

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO – EPS KÖPÜĞÜ – KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU
MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ruslan AHMEDOV

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mek. ve Geoteknik Mühendisliği Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO – EPS KÖPÜĞÜ – KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU
MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ruslan AHMEDOV

0501091340

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mek. ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMÜR

OCAK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **0501091340** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ruslan AHMEDOV**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇİMENTO–EPS KÖPÜĞÜ–KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Recep İYİSAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **25 Ocak 2012**

ÖNSÖZ

Günümüzde geoteknik mühendisliğinde hafif dolgular zemin problemlerinin çözümünde geliştirilen yeni çözümler sayesinde zemin iyileştirme yöntemleri arasında kendine özgü yer edinmektedir. Hafif dolguların tasarımında inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan genişletilmiş polistiren köpüğünün (EPS) yeri ayrıdır. EPS sahip olduğu hafiflik, dayanıklılık ve üretimindeki düşük maliyet nedeniyle diğer hafif dolgu malzemelerinden ayırt edilir. Polistiren köpüğünün geoteknik özelliklerinin ve çimento – EPS – kum karışımının geoteknik mühendisliğinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmanın ileride polistiren köpüğü üzerine yapılacak çalışmalar için katkısının olmasını temenni ederim.

Çalışmaların yürütüldüğü süre boyunca her türlü desteği sağlayan sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Berrak Teymur'a ve katkılarıyla bize destek olan Geoteknik ve Yapı Malzemesi bilim dallarındaki tüm öğretim üyesi ve asistanlara teşekkür ederim.

Yapılan çalışma süresince yapılan laboratuvar deneylerinde her daim yardımlarının esirgemeyen sayın Semih VIÇ'e, sayın Serdar GÜLTÜRER'e ve sayın İsmail CANTEKİN'e, ayrıca çalışmalarım boyunca bana her türlü maddi ve manevi desteği veren aileme de içten teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2011

Ruslan AHMEDOV

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOLLER.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. HAFİF DOLGU MALZEMELERİ.....	3
2.1 Uçucu Kül.....	4
2.1.1 Uçucu külün fiziksel özellikleri	6
2.1.2 Uçucu külün kimyasal özellikleri.....	7
2.1.3 Uçucu külün geoteknik özellikleri	8
2.1.4 Uçucu kül uygulaması	10
2.2 Kullanılmış Taşıtlı Lastik Parçaları.....	13
2.2.1 Şerit lastik parçaları.....	16
2.2.2 Lastik hurdası	17
2.2.3 Lastik yongası	17
2.2.4 Toz lastik.....	18
2.3 Genleşmiş Polistiren (EPS).....	18
2.3.1 Fiziksel özellikler	18
2.3.2 Geoteknik özellikler	22
3. EPS, KUM VE ÇİMENTO MALZEMESİNDEN OLUŞAN HAFİF DOLGU MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	25
3.1 Amaç	25
3.2 Deneysel Çalışma	25
3.2.1 Kumun elek analizi	25
3.2.2 Kumun relatif sıkılığı.....	27
3.2.3 Özgül ağırlık	29
3.2.4 EPS–çimento–kum karışımının hazırlanması	30
3.2.5 Kesme kutusu deneyi.....	32
3.2.6 Serbest basınç deneyi.....	39
3.2.7 CBR deneyi	46
3.2.8 Sabit seviyeli permeabilite deneyi.....	51
4. SONUÇLAR.....	55
5. KAYNAKLAR.....	57
6. EKLER.....	61
7. ÖZGEÇMİŞ	75

KISALTMALAR

ACAA : American Coal Ash Association (Amerikan Kömür Külü Birliği)

ASTM : American Society for Testing and Materials

CBR : Kaliforniya Taşıma Oranı

EPS : Genleşmiş Polistiren

TÇMB : Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Hafif dolgu malzemeleri	4
Çizelge 2.2: Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (TÇMB, 2004)	7
Çizelge 2.3: Zemin A, B ve C numunelerin fiziksel özellikleri.....	11
Çizelge 2.4: A, B ve C zemin örneklerine eklenen uçucu külün artan yüzdesine göre zemin özelliklerinin değişimi	12
Çizelge 2.5: Genleşmiş polistiren (EPS) genel özellikleri.....	21
Çizelge 3.1: Numunede kullanılmış kuma ait granülometrik özellikler.....	26
Çizelge 3.2: Zeminlerin relatif sıkılığına göre sınıflandırılması (Das, 2006).....	27
Çizelge 3.3: Kum numunesinin relatif sıkılık deneyi hesabı, maksimum ve minimum boşluk oranları	28
Çizelge 3.4: Kum numunesine ait sıkılık değerinin belirlenmesi	28
Çizelge 3.5: Deneysel çalışma kapsamında kullanılmış kum numunesine ait özellikler	29
Çizelge 3.6: Karışımda kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları	29
Çizelge 3.7: Karışımdaki malzemede kullanılan EPS ve kumun ağırlıkça yüzde değişimi.....	31
Çizelge 3.8: Çimento/malzeme (6/1) oranına ait farklı EPS yüzde karışımlardaki bileşen ağırlıkları.....	31
Çizelge 3.9: Çimento/malzeme (12/1) oranına ait farklı EPS yüzde karışımlardaki bileşen ağırlıkları.....	32
Çizelge 3.10: EPS'ye ait maksimum ve nihai gerilmeler.....	35
Çizelge 3.11: EPS'nin farklı yükleme kademelerine göre kayma modülü	37
Çizelge 3.12: Karışımdaki malzemelerin yüzde (%) cinsinden ağırlıkça oranları.....	41
Çizelge 3.13: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ağırlıkça oranında EPS miktarlarına ait serbest basınç deneyi ortalama normal gerilmeler	41
Çizelge 3.14: 7 günlük 12/1 çimento/malzeme ve %50 EPS ağırlıkça oranında karışımlara ait serbest basınç deneyi sonuçları.....	43
Çizelge 3.15: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve %100, %75 ve %25 EPS ağırlıkça oranlarında karışımlara ait serbest basınç deneyi sonuçları	43
Çizelge 3.16: %50 EPS katkılı malzeme ve çimento karışımlarına ait 28 günlük serbest basınç deneyi sonuçlarına göre numune basınç dayanımları ve ortalaması	44
Çizelge 3.17: CBR Sınıflandırılması (Kumbasar ve Kip, 1999).....	46
Çizelge 3.18: 7 günlük numunelerin CBR değerleri	49
Çizelge 3.19: 28 günlük numunelerin CBR değerleri	51
Çizelge 3.20: Permeabilite katsayısının zemin tipine göre aldığı değerler (Das, 2002)	51
Çizelge 3.21: Belirlenmiş oranda çimento - EPS - kum karışımına ait 7 ve 28 günlük permeabilite katsayı ve akım hızları.....	53
Çizelge A.1: EPS için kesme kutusu deneyi (12.5 kPa yükleme kademesi)	62
Çizelge A.2: EPS için kesme kutusu deneyi (25.0 kPa yükleme kademesi)	63
Çizelge A.3: EPS için kesme kutusu deneyi (37.5 kPa yükleme kademesi)	64

