

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇUCU KÜL – ÇİMENTO – GENLEŞMİŞ POLİSTİREN KÖPÜK
DANELERİ KARİŞİMİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Sevilay SEVER
(501021268)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Mayıs 2004

Tez Danışmanı :
Diğer Jüri Üyeleri

Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY
Prof.Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU
Prof.Dr. Erol GÜLER (B.Ü.)

(Signatures of the thesis advisor and jury members)

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Ülkemizde enerjinin önemli bir kısmı kömüre dayalı termik santraller vasıtasıyla üretilmektedir. Üretim artışı, yan ürün olarak önemli miktarda uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Diğer endüstriyel katı atıklar gibi uçucu külün depolanması, saklanması önemli çevre sorunlarını ortaya çıkarmaktadır. Kolay ve ucuz temini, kimyasal özellikleri nedeni ile uçucu küllerin mühendislik uygulamalarında kullanılması daha ekonomik çözümler ve çevreye verilen zararın azaltılması imkanlarını sağlayacaktır. Bu çalışmada uçucu kül – çimento – genleşmiş polistiren köpük daneleri karışımının geoteknik mühendisliğinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü imkanı sağlayan, değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocam Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY'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 GÜLTÜNER'e ve sayın Semih VİÇ'e, çalışmalarım sırasında her türlü maddi ve manevi desteği veren anneme, babama, kardeşim Ş. Seda SEVER'e ve İnş. Müh. Maşallah MUTLU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2004

Sevilay SEVER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. HAFİF DOLGU MALZEMELERİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Polistiren Köpük	7
2.2.1. Polistiren köpüğün üretimi	7
2.2.2. Polistiren köpüğün kullanım alanları	8
2.2.3. Polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri	9
2.2.4. Polistiren köpüğün kimyasal özellikleri	12
2.3. Hurda Taşıt Lastikleri	13
2.3.1. Kayma dayanımı	14
2.3.2. Parçalanmış lastiğin fiziksel özellikleri	18
2.3.3. Parçalanmış lastiğin mekanik özellikleri	19
2.3.4. Parçalanmış lastiğin kimyasal ve diğer özellikleri	24
2.4. Uçucu Kül	24
2.4.1. Uçucu külün sınıflandırılması	25
2.4.2. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri	25
2.4.3. Uçucu külün mühendislik özellikleri	26
3. KONU ÜZERİNDE YAPILMIŞ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	29
3.1. Polistiren Köpük Kullanarak Yapılmış Çalışmalar	29
3.1.1. Köpük karıştırılmış hafif zemin ile uygulamalar	29
3.1.1.1. Yumuşak zeminde mevcut bir dolguyu yükseltmek için uygulama	29
3.1.1.2. Yeraltı yapılarındaki toprak basıncını azaltmak için ölçümler	30
3.1.2. Polistiren köpük ile yol dolgusu teşkili	31
3.1.3. Uygulamadan örnekler	32
3.1.3.1. Akıcı kil üzerindeki yol dolgusunun tekrar inşası	32
3.1.3.2. Otoyol rampası inşası	33
3.1.3.3. Oturan fabrika döşeme dolgusunun tekrar inşası	33
3.1.4. Karma hafif dolgu malzemelerini modelleme	34
3.1.5. Yumuşak zemindeki dolguda yerdeğiştirme ile oturmanın azaltılması	37

3.2. Lastik Yongaları Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar	40
3.2.1. Yol dolgusu deneyi	40
3.2.2. Siltli kum karıştırılmış ve karıştırılmamış sıkıştırılmış lastik parçaları üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyi	42
3.3. Uçucu Kül Kullanarak Yapılmış Çalışmalar	45
3.3.1. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu	45
3.3.2. Uçucu külün akıcı dolgu olarak kullanılması	49
3.3.3. Uçucu kül katkısının şişen bir zeminin şişme basıncına etkisi	55
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	60
4.1. Giriş	60
4.2. Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	60
4.2.1. Karışım da kullanılan malzemelerin özellikleri	60
4.2.1.1. Termik santral uçucu külü	60
4.2.1.2. Portland çimentosu	63
4.2.1.3. Polistiren köpük daneleri	64
4.2.2. Uçucu Kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımının hazırlanması	65
4.2.3. Uçucu Kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımları üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri	69
4.3. Belirlenen (1 No'lu) Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımı Üzerinde Yapılan Deneyler	72
4.3.1. Serbest basınç deneyleri	72
4.3.2. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi	75
5. SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR	80
EKLER	82
ÖZGEÇMİŞ	112

KISALTMALAR

CBR	: California Bearing Ratio
EBL	: Köpük Karıştırılmış Hafif Zemin
EPS	: Expanded Polystyrene
OUK	: Orhaneli Uçucu Külü
PÇ	: Portland Çimentosu
UK	: Uçucu Kül
UKÇ	: Çimento Katılmış Uçucu Kül
UKK	: Kireç Katılmış Uçucu Kül
XPS	: Extruded Polystyrene



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Hafif Dolgu Malzemeleri.....	4
Tablo 2.2 Japonya’da Kullanılan Hafif Dolgu Malzemeleri.....	6
Tablo 2.3 Polistiren Köpüğün Özellikleri.....	11
Tablo 2.4 Polistiren Köpüğün Kimyasal Katkılara Dayanımı.....	12
Tablo 2.5 Lastik Yongaları, Kum, Kumlu Silt ve Karışımlarının Kayma Dayanımı Parametreleri.....	17
Tablo 2.6 Sıkıştırma Enerjisi, Tabaka Başına Vuruş Sayısı ve Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlık.....	20
Tablo 2.7 Alberta (Kanada) Uçucu Küllerinin Optimum Su Muhtevaları ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları.....	26
Tablo 2.8 Amerikan Uçucu Küllerinin Optimum Su Muhtevaları ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıkları.....	27
Tablo 3.1 Genleşmiş Polistiren Köpük Daneleri Karıştırılmış Hafif Zemin Numunelerinin Karışım Oranları.....	35
Tablo 3.2 Hava Köpüğü Karıştırılmış Hafif Zemin Numunelerinin Karışım Oranları.....	35
Tablo 3.3 Polistiren Köpük Karıştırılmış Hafif Zemin Üzerinde Yapılan Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	36
Tablo 3.4 Polistiren Köpük Karıştırılmış Hafif Zemin Üzerinde Yapılan Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	36
Tablo 3.5 Hava Köpüğü Karıştırılmış Hafif Zemin Üzerinde Yapılan Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	37
Tablo 3.6 Hava Köpüğü Karıştırılmış Hafif Zemin Üzerinde Yapılan Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	37
Tablo 3.7 Deneyde Kullanılan Malzemelerin İndeks Özellikleri.....	43
Tablo 3.8 Deney Programı.....	44
Tablo 3.9 Seyitömer Uçucu Külünün Özellikleri.....	45
Tablo 3.10 Kemerburgaz Kilinin Laboratuvar Özellikleri.....	46
Tablo 3.11 Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	48
Tablo 3.12 Kül, Kireç ve Su Yüzdelere Göre Grup İsimleri	50
Tablo 3.13 Soma Termik Santrali Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları	50
Tablo 3.14 Dizayn Karışımlarının 7, 14, 28 Günlük Serbest Basınç Mukavemeti ve Birim Deformasyon Sonuçları.....	51
Tablo 3.15 Dizayn Karışımlarının İlk ve Son Priz Süreleri ile Büzülme Yüzdeleri.....	51
Tablo 3.16 Dizayn Karışımlarının Geçirgenlik Katsayısı, Özgül ve Kuru Birim Hacim Ağırlıkları ve Boşluk Oranları.....	53
Tablo 3.17 Numunelerin Endeks Özellikleri.....	56

Tablo 3.18	Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Analiz Sonuçları.....	57
Tablo 3.19	Kullanılan Malzemelerin Mineralojik Analiz Sonuçları.....	57
Tablo 4.1	Orhaneli Uçucu Külünün (OUK) Değişik Tarihlerde Elde Edilen Kimyasal Analiz Sonuçları.....	62
Tablo 4.2	Klinkere veya Betona Katılacak Uçucu Küllerin Sağlaması Gerekli Kimyasal Özellikler	63
Tablo 4.3	PÇ 42.5'un Standart Değerleri.....	63
Tablo 4.4	PÇ 42.5'un Kimyasal Özellikleri.....	64
Tablo 4.5	Hafif Dolgu Malzemesi Üretmek İçin Yapılan Hazırlık Niteliğindeki Deneylerin Sonuçları.....	66
Tablo 4.6	Uçucu kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımlarının İçinde Kullanılan Malzemelerin Ağırlıkça Oranları	67
Tablo 4.7	Uçucu kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımlarının Yoğunlukları.....	68
Tablo 4.8	Uçucu kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımlarının 7 ve 28 günlük Elastisite Modülü (E) ve ϵ_f Değerleri.....	71
Tablo 4.9	1 No'lu Uçucu kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımının 7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı Değerleri	72
Tablo 4.10	1 No'lu Karışımın 7 Günlük Elastisite Modülü ve ϵ_f Değerleri.....	73
Tablo 4.11	1 No'lu Karışımın 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımı Değerleri	74
Tablo 4.12	1 No'lu Karışımın 28 Günlük Elastisite Modülü ve ϵ_f Değerleri.....	75
Tablo 4.13	1 No'lu Karışımın 7 Günlük CBR Değerleri.....	75
Tablo 5.1	Uçucu kül - Çimento - Polistiren Köpük Daneleri Karışımının Diğer Hafif Dolgu Malzemeleriyle Karşılaştırılması	79

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Polistiren Köpüğün Basınç Altında Gerilme – Deformasyon Eğrileri	9
Şekil 2.2	Kumlu Silt ve Kumlu Silt – Lastik Yongası Karışımları İçin Kayma Dayanımı ve Yatay Yerdeğiştirme.....	15
Şekil 2.3	Kumlu Silt – Lastik Yongası Karışımlarına Ait Kayma Dayanımı Zarfları.....	16
Şekil 2.4	(a) Kum – Lastik Yongası ve (b) Kumlu Silt – Lastik Yongası Karışımları İçin Kayma Verimliliği.....	18
Şekil 2.5	Tek Boyutlu Sıkışabilmeyi Ölçmek İçin Kullanılan Sistem.....	21
Şekil 2.6	Üç Ayrı Numune Üzerinde Yapılan Sıkışabilirlik Deneyleri.....	21
Şekil 2.7	Yükleme – Boşaltma Çevrimlerine Bağlı Olarak Lastik Yongalarının Sıkışabilirliği.....	22
Şekil 2.8	Sıkışma Anında Numunede Meydana Gelen Düşey Gerilmeye Çevre Sürtünmesinin Etkisi.....	22
Şekil 2.9	Tek Boyutlu Sıkışma Altında Test Edilen Numunede Yatay ve Düşey Gerilme Arasındaki İlişki.....	23
Şekil 3.1	Yumuşak Zeminde Kıyısız Seddeyi Yükseltmek İçin Uygulama.....	30
Şekil 3.2	Savak Yolu Civarında Dolgu Uygulaması.....	30
Şekil 3.3	Polistiren Köpüğün Yol Dolgusunda Kullanılması.....	31
Şekil 3.4	Polistiren Köpük Tabakalarının Yol Dolgusunda Kullanılması.....	32
Şekil 3.5	Kayan Yol Dolgusunun Polistiren Köpüklerle Tekrar Teşkili.....	33
Şekil 3.6	Yol Rampasının Polistiren Köpük Bloklarla Teşkili.....	33
Şekil 3.7	Fabrika Döşeme Dolgusunun Polistiren Köpüklerle Yapılması.....	34
Şekil 3.8	Dolgu Enkesiti.....	38
Şekil 3.9	Dolgu Boykesit ve Planı.....	38
Şekil 3.10	Geçen Süreyle Uygulanan Yük ve Oturmanın Değişimi.....	38
Şekil 3.11	Oturma – Zaman İlişkisi.....	39
Şekil 3.12	Köprü Ayağındaki Hafif Dolgu Uygulaması.....	39
Şekil 3.13	Dolgu Enkesiti.....	41
Şekil 3.14	Dane Çapı Dağılım Eğrisi.....	43
Şekil 3.15	Farklı Karışım Oranlarında Siltli Kum Karıştırılmış Lastik Parçalarının Maksimum ve Minimum Asal Gerilmeleri Arasındaki İlişki.....	44
Şekil 3.16	Seyitömer Uçucu Külü Granülometri Eğrisi.....	46
Şekil 3.17	Kemerburgaz Kili Granülometri Eğrisi.....	46
Şekil 3.18	Kemerburgaz Kili Üç Eksenli Basınç Gerilme – Deformasyon Eğrileri.....	48
Şekil 3.19	% 20 Uçucu Kül - % 80 Kil Karışımı Üç Eksenli Basınç Gerilme Deformasyon Eğrileri.....	48

Şekil 3.20	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Basınç Mukavemeti Değerleri.....	51
Şekil 3.21	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Kırılma Anı Deformasyon Değerleri.....	52
Şekil 3.22	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Basınç Mukavemeti Artışları	52
Şekil 3.23	Grupların Değişik Kür Sürelerine Göre Kırılma Deformasyon Değişimleri.....	53
Şekil 3.24	Uçucu Kül Numunelerinin w/c Oranı İlişkileri.....	54
Şekil 3.25	Uçucu Kül Numunelerinin w/c Oranı – Geçirimsizlik Katsayıları İlişkileri.....	54
Şekil 3.26	Soma ve Tunçbilek Uçucu Külü İlavesinin Zeminin Kıvam Limitlerine Etkisi.....	57
Şekil 3.27	Soma ve Tunçbilek Uçucu Külü İlavesinin Zeminin Şişme Basıncına Etkisi.....	58
Şekil 3.28	Soma ve Tunçbilek Uçucu Külü Katkılı Numunelerin Şişme Basınçlarına Kür Etkisi.....	58
Şekil 4.1	Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımlarının Yoğunluklarının Ağırlıkça Çimento ve Uçucu Kül Oranına Bağlı Değişimi.....	68
Şekil 4.2	Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımlarının Ağırlıkça Su / Çimento Oranına Bağlı Değişimi.....	69
Şekil 4.3	Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımlarının Ağırlıkça Çimento Oranına Bağlı Değişimi.....	70
Şekil 4.4	Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımlarının 7 ve 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımlarının Ağırlıkça Uçucu Kül Oranına Bağlı Değişimi.....	70
Şekil 4.5	1 No’lu Karışımın Gerilme – Düşey Deformasyon Eğrileri (7 Günlük)	73
Şekil 4.6	1 No’lu Karışımın Üretimden 28 Gün Sonra Yapılan Serbest Basınç Deneylerinden Elde Edilen Gerilme – Düşey Deformasyon Eğrileri	74
Şekil 4.7	1 No’lu Karışımın Üretimden 7 Gün Sonra Yapılan CBR Deneyinden Elde Edilen Düşey Yük – Penetrasyon Eğrileri.....	76
Şekil A.1	7 gün küre tabi tutulmuş 1 no’lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	83
Şekil A.2	28 gün küre tabi tutulmuş 1 no’lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	84
Şekil A.3	7 gün küre tabi tutulmuş 2 no’lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	85
Şekil A.4	28 gün küre tabi tutulmuş 2 no’lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	87
Şekil A.5	7 gün küre tabi tutulmuş 3 no’lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	87

Şekil A.6	28 gün küre tabi tutulmuş 3 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	88
Şekil A.7	7 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	89
Şekil A.8	28 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	90
Şekil A.9	7 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	91
Şekil A.10	28 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	92
Şekil A.11	7 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	93
Şekil A.12	28 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	94
Şekil A.13	7 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	95
Şekil A.14	28 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	96
Şekil A.15	7 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	97
Şekil A.16	28 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	98
Şekil A.17	7 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	99
Şekil A.18	28 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	100
Şekil A.19	7 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	101
Şekil A.20	28 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	102
Şekil A.21	7 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	103

Şekil A.22	28 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	104
Şekil A.23	7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	105
Şekil A.24	28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	105
Şekil B.1	7 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	109
Şekil B.2	28 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri.....	111

SEMBOL LİSTESİ

c	: Kohezyon
c_u	: Drenajsız Kayma Mukavemeti
C_c	: Sıkışma İndisi
C_r	: Yeniden Sıkışma İndisi
C_u	: Uniformluk Katsayısı
D_{50}	: Ortalama Dane Çapı
e	: Boşluk Oranı
E	: Young Modülü
G_s	: Özgül Ağırlık
q_u	: Serbest Basınç Dayanımı
w	: Su Muhtevası
w_{opt}	: Optimum Su Muhtevası
ϵ_f	: Maksimum Deviatör Gerilmeye Ulaşıldığı Andaki Eksenel Deformasyon
ϵ_v	: Düşey Deformasyon
ϕ_u	: Drenajsız Kayma Mukavemeti Açısı
γ_{kmax}	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
γ_n	: Doğal Birim Hacim Ağırlık
γ_s	: Dane Birim Hacim Ağırlığı
ν	: Poisson Oranı
σ	: Düşey Gerilme
$\Delta\sigma$	: Deviatör Gerilme

ÖZET

Ülkemiz su kaynakları, büyük oranda elektrik enerjisi üretebilecek bir potansiyele sahip olmasına karşın, hidroelektrik santrallerin yapımının ve devreye alınmasının uzun sürmesi ve maliyetinin çok yüksek olması sebebiyle son dönemlerde gerekli kömür ve linyit rezervlerine sahip olunması, maliyeti ve devreye alınma süresi daha az olan termik santrallerin yapımı hızlanmıştır.

Termik santraller elektrik enerjisi üretiminin yanında çeşitli atık ürünlerin de meydana gelmesine sebep olmaktadır. Baca gazları ile yükselen ve elektrostatik filtreler yardımıyla tutulan, uçucu küllerin atılması, depolanması çok büyük güçlükler yaratmakla birlikte önemli oranda çevre kirliliği yaratmaktadır. Termik santral uçucu külü, gelişmiş ülkelerde; çimento üretiminde, beton üretiminde çimentoyla doğrudan karıştırılarak, zemin stabilizasyonunda ve diğer alanlarda stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Fakat ülkemizde oldukça fazla üretim potansiyeline sahip olmasına rağmen yeterince kullanılmamaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde; çok yumuşak zeminler üzerinde hafif dolgular oluşturarak oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde, dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında hafif dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Hafif dolgu malzemesi olarak ağaç kabuğu ve talaş gibi doğal malzemeler kullanıldığı gibi, polistiren köpük gibi endüstri ürünleri, kullanılmış oto lastiği parçaları, katı atık uçucu külü ve termik santral uçucu külü gibi atık malzemeler de kullanılmaktadır.

Termik santral uçucu külü; maksimum kuru birim hacim ağırlığının uygun olduğu durumlarda, katkısız olarak hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Termik santral uçucu külünün hafif dolgu malzemesi olarak kullanılması, hem atık madde sorununa çözüm getirecek, hem de inşa edilen dolguların ölü yüklerinin azaltılmasına ve ölü yüklerden meydana gelebilecek zemin problemlerinin ortadan kalkmasına yardımcı olacaktır.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışmasında, Orhaneli uçucu külü, çimento ve polistiren köpük danelerinin karıştırılmalarıyla üretilen hafif dolgu malzemesinin, 7 ve 28 gün küre tabi tutulduktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiş ve geoteknik mühendisliğinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geoteknik mühendisliğinde kullanılan hafif dolgu malzemelerinin; mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Büyük miktarlarda uçucu külün kullanılmasına imkan verecek ve hafifliği sayesinde çeşitli zemin problemlerinin çözülmesini sağlayacak uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan deneyler değerlendirilmiştir.

Orhaneli uçucu külü – çimento – polistiren köpük daneleri karışımının genel özellikleri şöyledir:

- Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarında kullanılan ağırlıkça toplam uçucu kül ve çimento oranı % 67, su oranı % 31.2, polistiren köpük daneleri oranı % 1.8'dir.

- Karışımlarda uçucu kül ve çimento oranı her zaman sabit kalmış, bununla birlikte ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranları kendi aralarında değişmiştir. Ağırlıkça çimento oranı en az % 13, en çok % 33.5 olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça uçucu kül oranı en az % 33.5, en çok % 54 olarak kullanılmıştır.
- Karışımlarda çimento oranı arttıkça, karışımların mukavemetinde artış gözlenmiştir. Belirlenen 1 No'lu karışımda kullanılan ağırlıkça çimento oranı % 13 (106 kg/m^3) ve uçucu kül oranı % 54 (440 kg/m^3)'dür. 7 günlük basınç dayanımları 500 kPa ve 28 günlük serbest basınç dayanımları 1700 kPa olarak bulunmuştur.
- Karışımlarda kullanılan ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranları kendi aralarında değişse bile, toplam katı madde oranı sabit kaldığı için karışımların yoğunluğu değişmemiştir. Elde edilen bütün uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarının üretimden 7 gün sonraki yoğunlukları 8.15 ile 8.50 kN/m^3 arasında değişmektedir. Mikserde optimum karıştırma süresi 30 dakika olarak bulunmuş, bu karıştırma süresi aşılsa bile karışımın yoğunluğunun fazla değişmediği gözlenmiştir.
- Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarındaki çimento miktarını azaltarak ve uçucu kül miktarını azaltarak daha ekonomik karışımlar elde edilebilir. Çimento miktarının azaltılmasıyla dayanımın değişmemesini sağlamak için uçucu kül miktarını arttırmak gerekecek ve böylece karışımın yoğunluğu da artacaktır.

Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımı; 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 - polistiren köpük daneleri karışımı kullanılan yerlerde yatay basınçlar, karışımın hafifliği ve katılaştıktan sonra kendini tutması sebebiyle azalacaktır. Orhaneli uçucu külü - çimento - polistiren köpük daneleri karışımının dolu malzemesi olarak kullanılması uçucu kül için yeni kullanım alanları oluşturacak ve geoteknik mühendisliğindeki birçok probleme yeni çözümler sunacaktır.

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF FLY ASH – CEMENT – EXPANDED POLYSTYRENE BEADS MIXTURE AS A LIGHTWEIGHT FILL MATERIAL

SUMMARY

Water resources of our country have enough potential for producing large amounts of electrical power. Many countries prefer to build coal fired thermal power plants instead of hydroelectric dams because of the excess coal sources. Also because their construction time is shorter and they have a lower cost.

Thermal power plants are built to produce electrical energy where they are appropriate. Fly ash is a solid waste product created by the combustion of coal. It is carried out of the boiler by flue gases and collected by electrostatic precipitators or cyclone separators and filter bags. The disposal of the large quantities of this material is a problem. Most of the industrial countries use fly ash in concrete technology as a pozzolanic additive in the production of cement, as a secondary cementitious material with cement to produce concrete and in soil stabilization. Its disposal is a big problem in Turkey like all over the world and many researchers are still studying to find new usage areas for it.

In geotechnical engineering, 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. It can be used on soft clays to reduce consolidation settlements and to solve bearing capacity problems. Natural materials like sawdust and barks or industrial materials like polystyrene also waste materials like tire chips, solid waste incinerator fly ash and coal fly ash are used as lightweight fill materials.

There are three main factors providing fly ash as an attractive material to be used in geotechnical engineering. Generally, fly ash has a lower specific compared with soils, making it advantageous when used on soft clays to reduce settlements. It has pozzolanic and cementitious properties. Its effective cohesion because of pozzolanic reactivity allows steep embankment slopes to be constructed and reduces the lateral earth pressure on retaining walls. Furthermore, the self hardening properties of fly ash provide an increasing long term stability of such fills.

In this study, Orhaneli fly ash – cement – polystyrene beads mixtures having enough strength and durability to be used as a fill material have been produced. The general properties of Orhaneli fly ash – cement – polystyrene beads mixtures are given below:

- The amount of total fly ash and cement ratio used in Orhaneli fly ash – cement – polystyrene beads mixtures is % 67, water ratio is % 31.2 and polystyrene beads ratio is % 1.8 all as percent by weight.
- The amount of total solid material used in the mixtures as percent by weight hasn't been changed, however cement and fly ash ratios by weight have been changed between each other. In the mixtures, cement ratio by weight has taken a minimum value of %13 and a maximum value of % 33.5. Orhaneli fly ash by weight has taken a minimum value of % 33.5 and a maximum value of % 54.

- The mixtures has continued to gain strenght as cement ratio by weight was increased. When cement ratio by weight was % 13 (106 kg/m^3) and Orhaneli fly ash ratio by weight was % 54 (440 kg/m^3), mixtures attained a typical 7 day unconfined compressive strenght of 500 kPa and a 28 day unconfined compressive strenght of 1700 kPa in mixture 1.
- 7 days after production, all of Orhaneli fly ash – cement – polystyrene beads mixtures have varying values of density between 8.15 and 8.50 kN/m^3 . Optimum mixing time has been determined as 30 minutes and if it is exceeded, the density of mixture will remain stable. Orhaneli fly ash – cement – polystyrene beads mixtures can be easily produced at the construction site, also they are flowable and pumpable.
- To obtain more economical mixtures, cement ratio by weight has to be decreased. However, decreasing the quantity of cement used in the mixtures will also decrease unconfined compression strenghts of mixtures. In order to prevent this, total amount of solid material in the mixture has to be increased by increasing the quantity of Orhaneli fly ash but this will increase the density of mixture.

One way of reducing soil pressures is to lighten and solidify the fill materials used and Orhaneli fly ash – cement – polystyrene beads mixture is a good example of this kind of material. It can be used to relieve horizontal soil pressures applied to retaining walls and abutments. It can be used as a fill material on slopes with high slip potential and on soft soils to decrease vertical pressures. Usage of Orhaneli fly ash – cement – polystyrene beads mixtures as lightweight fill material will form new disposal areas for fly ash and produce new solutions to many problems in geotechnical engineering.

1. GİRİŞ

Endüstriyel atıkların tekrar kullanılır 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 sanayi 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 orataya 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 kullanılabildiği gibi özelliklerine bağlı olarak çimento ve kireç karışımlarıyla da kullanılabilir. Uçucu kül, çimento ve polistiren köpük daneleri karışımı sonucunda yeterli mühendislik özelliklerine sahip hafif dolgu malzemesi üretilebilmektedir.

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 nerdeyse 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, 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 miktarda 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 olunan 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.

Hafif dolgu malzemeleriyle ilgili Japonya’da çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Kayma potansiyeli mevcut şev üzerinde dolgu yapımı, istinat yapılarına gelen itkileri azaltma, hafif dolguların sismik stabilitelerinin sağlanması ve köpük, lastik parçaları gibi hafif malzeme karışımı hafif zeminlerin çeşitli uygulamalarıyla ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Tablo 2.2’de Japonya’da kullanılan hafif dolgu malzemesi türleri verilmektedir.

Tablo 2.1 Hafif dolgu malzemeleri (Aksoy, 1998)

Dolgu Cinsi	Sıkıştırılmış Birim Hacim Ağırlığı (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

Hafif dolgu malzemeleri yumuşak zeminlerde aşağıdaki şekillerde uygulanmaktadır:

- Yumuşak Zeminde Yapılan Alçak Yol Dolgularının Kalıcı Oturmasını Azaltmada

Yumuşak zemin tabakasının çok kalın olduğu yerlerde yol dolgularını, maruz kaldıkları trafik yüküne bağlı olarak ön yükleme ile yüklemek, istenmeyen sonuçlara neden olabilir. Bu durumlarda, hafif dolgu malzemesi kullanılarak, dolgunun sadece orta şiddette yüklenip, yükün kaldırılmasıyla kalıcı oturma büyük ölçüde önlenir.

- Kazıklı Yapılarda Yanal Toprak Basıncını ve Yaklaşım Dolgularındaki Farklı Oturmaları Önlemede

Yüksek yaklaşım dolgularında, örneğin köprü ayaklarını desteklerken, yaklaşım dolguları farklı oturmalarla maruzdur. Kazıklarda da yanal toprak basıncının şiddeti önemlidir. Hafif dolgu, böylece yaklaşım dolgularının yaratabileceği sorunları engellemede ve kazıklara gelen yanal toprak basıncını azaltmada zemin iyileştirmesi maliyetini azaltarak yararlı olur.

– Konut Yakınlarında Yapım Sırasında Deformasyonu Önlemede

Yumuşak zeminde, bir yolu genişletirken veya sedde yapılırken, çalışmanın yakındaki özel ve kamu konutları üzerindeki etkisini azaltmak için çok dikkat edilmelidir. Bu durumlarda, zemin stabilizasyonu için genellikle derin karıştırma veya çelik palplanş yöntemi kullanılır. Zeminin zayıf olduğu veya yumuşak zemin tabakasının kalın olduğu yerlerde tüm yapım maliyeti ve süresi, hafif dolgu yöntemi tek başına veya geleneksel yöntemlerle beraber kullanılarak büyük ölçüde azaltılabilir.

– Yüksek Standartlı Seddeler ve Suni Adalarda Kalıcı Oturmaların Azaltılmasında

Geniş bir alanda, yüksek bir dolgu inşasının temel zemininde çok güçlü bir etkisi vardır. Gerilmenin etki bölgesi herhangi bir zemin iyileştirme tekniği kullanmak için çok derin olabilir. Hafif dolgu teknolojisi bu bakımdan yüksek standartlı sedde ve suni adalar için umut verici bir alternatiftir.

– Yapım Süresini Kısaltmada

Hafif dolgu, özellikle sınırlı yapım süresi olan yerlerdeki uygulamalarda yararlıdır. Fakat, eğer zemin çok zayıfsa, hafif dolgu yöntemiyle birlikte sürtünme kazığı gibi yüzen bir temelle kullanılması gerekebilir.

– Az Bakıma İhtiyaç Olan Bir Yapı Elde Edilmesi

Hafif dolgu yönteminin başlangıç yapım maliyeti diğerlerinden çok az yüksek olsada, gelecekte nerdeyse hiç bakıma ihtiyacı olmamasından dolayı oldukça avantajlıdır (Miki, 2002).

Hafif dolgu malzemelerinin dağlık yol dolgularında uygulanmasının avantajları şöyledir.

1. En Az Topografik Değişim

Hafif dolgu yöntemi arazideki yarmaları en aza indirerek arazi şekli üzerindeki etkiyi azaltır ve doğal çevreyi korur.

2. Heyelan Problemlerine Çözüm

Hafif dolgu zemine az bir yük uyguladığı için, heyelanın kaçınılmaz olduğu dolgulara ve geleneksel heyelan önleyici ölçümlerin kullanılmasının çok büyük yapım maliyeti getirdiği durumlarda kullanılması onu avantajlı hale getirir (Miki, 2002).

Tablo 2.2 Japonya’da kullanılan hafif dolgu malzemesi türleri (Miki, 2002)

Hafif Dolgu Malzemesi	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Açıklama
EPS blokları	0.1-0.3	Çok hafif
Köpük karışımlı hafif zemin	~7 veya fazlası	Değişken yoğunluk; zeminle benzer sıkışma ve deformasyon özellikleri; yapım sonrası çıkan fazla zeminin kullanılabilmesi
Hava köpüklü kireç veya hava köpüklü hafif stabilize zemin	~5 veya daha fazlası	Yoğunluğu ayarlanabilir; akışkan; kendi sertleşebilen ve yapım sonrası çıkan fazla zeminin kullanılabilmesi
Köpük yapıcı üretan	0.3-0.4	Çok hafif; kendinden sertleşebilen; arazide köpük oluşturabilme
Kömür külü, granüle cüruf, v.b.	~10-15	Taneli malzeme; kendi sertleşebilen
Volkanik zemin külü	12-15	Doğal malzeme
Boşluklu yapılar	~10	Oluklu borular, kutu menfez, v.b.
(Ahşap yongaları)	7-10	Genellikle yeraltı suyu seviyesi altında kullanılabilme; sızmayı önleyici ölçümler yapılmalı
(Deniz kabukları)	~11	Boyutları 12-76 mm arası; kenetlenme etkisi
(Lastik yongaları)	7-9	Genellikle yeraltı suyu seviyesi üzerinde kullanılabilme; örtü zemin tabakası en az 0.9 m olmalı
Not: Parantez içindeki malzemeler Japonya’da nadiren kullanılır.		

2.2. Polistiren Köpük

Zemin köpüğü malzemeleri iki ana grupta toplanabilir (IGS, Uluslararası Geosentetikler Cemiyeti):

1. Polimerler (Plastik)
 - Polietilen
 - Poliizosiyanürat
 - Polistiren (Bazı ülkelerde Polistrol denilir)
 - Poliüretan
 - Diğer (Polistiren/polietilen karışımı)
2. İnorganik malzemeler
 - Boşluklu cam
 - Çimentolu malzemeler (Köpüklü portland çimentosu v.b.)

Polistiren köpük bu malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanıdır (Aksoy, 2002). Polistiren, mühendislik dolgusu olarak ilk defa, 1965 yılında Norveç'te kaldırım inşaatı sırasında yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu tecrübeden polistirenin kalın kütleler halinde yol dolgusu inşaatında kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır. 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 etmektedir (Sanders ve Snowdon, 1993).

2.2.1. Polistiren Köpüğün Üretimi

Uygulamada öncelikle ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan polistiren köpük, dolgu malzemesi olarak geoteknikte geniş yer bulmuştur. Polistiren köpük, genleşmiş polistiren köpük (EPS) ve ekstrude polistiren köpük (XPS) olmak üzere iki tür imal edilmektedir. EPS köpüğün üretimi 3 kısımda oluşur: ön genişletme, ara depolama ve kalıplama. İlk aşamada strofor tanesi ısıtılır ve patlamış mısır tanesi gibi genişler. Katkı malzemesi olarak pentan kullanılır. Pentan, strofor tanelerinin orjinal hacimlerini 5 katına çıkartır. Daha sonra, ön genişletilmiş malzeme bir kalıba konur ve köpük tanelerinin birbirine kaynaşması için biraz daha genişletilir. Sonuçta

hacminin çoğu mikroskopik hücrelerinde tutulan havadan oluşan sıkıştırılmış bir köpük malzemesi ortaya çıkar. Özel imal işlemi strofor köpüğünün yoğunluğunu değiştirilebilir kılar. Çünkü malzemenin özellikleri büyük ölçüde onun yoğunluğuna bağlıdır (BASF, 1993). Ekstrude polistiren köpük ise köpüklü malzemenin kalıba dökülmesinden sonra malzemeye basınç uygulanması yoluyla elde edilmektedir. Üretim metodlarındaki 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 (Sanders ve Snowdon).

Genleşmiş polistiren köpük (EPS), dünya çapında tercih edilir. Bunun nedenlerinden biri, teknik ve ekonomik olarak geosentetik özelliklerin hepsine sahip tek zemin köpüğü malzemesi olmasıdır. Ekstrude polistiren köpük (XPS) ve diğer zemin köpüğü malzemeleri çok daha sınırlı uygulamalarda kullanılırlar. Ayrıca EPS'nin imal edilmesi kolaydır (BASF, 1993).

2.2.2. Polistiren Köpüğün Kullanım Alanları

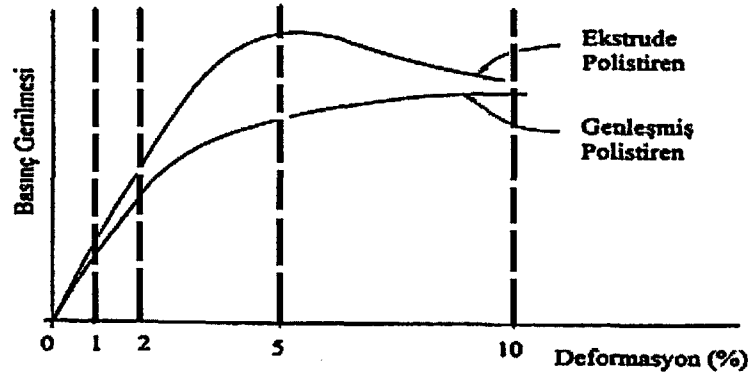
Aşağıda genleşmiş polistiren köpüğün uygulama alanları ve yaklaşık olarak ilk kullanılmaya başlandıkları tarihler verilmiştir. EPS'den sonra en yaygın olarak kullanılan XPS'nin de alternatif olarak kullanılabileceği durumlar belirtilmiştir.

- Isı yalıtımı (1960 lı yıllar) : Pratikte EPS ve XPS'nin ikisinin de kullanıldığı tek alandır. EPS ve XPS hücrelerinde tutulan büyük hacimli gaz (yaklaşık % 98), önemli ölçüde ısı yalıtımı sağlar.
- Hafif dolgu malzemesi (1970 li yıllar) : EPS yaklaşık 0.10 kN/m^3 gibi düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu normal zemin malzemelerinden %1 daha düşüktür. Bu yüzden çok hafif dolgu malzemesidir. Düşük yoğunluğuna rağmen dayanımı ve sertliği sayesinde motorlu araçları, trenleri, uçakları ve hatta hafif yüklenmiş yapıları destekleyebilir.
- Sıvı iletme / Drenaj (1970 li yıllar) : Zemin köpüğü malzemeleri geçirgen de olabilir (EPS ve XPS'yi de içeren çoğu malzeme geçirgen değildir) veya EPS ve XPS zemin köpüğü malzemeleri sıvı akışı sağlanması için boşluklar veya kanallar içerecek şekilde şekillendirilip kesilebilir.
- Titreşim sönümleme (1980 li yıllar) : EPS malzemesi küçük genlikli yer sarsıntılarını ve hatta araçlar ve trenlerin gürültülerini sönümlemede etkilidir.

- Sıkışabilme özelliği (1980 li yıllar) : Rijit dayanma yapılarında tutulan zeminde deformasyona müsaade ederek ve kayma direncini harekete geçirerek, gelecek yatay itkiyi azaltmada, maden bölgeleri gibi basınç zorlamalarına maruz elemanlara gelecek yatay itkiyi azaltmada, şişebilen veya donan zeminlerden gelebilecek hacim artışının yapıya olumsuz etkisini sıkıştırarak engellemede, temel elemanlarının altında ve yanında şişebilen zeminlerden gelecek basınçları azaltmada, boruların, menfezlerin ve küçük çaplı tünellerin üstünde veya altında düşey basınçları zeminde kemerlenme oluşturarak azaltmada kullanılır.
- Yapı elemanı (1990 lı yıllar) : Donatılı zemin duvarlarda cephe elemanı olarak ve yerinde dökme betonarme duvarlarda kalıp olarak EPS ve XPS ürünleri kullanılmaktadır (Horvath, 2002).

2.2.3. Polistiren Köpüğün Fiziksel ve Mühendislik Özellikleri

Polistiren köpüğün en büyük avantajı düşük birim hacim ağırlığa sahip olmasıdır. 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 Polistiren köpüğün basınç altında gerilme-deformasyon eğrileri (Sanders ve Snowdon, 1993)

Genleşmiş ve ekstrude polistiren köpüğün tek eksenli basınç altında gösterdikleri davranışlar birbirinden çok farklıdır (Şekil 2.1). Genleşmiş polistiren köpük % 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 köpük, genişmiş polistiren köpüğe nazaran daha geniş bir bölgede lineer elastik davranış gösterir. Deformasyon kontrollü deneylerde, % 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 yanıl deplasman yapar. Polistiren malzemelerin birim hacim ağırlığının, karakteristik basınç dayanımı gibi diğer mühendislik özelliklere doğrudan etkisi vardır. Polistiren, basınç dayanımına göre yüksek kayma dayanımı değerine sahiptir. Polistiren blokların kalıplanmış yüzeyi için genellikle sürtünme katsayısı olarak 0.5 değer, 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. 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 alışmalar göstermiştir ki, su emme değerinin, dolgunun dayanımı ve sıkışabilirliği üzerindeki etkisi çok azdır (Sanders ve Snowdon, 1993). Tablo 2.3'de, polistiren köpüğün fiziksel ve mühendislik özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.3 Polistiren köpüğün zellikleri (Aksoy, 1998)

ÖZELLİKLER	Genleşmiş Polistiren Köpük	Ekstrude Polistiren Köpük
Basınç Direnci* (N/mm ²)	0.02 – 0.10	0.14– 0.37
Basınç Direnci** (N/mm ²)	0.07 – 0.19	0.25 – 0.67
Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	0.15 – 0.30	0.28 – 0.55
Projelendirmede Kullanılması Tavsiye Edilen B.H.A. (kN/m ³)	0.10	-
Poisson Oranı (ν)	0 – 0.02	
Kayma Direnci (N/mm ²)	0.09 – 0.22	-
Bloklar Arası Sürtünme Açısı (ve 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		

Strofor köpüğünün yol yapımında şu özellikleri en önemlidir (BASF, 1993):

- Çok düşük su emmesi olan kapalı hücre yapısı
- Dona dayanıklı olması ve çürümemesi
- Biyolojik olarak zararsız (yeraltı suyuna zararlı etkisi yok)
- Uzun süreli statik ve dinamik yükleme altında iyi performans göstermesi

2.2.4 Polistiren Köpüğün Kimyasal Özellikleri

Polistiren köpük, birçok malzemeye karşı kimyasal olarak dirençlidir. Buna rağmen, polistiren köpüğün yüzeyinin tahrip olması ve uzun sürede büzölmelerin oluşması Tablo 2.4'deki malzemelerle reaksiyon oluşması sonucu meydana gelebilir.

