulunması

Belirlenen (12 no'lu) karışımın üretimden 28 gün sonraki permeabilite katsayısının

(k_{ort28}) düşen seviyeli permeametre kabı yardımıyla bulunması:

1.deney:							
t_2 (dak):	t_1 (dak):	H_1 (cm):	H_2 (cm):	a (cm ²):	A (cm ²):	L (cm):	k (cm/sn):
85	0	89,5	88,4	0,5	78,5	10	1,54448E-07
190	85	88,4	87,1	0,5	78,5	10	1,49783E-07
310	190	87,1	85,6	0,5	78,5	10	1,53677E-07
510	310	85,6	83,4	0,5	78,5	10	1,382E-07
							1,49027E-07

2.deney:							
t_2 (dak):	t_1 (dak):	H_1 (cm):	H_2 (cm):	a (cm ²):	A (cm ²):	L (cm):	k (cm/sn):
80	0	89,5	88,4	0,5	78,5	10	1,64101E-07
185	80	88,4	87,1	0,5	78,5	10	1,49783E-07
320	185	87,1	85,5	0,5	78,5	10	1,45793E-07
510	320	85,5	83,3	0,5	78,5	10	1,45647E-07
							1,51331E-07

3.deney:							
t_2 (dak):	t_1 (dak):	H_1 (cm):	H_2 (cm):	a (cm ²):	A (cm ²):	L (cm):	k (cm/sn):
80	0	89,5	88,6	0,5	78,5	10	1,34113E-07
185	80	88,6	87,4	0,5	78,5	10	1,37869E-07
330	185	87,4	85,8	0,5	78,5	10	1,35268E-07
							1,3575E-07

28 gün sonunda elde edilen ortalama permeabilite katsayısı, k_{ort28} (cm/sn): 1,45369E-07

ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Ankara’da doğmuştur. İlk öğrenimini Özel İnal – Ertekin İlkokulu, orta ve lise öğrenimini ise Bursa Anadolu Lisesi’nde 1993 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girmiştir. 1997 yılında İngilizce Destekli Öğretim Programını tamamlayarak mezun olmuş ve aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.