Çizelge A.4: EPS'nin kesme kutusu deney hesabı ve sonuçları.....	65
Çizelge D.1: 7 günlük sabit seviyeli permeabilite deney verileri	73
Çizelge D.2: 28 günlük sabit seviyeli permeabilite deney verileri	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: İngiltere'de termik santrallerde elde edilen uçucu küllerin kullanım sahaları.....	5
Şekil 2.2: Yüksek silisli uçucu kül, pulverize uçucu kül.....	7
Şekil 2.3: Yüksek kireçli uçucu kül.....	7
Şekil 2.4: Uçucu küllerin dane çapı dağılımı.....	9
Şekil 2.5: Farklı uçucu küllere ait kompaksiyon eğrileri.....	9
Şekil 2.6: Farklı numunelerde maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası farklılığı.....	10
Şekil 2.7: Lastik parçalarının görünümü.....	13
Şekil 2.8: Kullanılmış lastikten elde edilen çeşitli ürün türleri.....	15
Şekil 2.9: Kullanılmış lastiklerin çeşitli işlemlere tabi tutulmasıyla elde edilen ince lastik parçaları, lastik şerit parçaları, lastik yongası ve lastik hurdası.....	16
Şekil 2.10a: Polistiren köpüğü hammadde olarak görülmektedir.....	19
Şekil 2.10b: Polistiren köpüğü levha şeklinde.....	19
Şekil 3.1: Deneysel çalışmada kullanılan kuma ait dane çapı dağılımı.....	26
Şekil 3.2: Karışımda kullanılan genişlemiş polistiren (EPS) daneleri.....	30
Şekil 3.3: Laboratuvarında kullanılan kesme kutusu deney aleti.....	33
Şekil 3.4: 12.5 kPa, 25 kPa ve 37.5 kPa'lık yükleme kademelerine göre kayma gerilmesi - yanal yer değiştirme eğrileri.....	35
Şekil 3.5: EPS numunesinin yükleme kademelerine göre kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.....	36
Şekil 3.6: EPS'nin her yükleme kademesi için $\Delta H/H - \Delta L/L$ eğrileri.....	37
Şekil 3.7: EPS'nin her yükleme kademesi için $\Delta V/V - \Delta L/L$ eğrileri.....	38
Şekil 3.8: EPS malzemesine ait normal gerilme - kayma gerilmesi eğrisine göre kayma mukavemeti açısının (ϕ) belirlenmesi.....	37
Şekil 3.9: Farklı sıklıklardaki kum örneklerine ait kayma mukavemeti açıları.....	39
Şekil 3.10: Çimento-EPS-kum karışımında serbest basınç deneyi uygulaması.....	40
Şekil 3.11: Ağırlıkça 12/1 çimento/malzeme ve malzeme %50 EPS katkıli EPS-çimento - kum karışımlarının 7 günlük basınç dayanımlarının deformasyona göre değişimi.....	42
Şekil 3.12: Ağırlıkça 12/1 çimento/malzeme ve malzeme %50 EPS katkıli EPS - çimento - kum karışımlarının 28 günlük basınç dayanımlarının deformasyona göre değişimi.....	44
Şekil 3.13: Ağırlıkça 12/1 çimento/malzeme ve malzeme %50 EPS katkıli karışımların kür süresine göre basınç dayanımlarının artışı.....	45
Şekil 3.14: 12/1 çimento/malzeme oranındaki karışımlara ait 28 günlük serbest basınç mukavemetinin malzeme içindeki EPS oranına göre değişimi.....	46
Şekil 3.15: CBR deneyine tabi tutulmuş EPS karışım numunesi ve deney aleti.....	47
Şekil 3.16: 28 gün nem odasında kalmış ve CBR deneyi yapılmış numuneler.....	48
Şekil 3.17: CBR deneyine tabi tutulmuş 7 günlük EPS - çimento - kum karışım numunelerine ait düşey yük - penetrasyon grafiği.....	49

Şekil 3.18: CBR deneyine tabi tutulmuş 28 günlük EPS - çimento - kum karışım numunelerine ait düşey yük - penetrasyon grafiği	50
Şekil B.1: %20 sıklıkta kuma ait kayma gerilmesi - yanal yerdeğiştirme eğrisi	66
Şekil B.2: %20 sıklıkta kuma ait kayma mukavemeti açışı.....	66
Şekil B.3: %50 sıklıkta kuma ait kayma gerilmesi - yanal yerdeğiştirme eğrisi	67
Şekil B.4: %50 sıklıkta kuma ait kayma mukavemeti açışı.....	67
Şekil B.5: %80 sıklıkta kuma ait kayma gerilmesi - yanal yerdeğiştirme eğrisi	68
Şekil B.6: %80 sıklıkta kuma ait kayma mukavemeti açışı.....	68
Şekil C.1: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %100 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.....	69
Şekil C.2: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %75 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.....	69
Şekil C.3: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %50 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.....	70
Şekil C.4: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %25 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.....	70
Şekil C.5: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve malzemede %100 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.....	71
Şekil C.6: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve malzemede %75 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.....	71
Şekil C.7: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve malzemede %25 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.....	72