Tablo 2.4 Polistiren köpüğün kimyasal katkılara dayanımı (BASF, 1993)

Kimyasal katkı	Organik çözücüler	Köpük	
Tuz solisyonu (deniz suyu)	Aseton, etil alkol, benzen, ksilen, boya sulandırıcı, trikloretilen	+	-
Sabun solisyonu ve ıslatıcı katkı maddeleri	Doygun alifatik hidrokarbonlar	+	-
Beyazlaştırıcılar (hipoklorit, klorlu su, hidrojen peroksit gibi)	Gazyağı, vazelin	+	+ -
İnceltmiş asitler	Dizel yağı	+	-
%36 hidroklorik asit, %50 nitrik asit	Petrol	+	-
Susuz asitler (duman çıkaran sülfirik asit, buzlu asetik asit)	Alkoller (metanol, etanol gibi)	-	+ -
Sodyum hidrosit, potasyum hidroksit, ve amonyak solisyonları	Silikon yağı	+	+
+ Dayanıklı: Köpük uzun süre maruz kalsada etkisiz kalıyor. + - Sınırlı dayanıklı: Köpük uzun süre maruz kalınca büzülebilir veya yüzeyi zarar görebilir. - Dayanıklı değil: Köpük erir veya büzölür.			

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

2.3. Hurda Taşı Lastikleri

Amerika’da yılda yaklaşık 250 milyon adet çıkan hurda otomobil lastiklerinin ortadan kaldırılmasının yasaklanması, hurda lastiklerin stoklarında büyük bir artış meydana getirdi (1990’da 1 milyar lastik fazlası). Yeniden değerlendirme ve lastiklerin tekrar kullanılmasında son 10 yılda artış gerçekleşti. 2000’de sadece 300 milyon lastik stoğu vardı. Lastiklerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanım sayısı her yıl 30 milyon lastiğe yükseldi ve hurda lastiklerin tümünün % 70’i pazarlandı. Parçalanmış hurda lastikleri tek başlarına veya iç güçlendirmeyeyle zeminin mukavemet özelliğini arttırarak zeminle yapılan karışımlarda mükemmel bir sürtünme özelliği göstermiştir. Ek olarak, lastik yongaları, düşük özgül ağırlıklarından dolayı, tek başlarına veya zeminlerle olan karışımlarda, dolgularda ve toprak yapılarında v.b. kullanımlarında mükemmel bir hafif ve güçlü dolgu malzemesi sunarlar. Zemin lastik yongası karışımlarının deney sonuçları gösterir ki birim ağırlık her %10 lastik yongasına karşılık 1.5 kN/m^3 bir oranla, lastik muhtevası içeriği arttıkça azalır.

Kamu ve çevresel uygulamalarda yeniden değerlendirilen lastik kullanımında bir çok avantaj olduğu halde, ilgiler daha çok kendiliğinden yanabilme özelliği gösteren potansiyeli ve çevresel uygunluğu üzerinde arttı. 1995’de kendi ısınan ve yanan parçalanmış lastiklerle üç dolgu inşaa edildi. Bunlar, 7.9-15 m kalınlığında lastik yongaları içeriyordu. Belirlendi ki lastik tabakasının kalınlığının azaltılması bu problemi azaltıyor, daha ince tabakalarda hafif bir artıştan sonra sıcaklıklar azalıyordu. Bir lastik parçası tabakası kalınlığının 3 m ile sınırlı olması ve lastik parçalarından oluşan dolguların içine su ve hava akışının sınırlandırılması tavsiye edildi. Böylece, bu önlemleri alarak lastik yongalarını, bir hafif dolgu malzemesi olarak ve

kendinden yanma özelliğinden korkmadan zeminlerle karıştırılarak tek başına kullanmak mümkündür.

Lastiklerin, onlarla etkileşebilecek yeraltı suyunun kalitesi üzerindeki etkisi lastik yongalarının önemli bir kirliliğe yol açmadığını gösteren birçok araştırmayla değerlendirildi. Daha fazlası, Park ve diğ., lastik yongaları ve hurda lastik yongaları üzerinde uygulanan enjeksiyon su tutma deneylerine dayalı olarak, yüksek uçucu organik kimyasalları tutma kapasitesine sahip olduğunu buldu. Bu diğer yenilikçi uygulama olan, kirlenmiş sudan kimyasalları ortadan kaldırmak için parçalanmış lastik kullanımını önerir. Bu yüzden kirlenmiş bir çevrede lastik yongaları su tutucu olarak yararlı bir fonksiyona sahiptir.

Zemin-lastik yongası karışımları katıksız saf lastik yongalarından daha ağır olsa da diğer topraktan yapılmış malzemelerden önemli miktarda daha hafif olduğundan mekanik ve çevresel birçok avantajı en iyi şekilde kullanır (Edil, 2002).

2.3.1. Kayma Dayanımı

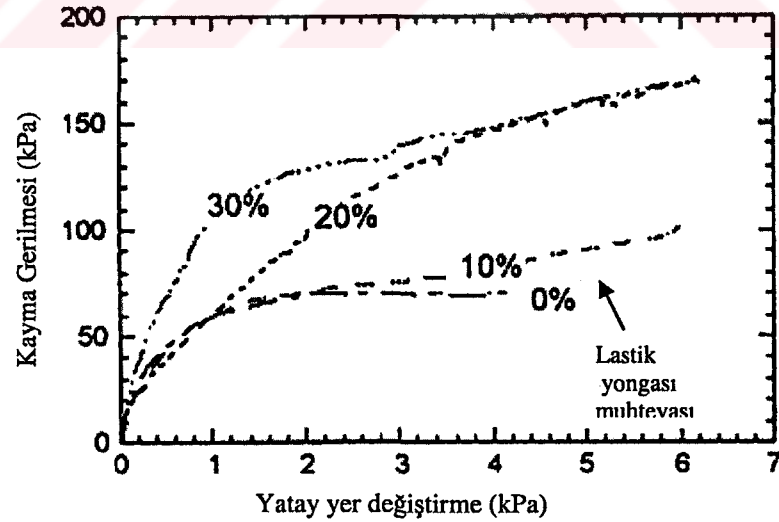
Lastik yongaları düzensiz şekilli, levhaya benzer parçalardır. Yapılarda kullanılan genel lastik yongası 50-100 mm uzunluğundadır ve hatta büyük lastik parçaları bile kullanılabilir. Lastik yongalarının istenen özelliklerinden biri hafifliğidir. Lastik yongalarının özgül gravitesi sudan biraz daha fazladır ve metal içeriğine bağlı olarak 1.08-1.36 arasında değişir. Lastik yongaları ortalama 1.15 özgül graviteye sahip metallerden yoksundurlar, bununla beraber, bir çok durumda lastik yongalarının özgül gravitesi 1.20'dir.

Katıksız lastik yongaları, büyük ölçüde basit kesme deneyine bağlı olarak, 20-35° arasında değişen sürtünme açılarına ve 3-11.5 kPa kohezyona sahiptir. Ufak lastik yongalarıyla yapılan (uzunluğu < 40 mm olan) üç eksenli basınç deneyleri gösterir ki sürtünme açısı 40°'den fazla olabilir ve kohezyon ihmal edilebilir. Arazi gözlemleri de katıksız lastik yongaları ve kum lastik yongası karışımları için yüksek sürtünme açılarını destekler.

Lastik yongalarını kuma ekleyerek, 65° gibi büyük bir sürtünme açısıyla, ağırlıkça % 21, hacimce % 30 lastik yongaları içeren sıkı kum karışımları elde edilir. Bununla beraber Foote ve diğ. lastik yongası içeriği % 30'u geçince dayanım azaldığını bulmuştur. Çünkü lastik yongası-kum karışımı güçlendirilmiş zemin gibi değil, kum

içeren bir lastik yongası kütlesi gibi davranır. Aynı zamanda donatı içeriği, zeminin birim ağırlığı ve çevre basıncı, zemin-lastik yongaları karışımının kayma dayanımını etkileyen önemli faktörlerdir. Sıkı kumla hazırlanan kum lastik yongası karışımı doğrusal olmayan kırılma zarflarına sahiptir. Aksine, gevşek kumlarla yapılan karışımlar doğrusal kırılma zarflarına sahiptir.

Diğer bir çalışmada, Tatlısöz ve diğ. atık lastik yongalarının kayma dayanımını, şekil değiştirebilme, sıkışabilirliği ve ince ve kaba taneli zeminlerle karışımlarını araştırdı. Çalışmada büyük ölçekli laboratuvar deney teçhizatları kullanıldı. Tipik arka dolgu zeminleriyle yapılan karışımlar; temiz kum, kumlu silt, ve kil gibi deneye tabi tutuldu. Deney sonuçları gösterdi ki lastik yongaları ve zemin lastik yongası karışımları zeminler gibi fakat daha fazla sıkışabilir davranış gösteriyor ve nihai kayma dayanımlarına ulaşmak için daha fazla deformasyon gerekiyor. Lastik yongalarını arka dolguda kullanma, birim ağırlıkta azalmaya, kum veya kumlu silt içeren karışımlarda kayma dayanımında artışa neden oluyor. Aksine, kil lastik yongası karışımları kilin tek başına olmasından daha az veya aynı kayma dayanımına sahiptir. Kum lastik yongası karışımları için dayanım zarfları, kumlu silt lastik yongası karışımlarında kayma dayanımı zarfının doğrusal olması ve kohezyon içermesi dışında doğrusal olmayabilir ve hemen hemen hiç kohezyon olmayabilir.

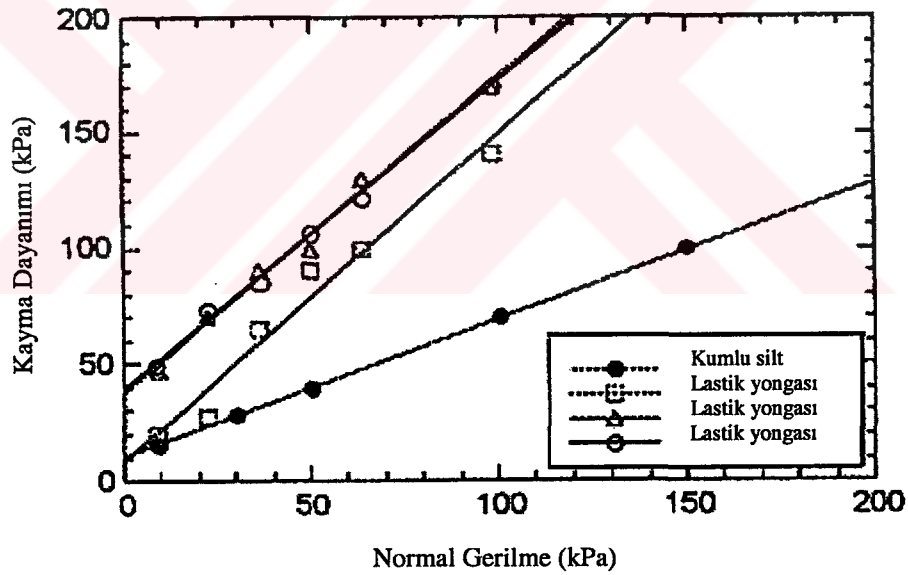


Şekil 2.2 Kumlu silt ve kumlu silt-lastik yongası karışımları için kayma dayanımı ve yatay yer değiştirme (Edil, 2002)

Kumlu silt ve kumlu silt-lastik yongası karışımları için kayma dayanımı ve yatay yer değiştirme arasındaki ilişki Şekil 2.2’de gösterildiği gibi farklıdır. Sadece kumlu silt

için, kayma gerilmesi başlangıçta artar ve sonra 0.5-1.0 cm gibi bir yatay yer değiştirmede kalır. Aksine, kumlu silt lastik yongaları karışımları için kayma gerilmesi yatay yerdeğiştirmeye artar, belirgin bir tepe noktası oluşmaz. Böylece kumlu silt lastik yongası karışımları için kayma dayanımı, belirli bir yerdeğiştirmede, örneğin 6 cm gibi, ulaşılan kayma gerilmeleridir. Böylece silt-lastik yongası karışımlarının nihai dayanımlarına ulaşmak için daha fazla yerdeğiştirme gereklidir. Benzer şeyler kum lastik yongası karışımları içinde söylenebilir.

Kumlu silt lastik yongası üzerinde yapılan kesme kutusu deneyi sonuçları Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Kumlu silt lastik yongası karışımları, kumlu siltin tek başına kullanılmasından daha fazla dayanıma sahiptir. Daha fazlası hacimce % 20 lastik yongası içeren karışımlar, hacimce % 10 lastik yongası içeren karışımlardan daha fazla dayanıma sahiptir. Burada hacimce % 20 ve % 30 lastik yongası içeren karışımlar için dayanım zarflarının aynı olmasından dolayı azalan bir dönüş noktası görülüyor.



Şekil 2.3 Kumlu silt - lastik yongası karışımlarına ait kayma dayanımı zarfları (Edil, 2002)

Foose ve diğ. zemin lastik yongası karışımları üzerinde yaptıkları deneylerde kayma dayanımında benzer artışlar buldular. Fakat dayanımdaki artışa öncelikle başlangıç sürtünme açısındaki artış sebep olur (Tablo 2.5). Lastik yongası muhtevasını arttırmak, başlangıç sürtünme açısını, sıkı kumlar ve lastik yongası muhtevası % 30 olanlar için 65° gibi yüksek bir değere arttırdı. Kumlu silt için sonuçlar (Tablo 2.5,

Şekil 2.3) gösterir ki kumlu silt-lastik yongası karışımlarının sürtünme açısı aslında lastik yongası muhtevasından bağımsızdır ($\sim 54^\circ$). Lastik yongası muhtevasını %10'un ötesinde arttırarak sağlanan kumlu silt-lastik yongası karışımlarının dayanımındaki artışlar sürtünme açısına değil, kohezondaki artışlara bağlıdır. Lastik yongaları ekleyerek ulaşılan kayma dayanımındaki artış, E_r , kayma verimliliği şöyle tanımlanır: τ_{st} (Zemin-lastik yongası karışımının kayma dayanımı, kPa)'ın, τ_s (Zeminin kayma dayanımı, kPa)'a oranıdır.

Lastik yongaları karıştırılmış kum ve kumlu silt karışımları için kayma verimliliğinin normal gerilme ile değişimi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

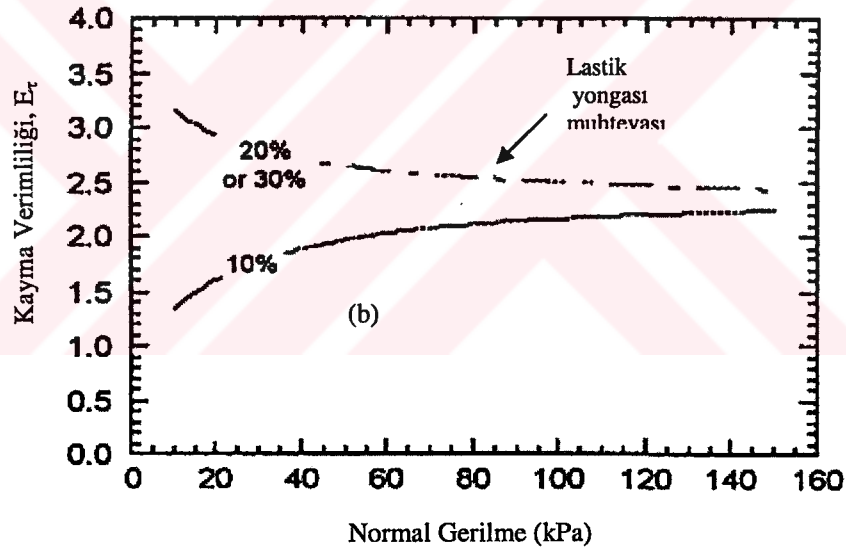
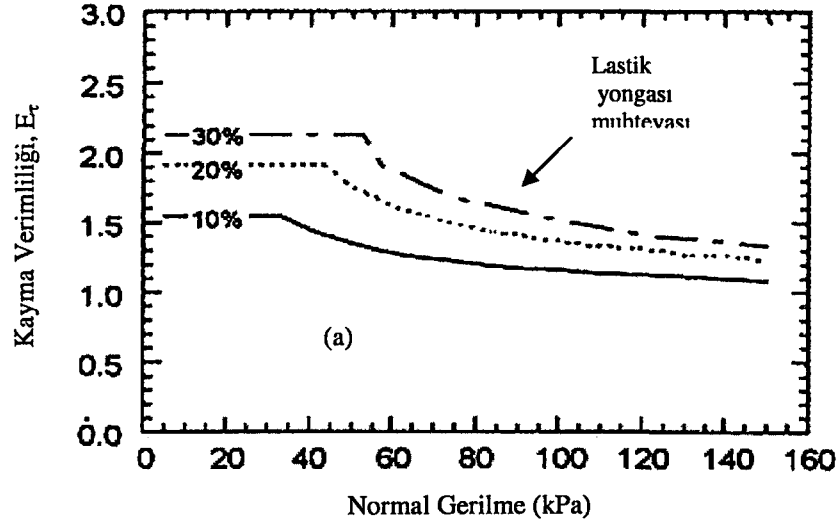
Kum lastik yongası karışımları için kayma verimliliği oranı, 1.1-2.2 arasında değişir (Şekil 2.4 (a)). Verilen lastik yongası muhtevası için, kayma verimliliği kayma dayanımı zarfının eğimindeki değişime tekabül eden "kritik çevre basıncı"na ulaşılan kadar sabittir. Normal gerilme daha fazla arttığında verimlilik azalır ve asimptotik olarak tüm lastik yongası muhtevaları için 1.0'e ulaşır. Verimlilik, kum ve kum-lastik yongaları karışımları için dayanım zarflarının daha yüksek çevre basınçlarında paralel olmalarından dolayı asimptotik olarak 1.0'e ulaşır. Böylece lastik yongalarıyla güçlendirilen kum, çevre basıncının düşük olduğu uygulamalarda daha yararlıdır.

Tablo 2.5 Lastik yongaları, kum, kumlu silt ve karışımlarının kayma dayanımı parametreleri (Edil, 2002)

Malzeme	Lastik Yongası Muhtevası (%)	Birim Ağırlık (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ (Derece)
Lastik yongası	100	5.9	~ 0	30
Kum	0	16.8	2	34
Kum-lastik yongası	10	15.6	2	46
Kum-lastik yongası	20	14.5	2	50
Kum-lastik yongası	30	13.3	2	52
Kumlu silt	0	18.3	11	30
Kumlu silt-lastik yongası	10	17.6	8	55
Kumlu silt-lastik yongası	20	17.0	38	54
Kumlu silt-lastik yongası	30	16.3	39	53

Kumlu silt lastik yongası karışımları için kayma verimliliği oranı, 1.3-3.2 arasında değişir (Şekil 2.4 (b)). % 10 lastik yongası içeren karışımlar için kayma verimliliği oranı artan çevre basıncıyla yavaş yavaş artar ve asimptotik olarak 2.3'e ulaşır. % 20 ve % 30 lastik yongası içeren karışımlar için kayma verimliliği oranı asimptotik

olarak 2.4'e kadar azalır. Düşük gerilmelerdeki verimliliğin farklı olması, karışımların farklı kohezyona sahip olmasındandır (Edil, 2002).



Şekil 2.4 (a) Kum - lastik yongası ve (b) kumlu silt - lastik yongası karışımları için kayma verimliliği (Edil, 2002)

2.3.2 Parçalanmış Lastiğin Fiziksel Özellikleri

Lastik yongalarının fiziksel ve mühendislik özelliklerini belirlemek için gerekli malzeme, çelik ve polyester kuşaklı taşıt lastiklerinin karışımından elde edilmiştir. Parçalama işleminin sonunda maksimum boyutu 5 cm olan yongalar üretilmiştir. Çelik kuşağın büyük parçaları bir mıknatıs yardımıyla uzaklaştırılmıştır. 5 ayrı numune üzerinde yapılan dane dağılımı deneylerinde dane dağılımı eğrilerinin dar bir alana sığıldığı görülmüştür. Elde edilen değerlere göre, numunenin sadece % 10'u,

12.7 mm çapından küçüktür ve numunenin % 50'si, 25.4 mm - 38.1 mm çapları arasında değişen dane boyutuna sahiptir. Başka bir üretim sistemiyle elde edilen lastik yongaları, daha değişik dane çapı dağılımına sahip olacaktır.

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

2.3.3. Parçalanmış Lastiğin Mekanik zellikleri

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 lk 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 2.6'da verilmiştir. Başlangıçtaki deneyler, havada kurumuş numuneler üzerinde yapılmıştır. Sonuçta elde edilen kuru birim hacim ağırlığa, sıkıştırma enerjisinin etkisinin küçük olduğu ortadadır. Aynı numuneden alınan lastik yongaları üzerinde yapılan Modifiye Proktor, Standart Proktor ve % 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 deneyler yapılmıştır. Elde edilen kuru

birim hacim ağırlıklar 6.1 ve 6.4 kN/m³'tür. Numune farklılığının kuru birim hacim ağırlık üzerindeki etkisi, sıkıştırma enerjisine göre çok fazladır.

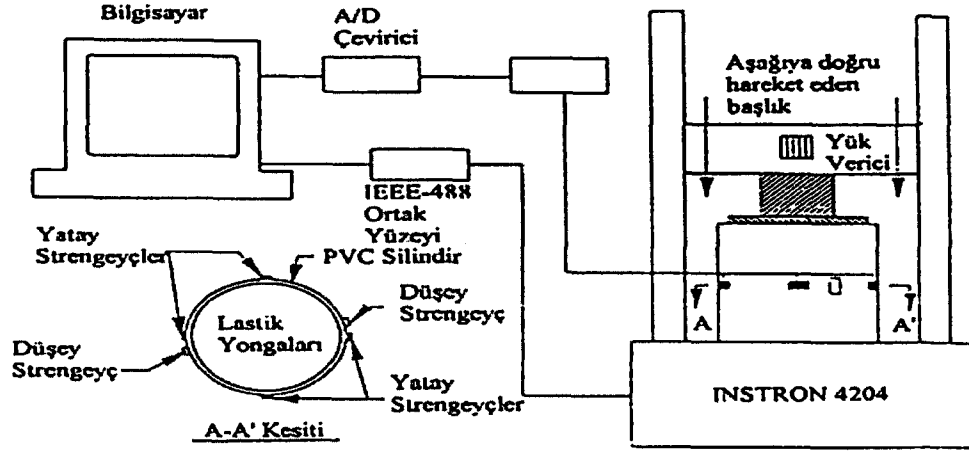
Tablo 2.6 Sıkıştırma enerjisi, tabaka başına vuruş sayısı ve sıkıştırılmış kuru birim hacim ağırlık (Humphrey ve Manion, 1992)

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

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 uygulamıştır. Islak sıkıştırılmış numuneler, havada kuruyanlara oranla 0.64 kN/m³ fazla kuru birim hacim ağırlığa sahiptirler (Humphrey ve Manion, 1992).

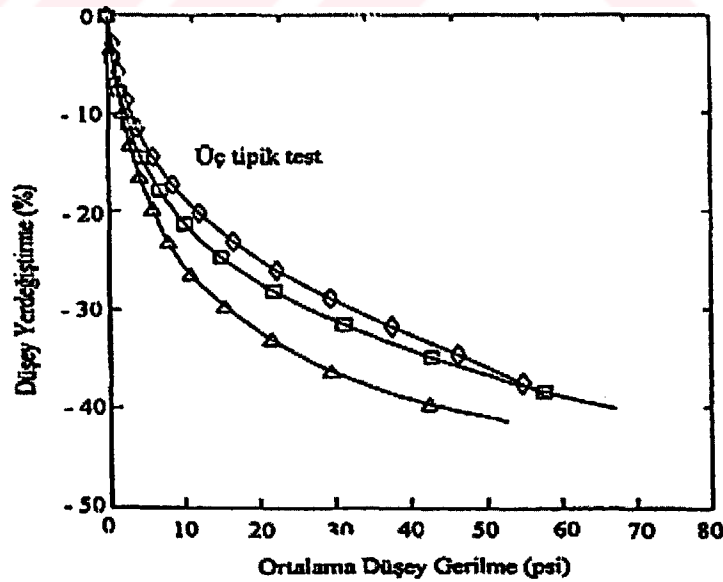
Sıkışabilirlik Testleri ve Sonuçları

Sıkıştırılmış lastik yongalarının sıkışabilirliğini belirlemek, Young Modülü ve Poisson oranı gibi yol kaplamasının şekil değiştirmesini belirlemek, gerekli sayısal analiz yöntemlerinde kullanılan elastik parametreleri elde etmek için sıkışabilirlik testleri düzenlenmiştir (Şekil 2.5). Numune hazırlamak için; silindir şeklindeki boş bir kalıp, çelik tabana kenetlenmiş ve daha sonra silindir 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.

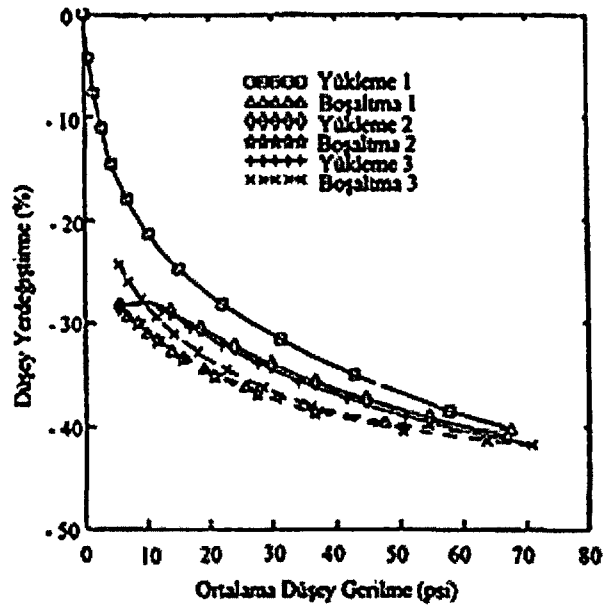


Şekil 2.5 Tek boyutlu sıkışabilmeyi ölçmek için kullanılan sistem (Humprey ve Manion, 1992)

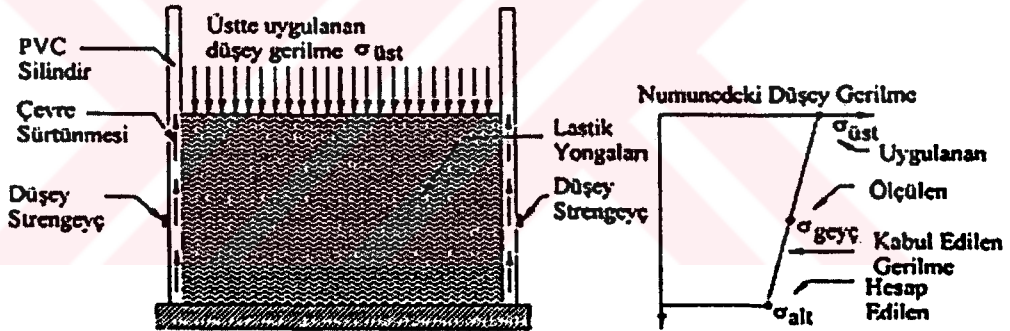
Üç ayrı numuneden oluşan sıkıştırılmış lastik yongaları üzerinde yapılan sıkışabilme deneyi sonuçları Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Buradan görülmektedir ki; sadece 68.9 kPa'lık düsey gerilme, % 20-25 oranında düsey şekil değiştirmeye neden olmaktadır. Gerilmeyi, 68.9 kPa'dan 413 kPa'a çıkarmak % 15-20'lik ek düsey şekil değiştirmeye sebep olmaktadır. Lastik yongaları, düşük gerilme seviyelerinde çok sıkışmakta fakat gerilme seviyesi arttıkça sıkışabilirlik dikkate değer ölçüde azalmaktadır.



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



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



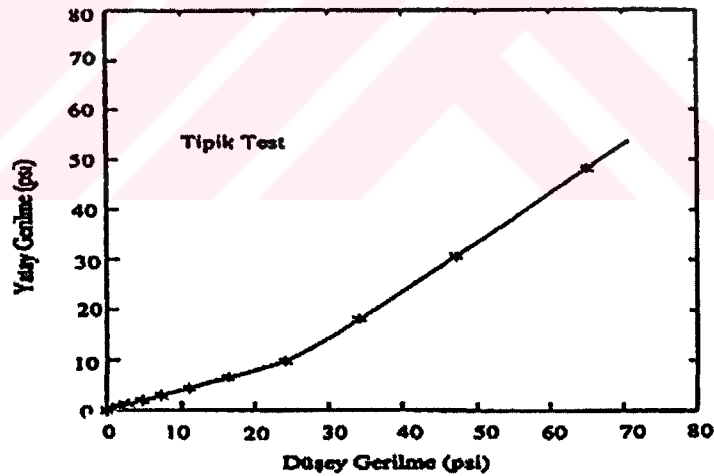
Şekil 2.8 Sıkışma anında numunede meydana gelen düşey gerilmeye çevre sürtünmesinin etkisi (Humphrey ve Manion, 1992)

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 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.

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 bölünmesiyle elde edilir. Düşey strengelylerin bulunduğu seviyede, kalıp tarafından taşınan yük bilinmektedir. Numune tarafından karşılanan düşey gerilme ($\sigma_{ölçüm}$); kalıp tarafından taşınan yük, uygulanan toplam düşey yükten çıkarıldığında geriye kalan net yükün numune alanına bölünmesiyle elde edilir. Bu seviyede, toplam uygulanan yükün % 10-40 oranlardaki kısmı, kalıp tarafından karşılanmaktadır. Numune yüksekliği boyunca oluşan ortalama düşey gerilmeyi belirlemek için, numunenin yukarısından aşağıya doğru gerilmenin lineer olarak azaldığı kabul edilmiştir. Şekil 2.8'den görülebileceği gibi, numunenin üst kısmındaki ve strengelylerin seviyesindeki gerçek gerilme değerleri bilinmektedir. Ortalama düşey gerilme; kalıbın üstündeki ve tabanındaki düşey gerilmenin ortalamasıdır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de ortalama düşey gerilme değerleri kullanılmıştır.

Sıkışabilme deneyleri sırasında yatay gerilme ölçülmüştür ve Şekil 2.9'da tipik bir deney için yatay gerilme-düşey gerilme grafiği gösterilmiştir. Düşey gerilme değeri, yatay strengelylerin 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)

Kayma Dayanımı ve Geçirimlilik

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).

2.3.4. Parçalanmış Lastiğin Kimyasal ve Diğer Özellikleri

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.

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. Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürle çalışan termik santrallerde pulverize edilen kömürün yanma ürünü olup baca gazları ile taşınan, mekanik ve elektrostatik filtrelerde tutulan silt boyutunda bir malzemedir. Daha iri boyutta olan ve kazan dibinde toplanan kül ise taban külü olarak isimlendirilir. Termik santrallerde üretilen külün yaklaşık %75-85'i uçucu kül olarak elde edilmektedir (Aksoy, 1992).

Ülkemizde elektrik enerjisi hidrolik ve fosil kaynaklar; kömür, doğalgaz ve akaryakıtı dayalı olarak üretilmektedir. Kömüre dayalı enerji üretimi birinci sırayı almaktadır. Üretimin yan ürünü olarak çıkan uçucu kül miktarı yılda 15 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Ülkenin çimento üretiminin 25 milyon ton civarında olduğu gözönüne alındığında, uçucu külün depolanması, saklanması veya atılmasının çevreye ve kamuya verdiği zararların önemi ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık uçucu küller, kimyasal ve fiziksel özelliklerinin verdiği imkanlar nedeniyle çeşitli dünya ülkelerinde sanayide, teknikte ve inşaat endüstrisinde kullanım alanı bulmaktadır. Uçucu küllerin bu şekilde kullanımı, çevreye verilen zararın azaltılması ve endüstride daha ekonomik uygulamalara ulaşılması imkanını verecektir. Uçucu küllerin Türkiye'de tüketimi ise üretimin % 1'inden daha az bir seviyededir (Tan ve İyisan, 1996).

2.4.1. Uçucu Külün Sınıflandırılması

Değişik kaynaklardan elde edilen kömürlerin ve kömür kazanlarının farklı olması sebebiyle bütün küller aynı yapıda değildir. ASTM C618'de F sınıfı ve C sınıfı olmak üzere iki çeşit uçucu kül tanımlanmıştır.

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 uygunsa 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 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.

2.4.2. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu kül heterojen bir malzemedir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerini aşağıdaki faktörler etkilemektedir (Aksoy, 1992):

- Kömür cinsi ve saflığı
- Ögütülme inceliği
- Kazan cinsi ve işletme şekli
- Toplama ve depolama metodları

Uçucu küller genel olarak gri renkte olmalarına karşın, içlerinde yanmamış karbon miktarının fazla olması durumunda, daha koyu renkte olabilirler. Tipik olarak küresel

şekilde olan uçucu kül parçacıklarının çapları 1-150 μm arasında değişim göstermekle beraber % 75'den fazlasının çapı 45 μm 'den daha küçüktür. Bu küresel parçacıkların içleri dolu veya boş olabilmektedir. Uçucu küllerin yoğunlukları 19.5-27.0 kN/m^3 mertebesindedir. Uçucu küller, doğal zeminle karşılaştırıldığında daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip, silt boyutunda oldukça üniform malzemelerdir. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu incelendiğinde, % 85 veya daha fazlasının SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve MgO bileşenlerinden oluştuğu görülmektedir. Kullanılan kömüre bağlı olarak bazı tiplerinde yüksek miktarda CaO bulunabilmektedir (Çakır, 1999).

2.4.3. Uçucu Külün Mühendislik Özellikleri

Kompaksiyon

Uçucu külün su muhtevasına göre kuru birim hacim ağırlığının değişmesi aynı dane çapı aralığına sahip iyi derecenmiş tabii zeminlere göre daha az olmaktadır. Uçucu külün bu özelliği yüksek hava boşluğu oranıyla açıklanmaktadır. Zeminlerde maksimum kuru birim hacim ağırlıkta % 1 - % 5 arasında olan hava boşluk oranı uçucu külde % 5 - % 15 olmaktadır. Yüksek hava boşluk oranı uçucu külün sıkıştırılması sırasında oluşacak boşluk suyu basıncını sınırlamakta böylece uçucu kül geniş bir su muhtevası aralığında sıkışabilmektedir.

Bazı Kanada ve Amerikan uçucu küllerinin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Tablo 2.7 ve Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.7 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 Ağırlığı (kN/m^3)	13.50	13.12	12.80	12.37	15.26	14.84

Tablo 2.8 Amerikan 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 Ağırlığı (kN/m ³)	18.25	15.40	15.01

Kayma Mukavemeti

Uçucu kül kuru halde toplanmışsa tamamen kohezyonsuz ve plastik olmayan bir malzemedir. Kendi kendine katılaşma özelliği olmayan uçucu kül aşınmaya kolaylıkla maruz kalabilir.

Suya doymun olmayan nemli uçucu külde boşluk suyunun oluşturduğu yüzey gerilimi görünür bir kohezyon vermektedir. Ortaya çıkan bu görünür kohezyon uçucu külün suya doymun hale gelmesi ile tamamen kaybolduğundan tasarımda göz önüne alınmamalıdır.

Kendi kendine sertleşme özelliğine sahip sıkıştırılmış uçucu küllerde zamanla artan orta veya yüksek kayma mukavemeti oluşmaktadır.

Sıkıştırılmış uçucu kül dolgularından alınan numunelerde yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deneylerde ölçülen kayma mukavemeti tipik değeri 30° olarak verilebilir. Ancak en düşük 20° ve en fazla 40°'lik değerler ölçülmüştür.

Sıkışabilme

Uçucu külün sıkışabilme özelliği laboratuvarında ödometre deneyi ile saptanabilir.

Sıkıştırılmış dolguların hafif ve orta şiddetteki yükler altında oturmalarının tahmininde, sıkışma indisi $C_c = 0.05 - 0.37$ ve tekrar sıkışma indisi $C_r = 0.006 - 0.04$ aralıklarında değerler almaktadır. Bu değerler kompaksiyonun, uçucu kül dolguların sıkışma özelliğini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Permeabilite

Sıkıştırılmış uçucu külün hava boşluk oranı maksimum kuru birim hacim ağırlıkta %5 - %15 arasında değerler almaktadır. Permeabilite katsayısı ise 10^{-4} ile 10^{-7} cm/s arasındadır.

Uçucu kül silt boyutunda bir malzeme olup, kapiler su yükselmesi 2.0 m veya daha fazla olabilmektedir. Uçucu külün dondan etkilenen bir malzeme olması nedeniyle soğuk bölgelerde yol inşaatlarında dikkatle ve gerekli tedbirler alınarak kullanılmalıdır.

Şişme

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

3. KONU ÜZERİNDE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1. Polistiren Köpük Kullanarak Yapılmış Çalışmalar

3.1.1. Köpük Karıştırılmış Hafif Zemin ile Uygulamalar

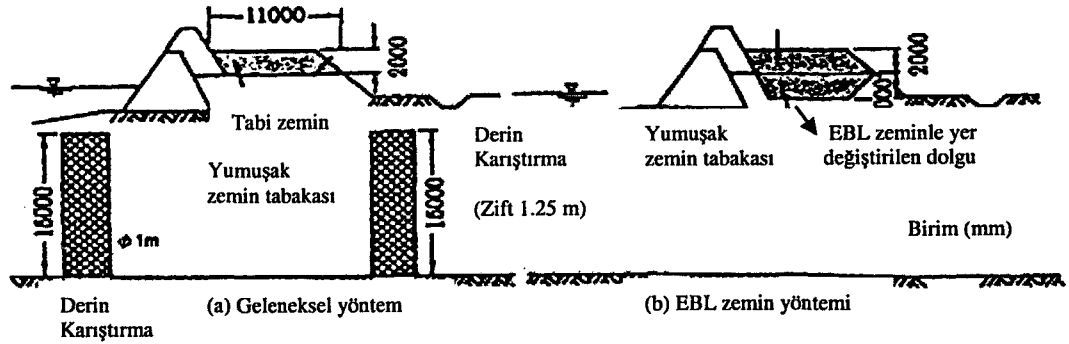
Ağırlığı azaltmak için, çok hafif köpükleri (polistrol, polipropilen gibi) zeminle karıştırarak hafif zemin hazırlanır. Daha yüksek dayanım gerektiği zaman, çimento gibi stabilize edici malzemeler kullanılır. Bu zeminin en büyük özellikleri, hafif ağırlıkta olması, ayarlanabilir dayanımı, su geçirmez ve defomasyona izin verebilir olmasıdır. Bu nedenlerle yumuşak zemin üzerinde yapılmış nehir setlerine uygulanabilir.

Köpük karıştırılmış hafif zemin ("EBL" zemin) doğal zeminle çok hafif köpük tanelerinin karıştırılmasıyla oluşmuş özel bir zemin türüdür. Bu yüzden bu özel zemin doğal zeminden daha hafiftir (ıslak yoğunluğu 8.0 ile 13 kN/m³ arasında değişebilir). Zemine uygulanan yükü azaltabilir, hava köpüğü karışımı stabilize zemin gibi EBL zemin, nerdeyse doğal zemine eşit şekilde, defomasyona esnek cevap verir ve bu yüzden zemin çökmesiyle başa çıkabilir. Bir iyileştiricinin eklenmesiyle EBL zeminin dayanımını ayarlamak mümkündür. Geçirimlilik nerdeyse orjinal zeminle aynıdır ve kompaksiyon doğal zemindeki gibi yapılabilir (Miki, 2002).

3.1.1.1. Yumuşak Zeminde Mevcut bir Dolguyu Yükseltmek için Uygulama

EBL zemini; doğal zemin, yumuşak zeminin beklenen kaymasına karşı yeterli güvenliği sağlayamadığından, kalın kil tabakaları içeren zemin üzerindeki kıyasal bir koruma seddesinin arkasındaki mevcut bir dolgu seviyesini yükseltmek için doğal zemin yerine kullanmıştır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi 15 m kalın tabaka içeren yumuşak zemin üzerinde mevcut bir dolgu seviyesini (11 m genişliğinde ve 2 m yüksekliğinde) 2 m daha yükseltmek için dolguda EBL zemini kullanımı doğal

zeminle kıyaslanmıştır. Sonuçlar EBL zeminin yapım maliyeti bakımından doğal zeminden çok daha ucuz olduğunu göstermiştir.

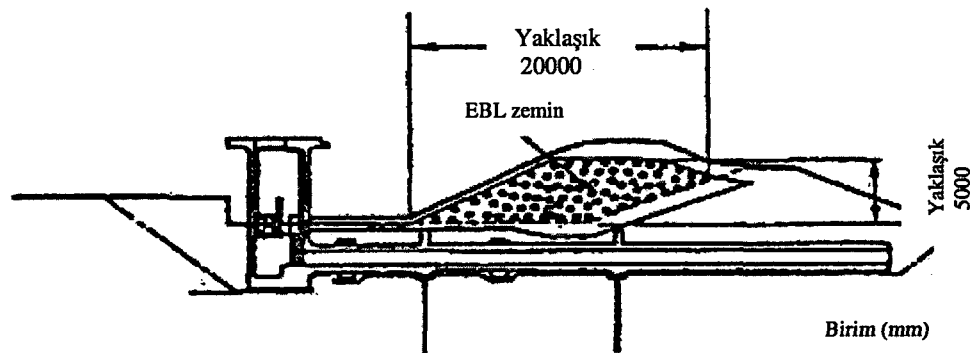


Şekil 3.1 Yumuşak zeminde kıyasal seddeyi yükseltmek için uygulama (Miki, 2002)

Köpük karıştırılmış hafif zemin, yumuşak bir zeminde mevcut bir dolguyu yükseltmede avantajlıdır, yapı ve çevreleyen dolgu arasındaki farklı oturmayı azaltır. İstinat duvarına gelen yatay basıncını azaltır (Miki, 2002).