SEMBOLLER

γ_n	: Tabii Birim Hacim Ağırlığı
γ_w	: Suyun Birim Hacim Ağırlığı
Δh	: Düşey yer değiştirme
ΔL	: Yanal yer değiştirme
E	: Elastisite Modülü
ε	: Şekildeğiştirme
ε_b	: Boyuna Şekildeğiştirme
ε_e	: Enine Şekildeğiştirme
μ	: Poisson Oranı
σ	: Normal Gerilme
σ_{maks}	: Maksimum Normal Gerilme
σ_f	: Nihai Normal Gerilme
τ	: Kayma Gerilmesi
τ_{maks}	: Maksimum Kayma Gerilmesi
τ_f	: Nihai Kayma Gerilmesi
ϕ	: Kayma Mukavemeti Açısı
ω_{ort}	: Ortalama Su Muhtevası
ω_n	: Tabii Su Muhtevası
ω_{opt}	: Optimum Su Muhtevası

ÇİMENTO – EPS KÖPÜĞÜ – KUM KARIŞIMININ HAFİF DOLGU MALZEMESİ OLARAK GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Günümüzde geoteknik mühendisliği alanındaki gelişmeler doğrultusunda dolgu, istinat yapıları, şev stabilitesi gibi bazı uygulamalarda hafif dolguların yapılmasının ekonomik açıdan yararlı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca hafif dolgu malzemelerinin kullanılması çok yumuşak ve sıkışabilir zeminler üzerine yapılan kontrollü dolgular için olduğu gibi, dayanma yapıları arkasına yapılan dolgularda oluşan aşırı toprak basınçları ve stabilite problemlerinin karşılanmasında geleneksel dolgulara göre daha yararlıdır. Hafif dolguların kullanılmasının ne kadar yararlı olacağının doğru bir şekilde tespit edilmesi için malzemenin birim hacim ağırlığı ve çeşitli yüklemeler altındaki mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Genellikle herhangi bir termik santral, fabrika yada bölgeye ait hafif dolgu malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri üreticisi tarafından belirtilir. Fakat bazen malzemenin dayanımı, gerilme - şekildeğiştirme davranışlarının tespit edilmesi için bazı deneylere tabi tutulması gereklidir. Hafif dolgu malzemesinin geoteknik uygulamalarda kullanılması için farklı gerilme koşullarındaki kayma mukavemeti açısı, sıkışabilirlik özelliklerinin ve birim hacim ağırlıklarının bilinmesi gerekmektedir.

Tez kapsamında yapılmış olan deneysel çalışmanın amacı EPS-çimento-kum karışımından oluşan hafif dolgu malzemesinin geoteknik mühendisliğinde kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla çalışmada kendini taşıyamayan zayıf bir zemindeki stabilite sorununa çözüm olarak normal zeminlere göre çok daha hafif, dayanıklı ve sıkışabilirliği yüksek malzeme üretilmesine çalışılmıştır.

Petrolden elde edilen genleştirilmiş polistiren köpük (EPS) günümüzde dünyanın değişik yerlerinde dayanımı düşük olan yumuşak zeminlerin güçlendirilmesinde, şev stabilitesi problemlerinde, köprü ayakları yanal yüklerin sönmülendirilmesinde, yol inşaatı drenaj tabakası yapımında, hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Hammadde olarak küçük köpük tanecikleri şeklinde temin edilen polistiren köpüğü çeşitli kimyasal işlemlerden geçtikten sonra endüstride blok levha şeklinde de kullanılabilir.

EPS'nin kullanım alanları arasında çeşitli geoteknik uygulamaları olan dolgular, istinat yapıları, şev stabilitesi ve köprü ayakları gibi uygulamalar gösterilebilir. Polistiren levhalar istinat duvarları arkasına dolgu malzemesi olarak konulduğu zaman toprak basıncını azaltmada önemli bir rol üstlenir. Ayrıca mukavemeti düşük olan zayıf zemin üzerinde bulunan yollardaki şev dolgularında kullanıldığı zaman alttaki yumuşak zemine etkiyen ölü yüklerin azalmasına yardımcı olacaktır. Tüm bunların yanısıra EPS'nin diğer hafif dolgu malzemelerine karşı uzun yıllar dayanıklılığını koruma ve düşük maliyet açısından üstünlükleri mevcuttur. Bu sebeplerden dolayı inşaat mühendisliğinde zamanla artan bir şekilde rağbet görmeye

başlayan polistiren köpüğü, günümüzde inşaat sektöründe hafif ve sıkışabilir dolgu malzemesi amaçlı ve daha birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında, aşağıda da bahsedilen laboratuvar deneyleri yardımıyla, hafif dolgu karışımı için hazırlanmış numunelerin geoteknik özellikleri tespit edilmiştir. EPS, çimento ve kumdan oluşan hafif dolgu karışımı için önce karışımdaki kum ve polistiren köpüğünün özgül ağırlıklar ve rölatif sıkılıkları belirlenmiş, daha sonra ise kesme kutusu deneyleri, serbest basınç deneyleri, CBR ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Burada karışımın yeterli dayanıma sahip olması için başlangıçta 6/1 olarak seçilen çimento/malzeme oranı daha sonra yeniden düzenlenerek 12/1 olarak belirlenmiştir. Ayrıca malzeme içinde bulunan EPS'nin %100, %75, %50 ve %25 gibi farklı oranlarda kombinasyonları yapılarak, karışım için en uygun oran belirlenmeye çalışılmıştır.

Sonuçlar literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırıldığında çimento, polistiren köpüğü ve kum karışımının şev stabilitesi açısından yeterli olduğu ve dolgu ağırlığını azaltmada oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen karışımın birim hacim ağırlığının normal zeminlere göre oldukça düşük olduğu belirlenmiş, buna karşılık dayanımının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Elde edilmiş olan EPS-çimento-kum karışımından oluşan hafif dolgu malzemesinin ağır yapısal yükleri taşıma amaçlı kullanılmaması, yol dolgularında üzerlerine kendi ağırlıklarından başka yüklerin gelmeyeceği şevlerin oluşumunda dolgu zemini olarak kullanılması tavsiye edilir.

DETERMINATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF CEMENT–EPS FOAM–SAND MIXTURE AS A LIGHTWEIGHT FILL MATERIAL

SUMMARY

With the developments in geotechnical engineering, it has been found that lightweight fills are cost beneficial for some applications such as embankments, slope stability and retaining walls. As an example, lightweight materials are advantageous not only for the construction of controlled fills which are done on very soft and compressible soil, but also for fills that are behind structural elements where there is a possibility of excessive earth pressure or a stability problem when using ordinary fill materials. In fact, to determine the potential advantage of lightweight fills, it is important to know about the unit weight and mechanical properties of the material under different loading conditions. For many types of lightweight materials, properties such as physical and chemical are presented by the manufacturer. Sometimes information about stress, strain and strength behavior of materials are not available and some tests need to be done. Information on such properties as the shear strength angles, the compressibility of a fill under various levels of excessive stress and the unit weight are essential for any use of these materials in a geotechnical application. Briefly, geotechnical properties of lightweight materials which are commonly used in embankments, road constructions, retaining walls and slope stability are discussed in this thesis. A comprehensive information is given about lightweight materials such as fly ash, used tires and expanded polystyrene (EPS), then these are compared.

Fly ash is one of the products of combustion of coal, and consists of silica and aluminum silica. Fly ash is classified into two groups due to their sources such as F type and C type fly ash. F type fly ash is the byproduct of anthracite or bituminous coal combustion. It has pozzolanic effect however it needs cement or lime for stability. C type fly ash is the byproduct of lignite or low bituminous coal combustion and also has strong pozzolanic effect as a binder. It consists of lime which gives its pozzolanic effect. In case of using fly ash as a lightweight material in geotechnical applications, which is going to become large waste deposits and environmental problem at thermal power plants, it will be economically feasible than other lightweight materials due to cheaper production.

Also it is explained that recycling of used tires is a major issue for environmental preservation of developed countries. Used tires are used in civil engineering in several areas such as improving shear strength of clay liners as absorbing material in petroleum contaminations, in preventing cracks caused by differential settlement, by adding to drainage systems, erosion prevention layers, concrete and asphalt aggregates. Used tires have advantages like their high performance and durability as a lightweight fill material.

Information about expanded polystyrene (EPS) geof foam which is obtained from the oil is given. This is used in low strength and soft soil construction as a lightweight fill material in different places of the world today. Expanded polystyrene foam is supplied as raw materials in the form of small particles. After completion of various chemical processes, it can be used as a block sheet form in industry.

EPS is widely used in various geotechnical applications such as embankments, retaining structures, slope stability, bridge piers and other applications. Expanded polystyrene sheets have a crucial role in decreasing of earth pressure, when they are used as fill material behind retaining walls. In addition, when it is used in slope fills of highway which is on poor soils, it will help to reduce dead loads acting on underlying soft ground. EPS has advantages of low cost and durability properties for long years against other types of lightweight materials, as well. Due to these reasons, expanded polystyrene has been popular over time in civil engineering and widely used as light and compressible fill material in many geotechnical application areas.

The aim of the laboratory study of lightweight fill that consist of EPS-cement-sand mixture is to investigate its usability in geotechnical applications. For weak soils with low durability which have slope stability problems with this composite soil more durable and compressible lightweight fill material is tried to be created.

In the scope of this thesis, by using various experiments, geotechnical properties of prepared samples were determined for mixture of lightweight fill. Not only lightweight fill mixture which is composed of EPS, cement and sand, but also mixture with sand and EPS samples is used for laboratory tests such as specific gravity, relative density, direct shear tests, unconfined compressive tests, CBR (California Bearing Ratio) and permeability experiments. Here initially selected ratio was 6/1 for cement/material mixture. Due to insufficient strength, this ratio was changed to 12/1. Also to determine the appropriate ratio for the material mixture; different percentages of EPS material such as 100, 75, 50 and 25 were tested.

At the phase of testing, firstly specific gravity test was performed for EPS-cement-sand mixtures, which is a ratio between solid unit weight of soil sample and unit weight of water. Then relative density of samples was determined and values of variable relative density percentages were calculated. By following the calculations, maximum and minimum values of void ratios were determined and the natural unit weight values related to different densities were calculated.

After determining unit weights of mixture components such as expanded polystyrene, cement and sand materials preparation of mixture was executed in the laboratory. Cement dosage was selected depending on the material content of lightweight mixture.

To determine parameters such as shear strength angle, cohesion, undrained shear strength of soil sample for foundations, slopes and retaining structures in laboratory conditions, a shear box test is performed. So, to find these parameters by using shear test, shear strengths of EPS and sand samples were determined in the study. At the beginning samples were placed into square shaped mold and required processes were applied to start the test. Then normal stress was applied vertically and shear stress was applied horizontally to the sample.

As a result of shear box tests, shear strength angles at different relative densities were determined for expanded polystyrene samples which are components of lightweight mixture. Also according to the results, samples are cohesionless, because shear strength was increasing from the initial point at the coordinate system. Shear box results of the same tests were made for sand samples and finally friction angles for sand samples were obtained at three different loading conditions.