3.1.1.2. Yeraltı Yapılarındaki Toprak Basıncını Azaltmak için Ölçümler

Taşma için nehir dolgusuna sokulan borular anlamında olan savak yolları, çevreleyen dolguyla birlikte çalışmalıdır. Aksi takdirde, sel sırasında dolgunun güvenliği tehlikeye girer. Şekil 3.2 dolgu genişliğini arttırmak için EBL zemin kullanılan bir durumu göstermektedir.



Şekil 3.2 Savak yolu civarında dolgu uygulaması (Miki, 2002)

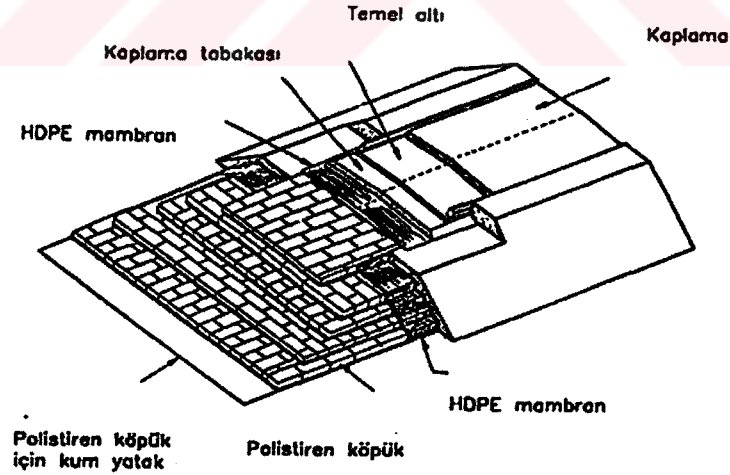
Dolgu, içinden geçecek şekilde yapılmış bir savak yoluna sahip ve kazıklı temel üzerinde durmaktadır. EBL zemini, farklı oturmaları kontrol etmek için

kullanılmıştır. Savak yolları gibi yapıların etrafındaki dolgu planlamasında en önemli şey, farklı oturumların önlenmesidir. Eğer gerekli zemin iyileştirmesi pahalıysa EBL zemini kullanımı etkili bir seçenektir.

Diğer bir örnek, düşük bir yolda mevcut istinat duvarının arkasında bir dolgu inşasıdır. Dolgu yapımı için, geleneksel yaklaşımla istinat duvarı stabilitesinin incelenmesi gereklidir. Bununla birlikte, alternatif bir yaklaşımla istinat duvarının arkasındaki zeminin kazılması ve arka dolgunun, kazılan zemine köpük karıştırılmasıyla oluşturulması sağlanmıştır. Atık zemin maliyeti, kazılan zeminin başka bir yere taşınmasına gerek bırakılmayarak azaltılmıştır (Miki, 2002).

3.1.2. Polistiren Köpük ile Yol Dolgusu Teşkil

Şekil 3.3’de gösterildiği gibi polistiren köpük bloklarla yol dolgusu teşkilinde, önce zemin üzerinde bir kum yatak hazırlanır ve ilk sıra bloklar döşenir. Her tabakada, polistiren bloklar aşağıdaki tabakanın derzlerini örtecek tarzda ve birbirine dik yönde yerleştirilir. Tabakalar yanlarda kademeli yapılır. 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.

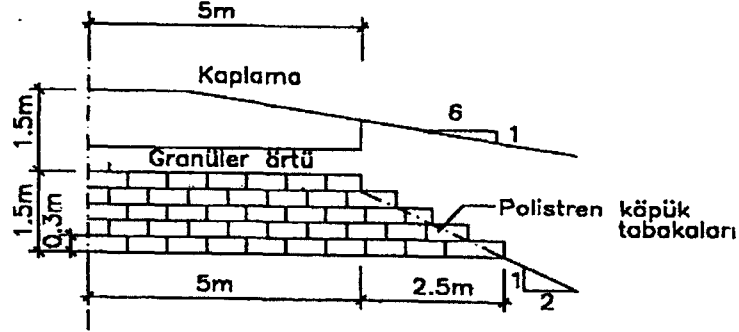


Şekil 3.3 Polistiren köpüğün yol dolgusunda kullanılması (Aksoy, 1998)

Polistiren dolgu bitiminden sonra, polistiren köpüğe zarar verecek petrol ve diğer kimyasallardan koruyucu yüksek yoğunlukta polietilen membran serilmelidir.

Mambran ile polistiren köpük tabakası arasına en az 5 cm kalınlığında kum yatak konulması tavsiye edilir.

Dolguda kullanılan genleşmiş polistiren köpüğün CBR değerlerinin % 2'den küçük olması nedeniyle otoyollarda polistiren köpük dolgu ile bitmiş yol yüzeyi arasında üzerinde en az 1.0 m kalınlığında temel altı dolgusunun yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu değer daha hafif trafik olan yollarda azaltılabilecektir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Polistiren köpük tabakalarının yol dolgusunda kullanılması (Aksoy, 1998)

Norveç ve Fransız şartnameleri kaplama altında trafik yüklerinin polistiren dolguya aktarımına yardımcı olması için 10 cm veya 15 cm kalınlığında hafif teçhizatlı betonarme bir plağın yapılmasını öngörmektedir.

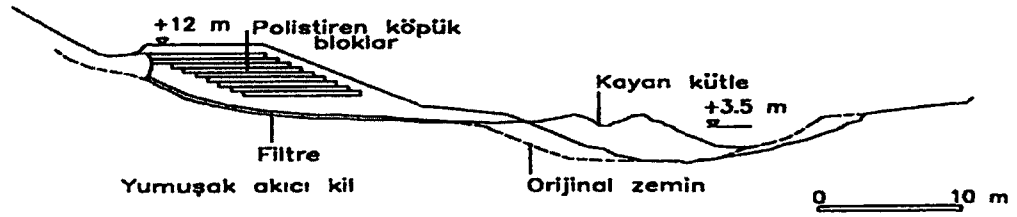
Uygulamada polistiren köpük bloklar yatay veya sabit eğimle döşenebilir, ancak karmaşık formlardan kaçınılması tavsiye edilmektedir. Polistiren köpük bloklar sıcak telle veya testere ile kolaylıkla kesilip boyutları ayarlanabilir. Hafif dolgu olduğundan kolayca taşınabilir ve işçiliği kolaydır (Aksoy, 1998).

3.1.3. Uygulamadan Örnekler

3.1.3.1. Akıcı Kil Üzerindeki Yol Dalgusunun Tekrar İnşası

1982 yılında kuzey Norveç'te Alta'da yumuşak akıcı kil şev üzerinde yer alan otoyolun 40 m uzunluğundaki bir kısmı yakınındaki nehre doğru kaymıştır. Kaymayı neyin tetiklediği belirlenememiştir (Şekil 3.5). Bununla birlikte sezonun yağmurlu olduğu, drenaj sisteminin tam vazife görmediği ve daha öncede nehir yamaçlarında kaymaların olduğu bilinmektedir. Yol güzergahının değiştirilmesinin zor olduğu, hatta diğer kesimlerde de stabilite durumunun problemli olması nedeniyle dolgunun

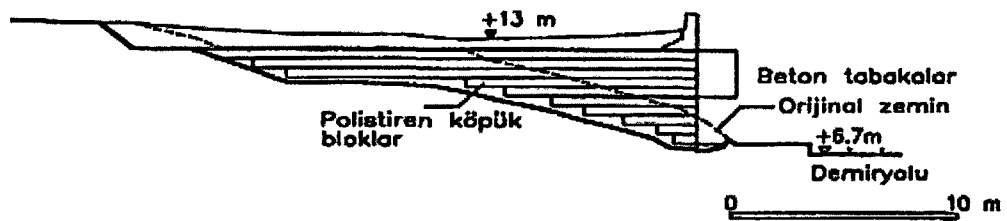
aynı yerde polistiren köpük bloklarla teşkiline karar verilmiş ve neticede başarılı bir stabil durum elde edilmiştir (Aksoy, 1998).



Şekil 3.5 Kayan yol dolgusunun polistiren köpükle tekrar teşkili (Aksoy, 1998)

3.1.3.2. Otoyol Rampası İnşası

Oslo otoyoluna giriş ve çıkış rampası yüksek bir istinat duvarı ile arkasında önemli miktarda dolgu yapılmasını gerektirmiştir. Anakaya derinliği 10 m ile 25 m arasındadır ve zemin kısmen akıcı kil olan yumuşak hassas kil ve üzerindeki dolgudan oluşmaktadır. Dolgu ile birlikte istinat duvarının stabilitesi temin edilememektedir ve ayrıca yakından geçen demiryolu da durumu güçleştirmektedir. Dolgunun polistiren köpük blokları ile inşası çözümü seçilmiş ve başarı ile uygulanmıştır (Şekil 3.6). Tabii zemin bir miktar kazılmış, polistiren köpük bloklarla teşkil edilen dolgu yüksekliği 5.5 m ve duvarın toplam yüksekliği ise 7.0 m'ye yaklaşmıştır. Polistiren köpük blokların demiryolu cephesindeki düşey yüzeyi üstte çelik levhalarla altta prefabrike beton levhalarla korunmuştur (Aksoy, 1998).

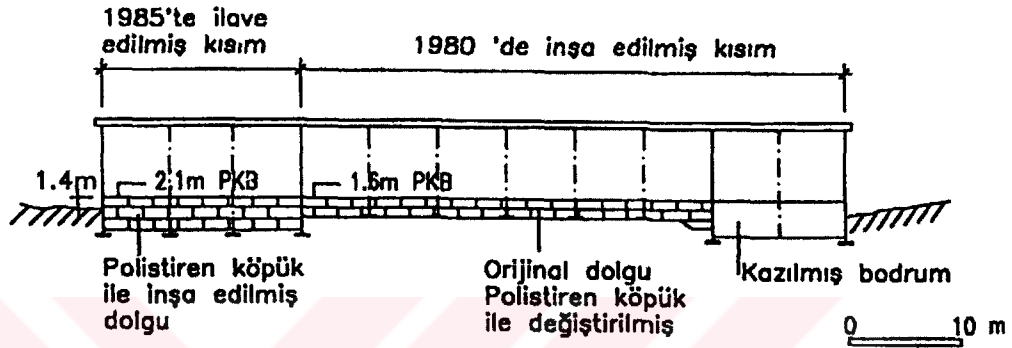


Şekil 3.6 Yol rampasının polistiren köpük bloklarla teşkili (Aksoy, 1998)

3.1.3.3. Oturan Fabrika Döşeme Dolgusunun Tekrar İnşası

1980 yılında Norveç'te 50 m × 55 m alanında bir fabrika binası inşa edilmiştir. Binanın esas kısmında orijinal zemin üzerinde, 1.5 m ile 1.8 m kalınlığında sıkıştırılmış çakıl dolgu ve üzerinde beton döşeme bulunmaktadır. Tabii zemini 40

m'den fazla kalınlığa sahip normal konsolide deniz kili oluşturmaktadır. İnşaattan 5 yıl sonra, en fazla oturma 35 cm ve farklı oturmalarda 25 cm'e ulaşmıştır. Dolgu yapılan alanlarda gerilme, hareketli yük dahil 40 kPa ile 50 kPa'dır. 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 3.7). Fabrikaya 1985 yılında 18 m × 55 m boyutlarında ilave bir bölüm yapılması söz konusu olduğunda önceki deneyimler gözönünde tutularak 2.1 m'lik dolgu polistiren köpük bloklarla teşkil edilmiştir (Aksoy, 1998).



Şekil 3.7 Fabrika döşeme dolgusunun polistiren köpük ile yapılması (Aksoy, 1998)

3.1.4. Karma Hafif Dolgu Malzemelerini Modelleme

Son zamanlarda, genişmiş polistiren köpük daneleri, hava köpükleri gibi hafif ağırlıktaki malzemeleri karıştırarak karma hafif dolgu malzemeleri oluşturma üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan deney sonuçlarına göre, karma malzemelerin özellikle yüksek çevre basınçlarında farklı basınç davranışları gösterdiği gözlenmiştir. Fakat karma malzemeler hakkında mekanik ve matematik modellerden şu ana kadar çok az literatür bahsetmiştir.

Hafif dolgu malzemeleri üzerine çalışmalar yapan JMS araştırma komitesi zeminle genişmiş polistiren köpük daneleri ve hava köpüğünü karıştırarak 2 tür hafif zemin oluşturarak bunlar üzerinde deney yapmıştır (Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002).

Genleşmiş Polistiren Köpük (EPS) Daneleriyle Yapılan Hafif Zemin

Tablo 3.1 genişmiş polistiren köpük daneleri karıştırılmış hafif zemin numunelerinin karışım oranlarını özetlemektedir. 5 cm çaplı ve 10 cm yüksekliğinde, silindirik şeklindeki numunelere 25°C sabit sıcaklık altında 7 gün kür uygulandı.

Tablo 3.1 Genleşmiş polistiren köpük daneleri karıştırılmış hafif zemin numunelerinin karışım oranları (Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002)

Kum (kuru ağırlığı) (g)	Su (g)	EPS daneleri (g)	Çimento (g)	Su (karıştırmak için) (g)
600	60	9	36	50

Hava Köpüklü Hafif Zemin

Hava köpüklü zemin, zemin ve su karıştırılarak yapılır. Şerbete ilk önce çimento gibi katılaştırıcı bir malzeme eklenir, daha sonra köpürten bir malzeme konur. En önemli avantajları, hafif, akışkan ve kendinden katılaşılan özelliklere sahip olmasıdır.

Tablo 3.2 hava köpüğü karıştırılmış hafif zemin numunelerinin karışım oranlarını özetlemektedir. 5 cm çaplı ve 10 cm yüksekliğinde, silindir şeklindeki numunelere 25°C sabit sıcaklık altında 7 gün kür uygulandı.

Tablo 3.2 Hava köpüğü karıştırılmış hafif zemin numunelerinin karışım oranları(Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002)

Kuru Kum (kg)	Su (kg)	Çimento (kg)	Hava köpüğü (cm ³)
3.95	0.95	0.5	2400

Deney Koşulları

Yukarıda tarif edilen numuneler kullanılarak, farklı çevre basınçları altında tek eksenli ve üç eksenli basınç deneyleri yapıldı. Üç eksenli basınç deneylerinde doymun olmayan numuneler kullanıldı. Hacimsel şekil değiştirme iki hücreli bir alet tarafından ölçüldü. Polistiren köpük daneleri karıştırılmış hafif zemin için çevre basıncı sırasıyla $\sigma_3 = 40, 70, 100$ kPa alındı. Hava köpüğü karıştırılmış hafif zemin için çevre basıncı sırasıyla $\sigma_3 = 20, 40, 70$ kPa alındı.

Deneysel Sonuçlar

Farklı numune ve deneyler için deneyisel sonuçlar deneyisel sonuçların özetleri Tablo 3.3-3.6'da gösterilmektedir(Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002).

Tablo 3.3 Polistiren köpük karıştırılmış hafif zemin üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçları (Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002)

	Numune No			
	1	2	3	Ortalama
Islak yoğunluk (kN/m ³)	10.73	10.82	10.81	10.79
Deneyden sonraki su muhtevası (%)	13.2	13.2	13.1	13.2
Tek eksenli basınç dayanımı (kPa)	160.6	150.2	136.1	149.0
Göçme anındaki birim şekil değiştirme (%)	1.140	1.160	2.160	-
Sekant modülü, E ₅₀ (MPa)	35.1	30.1	27.8	31.0

Tablo 3.4 Polistiren köpük karıştırılmış hafif zemin üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002)

	Numune No		
	1	2	3
Çevre Basıncı (kPa)	39.2	68.6	98.1
Islak yoğunluk (kN/m ³)	10.86	11.12	10.81
Maksimum deviator gerilme (kPa)	254.7	296.0	314.1
Mohr-Coulomb kriterine dayalı kohezyon (kPa)	76.5		
Mohr-Coulomb kriterine dayalı sürtünme açısı (°)	19.8		

Tablo 3.5 Hava köpüğü karıştırılmış hafif zemin üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçları (Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002)

	Numune No			
	1	2	3	Ortalama
Islak yoğunluk (kN/m^3)	10.66	10.77	10.50	10.64
Su muhtevası (%)	18.6	19.3	20.2	19.4
Tek eksenli basınç dayanımı (kPa)	132.4	152.0	131.4	138.6
Sekant modülü, E_{50} (MPa)	27.5	36.1	31.4	31.7

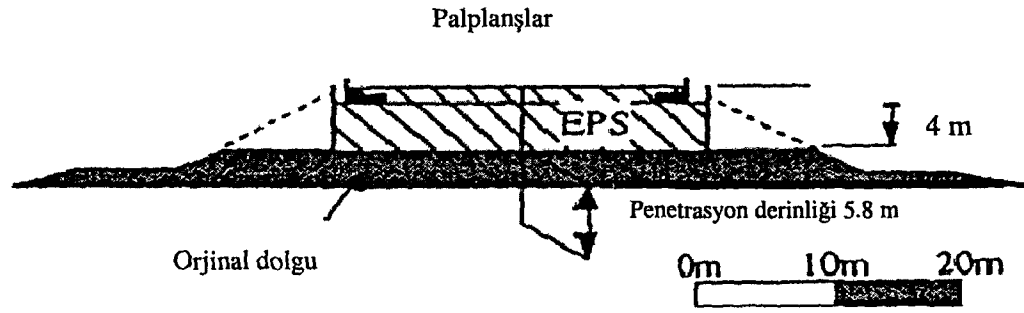
Tablo 3.6 Hava köpüğü karıştırılmış hafif zemin üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Wu, Yasuhara, Niu ve Yin, 2002)

	Numune No		
	1	2	3
Çevre Basıncı (kPa)	0.2	0.4	0.7
Islak yoğunluk (kN/m^3)	10.51	10.86	10.74
Su muhtevası (%)	20	19.1	20.3
Maksimum deviator gerilme (kPa)	115.42	138.37	167.15

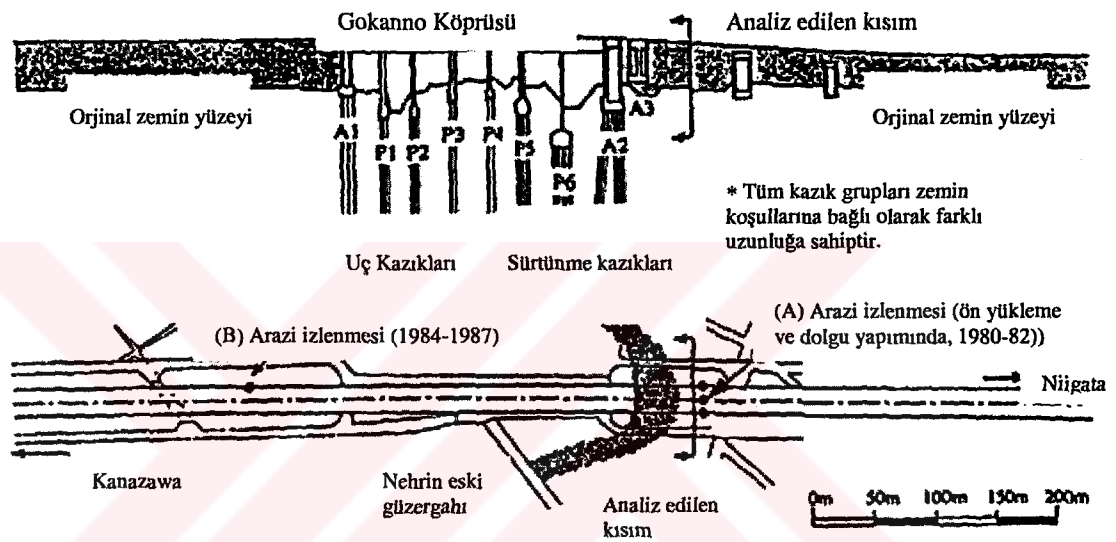
3.1.5. Yumuşak Zemindeki Dolguda Yer Değiştirme ile Oturmanın Azaltılması

Yumuşak zeminlerde bulunan yapıların oturmasının azaltmak için iki şey yapılmaktadır. Biri yapıların yükünü azaltmak, diğeri yapının altındaki veya yanındaki çevreleyen zeminin dayanımını arttırmaktır. Yapıların yükünü azaltmada hafif dolgu malzemelerini kullanmak uygun olmaktadır.

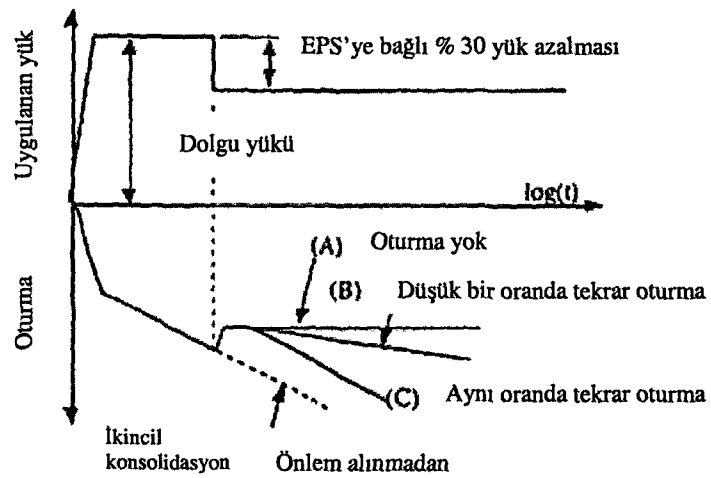
Şekil 3.8 yükleri azaltmak için genleşmiş polistiren köpük (EPS) ile kısmen yer değiştirilen dolgunun en kesitini göstermektedir. Boy kesit ve plan Şekil 3.9’de gösterilmektedir. Şekil 3.10’da geçen süreyle uygulanan yük ve oturmanın değişimi gösterilmektedir. Ön yükleme ve EPS ile dolgu yapılması sırasında gözlenen oturmalar ve zeminin yanal yer değiştirmesi, visko – elasto plastik model kullanarak hesaplanan sonuçlarla kıyaslanmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.8 Dolgu enkesiti (Yasuhara, 2002)

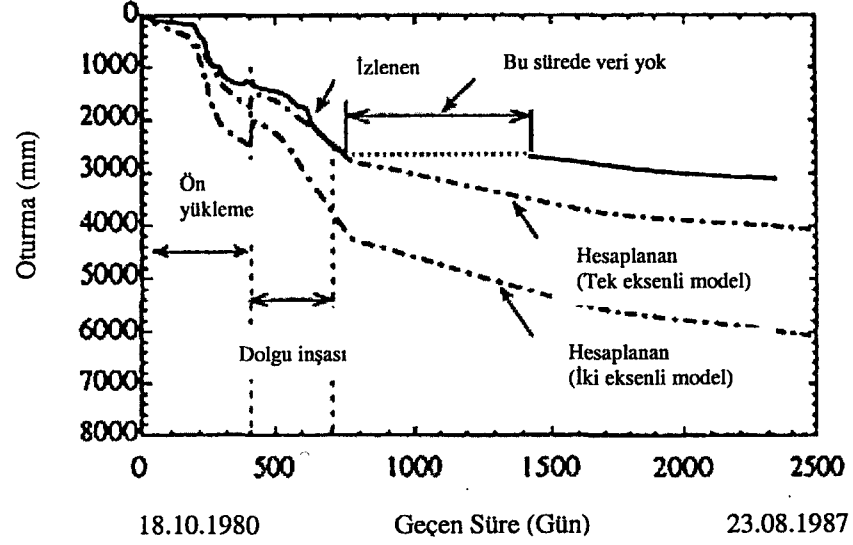


Şekil 3.9 Dolgu boykesit ve planı (Yasuhara, 2002)

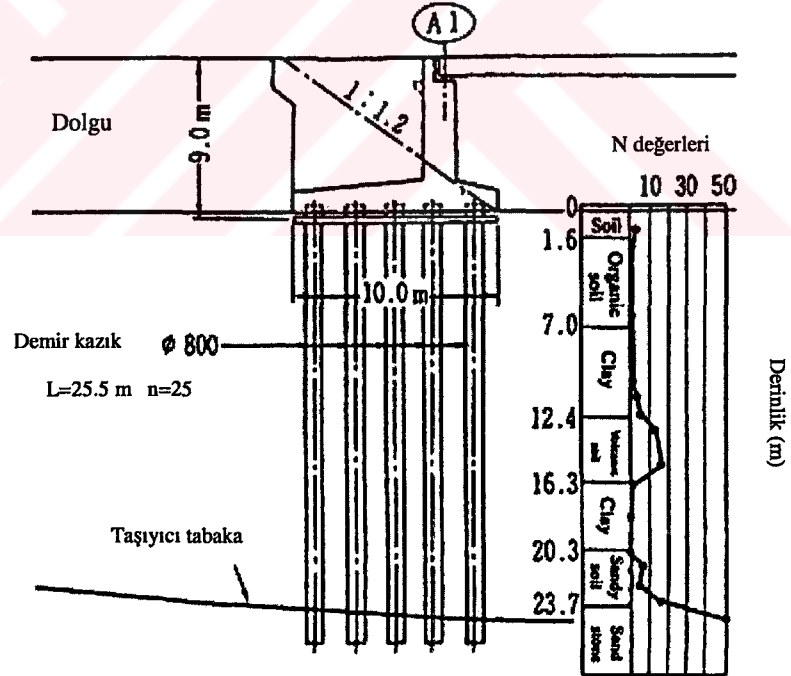


Şekil 3.10 Geçen süreyle uygulanan yük ve oturmanın değişimi (Yasuhara, 2002)

Oturma – zaman ilişkisinin gözlenen ve hesaplanan olmak üzere her ikisinden de yumuşak zeminin inşa sonundaki uzun dönem oturmalarını azaltmada EPS ile yük azaltılmasının oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.11 Oturma – Zaman ilişkisi (Yasuhara, 2002)



Şekil 3.12 Köprü ayağındaki hafif dolgu uygulaması (Yasuhara, 2002)

Yumuşak zeminde bulunan köprü kenar ayağı inşasında, yumuşak zeminin yanal deformasyonunu azaltmak ve kenar ayağın stabilitesini arttırmak için önlem alınmalıdır. Şekil 3.12’de Japon Karayolu Şirketinin yaptığı Kochi otoyolundaki bir

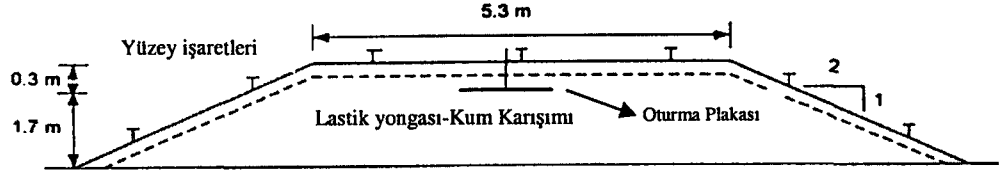
köprü ayağına ait en kesit verilmiştir. Oturmalar ve yanal deformasyonlar ön yüklemekten sonra arka dolgunun EPS ile yer değiştirilmesiyle azaltılmıştır (Yasuhara, 2002).

3.2. Lastik Yongaları Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

3.2.1. Yol Dolgusu Deneyi

Yol yapımında, parçalanmış lastikleri değerlendirmek için yaklaşık 7 m uzunluğunda 8 kısımdan oluşan bir yol dolgusu inşa edilmiştir (Şekil 3.13). Bu kısımlar farklı boyutlarda lastik parçaları kullanılarak inşa edilmiştir ve sadece zeminden inşa edilen iki kontrol bölümünü de kapsamaktadır. Bölümlerden sadece biri çakıllı kum ile lastik parçaları karışımından oluşmaktadır. Test dolgusunun yüksekliği 2 m, kret genişliği 5.3 m, eğimi 1V:2H'dır. Kum - lastik parçaları karışımı olan bölümde arazi birim hacim ağırlığı 11.8 kN/m^3 , sadece kumla inşa edilen kontrol bölümlerinin ise 16.5 kN/m^3 ile 17.5 kN/m^3 arasında değişmektedir. Dolgunun yüksekliğinin sınırlı olmasından toplam kayma dayanımı davranışı değerlendirilememektedir fakat dolgu tabanından 1.7 m yüksekte farklı kısımlara yerleştirilen oturma platformları ve yüzeye (kret ve şevlere) konulan işaretlerle deformasyon davranışı gözlenmiştir. Yaklaşık 2 yıl, hergün 60 ile 100 arası çöp kamyonu, herbiri ortalama 21.6 ton ağırlık yaparak dolgunun üzerinden geçmiştir. Yüzey işaretlerinin yanal hareketi, lastik parçalarıyla inşa edilen bölümler de dahil hiçbir bölümde ve şevlerde çıkıntı olmadığını göstermiştir. Kamyon lastiklerinin bıraktığı ize yerleştirilen yüzey işaretleri, yüzey oturmasının ilk 20 gün kamyon trafiği ile birlikte hızla arttığını ve 60 gün sonra sabit kaldığını göstermiştir. Sadece lastik parçalarıyla inşa edilen (üzerinde 1 m kalınlığında zemin tabakası bulunan) bölümler iyi davranış göstermiştir. Kum lastik parçaları karışımının (üzerinde 0.3 m kalınlığında zemin tabakası bulunan) bulunduğu bölümde benzer davranış göstermiştir. Yüzeydeki işaretlerin oturması, trafik yüklemesine bağlı gerilme artışının en büyük olduğu yerdeki yüzey malzemeleriyle (kırma taş) ilgili plastik deformasyonu tarif etmektedir. Oturma platformları, zamana bağlı olarak yüzeydeki işaretlerin gösterdiğine benzer bir eğilim göstermiştir. Örneğin, başlangıçta daha yüksek olan hareketler 60 gün sonra yavaşlamıştır ve 152 gün süren (son okuma) trafikten sonra sabit kalmıştır. Başlangıçta 60 günlük plastik birim şekil değiştirmeden sonra

oturma platformunun üzerindeki örtü basıncının toplam plastik birim şekil değiştirmeye oranı olan plastik rijitlik indeksi hesaplanmıştır. Kum lastik parçaları karışımından oluşan kısmın rijitlik indeksi 507 kPa, lastik parçalarından oluşan kısmın 364-388 kPa olarak bulunmuştur. Katkısız lastik parçalarının üzerine 1 m kalınlığında zemin konulması, 60 günden 152 güne kadar geçen sürede plastik rijitliği 514-1455 kPa'a arttırmıştır.



Şekil 3.13 Dolgu enkesiti (Edil, 2002)

Hizmet süresinin tesbiti için, yol dolgusunu oluşturan tabakaların geometrisini, trafik yüklerini ve çeşitli tabakaların (örneğin, yüzey, taban, alt temel, dolgu) poisson oranını kapsayan bir analiz yapılmıştır. Analiz, yol dolgusunda çeşitli kısımlar için yapılmıştır. Laboratuvar testlerine bağlı olarak, katkısız lastik parçaları ve kum lastik karışımları için poisson oranı sırasıyla 0.20 ve 0.25 bulunmuştur. Analizde, kum - lastik parçaları karışımı olan kısmın üzerindeki asfalt kaplama için 2 yıl, katkısız lastik parçaları olan kısmın üzerindeki asfalt kaplama için 1 yıldan az tasarım ömrü olduğu belirlenmiştir. Katkısız lastik parçaları üzerine 1 m kalınlığında zemin konulması, tasarım ömrünü 12 yıla kadar arttırmıştır. Lastik parçaları - zemin karışımları başlangıçta yük altında önemli bir başlangıç plastik sıkışması göstermektedir. Bu, katkısız lastik parçaları için başlangıçtaki yerleştirme kalınlığının % 40'ı kadar yüksek olabilmektedir. Başlangıçtaki bu plastik sıkışmayı önlemek ve takip eden plastik birim şekil değiştirmeleri sınırlamak için katkısız lastik parçalarıyla inşa edilen dolguların üzerine 1 m kalınlığında zemin serilmesi önerilmektedir. Uzun dönemde plastik rijitlik boşluk oranı ile ilgilidir. Örneğin; daha büyük lastik parçalarının, daha küçük lastik parçalarına nazaran daha fazla sıkışması beklenir. Benzer şekilde zemin - lastik parçaları karışımı, lastik parçalarının arasındaki boşlukları zeminin doldurmasıyla daha düşük boşluk oranına sahip olmakta, daha az sıkışmaktadır. Silt veya kil gibi ince daneli malzeme içeren zeminlerle yapılan zemin - lastik parçaları karışımının, kum - lastik parçaları

karışımından çok az daha sıkışabilir, fakat sadece lastik parçalarından daha az sıkışabilir olduğu bulunmuştur (Edil, 2002).

3.2.2. Siltli Kum Karıştırılmış ve Karıştırılmamış Sıkıştırılmış Lastik Parçaları Üzerinde Yapılan Üç Eksenli Basınç Deneyi

Duvar arkası dolguda, hafif dolgu malzemesi olarak parçalanmış lastikler tek başına veya zeminle karıştırılarak kullanılabilir. Lastiğin parçalanmasıyla oluşan, genellikle 12-50 mm arasında boyutlara sahip olan ürünlere “lastik yongası” adı verilmektedir. “Lastik parçaları” veya “kaba parçalar” terimleri daha büyük boyutta olanlar için kullanılmaktadır. Lastik yongaları ve kum – lastik yongası karışımlarının mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Kum – lastik yongası karışımı ve geosentetikler arasındaki ilişki çekme deneyleri ile araştırılmıştır. Tam ölçekli deney dolguları ve geosentetiklerle donatılı duvar inşa edilmiştir. Ayrıca arazi çalışmaları, lastik yongalarının suyun kalitesi üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğunu göstermiştir. Parçalanmış lastiklere siltli kum eklenmesinin faydası, sadece deformasyon özelliklerini geliştirmekle kalmayıp, aynı zamanda arka dolgunun dayanımını arttırmakta ve lastik yongalarının kendi kendine ısınma özelliğini de azaltmaktadır.

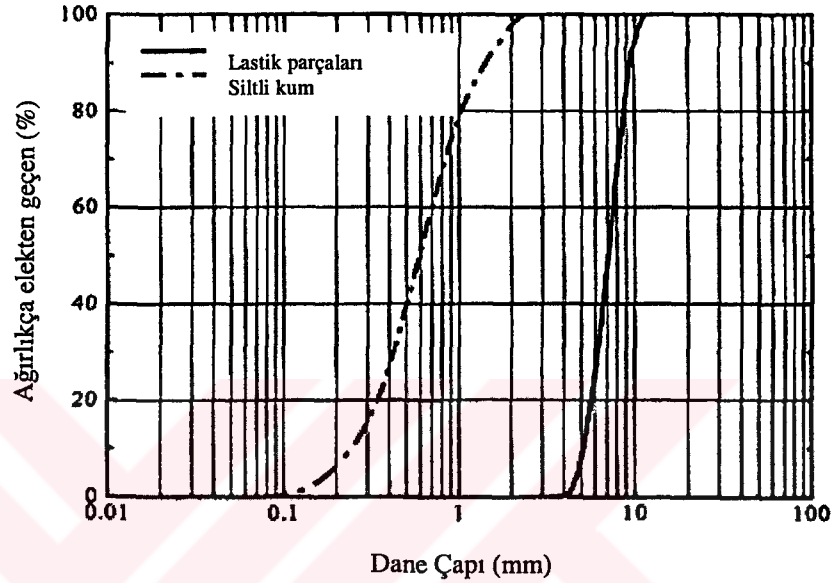
Bergado ve Youwai tarafından yapılan bu çalışmada, parçalanmış lastik - siltli kum karışımı, farklı karışım oranlarında hazırlanarak, pratik kullanımda en uygun karışım oranlarını seçmede yol gösterici olarak üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur.

Siltli kum (Ayutthaya Kum) ve parçalanmış lastik olmak üzere iki çeşit malzeme kullanılmıştır. Tablo 3.7’de malzemelerin indeks özellikleri verilmiştir. Şekil 3.14’de, deneyde kullanılan siltli kum ve parçalanmış lastiklerin tane çapı dağılımı eğrisi verilmiştir. Parçalanmış lastikler, laboratuvarında eski lastiklerin istenilen boyutta kesilmesiyle elde edilmişlerdir.

Lastik parçaları ve siltli kum değişik oranlarda karıştırılarak hazırlanan numune üzerinde, izotropik konsolidasyonlu drenajlı deneyler yapılmıştır. Deney programı Tablo 3.8’de verilmiştir. Üç eksenli basınç deneyinde, ağırlıkça 20:80, 30:70, 40:60 ve 50:50 oranlarında lastik parçaları, siltli kum ve siltli kum – lastik parçaları karışımından oluşan toplam 18 numune kullanılmıştır. İzotropik çevre basınçları 50, 100 ve 200 kPa olmak üzere üç farklı değer alınmıştır.

Tablo 3.7 Deneyde kullanılan malzemelerin indeks özellikleri (Bergado ve Youwai, 2002)

Malzeme	Özgöl Gravite	Efektif Çap, D_{10} (mm)	Sınıflandırma
Ayutthaya Kumu	2.67	0.27	SP-SM
Lastik Parçaları	1.15	5.00	-



Şekil 3.14 Dane çapı dağılımı eğrisi (Bergado ve Youwai, 2002)

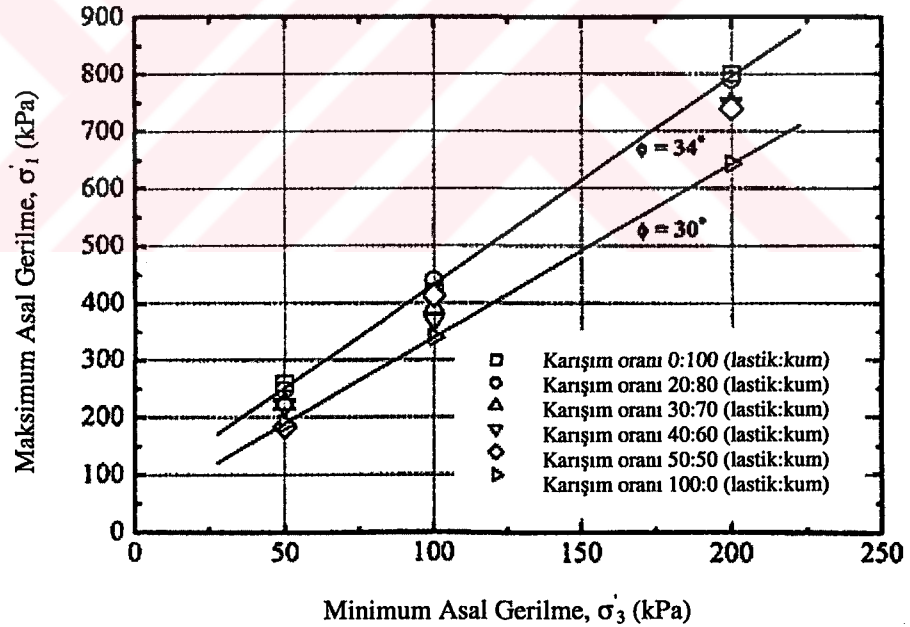
Su muhtevası % 7.5 olana kadar, önceden belirlenmiş saf suyla siltli kum karıştırılmış ve 3 gün kür uygulanmıştır. Belirlenmiş karışım oranlarından, herbir malzemenin yüzdesi hesaplanmıştır. Bu çalışmada kompaksiyon yöntemi kullanılarak, 2.5 kg'lık tokmak, 304.8 mm yükseklikten düşürülerek numunelere sıkıştırma uygulanmıştır. Malzeme, 5 tabakaya ayrılmıştır. Herbir tabakada aynı kompaksiyon enerjisini elde etmek için, birinci tabakadan beşinci tabakaya kadar, herbir tabakaya sırasıyla 21 ile 25 arasında değişen vuruş uygulanmıştır.

Daha sonra numuneye, hücre basıncını arttırarak, geri basıncı 200 kPa'da sabitleyerek izotropik bir konsolidasyon gerilmesi uygulanmıştır. Konsolidasyonun sonunda eksenel yük, eksenel birim şekil değiştirme % 20-25'e ulaşana veya kırılma gerçekleşinceye kadar arttırılmıştır. Kesme sırasında, eksenel deformasyon ve eksenel yük kaydedilmiştir. Ek olarak, drenajlı deney sırasında hacim değişimi büretle ölçülmüştür. Boşluk suyu basıncı ölçülmüştür.

Siltli kum karıştırılmış ve karıştırılmamış lastik parçalarının birim hacim ağırlığı Tablo 3.8’de gösterildiği gibi sıkıştırılmış siltli kumdan yaklaşık % 13-60 daha az olduğu belirlenmiştir. Ortalama kuru birim hacim ağırlığı, karışımda siltli kum miktarının artmasıyla artmaktadır. Karışım oranı 30:70’den daha fazla olduğunda, kuru birim hacim ağırlıkta, kum lastik yongalarının arasındaki boşlukları tamamen kapattığı için önemli bir artış olmamaktadır.