To determine the ratio of EPS in the cementitious material mixture, where sufficient shear strength is needed, and unconfined compression tests were done. An unconfined compression test is generally applied for cohesive materials such as clayey soils and cementitious mixtures. So, in this thesis prepared mixture samples were tested for unconfined compression test, then relevant percentage of expanded polystyrene content of material and cement/material ratio of mixture was determined.

Other laboratory test done is California Bearing Ratio (CBR test) that is a method of evaluating the relative quality of sub-grade, sub-base and base soils for pavements. This test was used to determine the settlement of a mixture under controlled moisture and density conditions. CBR value is obtained as the ratio of the unit load required to penetrate a definite depth into a compacted soil sample to the standard unit load required to obtain the same depth of penetration on a standard sample of crushed stone.

Constant head permeability tests were also done. These tests are used to measure the permeability coefficient which is defined as a rate of water flow in soil. Permeability coefficient of soils depends on viscosity of fluid, size of soil voids, grain size distribution, void ratio and saturation degree of soil. During the study permeability coefficient of mixture samples of 7 days and 28 days curing were measured by constant head permeability test. After completion of test and calculations, mixture sample was measured as permeable or not. Permeability rates changes from high permeable value to impermeable value as time passes.

In conclusion all results are discussed and whether EPS-cement-sand mixture is suitable to be used in lightweight embankment. The relevant content of EPS in material is determined as 50% and ratio in terms of weight for cement/material of mixture was measured as 12/1. According to the results, the mixture is defined as a low permeable lightweight fill and it also has CBR value that can be classified as medium. As a result, it was found that a mixture containing cement, polystyrene foam and sand, can be successfully used in some applications such as improvement of slopes and reducing the weight of embankments.

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü tarihsel açıdan irdelendiğinde antik Mısır, Yunan ve Roma imparatorlukları gibi en eski uygarlıklardan itibaren tüm insanlığın günümüze kadar barınak, ulaşım, tarım, sanayi, ekonomi, askeri ve başka alanlarda sürekli ihtiyaç duyduğu bir hizmet dalıdır. Son yıllarda inşaat mühendisliğinde yapılan uygulamalarda ortaya çıkan problemlerin çözümünde, teknolojinin, bilimsel çalışmaların ve deneyimin de getirdiği kolaylıklar sonucu olarak geliştirilen çözüm tekniklerinde dikkate değer bir şekilde artış yaşanmaktadır. Bu yenilikçi çözümler üstyapı, su yapıları, ulaşım, altyapı gibi inşaatın tüm sahalarında kendilerini açık bir şekilde göstermektedir.

İnşaat mühendisliğinin bir kolu olan geoteknik mühendisliğinde de diğer inşaat dallarında olduğu gibi çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Buna örnek olarak jet-grout, diyafram duvarlar, kazık çeşitleri ve zemin iyileştirme teknikleri gösterilebilir. Geliştirilen tekniklere bakılınca bunların büyük kısmının zemin problemlerinin çözümü amacıyla ortaya çıkmış yeni yöntemler olduğu görülecektir.

İnşaat yapılarının mühendislik özellikleri düşük olan problemler üzerinde yapıldığı durumlarda zemin problemlerinin çözümü maksadıyla hafif dolgu, enjeksiyon, zemin değişimi, biyolojik yöntemler gibi çeşitli zemin iyileştirme teknikleri geliştirilmeye devam etmektedir. Bu şekilde yapıdan zemine gelen yüklerin karşılanması, depremsel durumlarda zeminde oluşacak hareketliliklerin kontrol altında tutulması amaçlanmaktadır (Haşal, 2000).

Kendini taşıyamayan bir zemin tabakasının üzerine gelen yükleri azaltmak için zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi olarak yeterli mukavemet ve dayanıklılığa sahip hafif dolgu malzemesi de kullanılmaktadır. Bu şekilde inşaat alanlarında özellikle yol inşaatlarında hafif dolgu malzemesi kullanılarak dolgu altındaki zemine gelen yükler azaltılır (Haşal, 2000).

Geoteknikte hafif dolgu oluşturmak için kullanılan malzemeler orman sanayii atık ürünleri olan talaş, ağaç kabuğu, endüstriyel atıklar olan termik santral taban ve uçucu külleri, kullanılmış oto lastik parçaları ve sanayi ürünü olan polistiren köpüğüdür (Haşal, 2000). Bu malzemelerin kullanılmasıyla birlikte her yıl artarak

dünyada ciddi çevresel sorunlara dönüşen endüstriyel atıkların tüketilmesi sayesinde, ekonomik ve çevresel açıdan yararlanması hedeflenmektedir.

Bu çalışmada, polistiren köpüğü (EPS) danelerinin çimento ve kumla birlikte karıştırılmasıyla elde edilen kompozit hafif dolgu malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenerek, sahada kullanılması durumunda gerekli olan mühendislik özelliklerinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu nedenle karışım ve içerisindeki kum, polistiren köpüğü daneleri gibi malzemeler mühendislik özelliklerini belirlemek amaçlı relatif sıkılık, kesme kutusu, serbest basınç, CBR, sabit seviyeli permeabilite gibi çeşitli laboratuvar deneylerine tabi tutulmuştur. Kendini taşıyamayan zayıf bir zemindeki stabilite sorununa çözüm olarak normal zeminlere göre çok daha hafif, dayanıklı ve sıkışabilirliği yüksek malzeme üretilmesine çalışılmıştır

İkinci bölümde hafif dolgu malzemeleri için literatür araştırması yapılmış, uçucu küller, kullanılmış taşıt lastik parçaları, polistiren köpüğü gibi malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, geoteknik özellikleri belirtilmiş, bu malzemelerin geçmişten günümüze yapılan araştırmalar kapsamında geoteknikte kullanım alanları hakkında bilgiler aktarılmıştır.

Üçüncü bölümde ise tez çalışması kapsamında hazırlanan hafif dolgu malzemesinin ve içerisinde bulunan kum, EPS gibi malzemelerin mühendislik özellikleri laboratuvarında yapılan özgül ağırlık, relatif sıkılık, kesme kutusu, serbest basınç, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonuçlarına göre belirlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre polistiren köpüğü, kum ve çimento – EPS – kum karışımının belirlenmiş olan mühendislik özellikleri tartışılmıştır.

2. HAFİF DOLGU MALZEMELERİ

Hafif dolgu malzemeleri klasik zeminlerin yerine sıkıştırma gerektirmeden konulabilen, birim hacim ağırlıklarının daha düşük olduğu ve gerektiğinde kolayca kazılabilen malzemelerdir (Türkel, 2008). Bu özelliklere sahip malzemeler dolgular, yol stabilizasyonu, istinat yapıları ve şev stabilitesi gibi geoteknik uygulamalarda gittikçe daha yaygın şekilde kullanılmaya başlamıştır. Ayrıca kendini taşıyamayan bir zemin tabakasının üzerine gelen yükleri azaltmak için zemin iyileştirme yöntemleri olarak yeterli mukavemet ve dayanıklılığa sahip hafif dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Bu şekilde inşaat alanlarında özellikle yol inşaatlarında dolgu altındaki zemine gelen yükler azaltılır.

Hafif dolgu malzemelerinin üretiminde endüstride kullanılan atıklardan ve çeşitli kimyasal işlemlerden geçerek elde edilen malzeme ve karışımlardan yaygın bir şekilde yararlanılmaktadır. Bunlara örnek olarak termik santrallerde elde edilen uçucu küller, taşıt lastik atıkları ve genellikle yalıtımda levhalar şeklinde kullanılan genleştirilmiş polistiren (EPS) tanelerinden oluşan hafif dolgu malzemelerini gösterebiliriz. Burada uçucu küllerin ve taşıt lastiklerin endüstri atıkları olması insan sağlığının korunması ve çevre kirliliğinin azaltılması bakımından büyük anlam ifade ediyor. Örneğin yol güzergahlarının yumuşak zeminlerin üzerinden geçtiği durumlarda, bu zeminlerin taşıma gücünün düşük olması nedeniyle sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu zeminlerin taşıma gücünün yeterli olması durumunda bile üzerlerinden taşıt geçtiğinde oluşan yüklere bağlı olarak ortaya çıkan oturmalar zamanla içinde kalması gerektiği sınırı aşmaktadır ki, bu durumda akla gelen zemin iyileştirmesidir. Zemin iyileştirmesine geleneksel bir çözüm yolu olarak da kayma mukavemeti yetersiz olan bir zemin tabakasının, yeterli kayma mukavemetine sahip bir zeminle kısmen yada tamamen değiştirilmesi düşünülebilir. Fakat bu durumda zaman kaybı ve maliyet sorunları ortaya çıkabilir. Bu nedenle geleneksel yöntemler yerine alternatif olarak hafif dolgu malzemeleri kullanılarak değiştirilecek zeminin ağırlığının azaltılması ve maliyet açısından daha ucuza mal edilme yoluna gidilebilir (Aytekin ve Çakıroğlu, 1997).

Bunun yanısıra polistiren malzemelerin de hafif dolgu malzemesi amaçlı karışımlarda kullanılması birim hacim ağırlığının düşük olması sebebiyle çok yararlıdır. Çizelge 2.1’de hafif dolgu malzemelerinin sıkıştırılmış durumdaki birim hacim ağırlıkları görülmektedir (Aksoy, 1998).

Çizelge 2.1: Hafif dolgu malzemeleri (Aksoy, 1998).

Dolgu Malzemesi	Sıkıştırılmış Birim Ağırlık (kN / m³)
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
Taban Külü	15.69 ~ 17.65
Uçucu Kül	14.71 ~ 17.65
Çimento, Köpük ve Volkanik Kül Karışımı	9.81
Kullanılmış Taşıtların Lastikleri	6.28 ~ 9.32
Polistiren Köpüğü	0.20 ~ 0.98

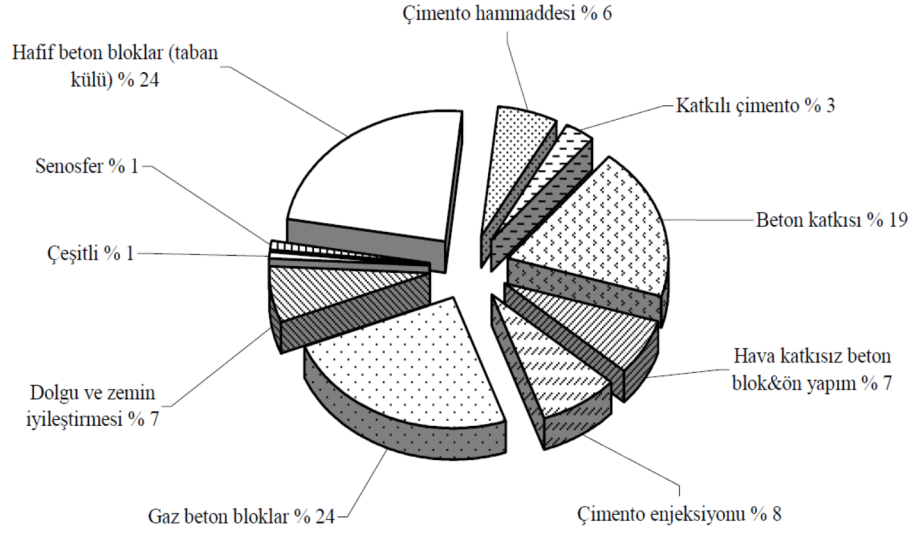
Aşağıda bu malzemelerden uçucu küller, taşıtların lastik atıkları ve çalışmamızda kullandığımız polistiren köpüğünün (EPS) fiziksel ve mekanik özellikleri, geoteknik özellikleri, Türkiye’deki bu konuda yapılmış olan bilimsel çalışmalar ve kullanım sahaları hakkında genel bilgi verilmektedir.