Tablo 3.8 Deney programı (Bergado ve Youwai, 2002)

Karışım Oranı (Lastik yongası:Kum)	Deney Numarası	Çevre Basıncı (kN/m ³)	Ortalama Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)
0:100	3	50, 100, 200	17.32
20:80	3		15.07
30:70	3		14.19
40:60	3		12.93
50:50	3		11.65
100:0	3		6.83



Şekil 3.15 Farklı karışım oranlarında siltli kum karıştırılmış lastik parçalarının maksimum ve minimum asal gerilmeleri arasındaki ilişki (Bergado ve Youwai, 2002)

Maksimum asal gerilme (σ_1) ve minimum asal gerilme (σ_3) arasındaki ilişki Şekil 3.15’de verilmiştir. Siltli kum karıştırılmış ve karıştırılmamış lastik parçalarının dayanımı çevre basıncı (σ_3) arttıkça artmakta olduğu belirlenmiştir. Karışımın

dayanımının; kum, lastik yongalarının arasındaki boşlukları tamamen kapattığı için kumlu silt miktarının artmasıyla artmakta olduğu ve siltli kumun kayma dayanımının, lastik parçalarının kayma dayanımından daha fazla olduğu bulunmuştur. İçsel sürtünme açısının maksimum değeri, karışımdaki siltli kumun artmasıyla 30-34° arasında değişmekte olduğu bulunmuştur.

Farklı oranlarda, siltli kum karıştırılmış ve karıştırılmamış lastik parçaları üzerinde üç eksenli drenajlı basınç deneyi uygulanmıştır. Sonuç olarak, karışımdaki siltli kum miktarının artmasıyla dayanım artmış ve izotopik basınca bağlı olan deformasyon azalmıştır. Karışımdaki siltli kum % 30'dan daha fazla olduğunda deformasyon önemli ölçüde azalmıştır (Bergado ve Youwai, 2002).

3.3. Uçucu Kül Kullanarak Yapılmış Çalışmalar

3.3.1. Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu

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.

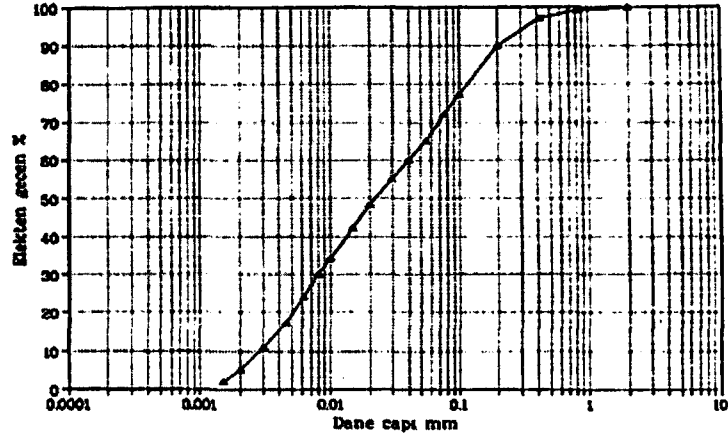
Uçucu Külün Özellikleri

Uçucu kül numunesi Seyitömer kül atık sahasından temin edilmiştir. Seyitömer uçucu külü, kimyasal yapısı bilinen, puzolanik aktivitesi yüksek, yüksek oranda kireç (% 10.3) içeren, C sınıfı bir küldür.

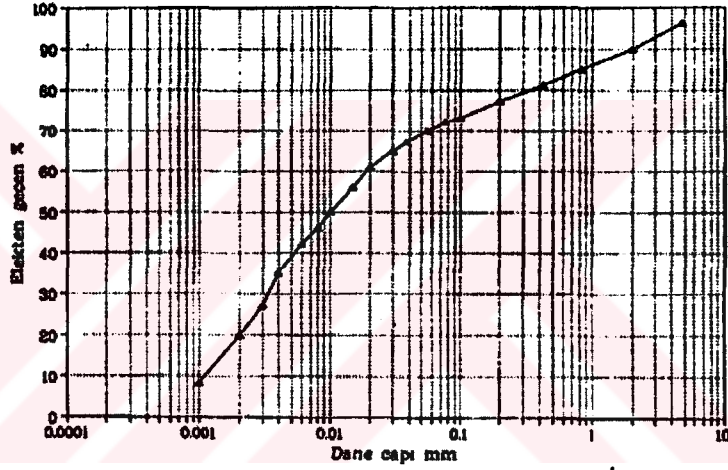
Danelerin % 65'i 0.076 mm (No.200 elek)'den ince fakat plastik değildir. Deneylerde kullanılan malzemenin dane çapı dağılımı Şekil 3.16'da verilmektedir. Laboratuvar da yapılan deneylerde uçucu külün özellikleri bulunmuştur (Tablo 3.9).

Tablo 3.9 Seyitömer uçucu külünün özellikleri (Tan ve İyisan, 1996)

Dane Birim Hacim Ağırlığı, γ_s (kN/m ³)	Kıvam Limitleri	Standart Proktor Deneyi		Modifiye Proktor Deneyi	
		γ_{kmax} (kN/m ³)	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	w_{opt} (%)
19.8	Plastik değil	8.25	46	9.25	43



Şekil 3.16 Seyitömer uçucu külü granülometri eğrisi (Tan ve İyisan, 1996)



Şekil 3.17 Kemberburgaz kili granülometri eğrisi (Tan ve İyisan, 1996)

Kilin Özellikleri

Deneyde kullanılan kil numunesi, İstanbul, Kemberburgaz, Kilsan, Tuğla Fabrikası kil yatağından alınmış ve havada kurutulmuştur. Numuneye ait dane çapı dağılımı Şekil 3.17'de verilmiştir. Kemberburgaz kilinin laboratuvar özellikleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10 Kemberburgaz kilinin laboratuvar 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_{kmax} (kN/m ³)	w_{opt} (%)
27.3	40	19	21	CL	17	18

Kil – Uçucu Kül Karışımı

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 $\gamma_{kmax} = 15.1 \text{ kN/m}^3$ ve optimum su muhtevası $w_{opt} = \% 20$ olarak bulunmuştur.

Numune Hazırlanması ve Deney

Uçucu kül katılmamış kil ve kuru ağırlıkça % 20 uçucu kül - % 80 kil karışımı ile iki grup numune hazırlanmıştır. Katkisız kil ve kül - kil karışımları daha önce elde edilmiş olan optimum, sırasıyla % 18 ve % 20 su muhtevalarında, Standart Proktor kalıbında ve şartlarında kompaksiyonla sıkıştırılmıştır. Uçucu küllerin puzolanik özelliği nedeniyle 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 kesilmiş ve drenajsız şartlarda, 100, 200 ve 300 kPa çevre basıncında, 1.5 mm/dak sabit deformasyon hızında kırılıncaya kadar yüklenmiştir.

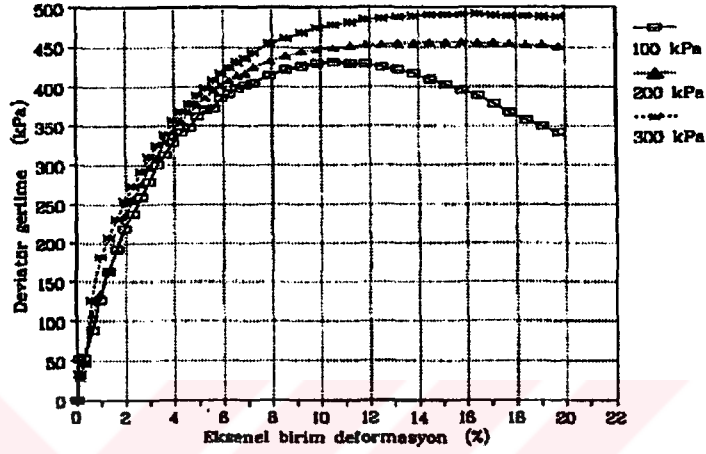
DeneySEL Sonuçlar

Katkısız kil ve % 20 uçucu kül - % 80 kil karışımları, optimum su muhtevalarında, Standart Proktor şartlarında, kompaksiyon ile hazırlanan iki grup numune 1 günlük kürden sonra, drenajsız şartlarda üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur.

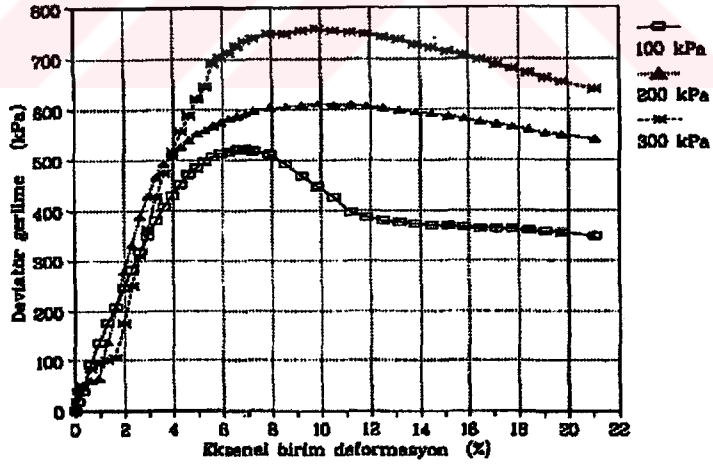
İki grup numune üzerinde yapılan deneylere ait gerilme – deformasyon eğrileri Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da verilmektedir. Uçucu kül katılmış ve katılmamış numunelerin, Mohr – Coulomb kırılma hipotezine göre kayma direnci parametreler; drenajsız kohezyon (c_u) ve kayma direnci açıları (ϕ_u), deformasyon modülleri ile kırılmanın gözlemlendiği; maksimum deviator gerilmeye ulaşılan eksenel birim deformasyonlar (ϵ_f) Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11 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 3.18 Kemerburgaz kili üç eksenli basınç gerilme-deformasyon eğrileri (Tan ve İyisan, 1996)



Şekil 3.19 % 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 yapısıyla 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 beraber, 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/s olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda, katı atık sahalarında, taban ve örtü tabakalarında kullanılabileceğini göstermektedir (Tan ve İyisan, 1996).

3.3.2. Uçucu Külün Akıcı Dolgu Olarak Kullanılması

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

Akıcı dolgu kullanım yöntemi itibariyle, su, çimento mineralleri ve kum ve/veya ince taneli granüler malzeme karışımından oluşmaktadır. Karışıma granüler malzeme konulmasının sebebi dolgunun artan su muhtevası ile artan kuruma büzülmesini azaltmak ve karışımın mukavemetini arttırmaktır. Ancak uçucu kül kimyasal yapısı itibariyle yüksek su muhtevalarında bile kayda değer büzülme yapmamakta, hatta bu özelliği ile betonda büzülmeyi önlemesi için kullanılmaktadır. Ayrıca, akıcı dolgu ile sağlanan 28 günlük serbest basınç mukavemetinin 1035 kPa değerini aşmaması gerekmektedir. Bu nedenle granüler malzeme kullanılmamıştır.

Dizayn karışımları % 100 kül ve % 95 kül, % 5 kireç karışımlarını içermektedir. Dizayn karışımlarının grup isimleri ve buna mukabil kül, kireç ve su muhtevaları Tablo 3.12’de verilmiştir.

Soma Termik Santrali’nden elde edilen uçucu külün kimyasal özellikleri ASTM C 618 standardı ile karşılaştırılarak, Tablo 3.13’de verilmektedir. Elde edilen uçucu

külün, % 9.28 CaO muhtevası ile kendi başına çimentolaşma özelliği olduğu belirlenmektedir.

Tablo 3.12 Kül, kireç ve su yüzdelerine göre grup isimleri (Baykal ve Döven, 1996)

Grup	UK47	UK52	UK55	UK60	UKK50	UKK55	UKK57.5	UK62.5
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

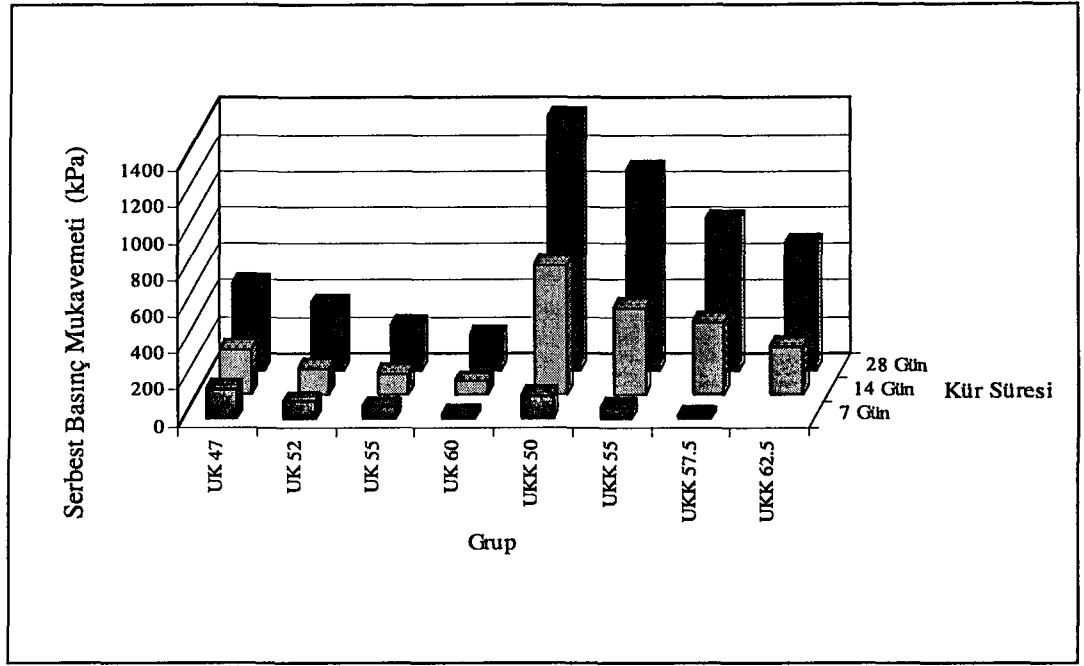
Tablo 3.13 Soma Termik Santrali Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları (Baykal ve Döven, 1996)

Oksit (%)	Soma Uçucu Külü	ASTM C 618	
		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 3.14 ve Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'de verilmiştir.

Tablo 3.14 Dizayn karışımlarının 7, 14, 28 günlük serbest basınç mukavemeti ve birim deformasyon sonuçları (Baykal ve Döven, 1996)

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

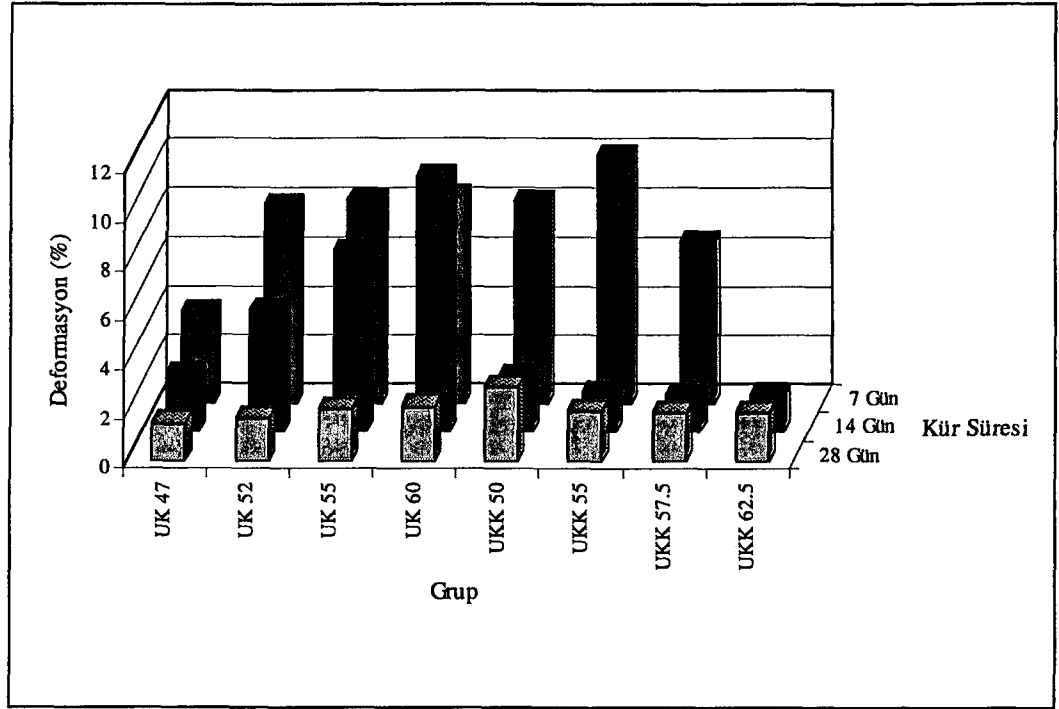


Şekil 3.20 Grupların değişik kür sürelerine göre basınç mukavemeti değerleri (Baykal ve Döven, 1996)

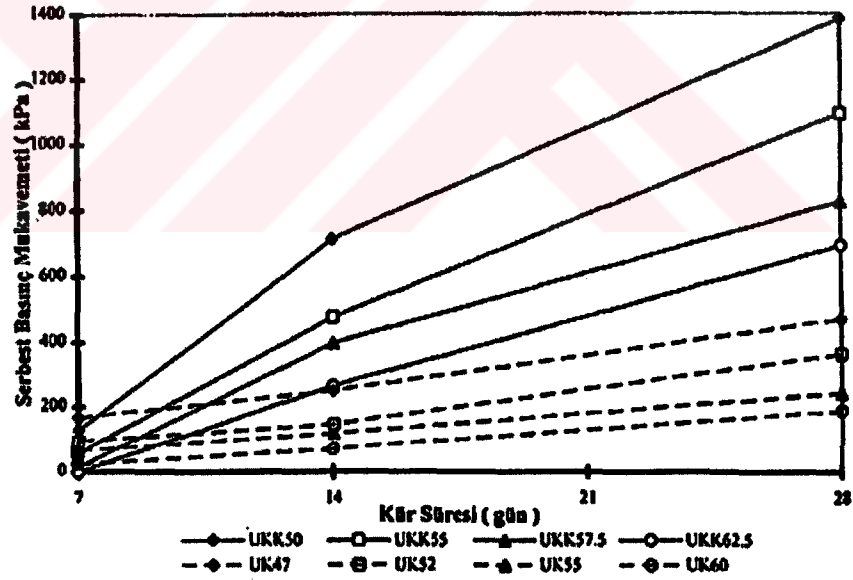
Başlangıç ve bitiş priz sürelerini belirlemek amacı ile kalibre edilmiş cep penetrometresi kullanılmıştır. 5 mm penetrasyon değeri için (ortalama bir insan ağırlığının tek ayak üzerinde sağladığı basınç değeri olan) 50 kPa taşıma gücüne ulaşma zamanı ilk priz süresi olarak, 1 mm penetrasyon değeri için 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 aralıklarla 15 dakika ara ile alınmıştır. Sonuçlar Tablo 3.15’de verilmiştir.

Tablo 3.15 Dizayn karışımlarının ilk ve son priz süreleri ile büzülme yüzdeleri (Baykal ve Döven, 1996)

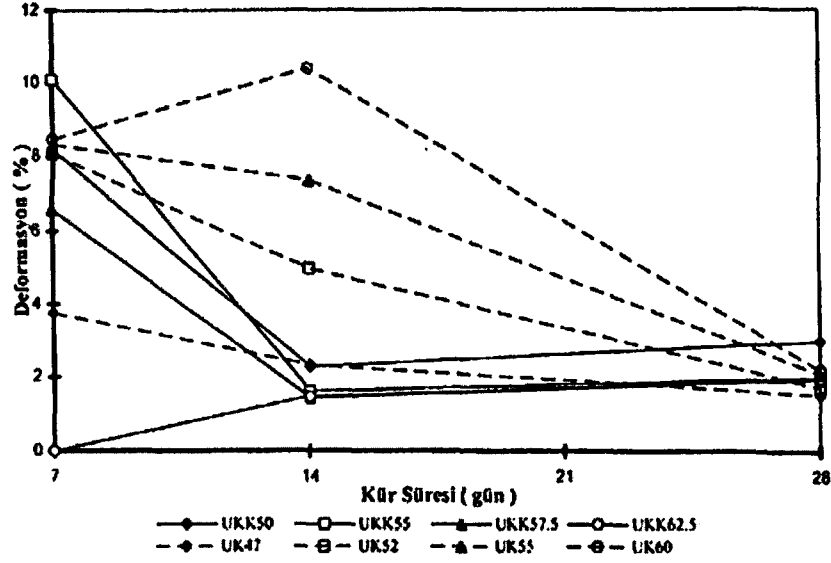
Grup	Priz Süreleri		Büzülme (%)
	Başlangıç (5 mm)	Bitiş (1 mm)	
UK47	10 saat 30 dakika	27 saat 15 dakika	1.47
UK52	17 saat 30 dakika	36 saat 30 dakika	2.07
UK55	31 saat 15 dakika	56 saat 15 dakika	2.58
UK60	67 saat	128 saat 45 dakika	3.01
UKK50	6 saat 30 dakika	28 saat 45 dakika	6.69
UKK55	14 saat	40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



Şekil 3.21 Grupların değişik kür sürelerine göre kırılma anı deformasyon değerleri (Baykal ve Döven, 1996)



Şekil 3.22 Grupların değişik kür sürelerine göre basınç mukavemeti artışları (Baykal ve Döven, 1996)

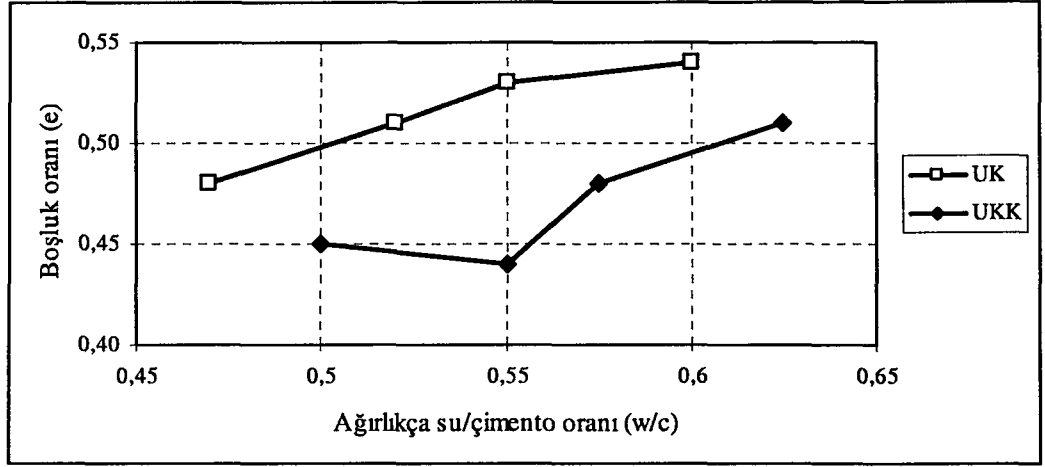


Şekil 3.23 Grupların değişik kür sürelerine göre kırılma deformasyon değişimleri(Baykal ve Döven, 1996)

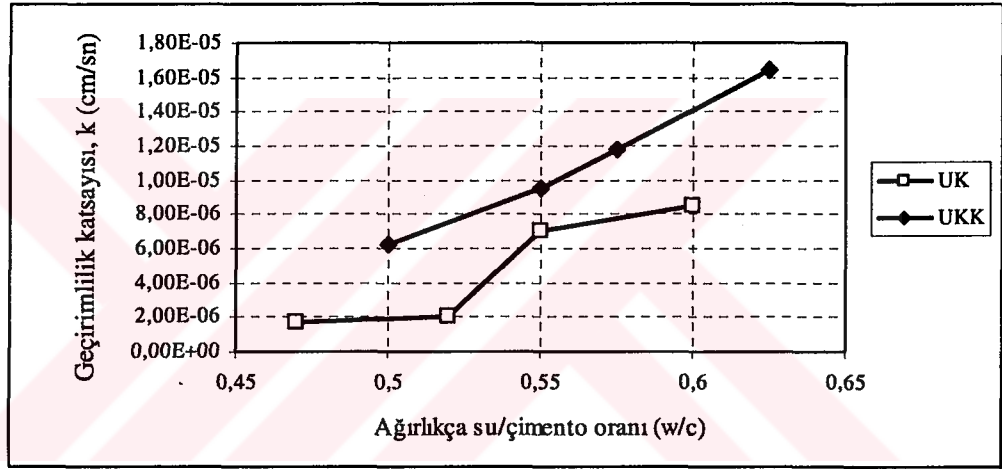
Geçirgenlik katsayıları, ASTM D5084 standardına uygun olarak her grup için 28 gün kür edilmiş ikişer adet numune üzerinde yapılan deneylerle bulunmuştur. Desikatörde su içerisinde vakum uygulanan numuneler, doygunluk dereceleri % 95 olduğunda 70 kPa çevre basıncı ve hidrolik eğimi 200 olacak şekilde deneye tabi tutulmuşlardır. Deneyden sonra aynı numuneler ASTM C642'ye uygun olarak özgül ağırlık deneyine tabi tutulmuş ve boşluk oranları beirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 3.16 ve Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de verilmiştir.

Tablo 3.16 Dizayn karışımlarının geçirgenlik 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^{-5}	1.57	10.35	0.48
UKK62.5	1.64×10^{-5}	1.55	10.06	0.51



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



Şekil 3.25 Uçucu kül numunelerinin w/c oranı – geçirimsilik katsayıları ilişkileri (Baykal ve Döven, 1996)

Yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde aşağıda yer alan sonuçlara varılmaktadır:

1. Kullanım alanları itibariyle gerekli serbest basınç mukavemeti açısından, elde edilen uçucu kül yeterlilik sağlamıştır. Ayrıca mukavemetin kazılabilirlik şartnamesini aşmadığı (basınç dayanımı 1035 kPa maksimum), aşılabilecek özellikteki uçucu küller için de, mukavemetin w/c oranı arttırılarak kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır.
2. 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 sergilemektedir.

3. Kireç katkılı numunelerde (UKK) ilk yedi gün içerisindeki mukavemet artışı, küllü numuneler (UK) ile aynı olmaktadır. Ancak w/c oranı arttıkça azalmaktadır. Bu sonuç terleme sonucunda numune üzerinde toplanan suyun yumuşamaya sebep olmasından kaynaklanmaktadır.
4. Boşluk oranı sadece küllü numunelerde, kireç katkılı olanlara oranla daha yüksektir. Kireçli numunelerde priz süresi boyunca meydana gelen çökme böyle bir sonuca yol açmaktadır. Buna mukabil geçirgenlik 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 geçirgenlik katsayısı artmaktadır (Baykal ve Döven, 1996).

3.3.3. Uçucu Kül Katkısının Şişen bir Zeminin Şişme Basıncına Etkisi

Killi zeminlerin kabarması inşaat mühendislerini zor bir problemle karşı karşıya getirir. Bu problemin çözümü için çeşitli metodlar önerilmiştir. En çok kullanılan metod stabilize edici maddelerin şişen zemine ilavesidir.

Şişen zeminlere dünyanın pek çok bölgesinde rastlanabilmektedir. Bu tür zeminler su ile temas ettiklerinde su alıp hacimlerini arttırmakta ve üzerlerinde bulunan yapılara basınç uygulamaktadırlar. Bu suyun kaynağı yağmur, sel suları veya sızıntı yapan su kanalları olabilmektedir. Bu tür zeminler üzerinde inşa edilmiş hafif yapılar (karayolu, demiryolu, zemin üzerine oturan döşemeler, kanal ve rezervuar kaplamaları, sulama kanalları vb.) şayet alttan gelen şişme basıncını karşılayamazlarsa çatlayabilmektedir. Şişen zeminlerin hacim artışı çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar, zemin özellikleri ve çevresel faktörler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Zemin özellikleri olarak; zeminin ilk su muhtevası, kil muhtevası, minerolojisi, ilk kuru birim hacim ağırlığı, 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 artırma 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. 3.17). Kimyasal ve mineralojik analiz deneylerinin sonuçları Tablo 3.18 ve 3.19'da verilmektedir.

Tablo 3.17 Numunelerin endeks özellikleri (Çokça ve İpek, 1998)

Numune	Kil Yüzdesi	Silt Yüzdesi	G_s	Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı	Aktivite (PI / % kil)
				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	2.60	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

Numuneler 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 artırılarak deformasyonlar engellenmiş ve zaman içinde şişme sona erdiğinde, şişmeyi engellemek için

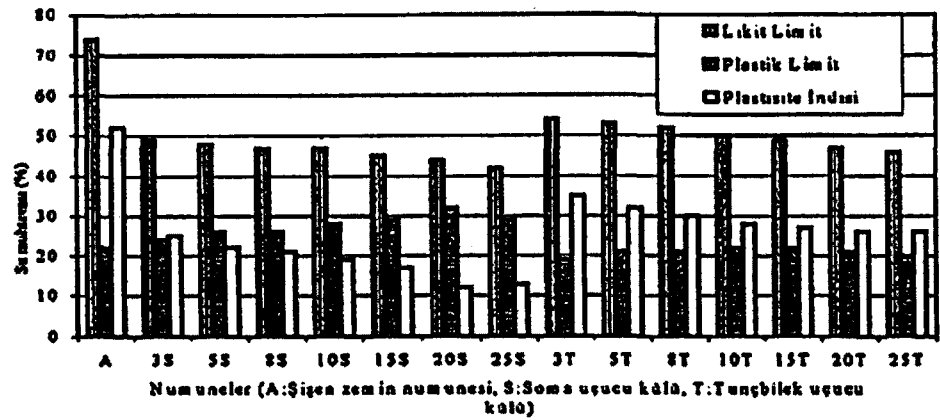
uygulanan şişme basıncı olarak kaydedilmiştir. Soma ve Tunçbilek uçucu külü katkılı numuneler 7 gün küre tabi tutulmuşlar ve kürenin şişme basıncının düşürülmesindeki etkinliğine bakılmıştır.

Tablo 3.18 Kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları (Çokça ve İpek, 1998)

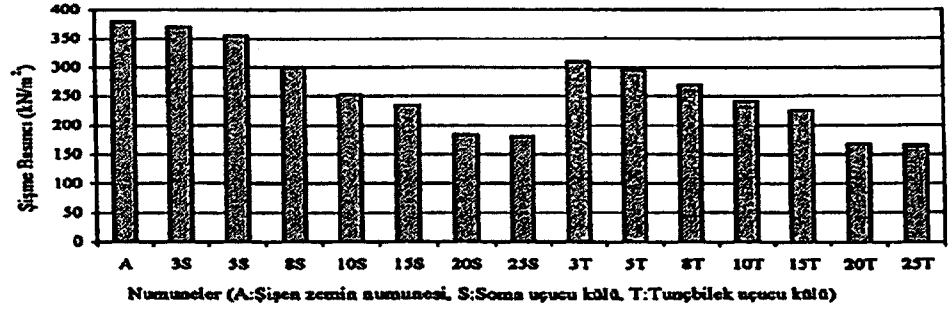
Kimyasal Kompozisyon (%)	Kaolin	Bentonit	Soma Uçucu Külü (C-sınıfı)	Tunçbilek Uçucu Külü (F-sınıfı)
MgO	0.03	1.28	1.01	1.66
Al ₂ O ₃	33.03	14.98	22.13	19.44
SiO ₂	49.89	56.19	44.18	58.62
CaO	0.42	2.25	18.98	2.18
Fe ₂ O ₃	1.78	9.45	4.85	10.18
SO ₃	0.13	0.33	3.96	0.36
K ₂ O	1.69	1.19	1.52	1.50
Na ₂ O	0.08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

Tablo 3.19 Kullanılan malzemelerin mineralojik analiz sonuçları (Çokça ve İpek, 1998)

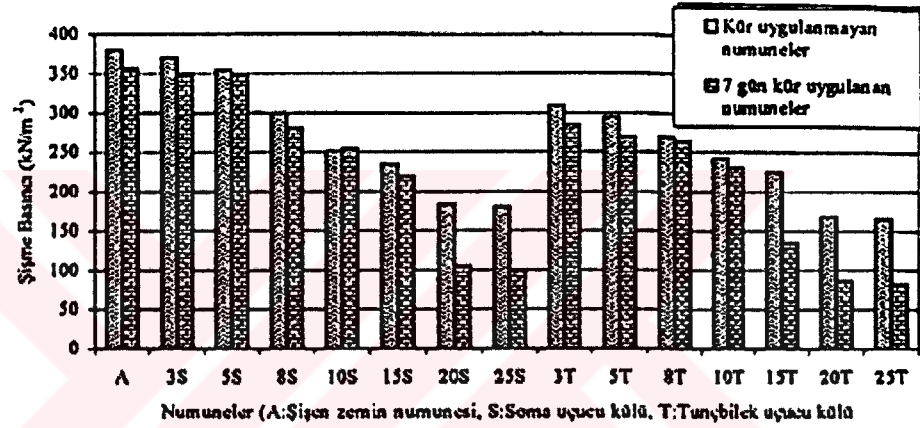
Malzeme	Mineraloji
Kaolin	Kaolin, kuvars, illit, feldispat
Bentonit	Smektit, illit, kaolin
Soma Uçucu Külü (C-sınıfı)	Kuvars, albit, anhidrit, hematit, magnetit, serbest kireç, camısı veya amorf gaz
Tunçbilek Uçucu Külü (F-sınıfı)	Kuvars, magnetit, camısı veya amorf gaz



Şekil 3.26 Soma ve Tunçbilek uçucu külü ilavesinin zeminin kıvam limitlerine etkisi (Çokça ve İpek, 1998)



Şekil 3.27 Soma ve Tunçbilek uçucu külü ilavesinin zeminin şişme basıncına etkisi (Çokça ve İpek, 1998)



Şekil 3.28 Soma ve Tunçbilek uçucu külü katkılı numunelerin şişme basınçlarına kür etkisi (Çokça ve İpek, 1998)

Numunelerin kil muhtevası şişme basıncını etkilemektedir. Tablo 3.16’da görüldüğü gibi numunenin içindeki uçucu kül miktarı arttıkça; silt yüzdesi artmakta, kil yüzdesi düşmekte, numunenin özgül ağırlığı ve aktivitesi azalmaktadır.

Deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki neticeler elde edilmiştir:

- Uçucu kül katkısının miktarı arttıkça numunelerin içindeki kil ebadındaki parçacık miktarı azalmakta, silt ebadındaki parçacık miktarı artmaktadır.
- Şekil 3.26’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 3.27’den de görüleceği gibi uçucu kül katkısının miktarı arttıkça numunelerin şişme basınçları azalmıştır.
- Şekil 3.28’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.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Yapılan laboratuvar çalışmasında termik santral uçucu külü, çimento ve polistiren köpük daneleri kullanılarak yeterli mukavemet ve dayanıklılığa sahip hafif dolgu malzemesi üretilmiştir.

4.2. Uçucu Kül - Çimento - Polistiren Köpük Daneleri Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu kül, Orhaneli Termik Santrali'nden elde edilmiştir. 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 üretilmesine 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. Bütün bu özelliklere sahip bir malzeme üretebilmek için; termik santral uçucu külü (OUK), çimento, polistiren köpük daneleri ve su karıştırılmıştır.

4.2.1. Karışımda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

4.2.1.1. Termik Santral Uçucu Külü

Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri 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.

- Portland çimentosuna ek olarak kullanılan uçucu kül betonun işlenebilirliğini artırır.
- İçinde uçucu kül kullanılan betonlar genellikle daha az segregasyona uğrarlar.
- Uçucu kül kullanımı hidratasyon 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 rötre 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

Uçucu küller kimyasal özelliklerine göre F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılır. 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 Tablo 4.1'de verilmiştir.

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-linyit) 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 4.1 Orhaneli uçucu külünün (OUK) değişik tarihlerde elde edilen kimyasal analiz sonuçları (Haşal, 2000)

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	6.30	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 4.2 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), katılmış 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.

4.2.1.2. Portland Çimentosu

Üretilcek uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarındaki çimento oranını belirleyebilmek için klinker oranı % 100 olan Portland çimentosu (PÇ 42.5) kullanılmıştır. PÇ 42.5'in standart değerleri Tablo 4.3'de, kimyasal özellikleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.3 PÇ 42.5'un standart değerleri (Haşal, 2000)

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 4.4 PÇ 42.5'un kimyasal özellikleri (Haşal, 2000)

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

4.2.1.3. Polistiren Köpük Daneleri

Hafif dolgu malzemesi üretebilmek için polistiren köpük daneleri kullanılmıştır. Polistiren köpük danelerinin kullanılması, uçucu kül - çimento karışımının yoğunluğunu azaltacaktır. Yapılan elek analizi sonucunda deneyde kullanılan köpük danelerinin boyutlarının 2.00 - 4.75 mm arasında değişmekte olduğu bulunmuştur.

Polistiren köpüğünün en önemli özellikleri şunlardır:

- Çok düşük su emmesi olan kapalı hücre yapısı
- Dona dayanıklı olması ve çürümemesi
- Biyolojik olarak zararsız (yeraltı suyuna zararlı etkisi yok)
- Uzun süreli statik ve dinamik yükleme altında iyi performans göstermesi

4.2.2. Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımının Hazırlanması

Orhaneli uçucu külünün ortalama dane çapı (D_{50}) 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 polistiren köpük daneleri eklenmiştir. Polistiren köpük daneleri karışımın yoğunluğunu azaltacaktır. Karışıma çimento katılmasının birinci amacı; malzemenin priz süresini azaltmak, ikinci amacı; belirli dayanımı sağlamak için kullanılacak uçucu kül miktarını, daha az miktarda Portland çimentosu katarak, karışımın yoğunluğunu düşürmektir. 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, polistiren köpük daneleri ve suyun karışım oranlarının belirlenmesi için hazırlık niteliğinde deneyler yapılmıştır. Numunelerin hazırlanması aşamasında ilk olarak çimento, uçucu kül ve polistiren köpük daneleri karıştırılmış, daha sonra su ilave edilerek çözelti belirli bir süre spatula ile 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 dayanımları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Hazırlık aşamasında karışımın spatula ile karıştırılması genel fikir vermekle birlikte karışımın iyi bir şekilde karıştırılmasını sağlayamamıştır. Spatula yerine mikser kullanılması daha uygun olmuştur. Çünkü mikser, hem kendi ekseni hem de çözeltinin içine konulduğu kabın etrafında dönebilmektedir. Karıştırma biçiminin değişmesi sebebiyle, hazırlık niteliğindeki deneylerde elde edilen karışım oranları kullanılarak yeni deneyler yapılmıştır. Daha sonra, elde edilen karışımların karakteristik özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmıştır.