2.1 Uçucu Kül

Zemin iyileştirmede kullanılan yöntemlerden biri olan uçucu kül termik santrallerde kömürün ve katı atıkların yanmasıyla oluşan, kazan bacalarına gazlar vasıtasıyla taşınan bir atık türüdür. İlk olarak 1940’lı yıllarda ABD’de kullanılmaya başlanan uçucu küller, gittikçe yaygınlaşmış ve günümüzde artık beton ve asfalt yollarda, hafif agreganın elde edilmesinde, yol temel tabakalarında dolgu amaçlı, zemin stabilizasyonunda ve endüstriyel sanayi gibi çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmaya başlanmıştır (TÇMB, 2004).

Amerika Kömür Külü Birliği’nin (ACAA) tahminlerine göre ABD’deki termik santrallerde yılda yaklaşık 50 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmakta ve bunun sadece

%25-30'u değerlendirilmekte, kalan %70-75'lik kısmı atık olarak doğada toplanmaktadır. Bunun sonucu olarak doğada ciddi çevresel problemler oluşmaktadır. Bu sorunların aradan kaldırılması maksadıyla da uçucu kül atıklarından yararlanmak maksadıyla büyük çabalar sarf edilmektedir. (Brooks ve diğ., 2011). Aşağıdaki Şekil 2.1'de İngilterede termik santrallerde elde edilen uçucu küllerin inşaat sanayisinin çeşitli kalemlerinde yaygın şekilde, özellikle konumuz olan dolgu ve zemin iyileştirmede %7 gibi bir oranda kullanılması görülmektedir.



Şekil 2.1: İngiltere'de termik santrallerde elde edilen uçucu küllerin kullanım sahaları (Aruntaş, 2006).

Uçucu küller Türkiye'de ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında kullanılmaya başlanmış, daha sonra Karayolları Genel Müdürlüğü köprü ve yol inşaatlarında, az miktarda da olsa katkı çimentoların üretiminde ve son olarak da hazır beton, hafif dolgu üretiminde kullanılmaya başlandı (TÇMB, 2004).

Ayrıca Türkiye'de uçucu küller kullanılarak yapılmış bilimsel çalışmalara örnek olarak "Uçucu Külün Geoteknikte Kullanılması" (Aksoy, 1992), "Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu" (Tan ve İyisan, 1996), "Uçucu Kül Çimento-Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri" (Haşal, 2000), "Yol Kaplamalarının Özelliklerine Lastik, Karbon Karası ve Uçucu Kül Etkisi", (Hamamcı, 1991), "Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları" (Baykal ve diğ., 1996), "Geçirimsiz Toprak Perde Uygulamasında Lastik Katkılı Uçucu Külün Permeabilite ve Mukavemeti" (Köprülü, 1991), "Yol Güvenlik Bariyerlerinde Sıkıştırılmış Uçucu Kül Karışımlarının Kullanılması" (Mehmetoğlu,

1994) ve diğ er konulu ç alışmalarda yaygın bir şekilde endüstriyel atık olarak uçucu külün inşaat sektöründe kullanımı incelenmiştir (Alkaya, 2009).

Yumuřak zeminler üzerindeki inşaat yapılarında oturmaları azaltmak, yan al akış ve sismik sıvılaşma için zemin iyileştirmesi gereklidir. Zemin iyileştirmesi yapılırken dūřey dren ve önyüklemeler gibi ölçütler sık sık kontrol edilmelidir, çünkü uçucu kül depozitinden oluşan zeminlerde ince dane oranı yüksek olduğ undan kohezyonlu malzeme gibi davranış sergilerler. Kuriyami'nin yaptığı önyükleme testleri göstermiştir ki, uçucu küllerin permeabilitesi kumlardan dūřük, fakat tipik kil numunelerinden yüksek çıkmaktadır. Kül tanelerinin silt boyutunda olması, bunu bir nevi teyit etmektedir. Uçucu kül zeminlerin iyileştirilmesinde orta seviyede permeabilite elde edilmesi ve plastisitenin de olmaması için daha ekonomik metod olan ağır kompaksiyon metodu uygulanabilir. (Kokusho ve diğ, 2011).

Uçucu küller kimyasal bileşenleri oranlarına göre ASTM ve TS EN 197-1 standartlarında farklı şekillerde sınıflandırılırlar. ASTM C 618 standardında F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılırlar. ASTM C 618 standardında F sınıfı olarak nitelendirilen uçucu küller bitümlü kömürden üretilir ve SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ toplamalarının yüzdesi %70'den fazladır. Aynı zamanda CaO yüzdesi de %10'un altında kalır, dolayısıyla dūřük kireçli, pulverize uçucu küller olarak adlandırılır. C sınıfına ait uçucu küllerde ise SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ toplamalarının yüzdesi %50'den fazladır. Bunun yanısıra CaO yüzdesi %10'dan fazladır ve dolayısıyla yüksek kireçli küller olarak adlandırılır, puzolanik özelliklerinin yan ında bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

TSE EN 197-1 standardında ise uçucu küller silissi (V) ve kalsersi (W) olarak sınıflandırılırlar. Burada V sınıfına ait küllerde reaktif silis miktarının %25'ten fazla, reaktif kireç oranı ise %10'dan az olması gerekiyor. Buna karşılık W sınıfına ait küllerde reaktif silis miktarı %25'ten fazla, reaktif kireç miktarı %10'dan fazla olması gerekiyor (TÇMB, 2004).