Tablo 4.5 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 _n (Mpa)			
PÇ 42.5	OUK	Köpük	Su				Alt	Orta	Üst	Ort.
9	58	1.8	31.2	2.5	8.75	8.62	0.21	-	0.19	0.20
11	56	1.8	31.2	2.5	8.76	8.64	0.23	0.22	0.20	0.22
13	54	1.8	31.2	2.5	8.83	8.71	0.24	0.23	0.23	0.23
15	52	1.8	31.2	2.5	8.87	8.74	0.23	0.23	0.23	0.23
17	50	1.8	31.2	2.5	8.79	8.67	0.28	0.29	0.27	0.28
19	48	1.8	31.2	2.5	8.63	8.51	0.28	0.27	0.26	0.27
21	46	1.8	31.2	2.5	8.95	8.83	0.29	0.28	0.28	0.28
23	44	1.8	31.2	2.5	9.03	8.89	0.30	0.33	0.29	0.31
25	42	1.8	31.2	2.5	9.01	8.89	0.32	0.31	0.29	0.31
27	40	1.8	31.2	2.5	9.07	8.93	0.33	0.32	0.31	0.32
29	38	1.8	31.2	2.5	9.04	8.91	0.32	0.31	0.31	0.31
31	36	1.8	31.2	2.5	8.93	8.80	0.36	0.34	0.33	0.34
33	34	1.8	31.2	2.5	8.96	8.84	0.28	0.31	0.31	0.30
33.5	33.5	1.8	31.2	2.5	8.84	8.69	0.36	0.34	0.36	0.35
-	67	1.8	31.2	2.5	9.36	9.24	0.30	0.30	0.35	0.32
67	-	1.8	31.2	2.5	8.89	8.74	>0.45	>0.45	>0.45	>0.45
19	48	1.8	31.2	2.5	11.26	11.13	0.27	-	0.23	0.25
21	46	1.8	31.2	2.5	11.41	11.25	0.28	0.25	0.27	0.27
23	44	1.8	31.2	2.5	11.52	11.36	0.36	0.33	0.31	0.33
25	42	1.8	31.2	2.5	11.48	11.32	0.36	0.35	0.35	0.35
19	48	1.8	31.2	2.5	9.47	9.36	0.28	0.26	0.25	0.26
21	46	1.8	31.2	2.5	9.53	9.42	0.28	0.24	0.25	0.26
23	44	1.8	31.2	2.5	9.76	9.64	0.28	0.28	0.28	0.28
25	42	1.8	31.2	2.5	9.72	9.61	0.27	0.29	0.27	0.28

Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarındaki ağırlıkça malzeme oranları Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6 Uçucu kül-çimento-polistiren köpük daneleri karışımlarının içinde kullanılan malzemelerin ağırlıkça oranları

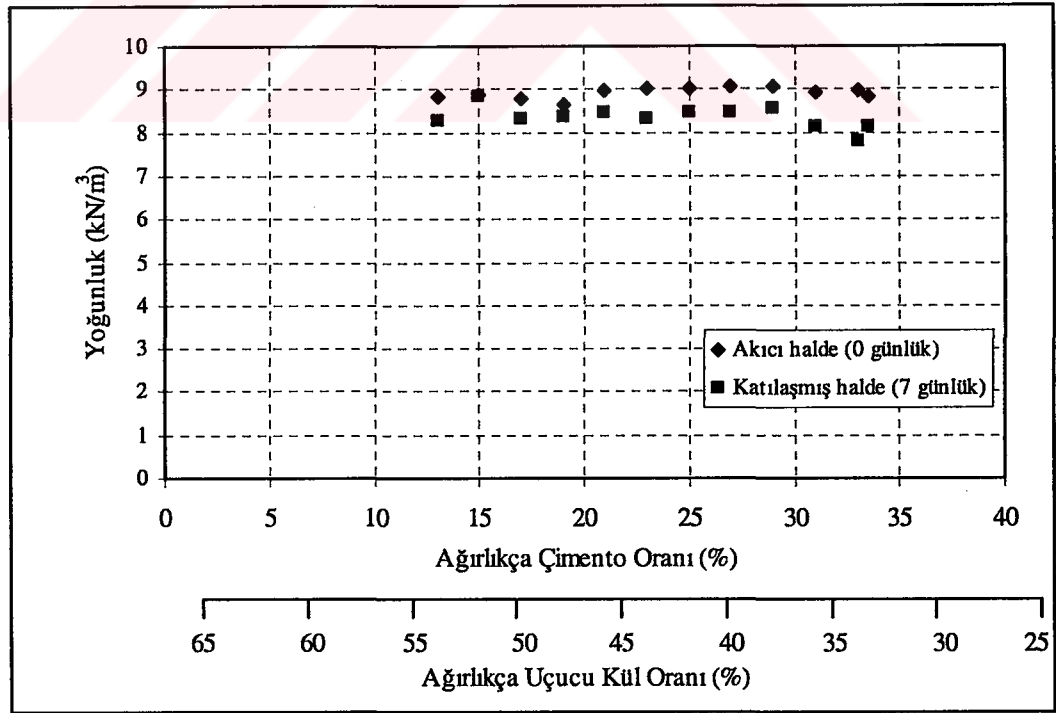
Karışım No	Karışımı Üretmek İçin Kullanılan Malzemelerin Ağırlıkça Oranları (%)				Optimum Karıştırma Süresi (dak.)
	PÇ 42.5	OUK	Köpük	Su	
1	13	54	1.8	31.2	30
2	15	52	1.8	31.2	30
3	17	50	1.8	31.2	30
4	19	48	1.8	31.2	30
5	21	46	1.8	31.2	30
6	23	44	1.8	31.2	30
7	25	42	1.8	31.2	30
8	27	40	1.8	31.2	30
9	29	38	1.8	31.2	30
10	31	36	1.8	31.2	30
11	33	34	1.8	31.2	30
12	33.5	33.5	1.8	31.2	30

Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımı hazırlanırken bir tepsi içerisinde önce uçucu kül, çimento ve polistiren köpük daneleri bir spatula yardımı ile bir süre karıştırılmış daha sonra mikserde konularak su ilave edilmiştir. Daha sonra malzemeler mikserde 30 dakika birlikte karıştırılmıştır. En uygun karıştırma süresi, karışımın yoğunluğunun zamana bağlı değişimi gözönüne alınarak belirlenmiştir. Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımı, akışkan haldeyken maksimum yoğunluğa sahiptir. Karışım katılaştıkça yoğunluğu azalmaktadır. Tablo 4.7’de, üretilen karışımların akışkan ve katı haldeki (üretildikten 7 gün sonra)

yoğunlukları ve bunlarla ilgili değerler, üretilen karışımların yoğunluklarıyla ilgili standart sapma değerleri verilmiştir.

Tablo 4.7 Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri 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	8.83	8.91	0.13	8.27	8.34	0.26
2	8.87			8.83		
3	8.79			8.33		
4	8.63			8.37		
5	8.95			8.47		
6	9.03			8.29		
7	9.01			8.45		
8	9.07			8.46		
9	9.04			8.55		
10	8.93			8.14		
11	8.96			7.79		
12	8.84			8.11		

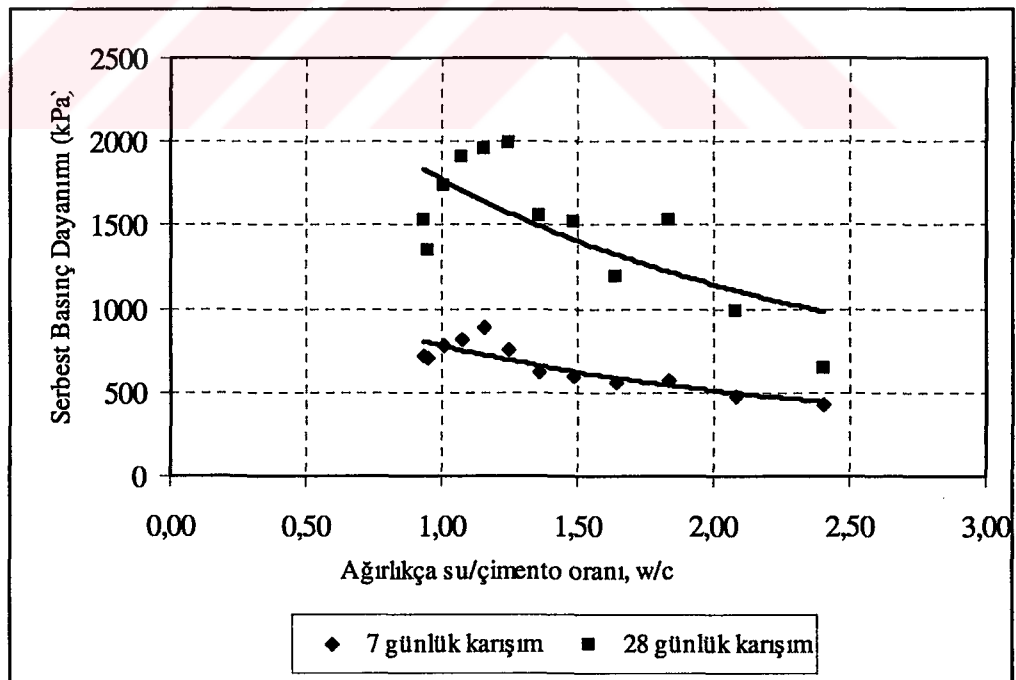


Şekil 4.1 Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarının yoğunluklarının ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi

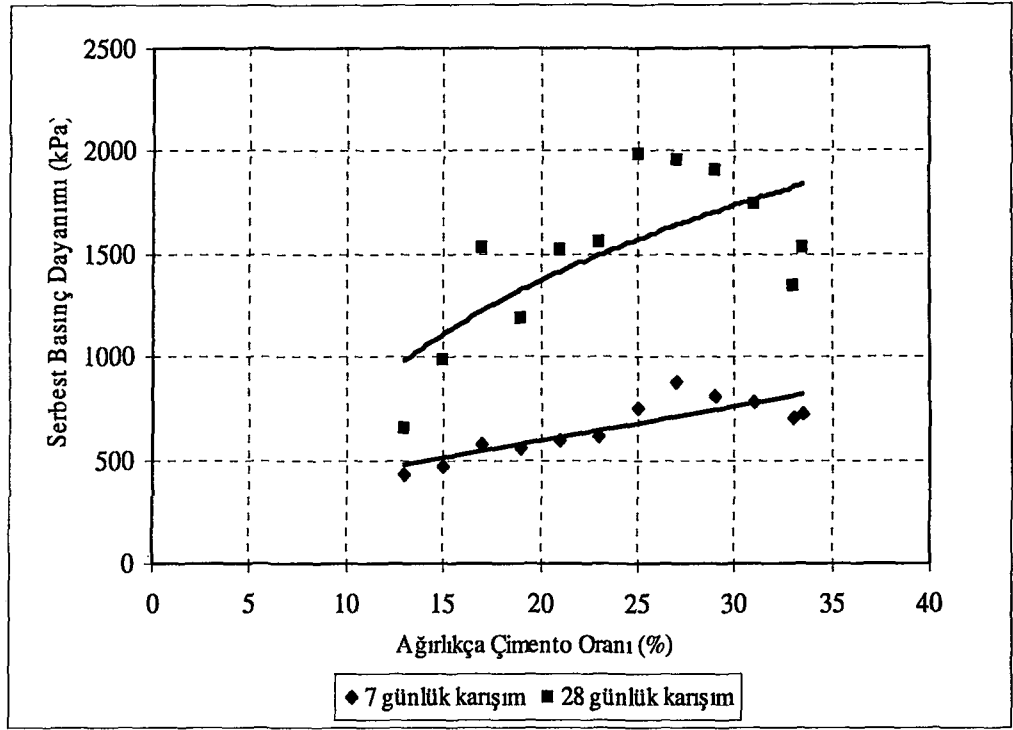
Çimento ve uçucu külün dane birim hacim ağırlıklarının ve dane boyutlarının birbirine yakın değerlere sahip olması ve karışımlarda kullanılan toplam katı madde, polistiren köpük ve su miktarının sabit kalması, karışımların yoğunluklarının birlikte değerlendirilmesine imkan verir. Şekil 4.1’de, uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarının yoğunluklarının, ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranlarına bağlı değişimi, karışımların akıcı ve katılaşmış (7 günlük) halleri için birlikte verilmiştir.

4.2.3. Uçucu Kül – Çimento – Polistiren Köpük Daneleri Karışımları Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deneyleri

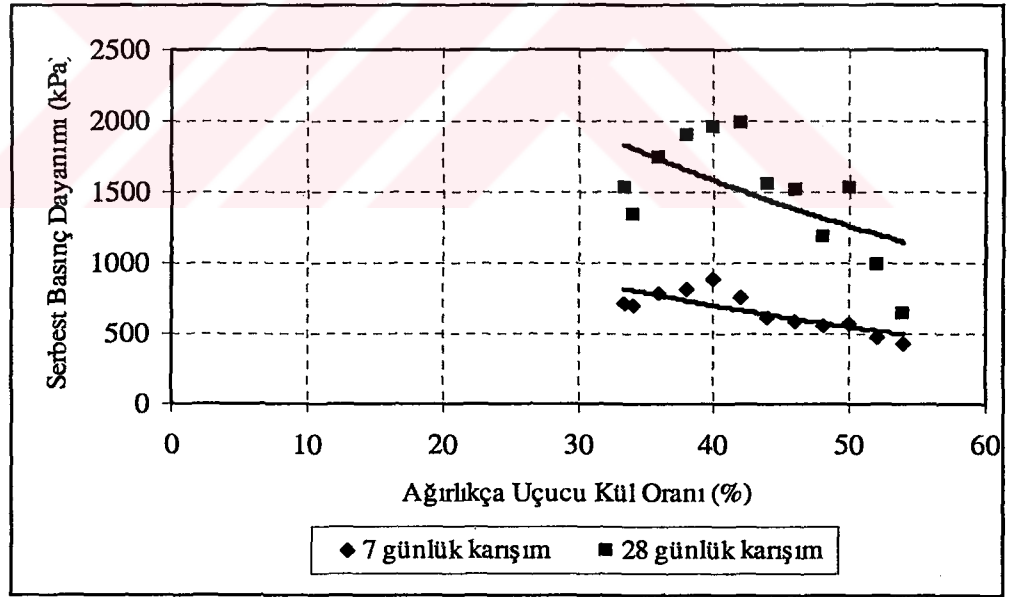
Tablo 4.7’de verilen karışım oranları kullanılarak üretilen uçucu kül-çimento-köpük karışımları 43 mm ve 50 mm çapında su sızdırmaz kalıplara (mika borular) döküldükten sonra 7 gün nem odasında bekletilmiştir. Kullanılan kalıplar, polistiren köpük danelerinin kesilememesi ve numunenin dağılması nedeniyle gerekli boyutlarda kesilerek deneye devam edilmiştir. Numuneler, 1 gün sonra mika borulardan çıkarılmış, traşlanarak gerekli boyutlara getirilmiş, 7 gün ve 28 gün sonra deneye tabi tutulmak üzere streç filme sarılarak tekrar nem odasına konulmuştur.



Şekil 4.2 Uçucu Kül - çimento – polistiren köpük daneleri karışımlarının 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının ağırlıkça su/çimento oranına bağlı değişimi



Şekil 4.3 Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarının 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının ağırlıkça çimento oranına bağlı değişimi



Şekil 4.4 Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarının 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının ağırlıkça uçucu kül oranına bağlı değişimi

Serbest basınç deneyleri, üç eksenli basınç aletlerinde 1.5 mm/dak yükleme hızı altında yapılmıştır. Ek A'da serbest basınç deneylerine ait grafikler verilmiştir. Üretilen karışımların 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının ağırlıkça çimento,

ağırlıkça su/çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir.

Çimento ve uçucu kül suyla birleştiklerinde (hidratasyon süreci), ekzotermik reaksiyon meydana gelir ve ısı açığa çıkar. Bu nedenle karışımdaki suyun bir kısmı buharlaşır. Suyun geri kalan kısmı bağlayıcı jelleri (tobermorit vb.) oluşturup, karışımın katılaşmasını ve dayanım kazanmasını sağlar.

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 4.8’da, karışımların Elastisite Modülü (E) ve ϵ_f değerleri birlikte verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.5’de, üretilen karışımların Elastisite Modülü değerlerinin ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranına bağlı değişimi verilmiştir.

Tablo 4.8 Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri 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	3.Deney	E _{ort}	1.Deney	2.Deney	3.Deney	ϵ_{fort}	E _{ort}	ϵ_{fort}
1	12.91	12.58	28.69	18.06	3.50	3.25	1.45	2.73	18.21	4.36
2	12.53	17.04	15.85	15.14	3.75	2.50	3.25	3.17	26.02	4.00
3	13.86	16.42	15.71	15.33	4.07	3.49	3.78	3.78	21.44	5.23
4	20.08	15.48	15.23	16.93	1.25	3.25	4.00	2.83	43.68	2.83
5	21.28	19.93	19.50	20.24	3.20	2.91	2.62	2.91	58.62	2.67
6	25.17	21.88	22.80	23.28	2.03	3.25	2.75	2.68	62.04	3.00
7	16.52	14.51	24.34	18.46	4.94	4.50	3.25	4.23	56.77	3.50
8	31.09	30.00	25.31	28.80	2.75	3.00	3.50	3.08	48.24	4.17
9	42.95	19.05	31.80	31.27	2.00	4.00	2.25	2.75	63.54	3.00
10	25.76	36.68	25.88	29.44	2.62	2.50	2.91	2.68	64.19	2.69
11	21.28	21.51	48.13	21.39	3.20	3.25	1.50	2.65	51.26	2.62
12	25.80	28.59	25.32	26.57	3.00	2.62	2.50	2.71	51.08	2.98

4.3. Belirlenen (1 No'lu) Uçucu Kül - Çimento - Polistiren Köpük Daneleri Karışımı Üzerinde Yapılan Deneyler

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. Ağırılıkça en az çimento kullanılan, dayanımı en düşük olan, 1 no'lu karışımın üretilmesine karar verilmiştir.

4.3.1 Serbest Basınç Deneyleri

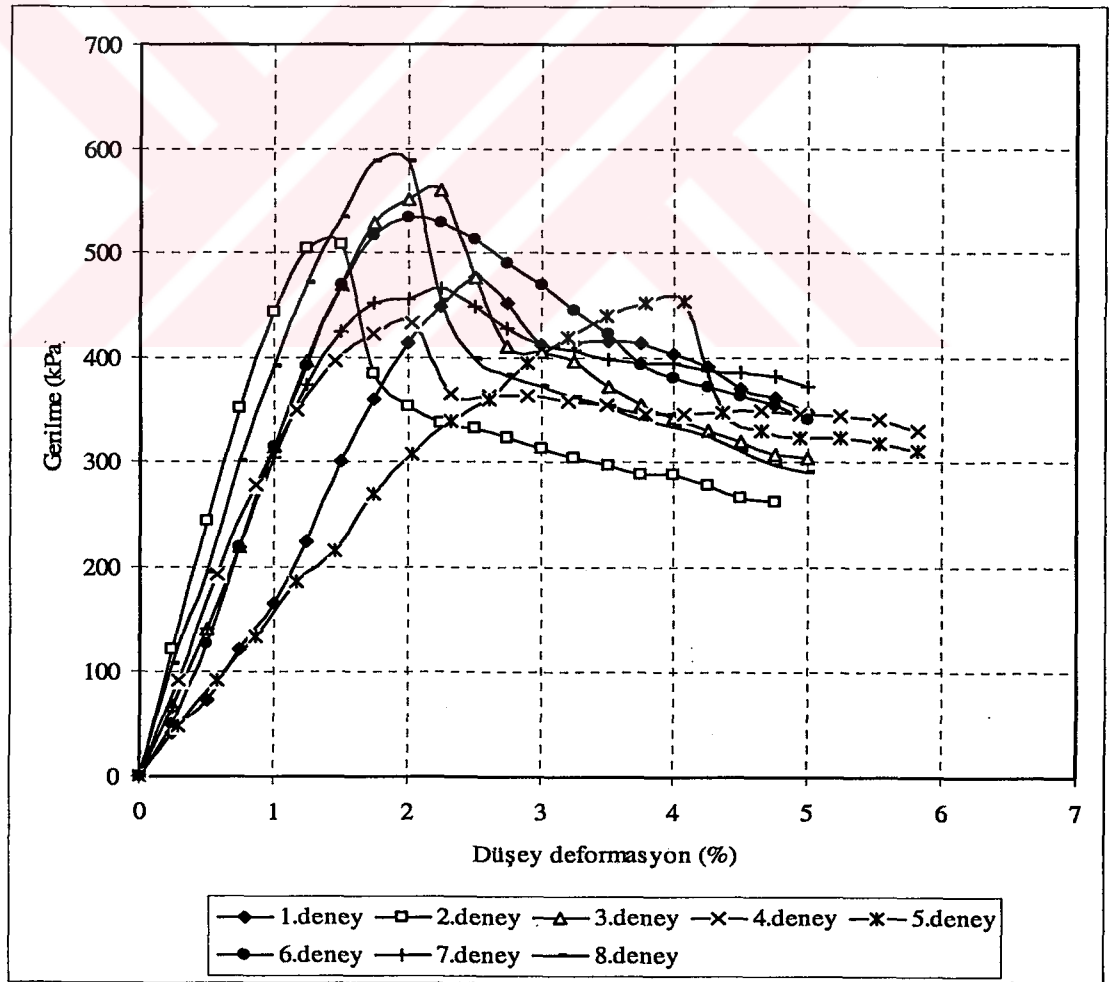
Daha önce üretilen 1 no'lu uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde çok sayıda deney yapılarak çok sayıda numune üretilmiştir. Numuneler daha sonra 4.2.3'de anlatıldığı gibi deney yapılmaya hazır hale getirilmiş ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4.5'da, 1 no'lu karışımın üretiminden 7 gün sonra yapılan deneylerle elde edilen gerilme-düşey deformasyon eğrileri gösterilmiştir. Tablo 4.9'da, 1 no'lu karışım kullanılarak yapılan 8 deneyden elde edilen 7 günlük serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Tablo 4.10'da, 1 no'lu karışımın 7 günlük gerilme-düşey deformasyon bağıntıları kullanılarak elde edilen Elastisite Modülü (E) ve gerilmenin maksimumuna ulaştığı andaki düşey deformasyon (ϵ_f) değerleri verilmiştir.

Tablo 4.9 1 No'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımının 7 günlük serbest basınç dayanımı değerleri

Deney No	1 No'lu Karışım (7 günlük)		
	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Standart Sapma (kPa)	Ortalama/Karakteristik Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
1	476.13	54.39	501.87 / 447.48
2	507.46		
3	558.49		
4	433.33		
5	452.83		
6	533.60		
7	465.41		
8	587.74		

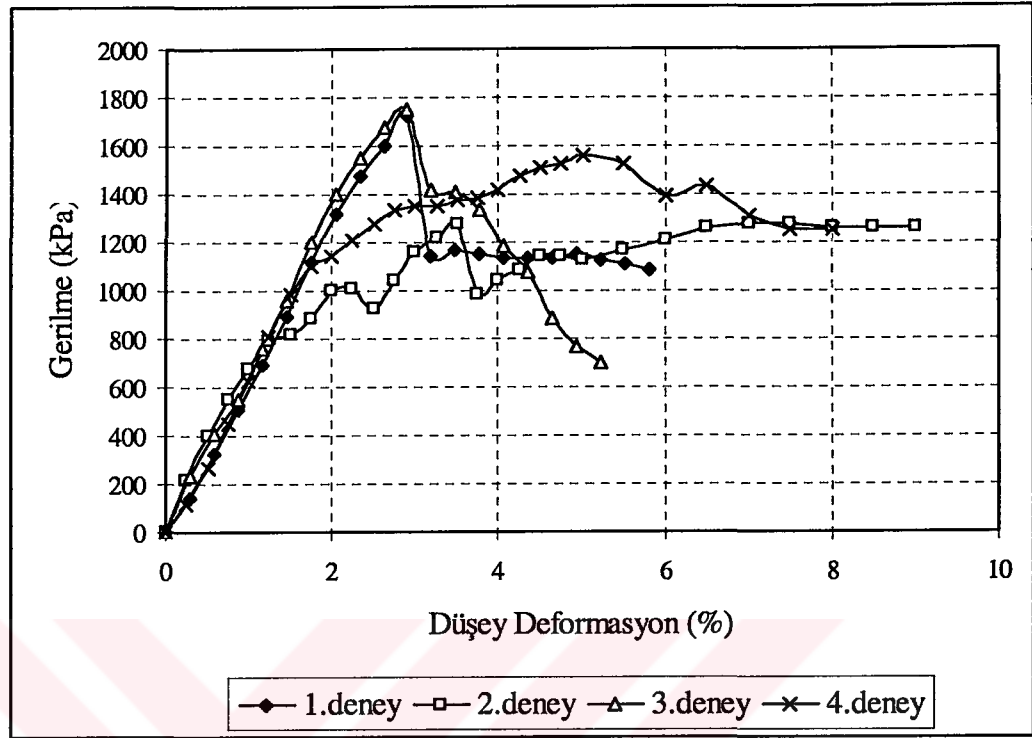
Tablo 4.10 1 No'lu karışımın 7 günlük Elastisite Modülü ve ϵ_f değerleri

Deney No	1 No'lu Karışım			1 No'lu Karışım		
	7 Günlük Elastisite Modülü, E (MPa)	Standart Sapma (MPa)	Ortalama / Karakteristik Elastisite Modülü (MPa)	7 Günlük ϵ_f değeri (%)	Standart Sapma (%)	Ortalama / Karakteristik ϵ_f (%)
1	19.04	7.60	23.88 / 16.28	2.50	0.78	2.29 / 1.51
2	33.80			1.50		
3	24.80			2.25		
4	21.33			2.03		
5	11.13			4.07		
6	26.70			2.00		
7	20.67			2.25		
8	33.60			1.75		



Şekil 4.5 1 no'lu karışımın gerilme-düşey deformasyon eğrileri (7 Günlük)

Şekil 4.6’de, 1 no’lu karışımın üretimden 28 gün sonra yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme düşey deformasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.6 1 no’lu karışımın üretiminden 28 gün sonra yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme-düşey deformasyon eğrileri

Tablo 4.11’de, 1 no’lu karışım kullanılarak yapılan 4 deneyden elde edilen 28 günlük serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Tablo 4.12’de ise, 1 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 verilmiştir. 1 no’lu karışım kullanılarak yapılan 7 ve 28 günlük serbest basınç deneylerine ait grafikler Ek B’de verilmiştir.

Tablo 4.11 1 no’lu karışımın 28 günlük serbest basınç dayanımı değerleri

Deney No	1 No’lu Karışım (28 Günlük)		
	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Standart Sapma (kPa)	Ortalama/Karakteristik Basınç Dayanımı (kPa)
1	1724.29	216.64	1576.71 / 1299.41
2	1277.07		
3	1746.73		
4	1558.76		

Tablo 4.12 1 no'lu karışımın 28 günlük Elastisite Modülü (E) ve ϵ_f değerleri

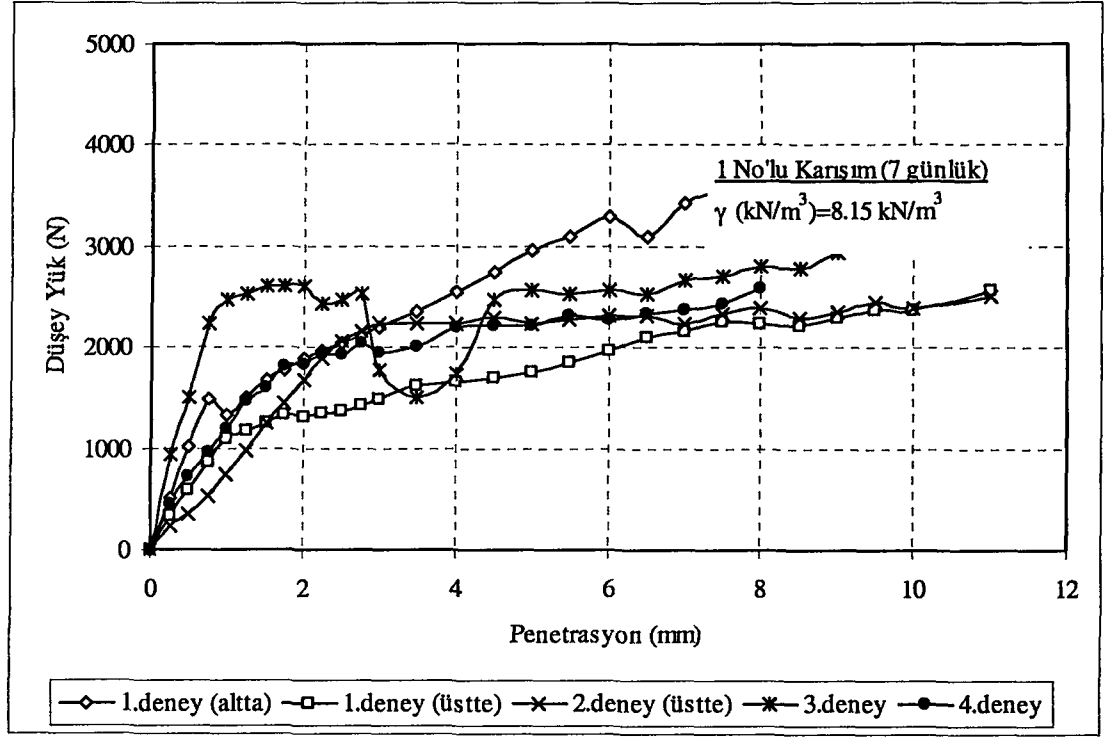
Deney No	1 No'lu Karışım			1 No'lu Karışım		
	28 Günlük Elastisite Modülü, E (MPa)	Standart Sapma (MPa)	Ortalama / Karakteristik Elastisite Modülü (MPa)	28 Günlük ϵ_f değeri (%)	Standart Sapma (%)	Ortalama / Karakteristik ϵ_f (%)
1	59.24	15.06	46.74 / 31.68	2.91	0.99	3.58 / 2.59
2	36.49			3.50		
3	60.03			2.91		
4	31.18			5.00		

4.3.2. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyleri

Tablo 4.7'de verilen karışım oranları kullanılarak üretilen uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımları, su sızdırmaz kalıplara (Modifiye Proktor Kalıpları) döküldükten sonra nem odasına konulmuştur. Katılan numuneler üzerinde 7 gün sonra CBR deneyi yapılmıştır. Yüklemeler 2 numune için kalıbın alt ve üst tarafında olmak üzere iki defa, diğer 2 numunenin ise sadece üst tarafında yapılmıştır. CBR deneyleri 1.5 mm/dak yükleme hızı altında yapılmıştır. CBR deneylerine ait grafikler Ek C'de verilmiştir. Şekil 4.7'de, 1 no'lu karışımın üretiminden 7 gün sonra yapılan deneylerden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri gösterilmiştir. Tablo 4.13'de, 1 no'lu karışım kullanılarak yapılan 4 deneyden elde edilen 7 günlük CBR deneyleri verilmiştir.

Tablo 4.13 1 No'lu karışımın 7 günlük CBR değerleri

Deney no	1 No'lu Karışım (7 Günlük)			
	Kalıbın Alt Kısımında	Kalıbın Üst Kısımında		
	CBR (%)	CBR (%)	Standart Sapma (%)	Ortalama / Karakteristik CBR Değeri (%)
1	14.96	10.06	2.49	13.66 / 11.17
2	-	14.68		
3	-	15.79		
4	-	14.11		



Şekil 4.7 1 No'lu karışımın üretiminden 7 gün sonra yapılan CBR deneyinden elde edilen düşey yük – penetrasyon eğrileri

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımının hafif dolgu malzemesi olarak uygunluğu araştırılmıştır. Uçucu kül, çimento ve polistiren köpük daneleri kullanılarak yapılan hazırlık niteliğinde deneyler sonucunda, homojen, zemin dolgularında kullanmak için yeterli mukavemet ve dayanıklılığa sahip uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımların genel özellikleri şöyledir:

- Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarında kullanılan ağırlıkça toplam uçucu kül ve çimento oranı % 67, su oranı % 31.2, polistiren köpük daneleri oranı % 1.8'dir.
- Karışımlarda uçucu kül ve çimento oranı her zaman sabit kalmış, bununla birlikte ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranları kendi aralarında değişmiştir. Ağırlıkça çimento oranı en az % 13, en çok % 33.5 olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça uçucu kül oranı en az % 33.5, en çok % 54 olarak kullanılmıştır.
- Karışımlarda çimento ve uçucu kül dışında herhangi bir agrega kullanılmamıştır. Bunun nedeni homojenliğin sağlanması ve karışımların dayanımlarının gereksiz yere yüksek olmasının istenmemesindendir.
- Karışımlarda çimento oranı arttıkça, karışımların mukavemetinde artış gözlenmiştir. Belirlenen 1 No'lu karışımda kullanılan ağırlıkça çimento oranı % 13 (106 kg/m^3) ve uçucu kül oranı % 54 (440 kg/m^3)'dür. 7 günlük basınç dayanımları 500 kPa; elastisite modülleri 24 MPa ve 28 günlük serbest basınç dayanımları 1700 kPa; elastisite modülleri 47 MPa olarak bulunmuştur.
- Karışımlarda kullanılan ağırlıkça çimento ve uçucu kül oranları kendi aralarında değişse bile, toplam katı madde oranı sabit kaldığı için karışımların yoğunluğu değişmemiştir. Elde edilen bütün uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımlarının üretimden 7 gün sonraki yoğunlukları 8.15 ile 8.50

kN/m^3 arasında değişmektedir. Mikserde optimum karıştırma süresi 30 dakika olarak bulunmuş, bu karıştırma süresi aşılsa bile karışımın yoğunluğunun fazla değişmediği gözlenmiştir.

- Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımı akıcıdır ve kolaylıkla pompalanabilir.
- Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımlarındaki çimento miktarını azaltarak ve uçucu kül miktarını artırarak daha ekonomik karışımlar elde edilebilir. Çimento miktarının azaltılmasıyla dayanımın değişmemesini sağlamak için uçucu kül miktarını arttırmak gerekecek ve böylece karışımın yoğunluğu da artacaktır.
- En ekonomik olduğu için seçilen 1 No'lu karışım üzerinde yapılan deney sonuçları, diğer hafif dolgu malzemelerinin fiziksel ve mühendislik özellikleriyle karşılaştırılmak üzere Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımının diğer hafif dolgu malzemeleriyle karşılaştırılması

Özellikler	Genleşmiş Polistiren Köpük (EPS)	Volkanik kül – Çimento – Köpük Karışımı	OUK – Çimento – Hava Sürükleyici Katkı Maddesi Karışımı (Haşal, 2000)	OUK – Çimento – Genleşmiş Polistiren Köpük Daneleri Karışımı
Basınç Dayanımı (kPa)	(20 – 100)* (70 – 190)**	150' 350"	200' 500"	500' 1700"
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	0.15 – 0.30	11.0	5.20 – 5.60	8.15 – 8.50
CBR (%)	<2	10.7"	2.5' (altta) 6.5' (üstte)	14.96' (altta) 13.66' (üstte)
Not : OUK – çimento – polistiren köpük daneleri karışımında ağırlıkça karışım oranları (OUK= % 54, Ç = % 13, Su = % 31.2, Polistiren Köpük Daneleri = % 1.8)				
(*) % 1 deformasyonda		() Üretimden sonra 7 gün nem odasında bekletilen numune		
(**) % 10 deformasyonda		(") Üretimden sonra 28 gün nem odasında bekletilen numune		

Uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı; 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 - polistiren köpük daneleri karışımı kullanılan yerlerde yatay basınçlar, karışımın hafifliği ve katılaştıktan sonra kendini tutması sebebiyle azalacaktır. Karışımın birim hacim ağırlığı doğal zeminlerin birim hacim ağırlığının yarısına eşit olduğu için, dolgu olarak kullanılması halinde alttaki zeminde oluşacak düşey basıncı, doğal dolgu malzemelerine göre yarıya indirecektir.



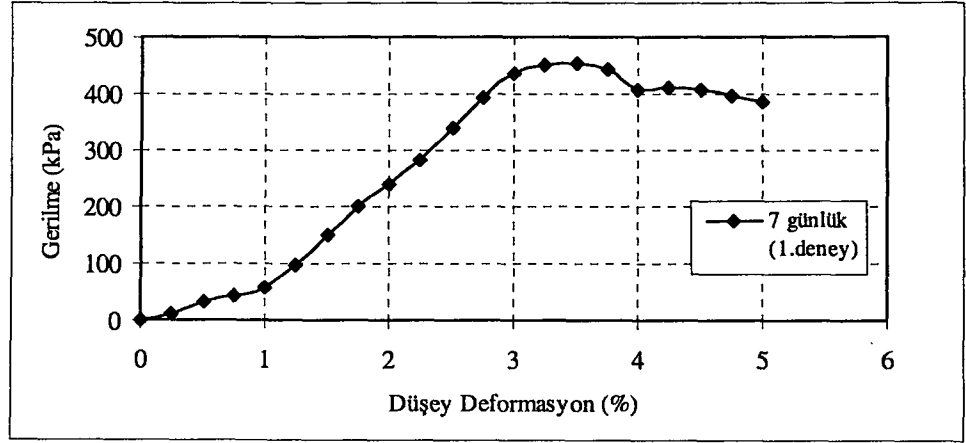
KAYNAKLAR

- Akman, M. S.**, 1990. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- 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.
- 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.
- Bowles, J. E.**, 1998. Engineering Properties of Soils and Their Measurement, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- 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, Cilt 2, s.450-459.
- Edil, T. B.**, 2002. Mechanical Properties and Mass Behavior of Shredded Tire – Soil Mixtures, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, Tokyo, Japan, March 26-27, pp. 17-33.
- 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., Halmwanger, J. D., Hendron, A. J. and Mesri, G., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Haşal, M. E.**, 2000. Uçucu Kül – Çimento – Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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.

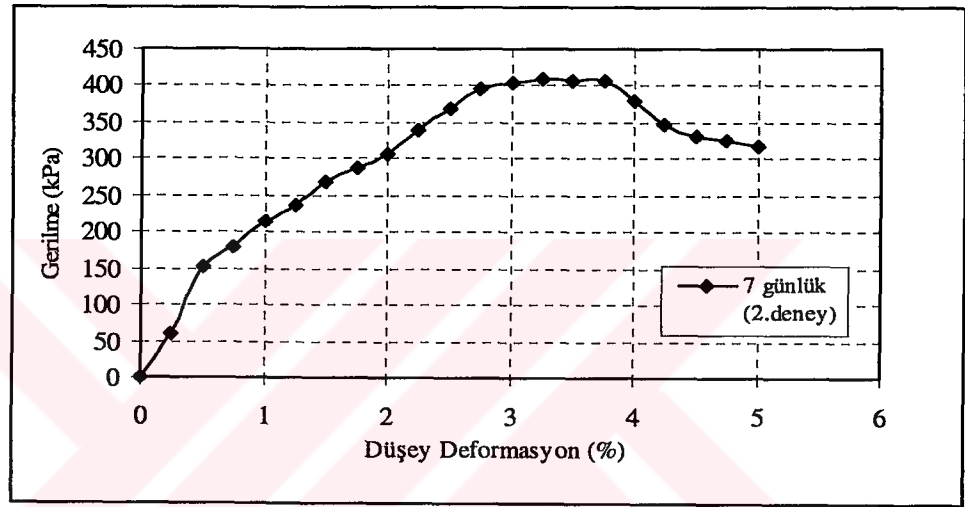
- Lambe, T. W. and Whitman R. V., 1969.** Soil Mechanics, John Wiley & Sons, U.S.A.
- Miki, H., 2002.** Cost Reduction Effect Due to Lightweight Embankment, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, Tokyo, Japan, March 26-27, pp. 1-17.
- Önalp, A., 1997.** Zeminler ve Mekaniği, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İstanbul.
- Önalp, A. ve Özocak, A., 1998.** Geoteknik Sözlüğü, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ekim 1998.
- Poran, C. J. and Ahtchi-Ali, F., 1989.** Properties of Solid Waste Incinerator Fly Ash, Journal of Geotechnical Engineering, August 1989, Vol. 115, No. 2, pp. 61-65.
- Sanders, R. L. and Snowdon, R. A., 1993.** Polystyrene as an Ultra-Lightweight Engineered Fill, Proceedings of the Conference Engineered Fills' 1993, 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.
- 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.
- Yasuhara, K., 2002.** Recent Japanese Experiences with Lightweight Geomaterials, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, Tokyo, Japan, March 26-27, pp. 35-60.
- Wu, Z., Yasuhara K., Niu H. and Yin J., 2002.** Modeling of Composite Lightweight Geomaterials, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, Tokyo, Japan, March 26-27, pp.143-151.
- TS-639, 1975.** Uçucu Küller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS-640, 1975.** Uçucu Küllü Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



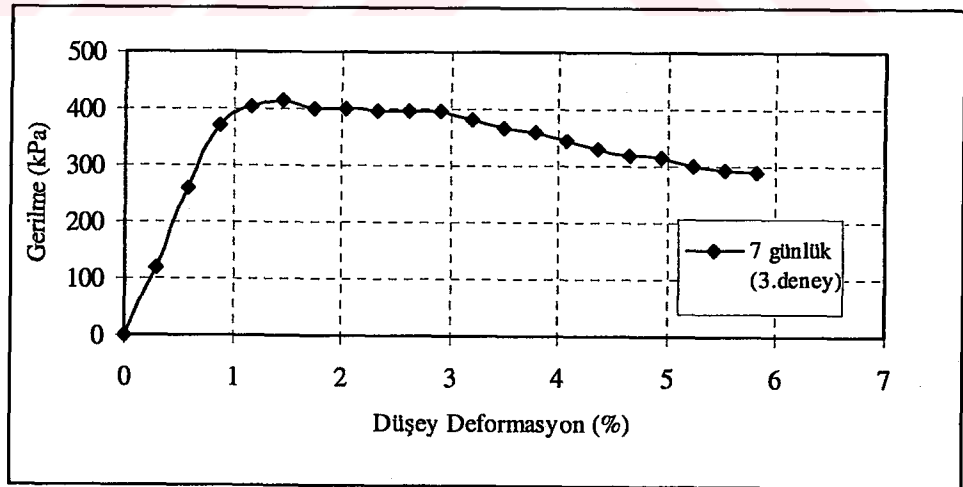
EKA



(a)

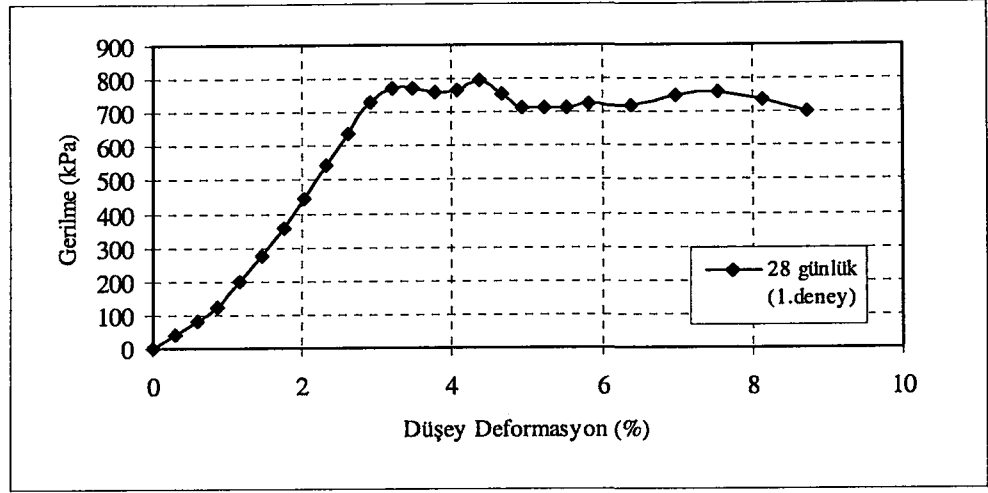


(b)

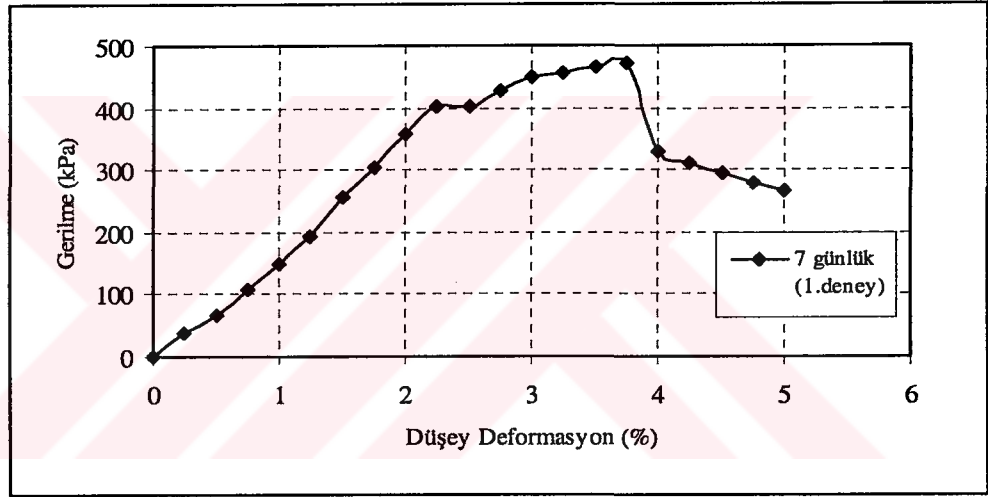


(c)

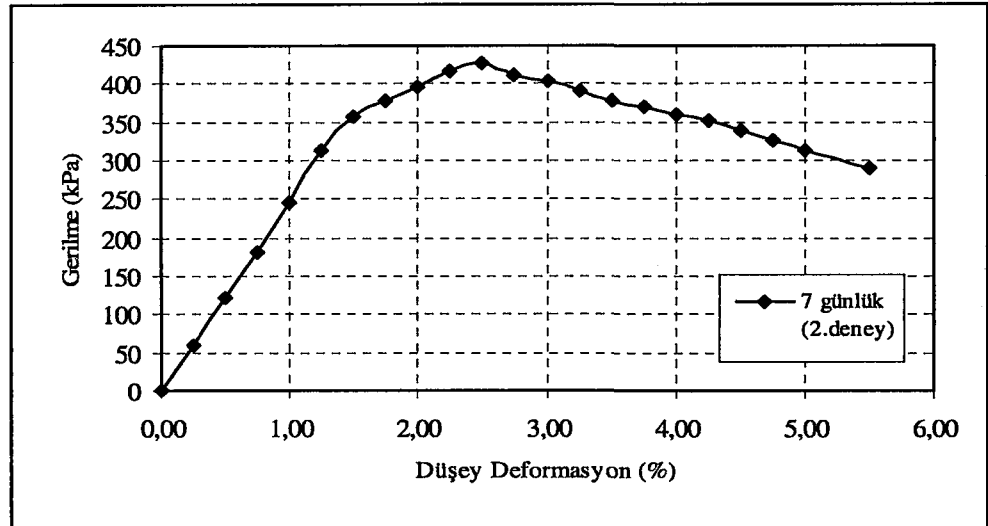
Şekil A.1 7 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



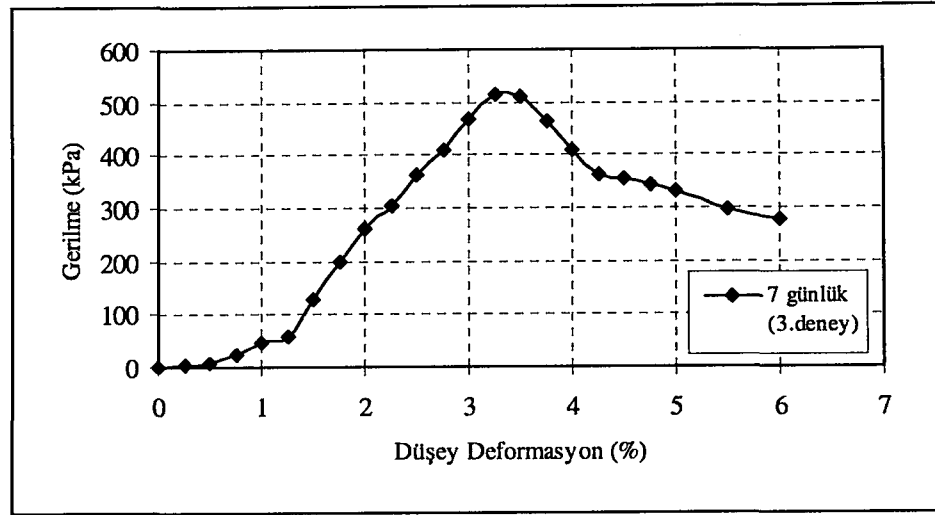
Şekil A.2 28 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

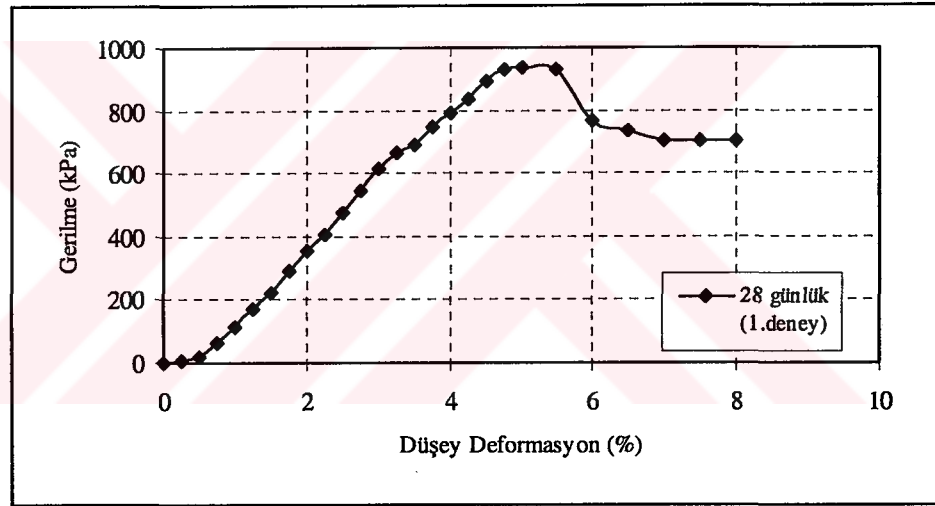


(b)

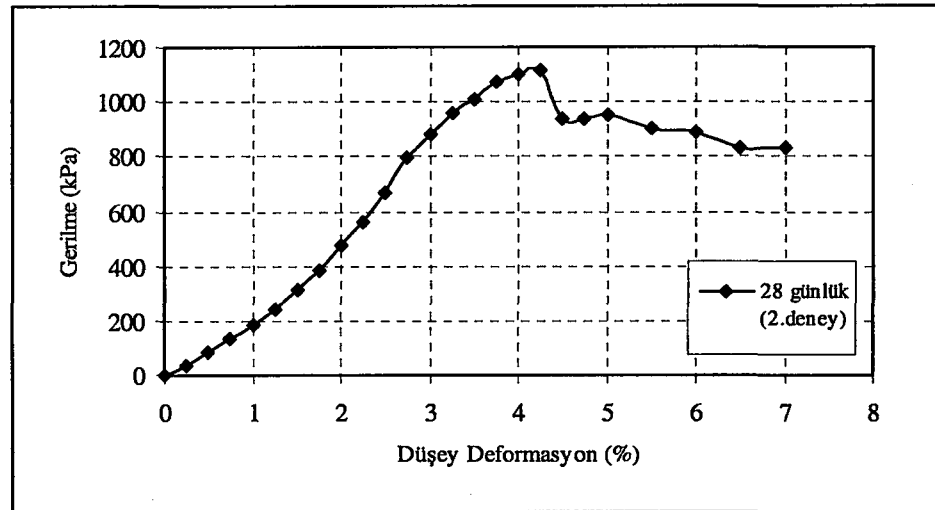


(c)

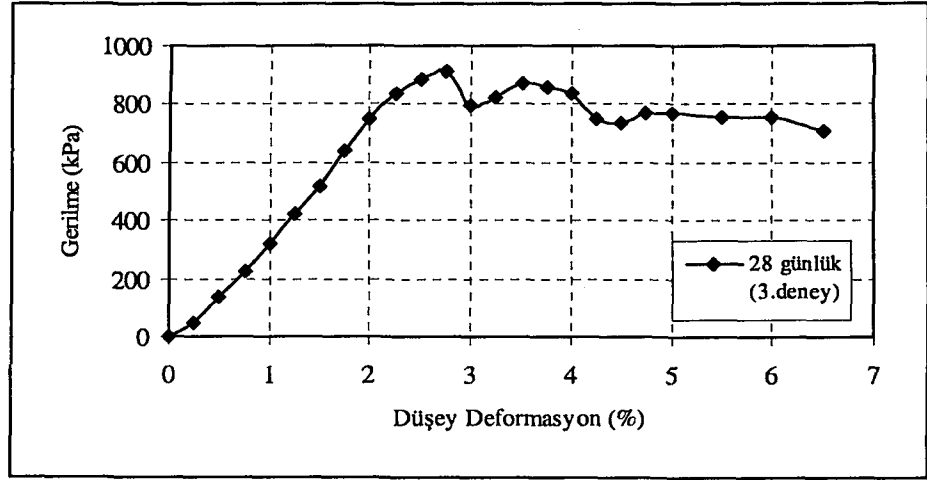
Şekil A.3 7 gün küre tabi tutulmuş 2 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

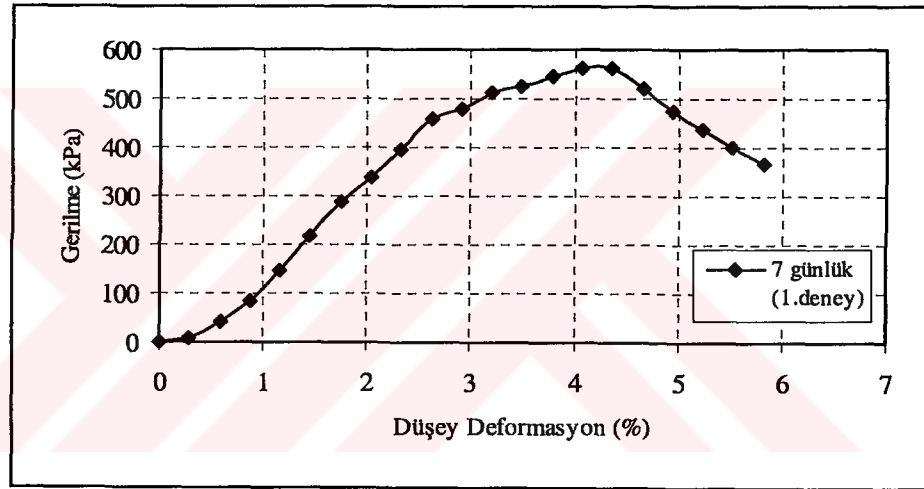


(b)

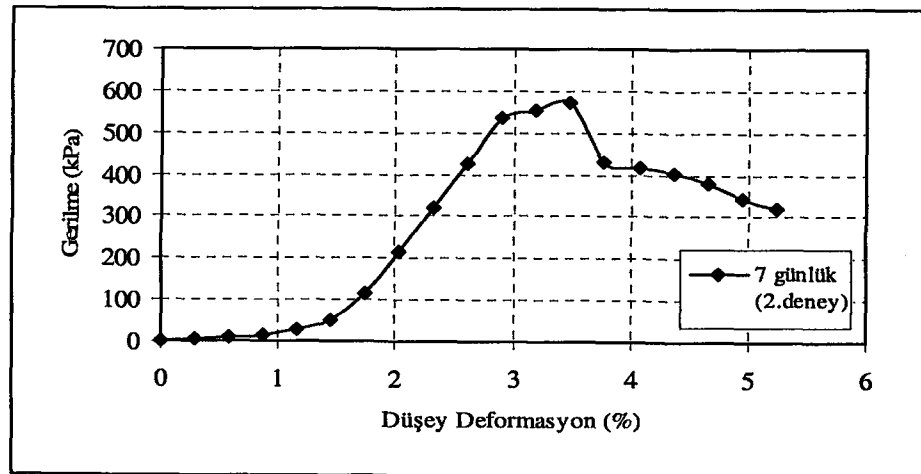


(c)

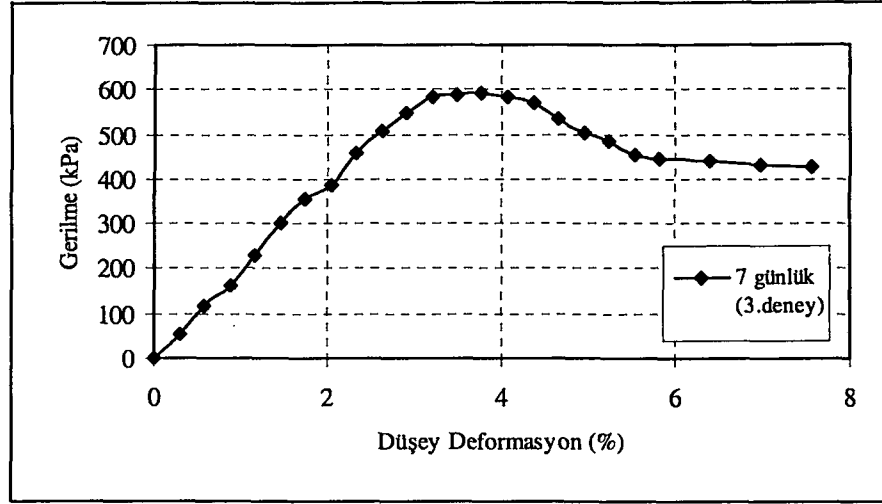
Şekil A.4 28 gün küre tabi tutulmuş 2 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

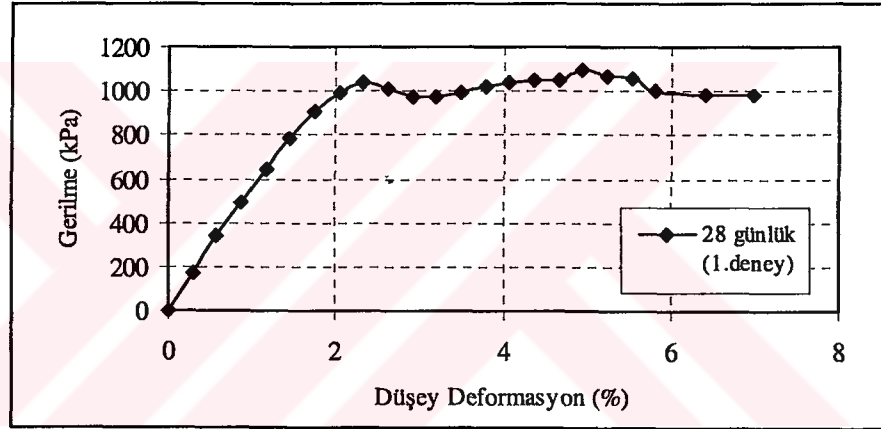


(b)

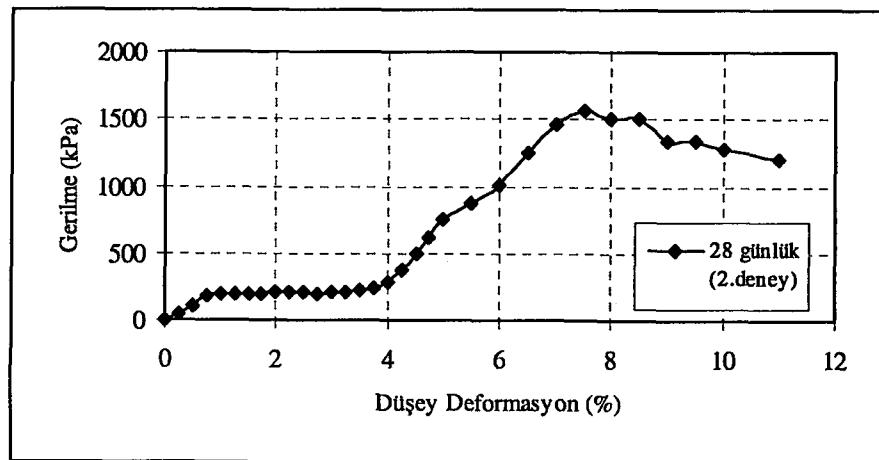


(c)

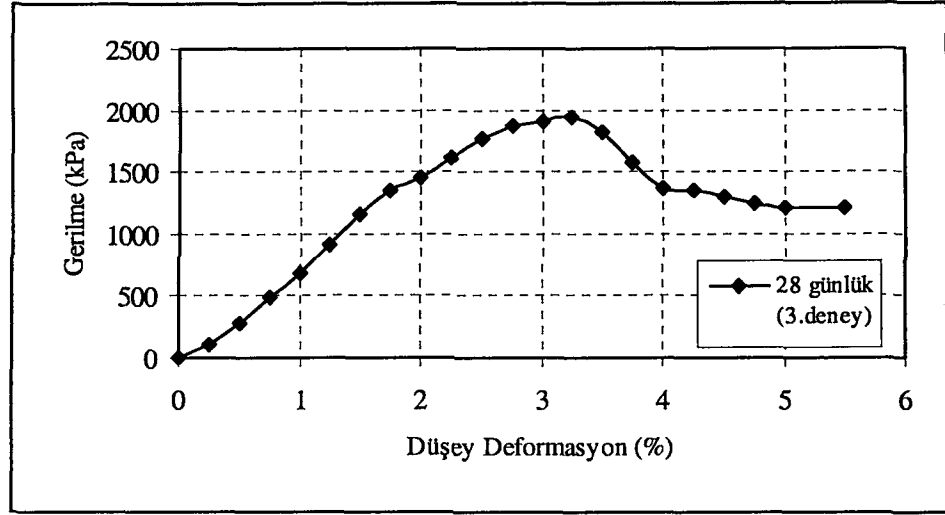
Şekil A.5 7 gün küre tabi tutulmuş 3 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

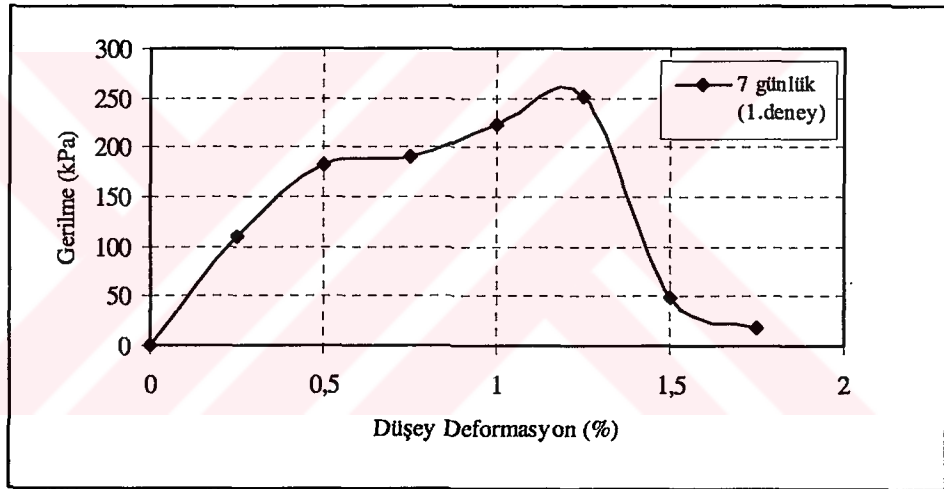


(b)

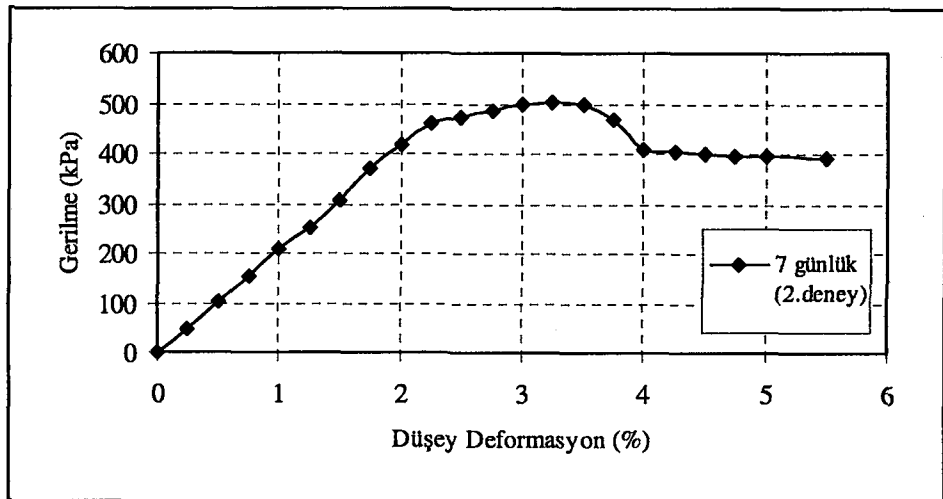


(c)

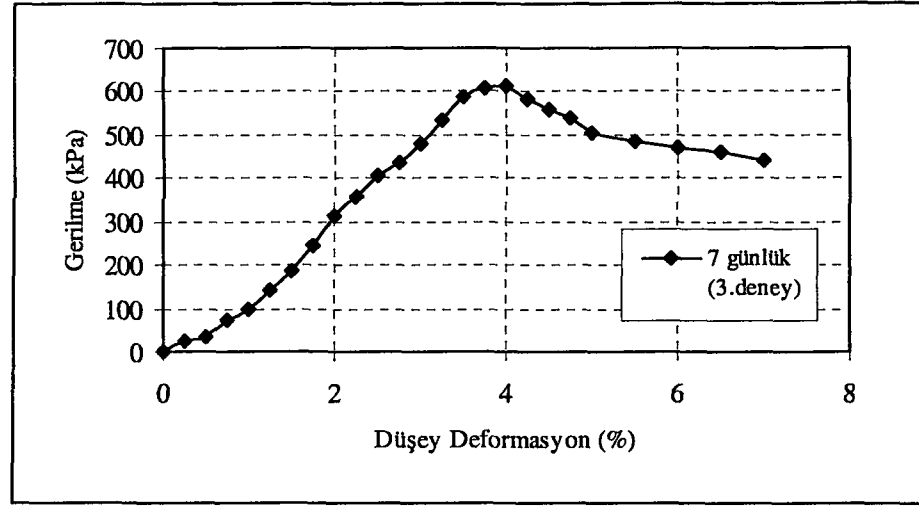
Şekil A.6 28 gün küre tabi tutulmuş 3 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

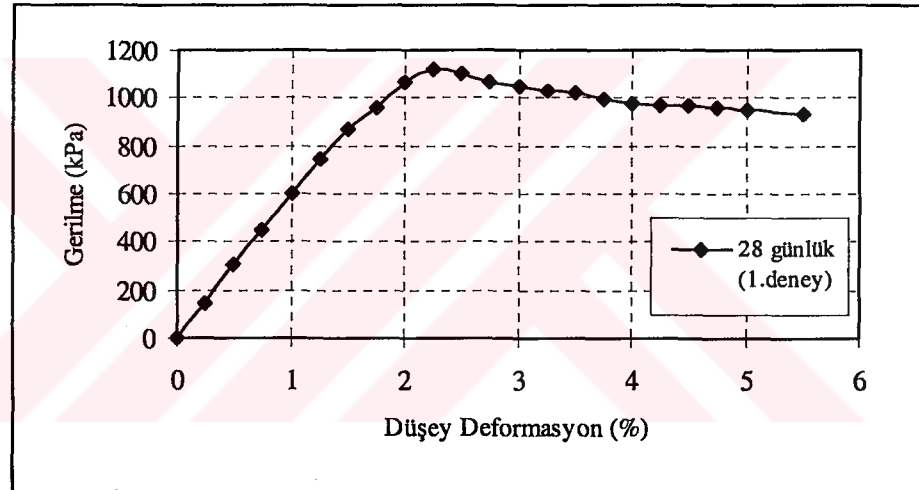


(b)

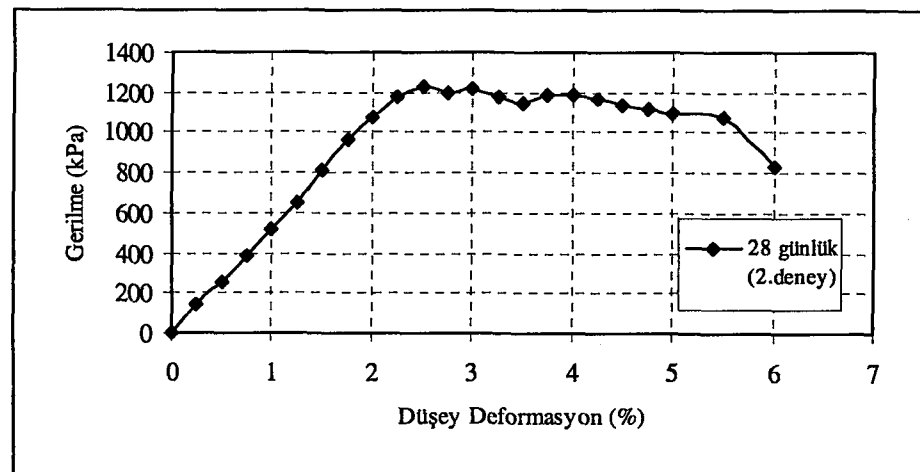


(c)

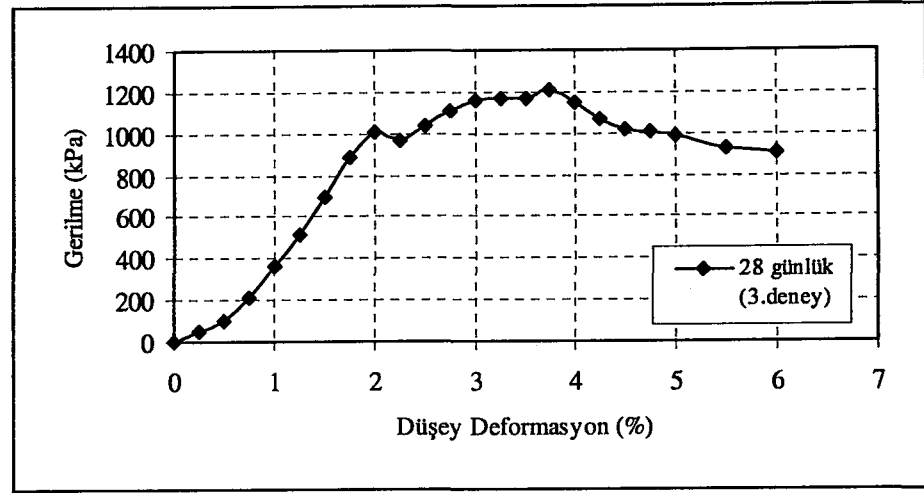
Şekil A.7 7 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

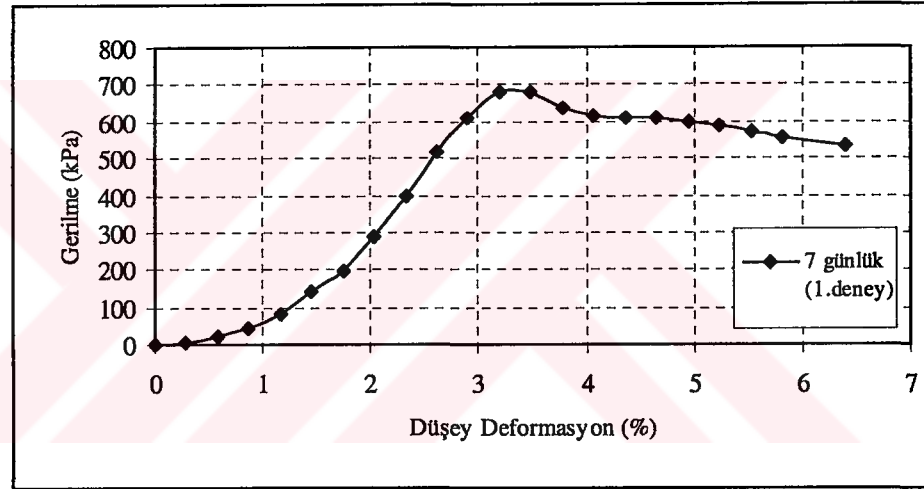


(b)

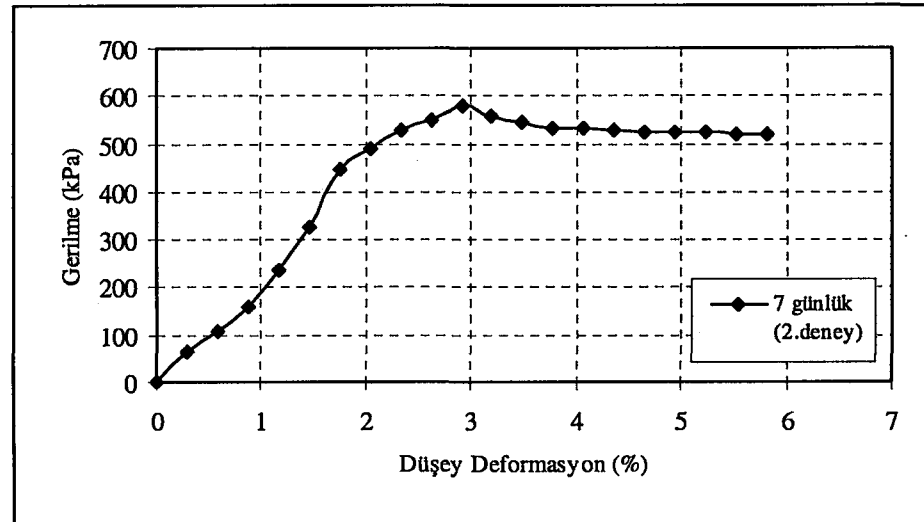


(c)

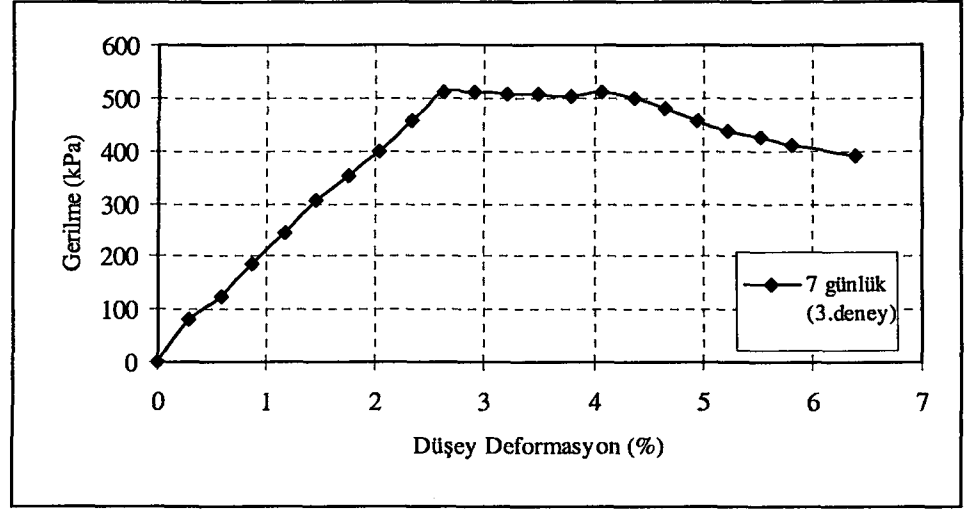
Şekil A.8 28 gün küre tabi tutulmuş 4 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

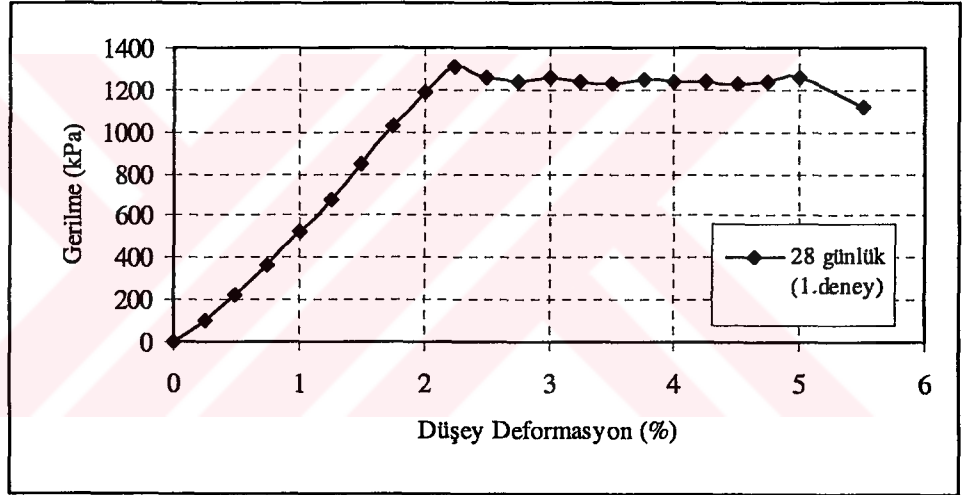


(b)

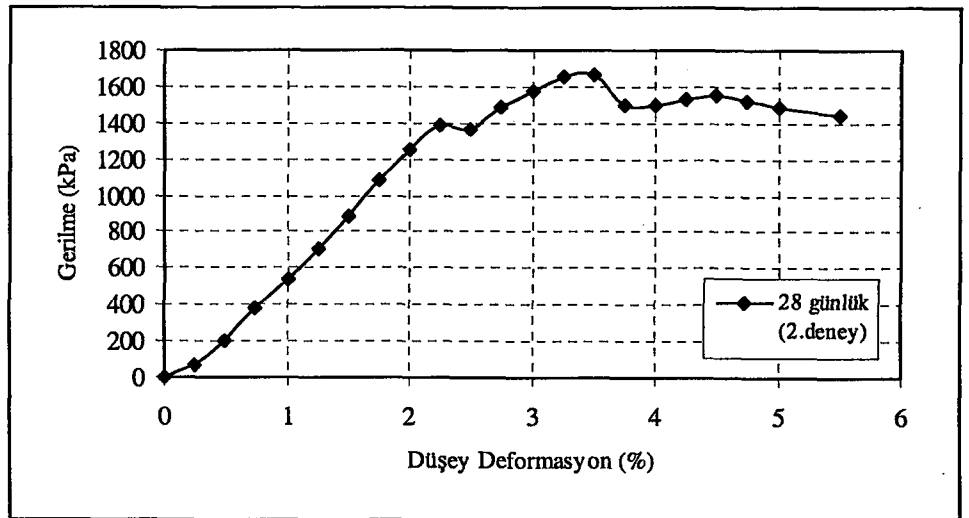


(c)

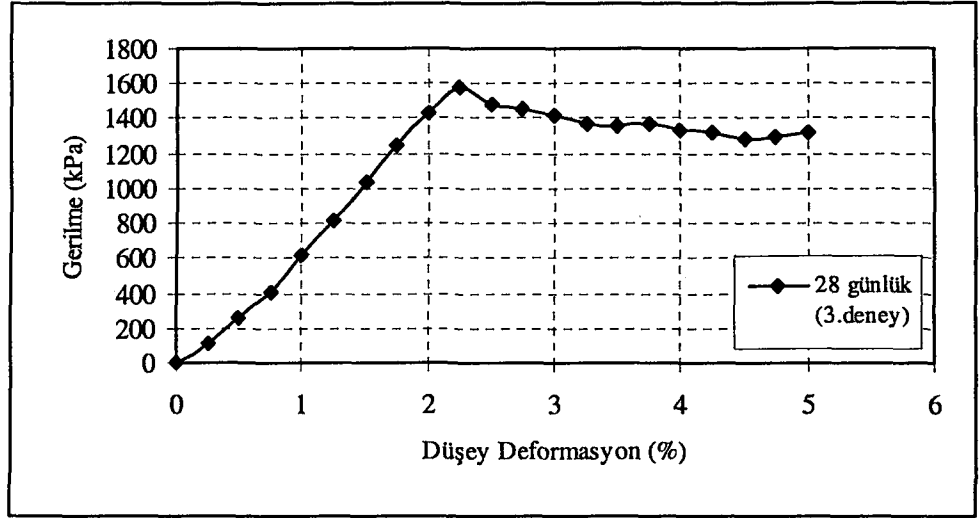
Şekil A.9 7 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

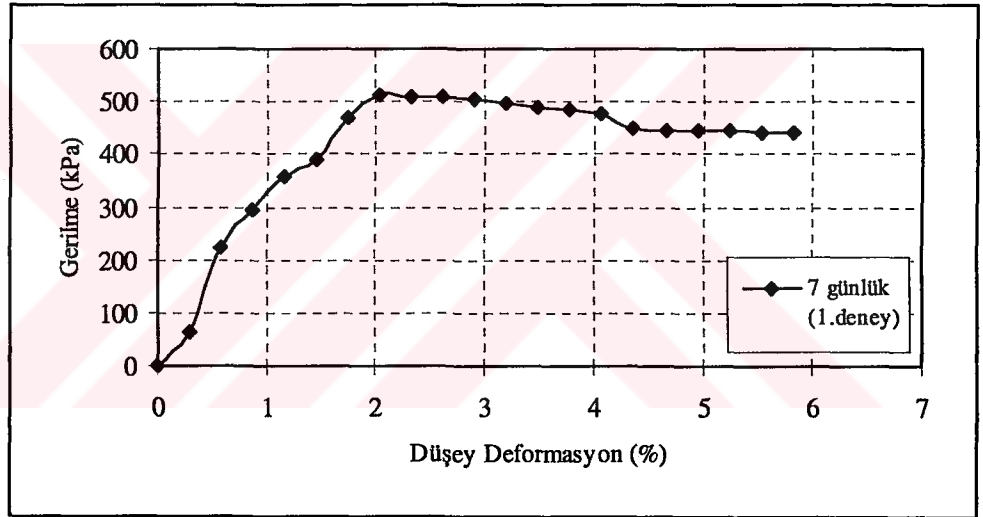


(b)

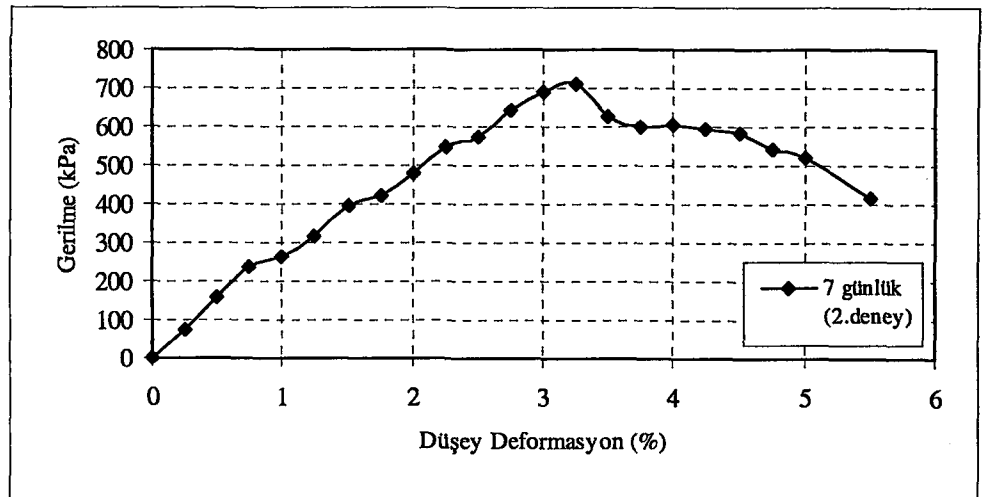


(c)

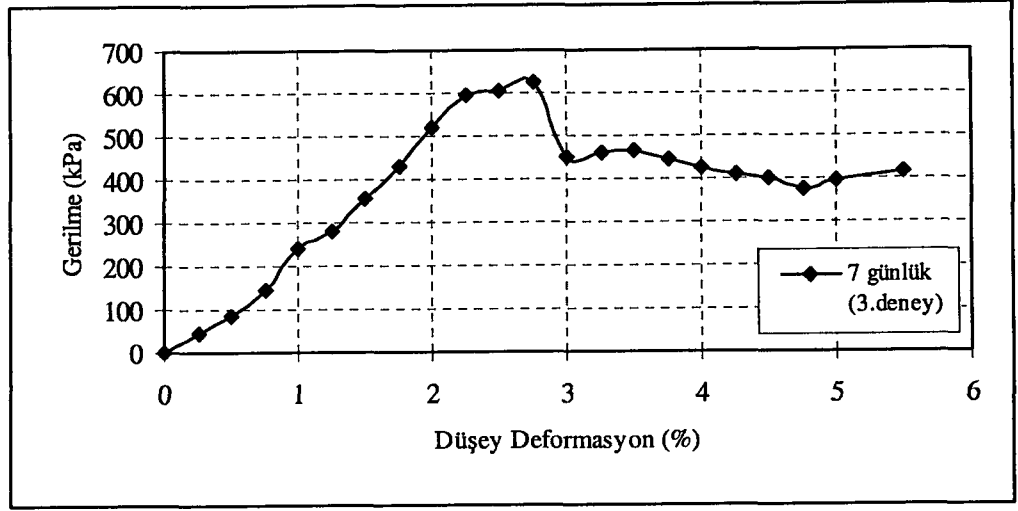
Şekil A.10 28 gün küre tabi tutulmuş 5 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

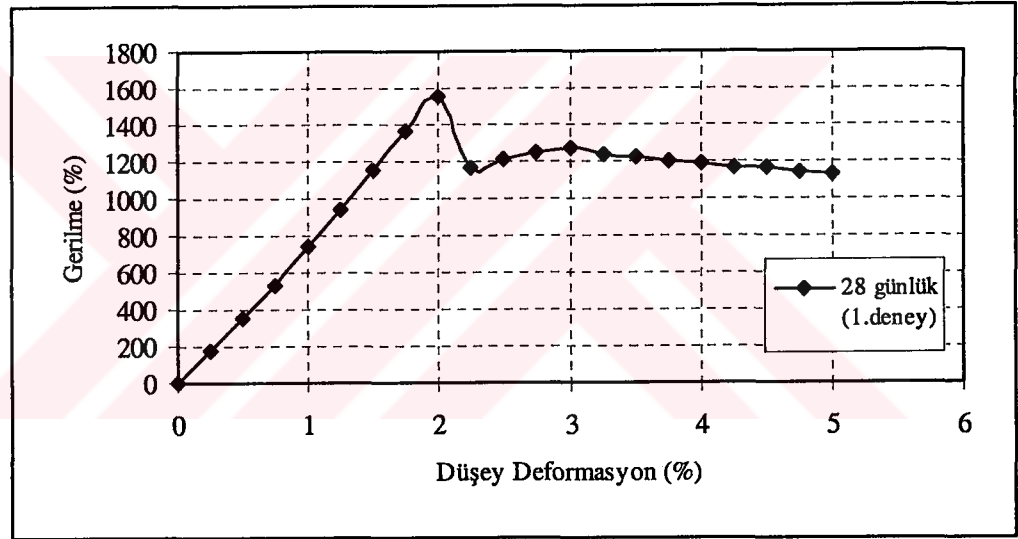


(b)

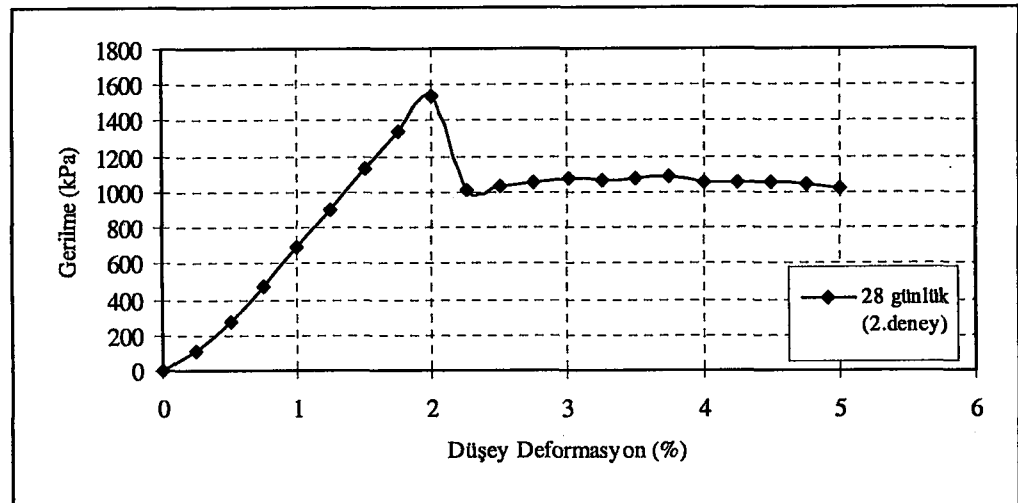


(c)

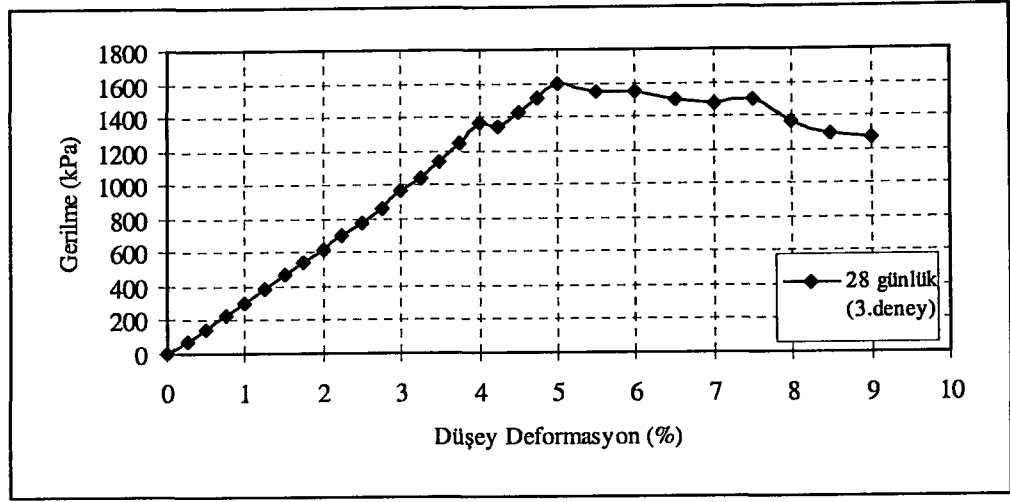
Şekil A.11 7 gün küre tabii tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

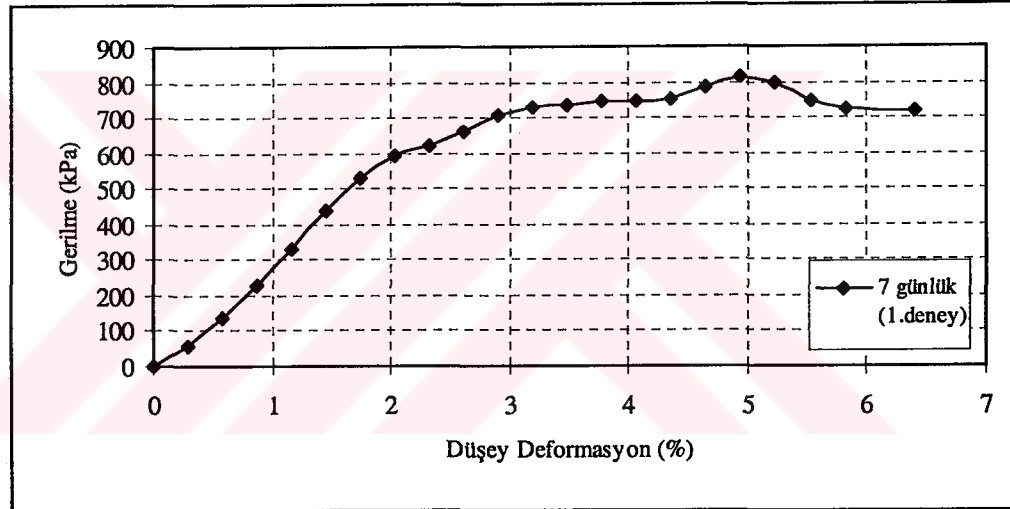


(b)

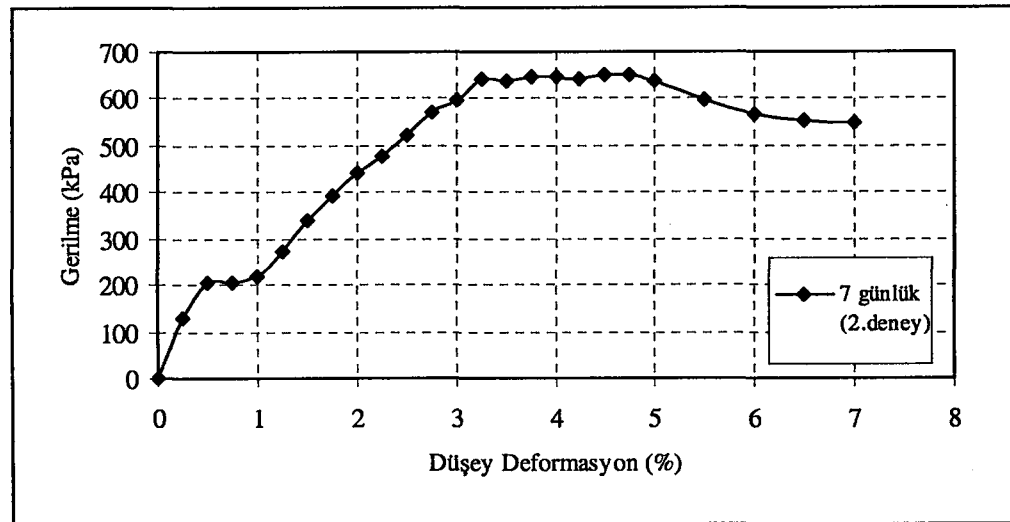


(c)

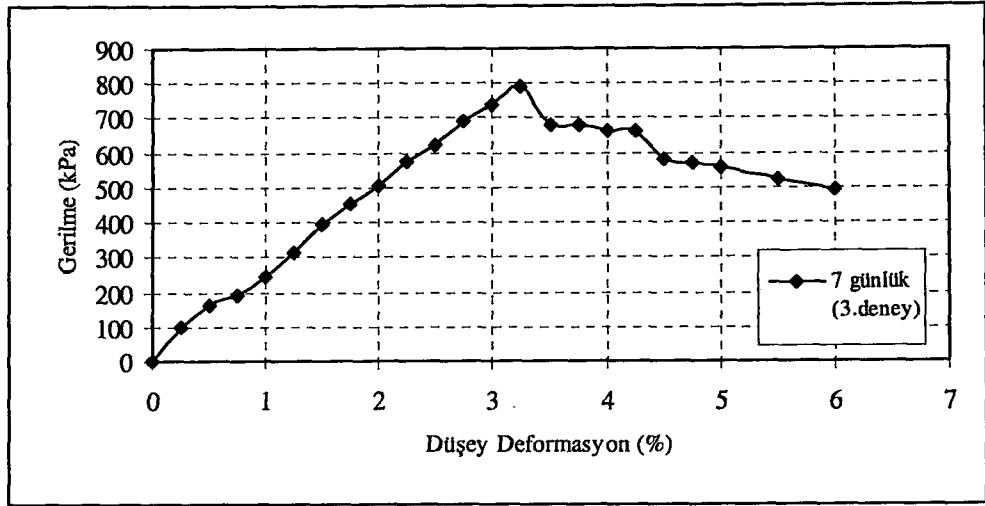
Şekil A.12 28 gün küre tabi tutulmuş 6 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

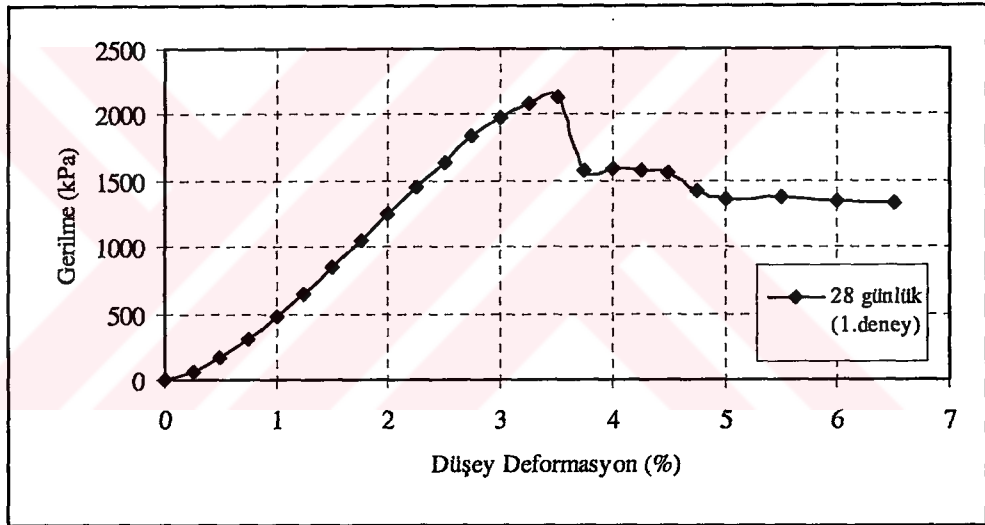


(b)

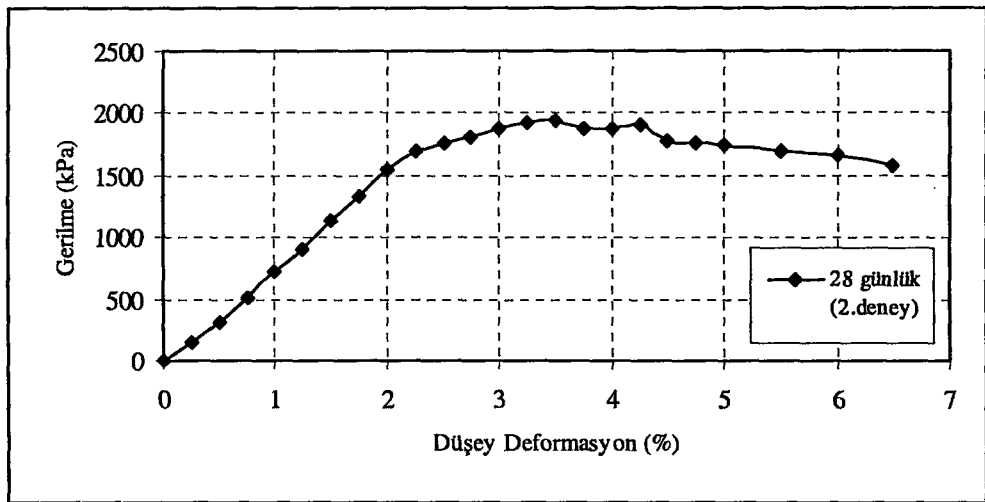


(c)

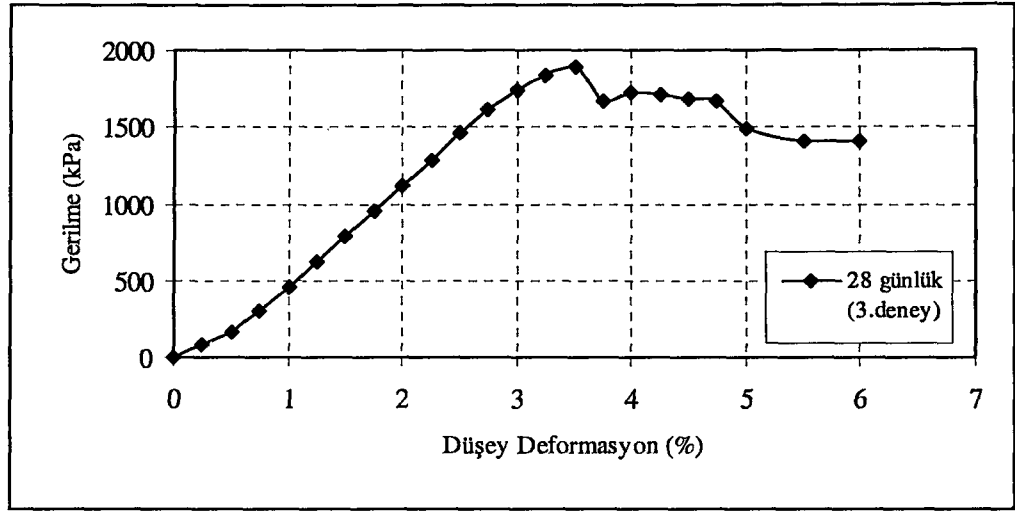
Şekil A.13 7 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

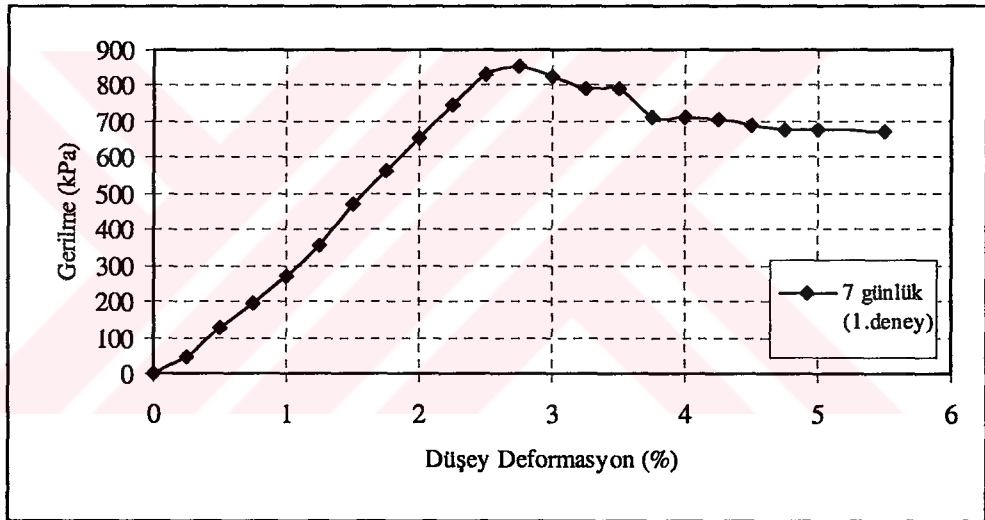


(b)

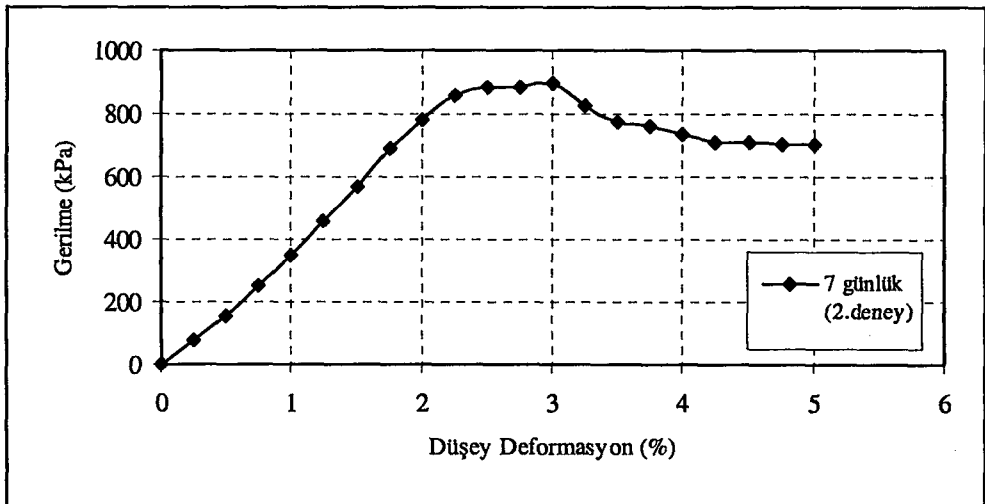


(c)

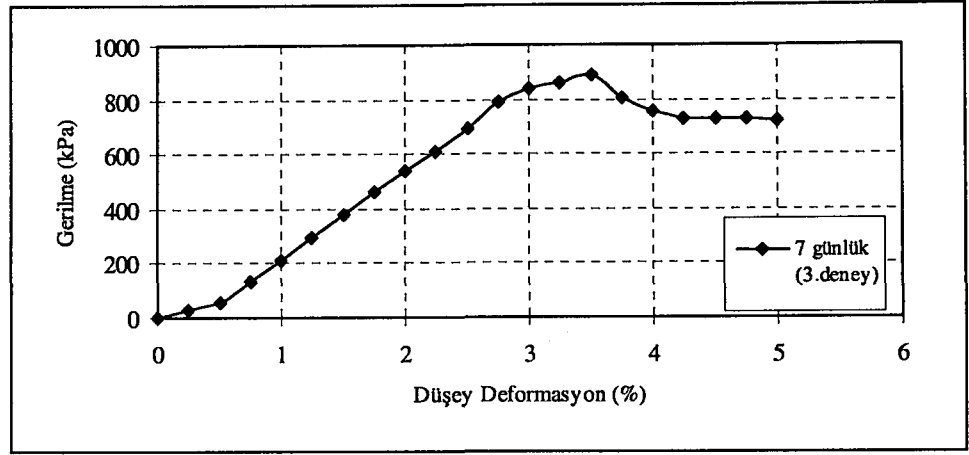
Şekil A.14 28 gün küre tabi tutulmuş 7 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

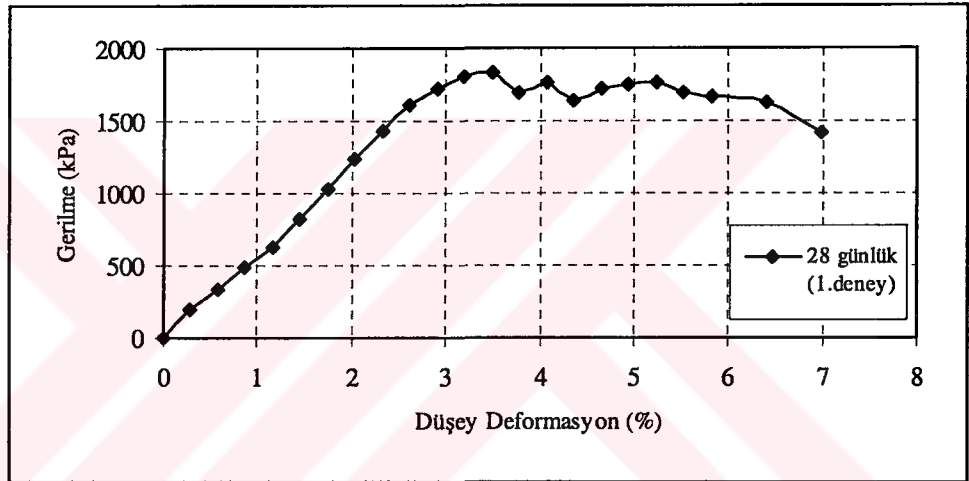


(b)

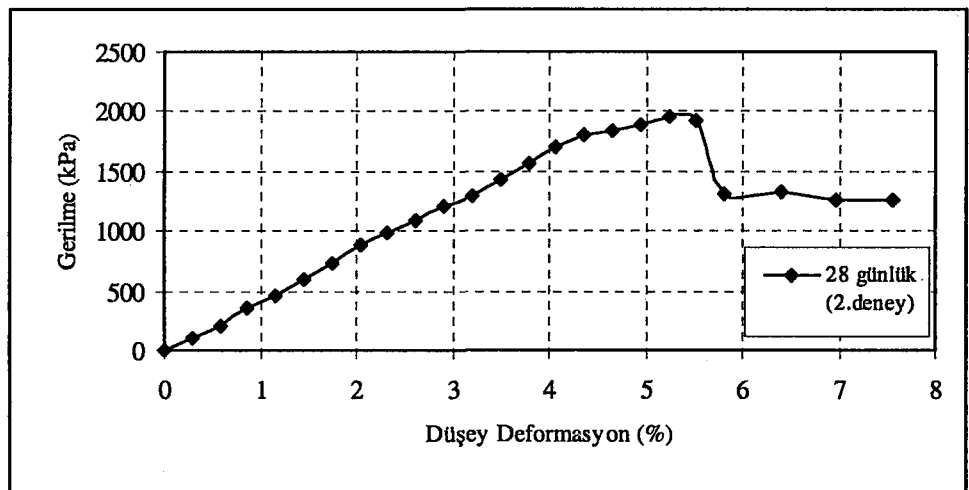


(c)

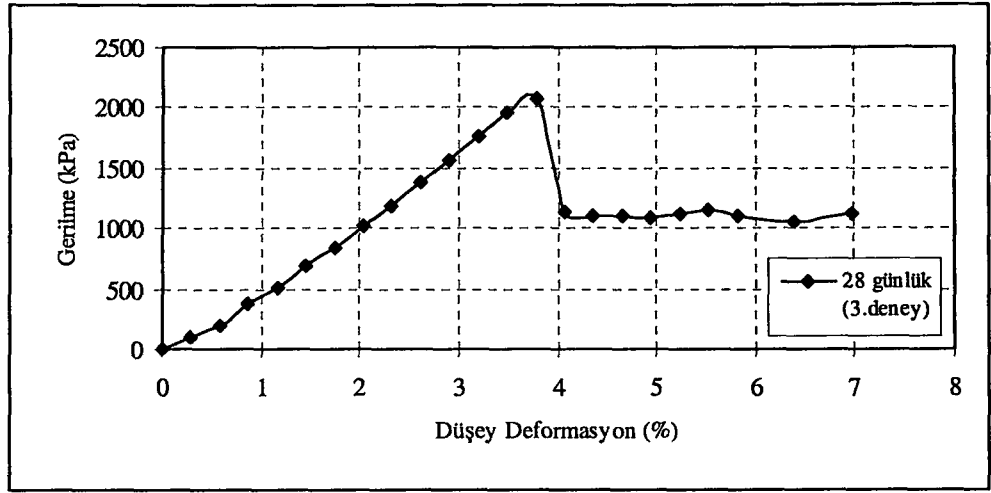
Şekil A.15 7 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



(a)

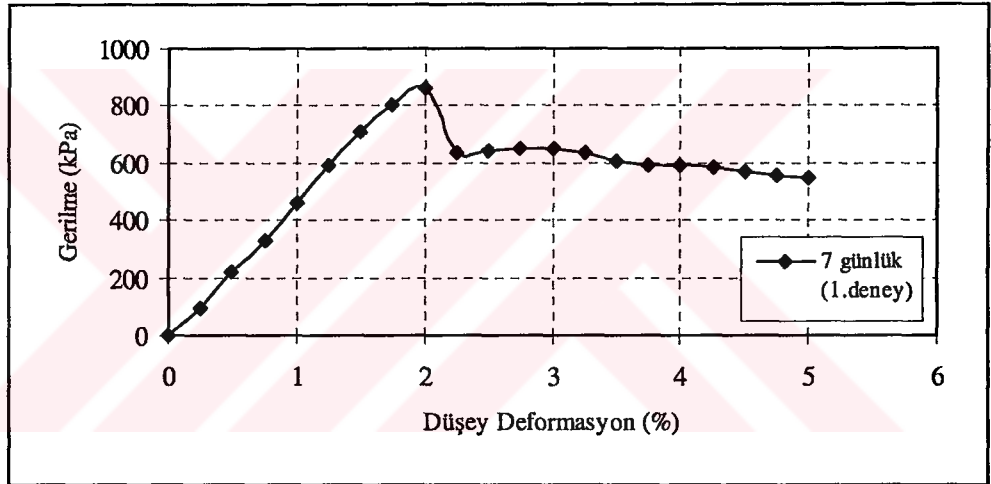


(b)

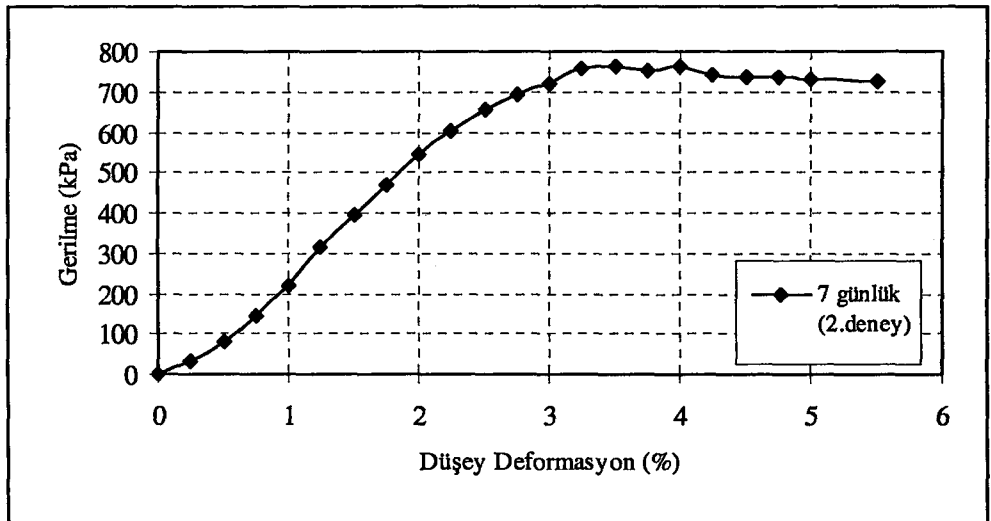


(c)

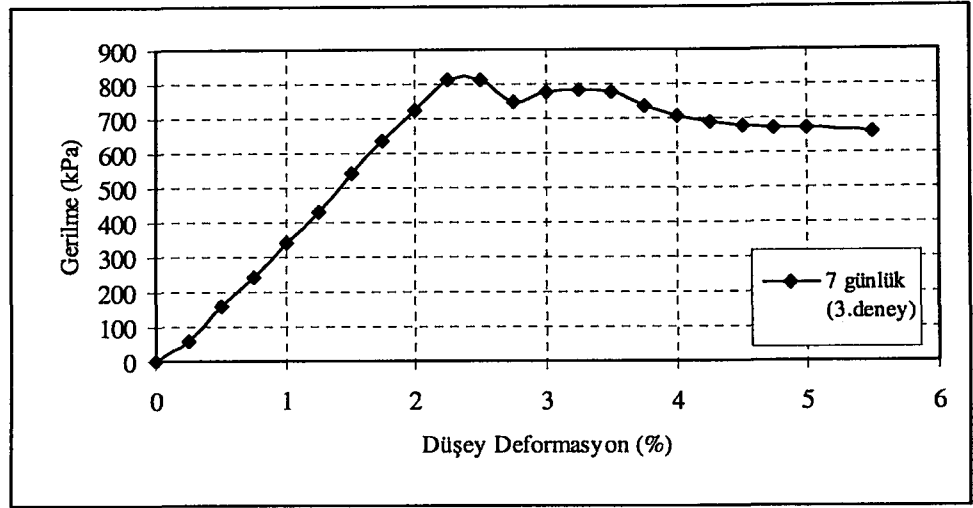
Şekil A.16 28 gün küre tabi tutulmuş 8 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

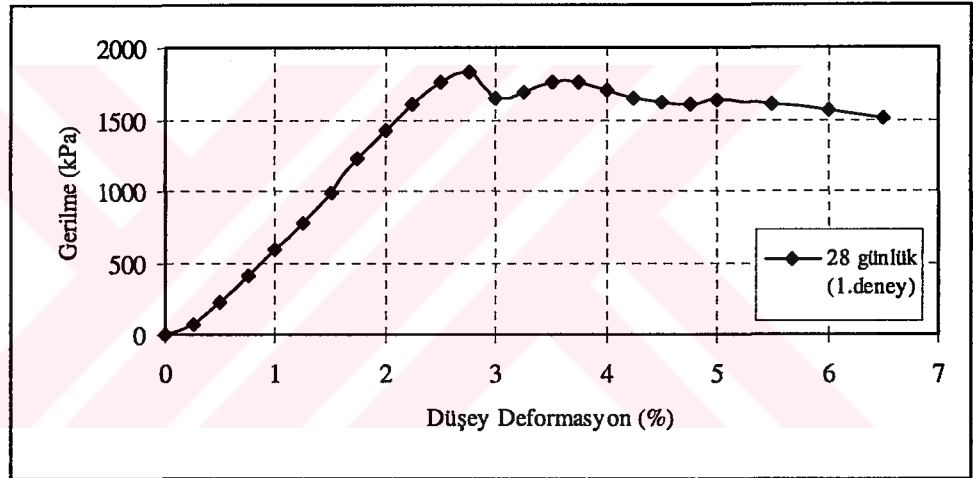


(b)

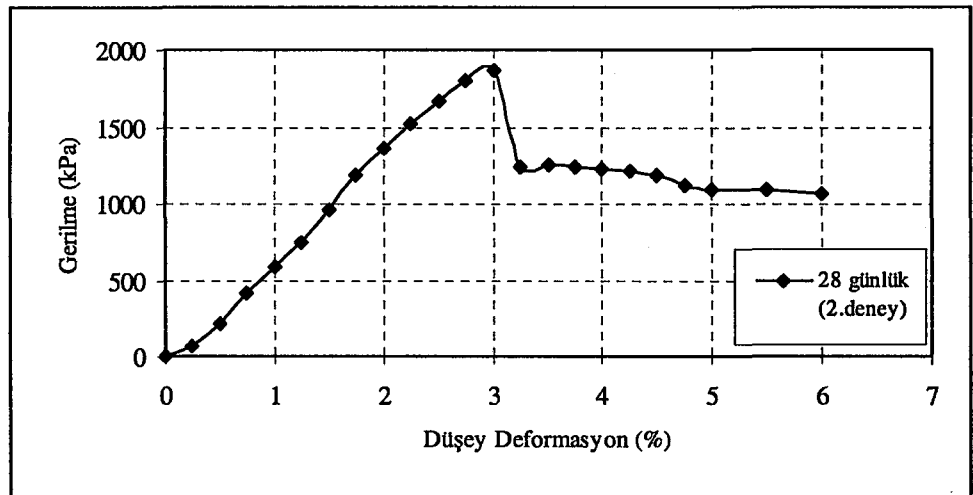


(c)

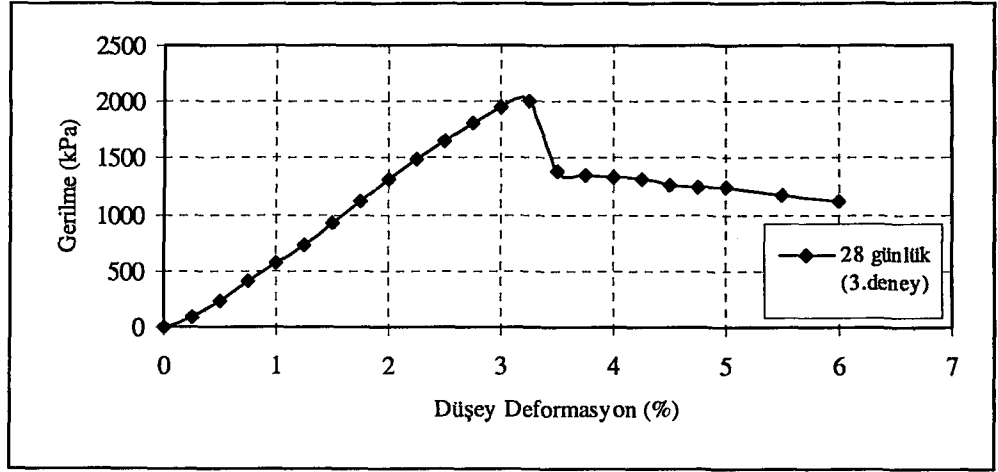
Şekil A.17 7 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

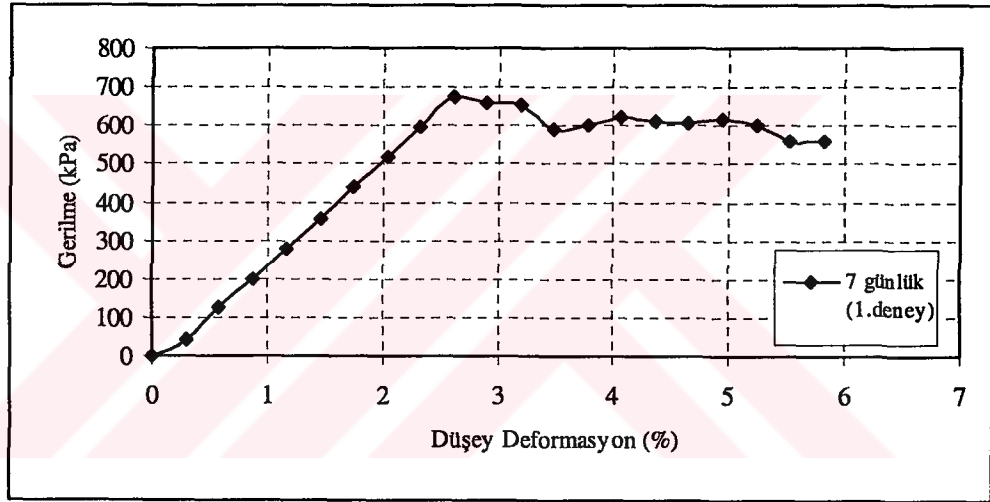


(b)

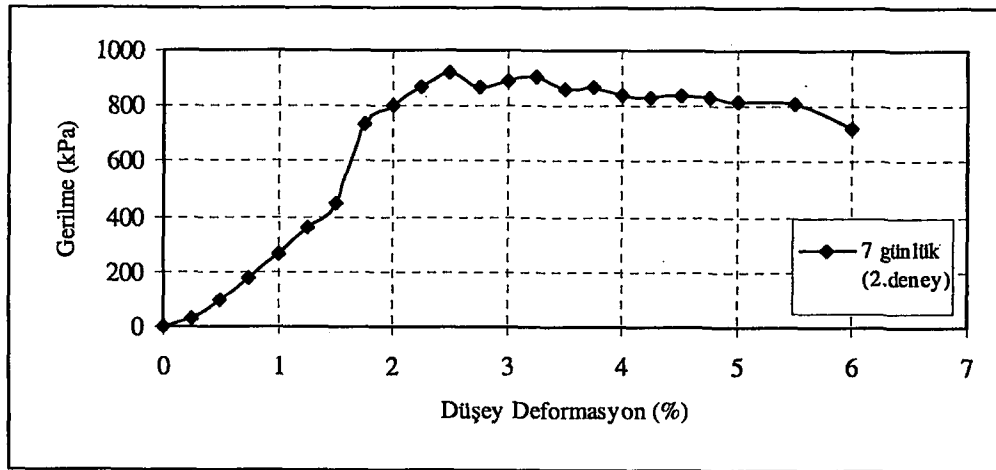


(c)

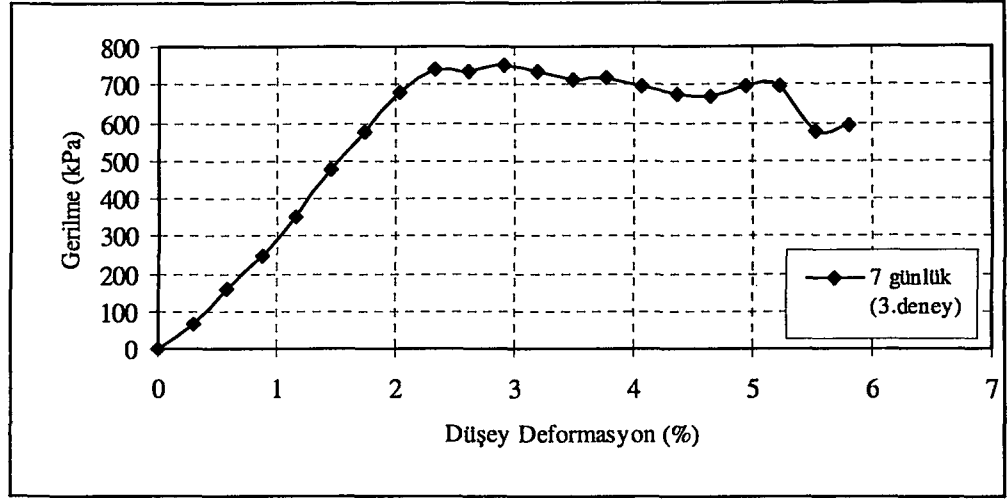
Şekil A.18 28 gün küre tabi tutulmuş 9 no'lu uçucu kül - çimento - polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme - deformasyon eğrileri



(a)

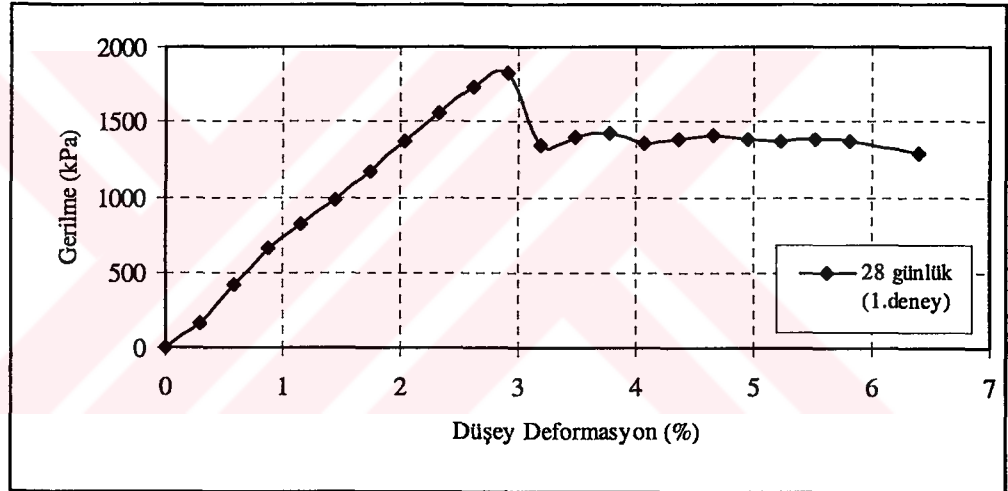


(b)

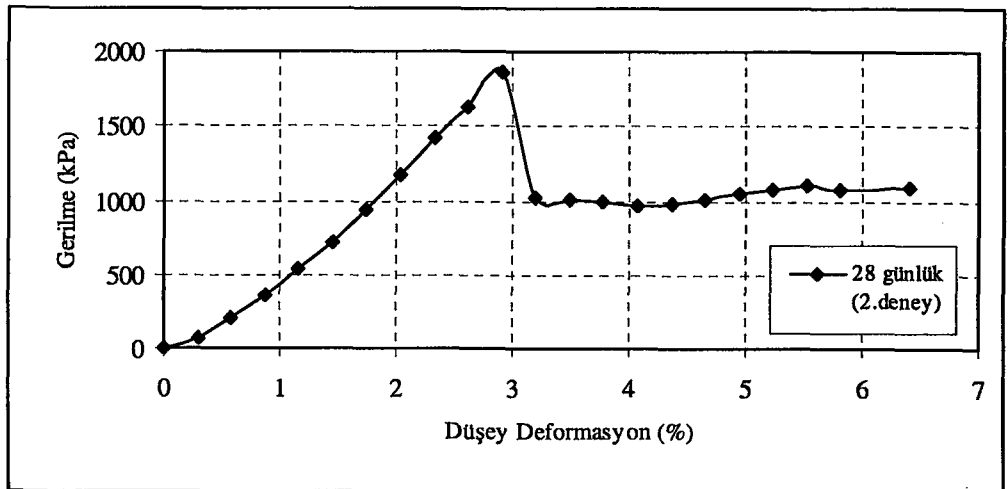


(c)

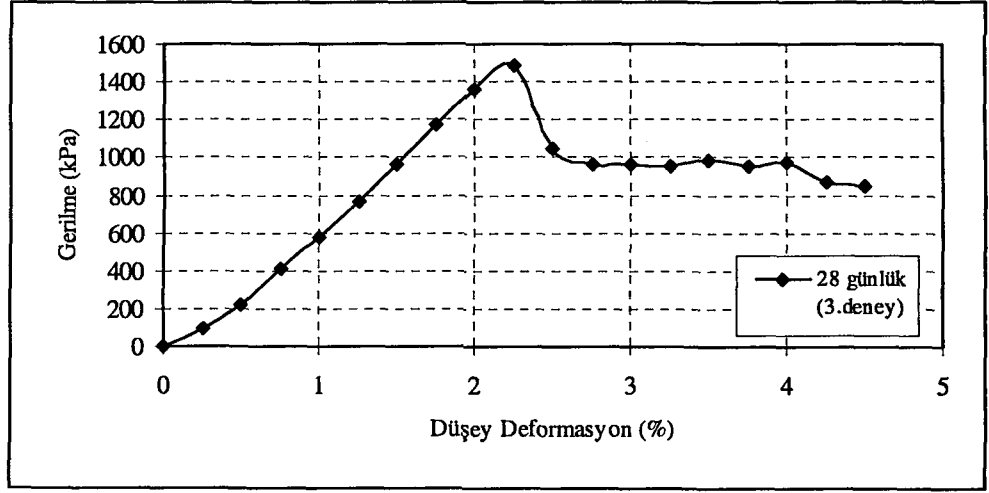
Şekil A.19 7 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

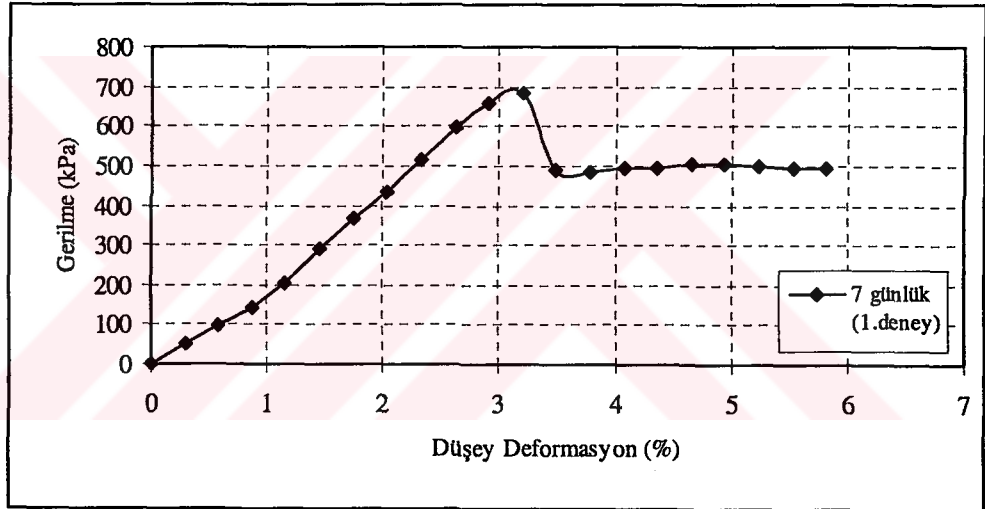


(b)

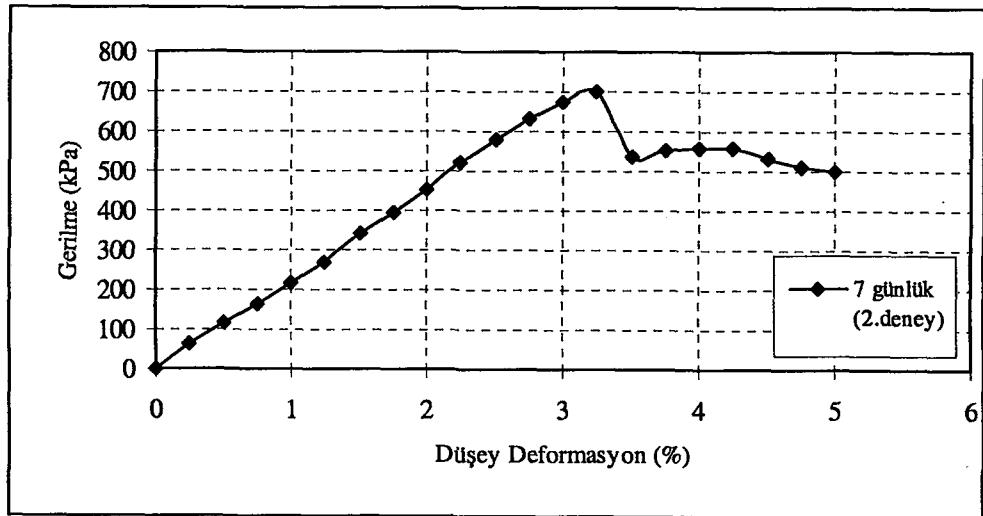


(c)

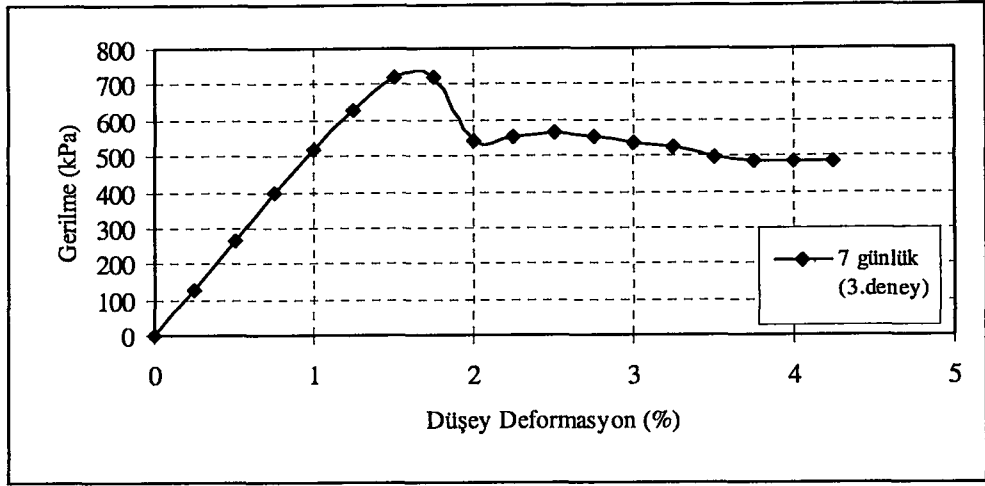
Şekil A.20 28 gün küre tabi tutulmuş 10 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

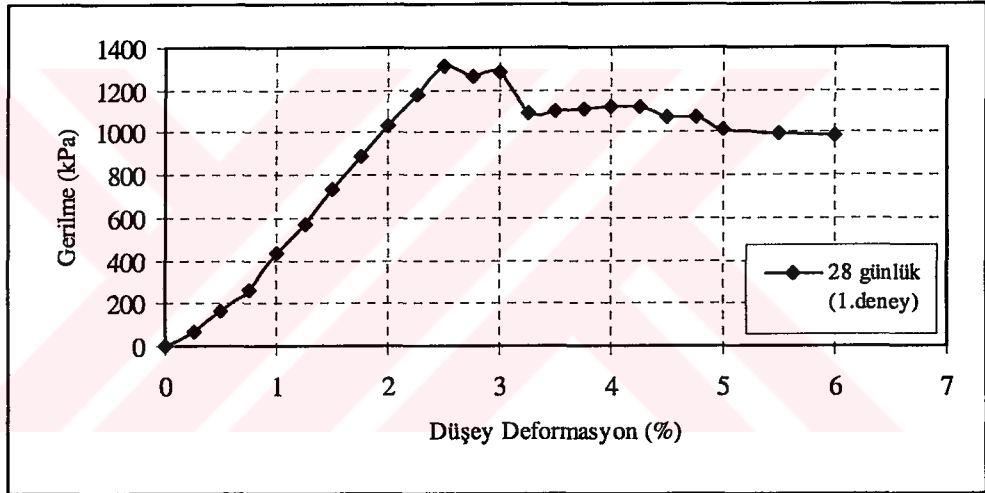


(b)

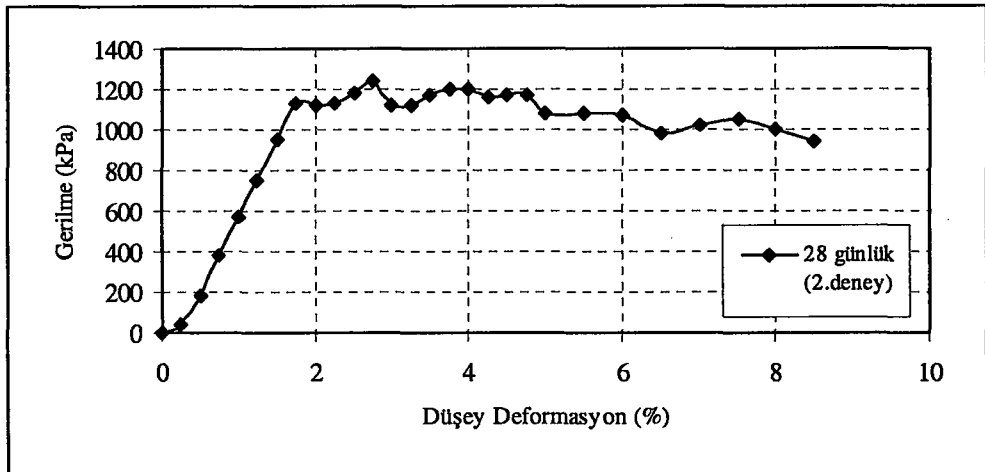


(c)

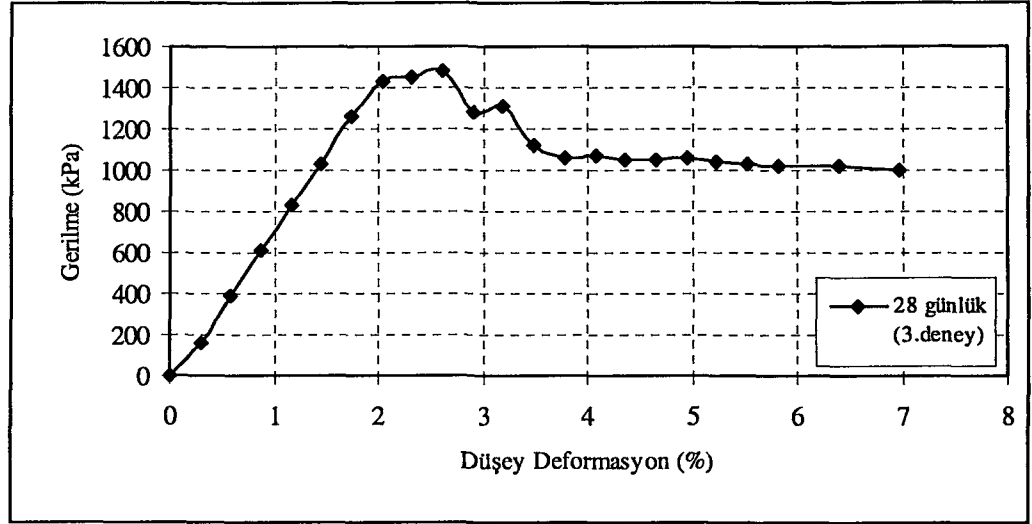
Şekil A.21 7 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

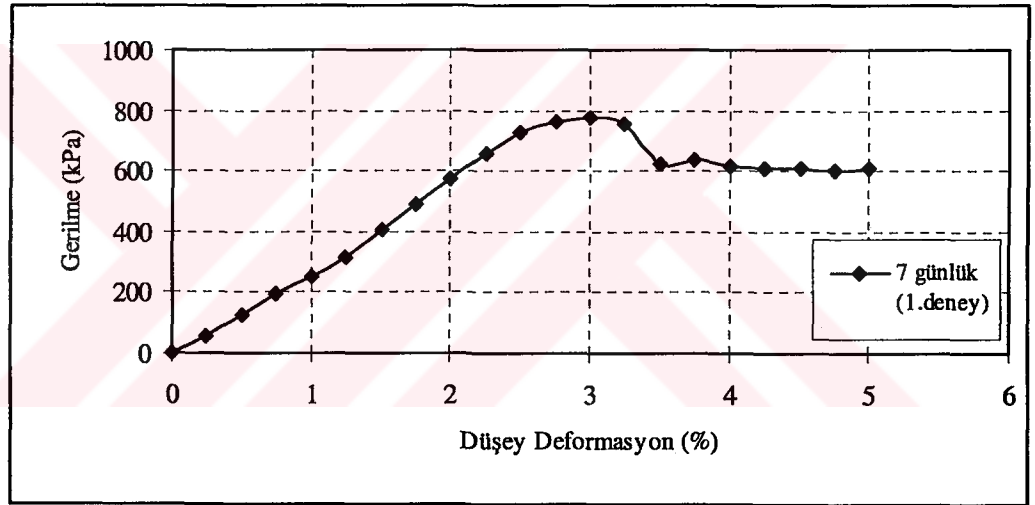


(b)

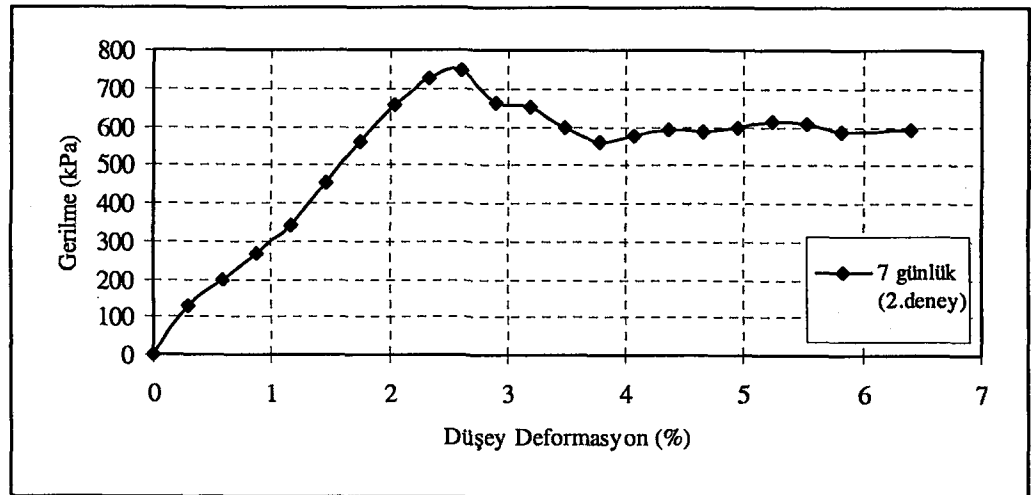


(c)

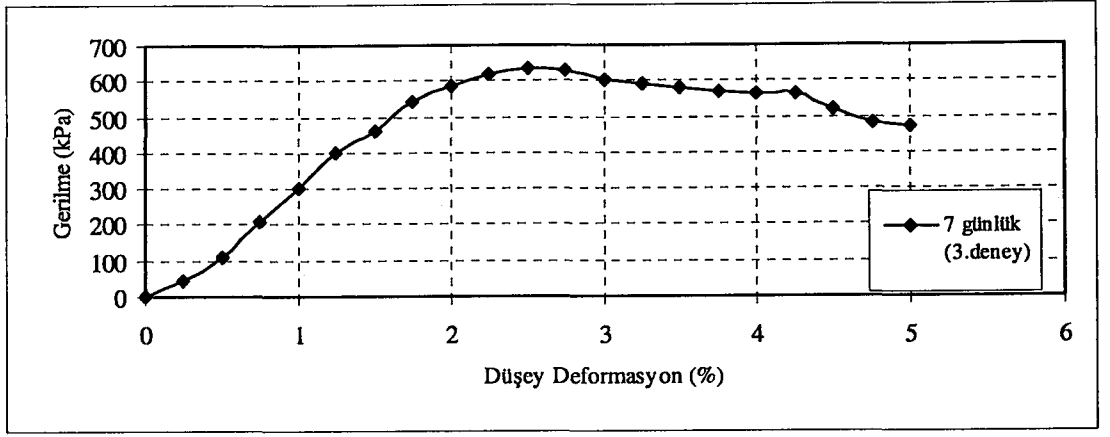
Şekil A.22 28 gün küre tabi tutulmuş 11 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

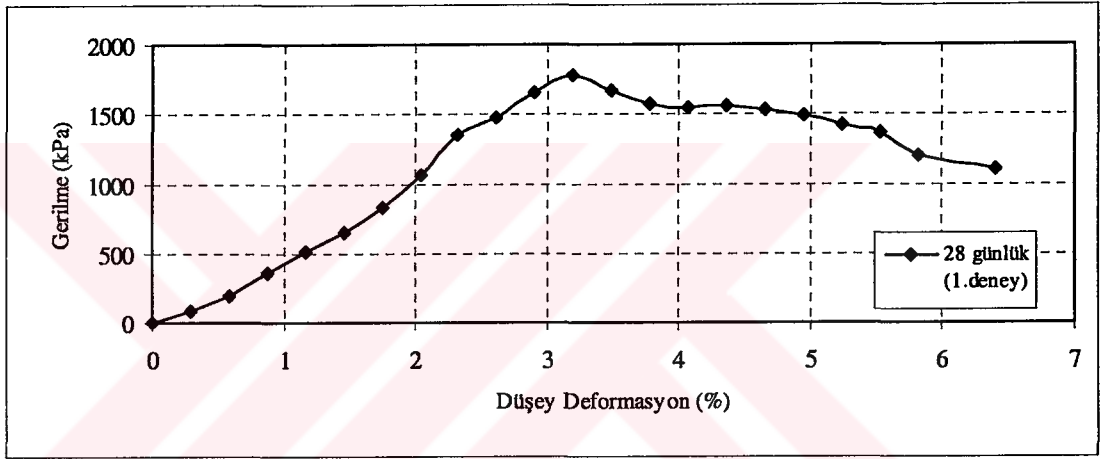


(b)

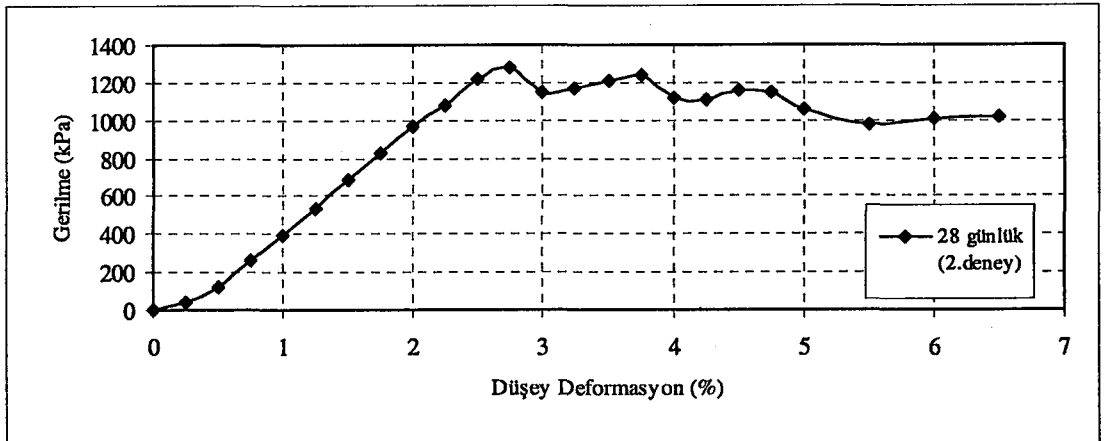


(c)

Şekil A.23 7 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



(a)

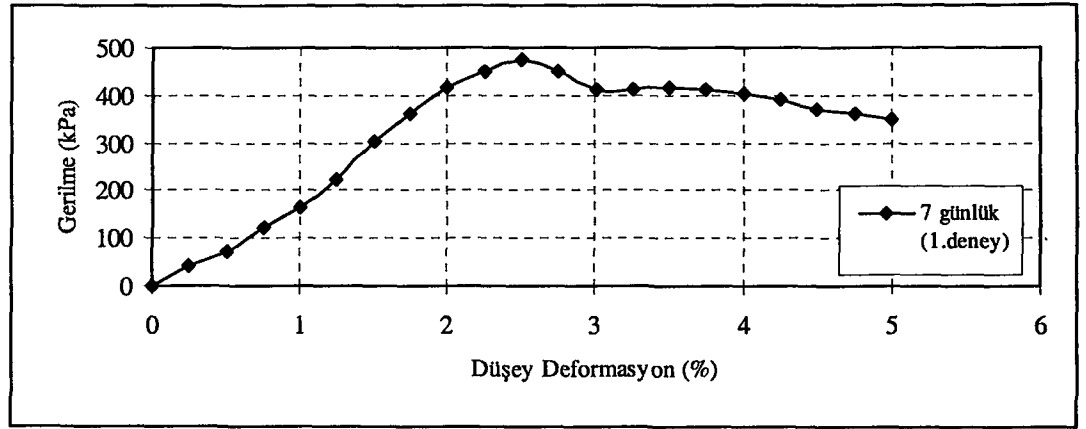


(b)

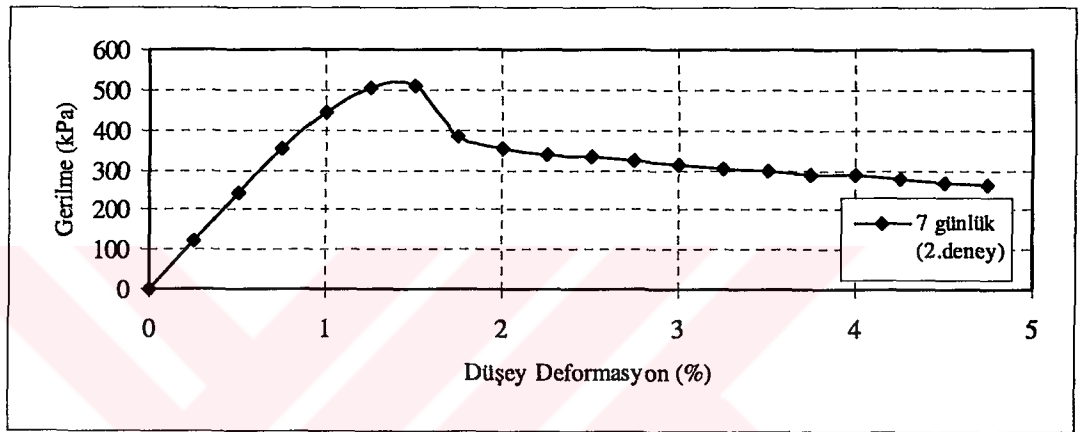
Şekil A.24 28 gün küre tabi tutulmuş 12 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



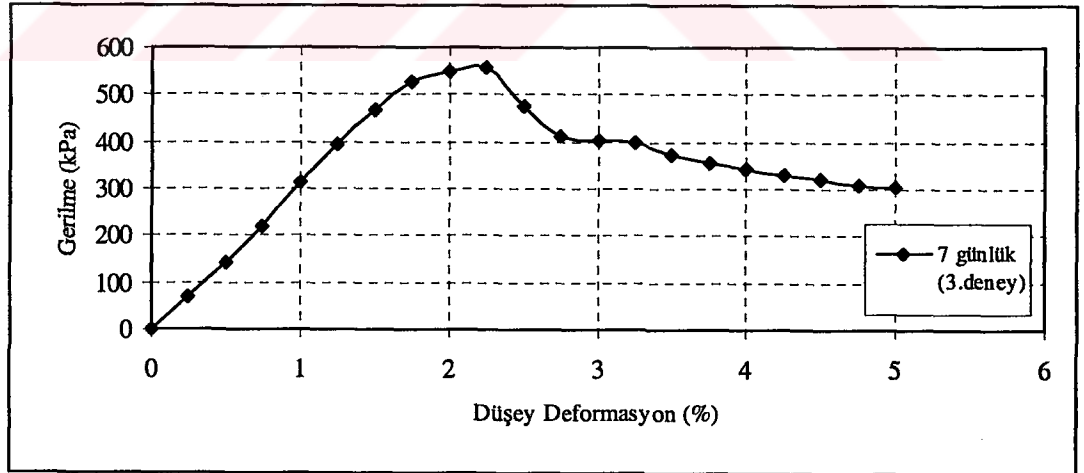
EK B



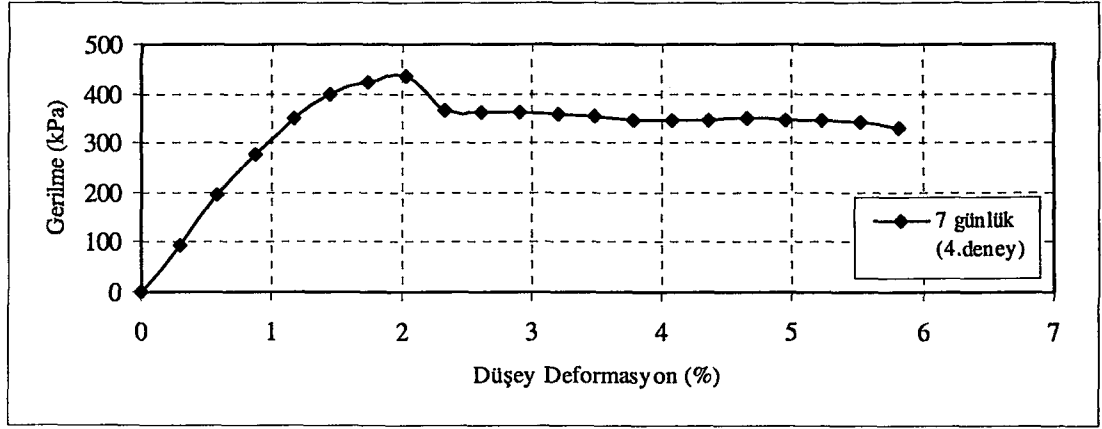
(a)



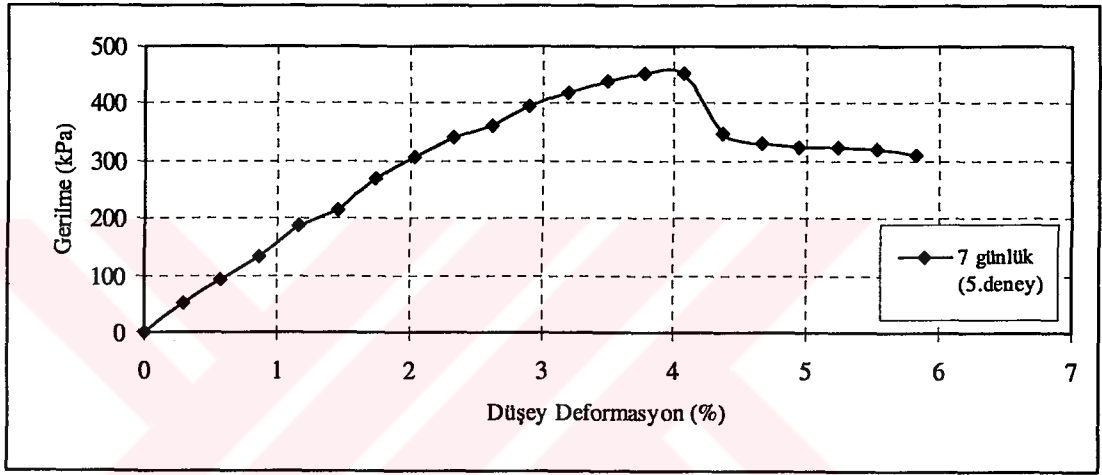
(b)



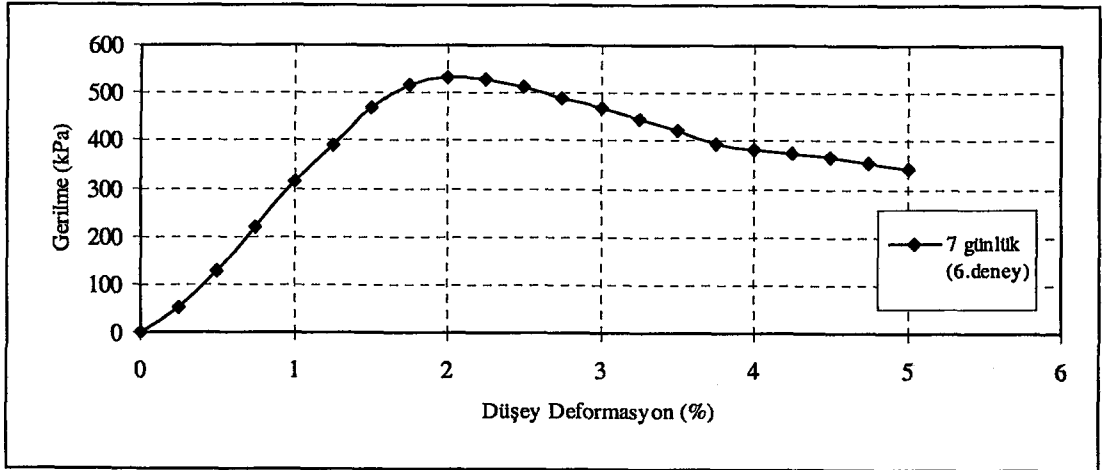
(c)



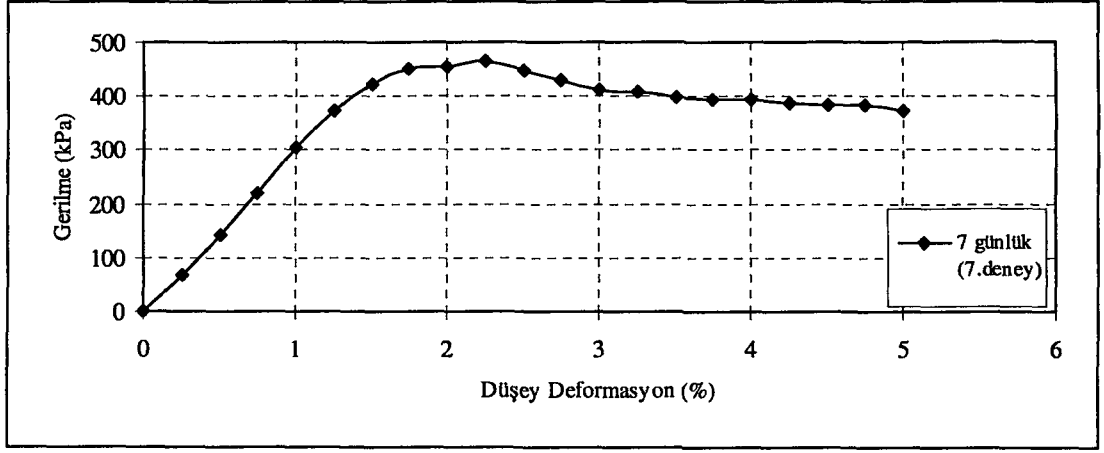
(d)



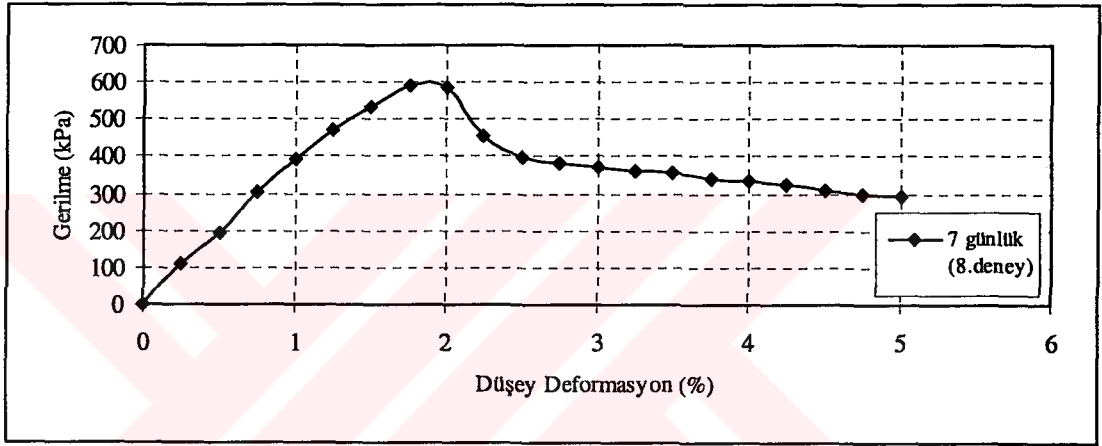
(e)



(f)

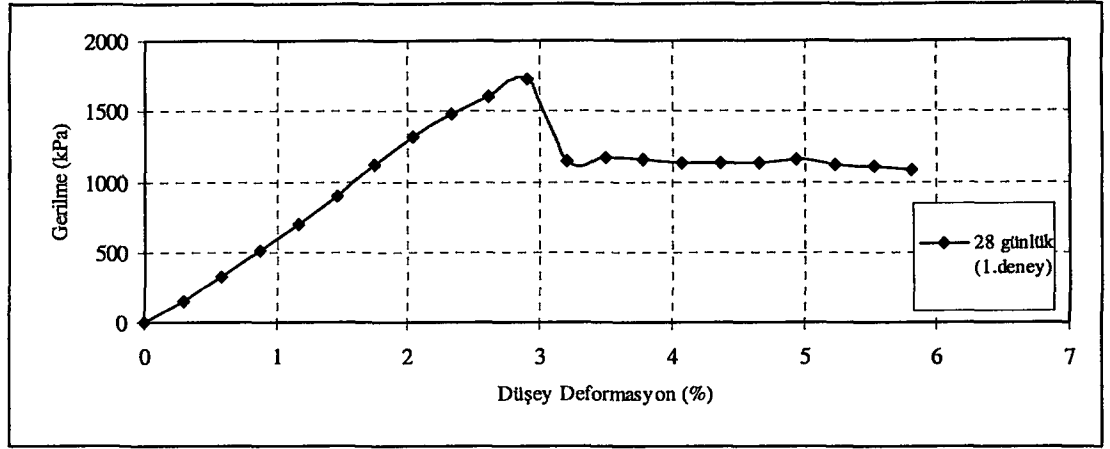


(g)

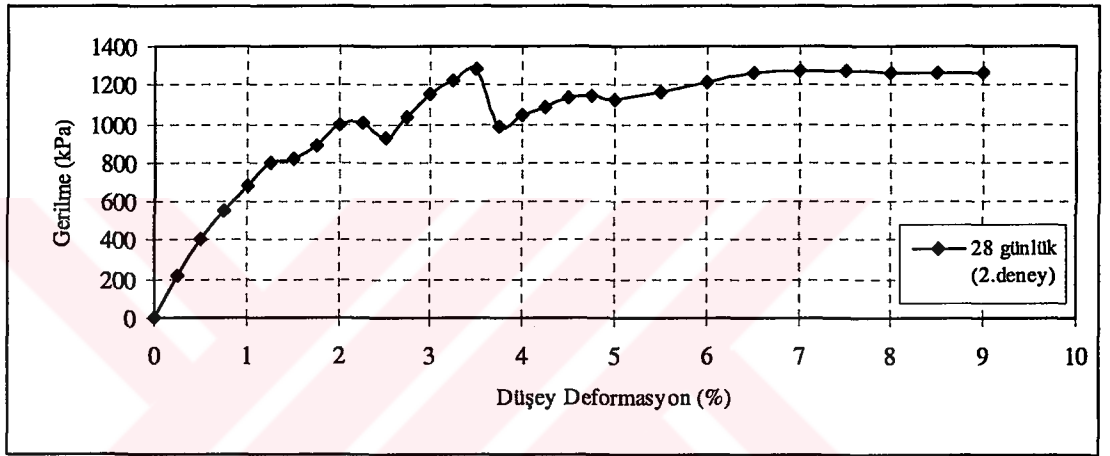


(h)

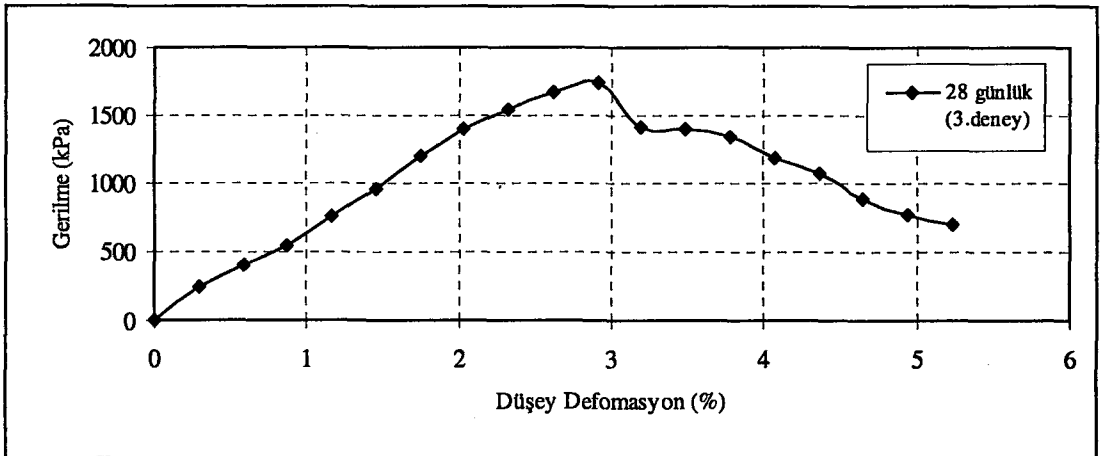
Şekil B.1 7 gün küre tabi tutulmuş 1 no'lu uçucu kül – çimento – polistiren köpük daneleri karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme – deformasyon eğrileri



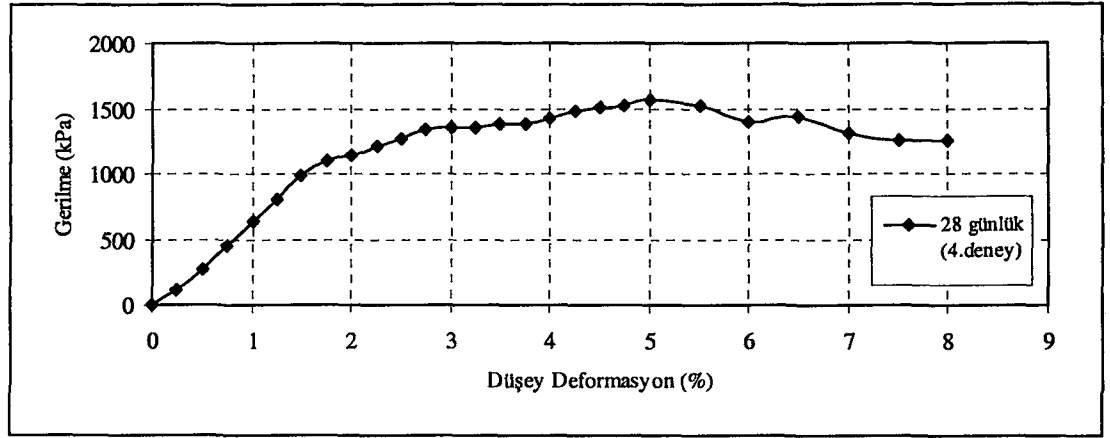
(a)



(b)



(c)



(d)

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

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İstanbul’da doğmuştur. İlk öğrenimini Dr. Sait Darga İlkokulu, orta öğrenimini Kazım İşmen Lisesi ve lise öğrenimini Kadir Has Süper Lisesi’nde tamamlamıştır. 1998 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girmiş, 2002 yılında bölümünü birincilikle tamamlayarak mezun olmuştur. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.