2.1.1 Uçucu külün fiziksel özellikleri

Uçucu kül'ün fiziksel özellikleri yakılan kömürün türüne, özelliklerine ve yakılma yöntemine göre farklılıklar arz etmektedir. Uçucu kül içinde yakılan karbon oranına göre renk alır. şöyle ki, yakılan karbon miktarı azaldıkça renk griden koyuya doğru değişim gösterir. Granülometrik özelliklerine gelince, daneleri ince ve yuvarlak

biçiminde, çapları da 1-200 μm arasında değişir. Granülometrik eğride çaplarının yaklaşık %75'i 45 μm 'den, %50'si de 20 μm 'den daha küçüktür. Uçucu külün özgül ağırlığı 2.2-2.7 gr/cm^3 arasında değişir. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri çizelge şeklinde aşağıda Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

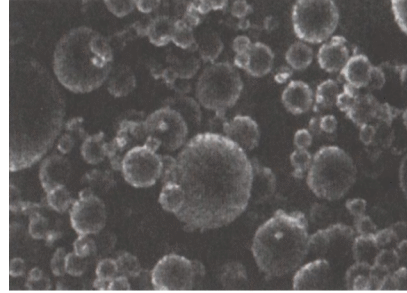
Çizelge 2.2: Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (TÇMB, 2004).

Çap (μm)	Şekil	Renk	Yoğunluk (g/cm^3)	İncelik
1-200	Yuvarlak	Gri	2.2-2.7	~Çimento inceliğinde

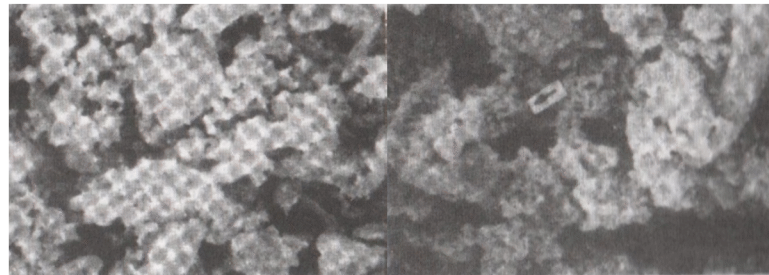
2.1.2 Uçucu külün kimyasal özellikleri

Uçucu külde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 'nun yanısıra SO_3 , MgO , titanyum, fosfor, mangan, molibden, yanmamış karbon ve diğer alkali oksitler de bulunur. Bütün bu bileşenlerden oluşan uçucu küllerin kimyasal bileşimleri, kömürün yapıyla özellikleri, jeolojik yapısı, yanma işlemlerine göre farklılık gösterir.

SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO gibi başlıca bileşenlerin genel bileşimdeki oranlarına göre uçucu küller silissi yada kireçsi yapı aralığında yer alırlar. Bunun mikroskop altında incelendiğinde bileşen miktarına göre aşağıdaki Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'deki gibi hal aldığını açıkça görebiliriz.



Şekil 2.2: Yüksek silisli uçucu kül, pulverize uçucu kül (TÇMB, 2004).



Şekil 2.3: Yüksek kireçli uçucu kül (TÇMB, 2004).

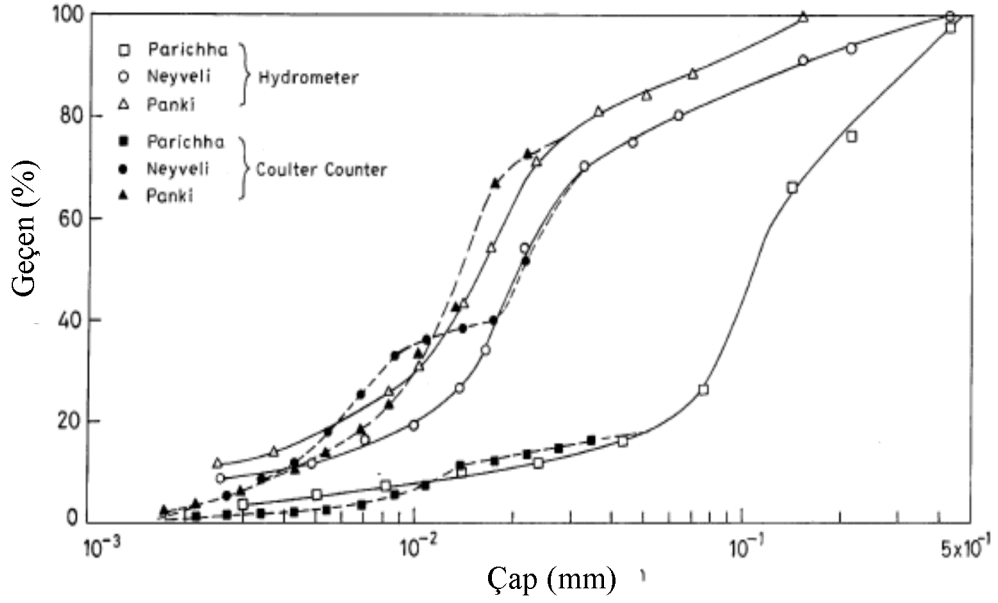
2.1.3 Uçucu külün geoteknik özellikleri

Uçucu küller inşaat sektöründe çeşitli uygulamalarda kullanılarak, yakılan kömür sonrası ortaya çıkan atıktan dolayı oluşan çevre kirliliğinin azaltılmasında önemli rol üstlenmektedir. Yaygın olarak çimento, beton ve yapı malzemelerinin üretiminde kullanılmasına rağmen, uçucu küller geoteknik uygulamalarda da gittikçe yaygınlaşmaya başlayan bir malzeme halini almıştır. Dünyada ve Türkiyede bu atığın değerlendirilerek atık malzemede geri dönüşümün sağlanması, ekonomik olarak daha ucuz ve kaliteli malzeme kullanılması, ayrıca enerji tasarrufu gibi çözümler amaçlanmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde uçucu küller zemin stabilizasyonunu sağlamak, taşıma gücü zayıf zeminlerde hafif dolgu malzemesi, istinat yapıları arkasına dolgu ve bent yapmak amaçlı kullanılmaktadır. Bunların dışında uçucu küller yol kaplamalarında taban dolgu malzemesi, atık depolama sahalarındaki taban malzemesi ve üst beton kaplamasında oluşan hasarlarda kireçle birlikte enjeksiyon gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de de görüldüğü üzere çeşitli inşaat kalemlerinde uçucu küller yaygın olarak kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

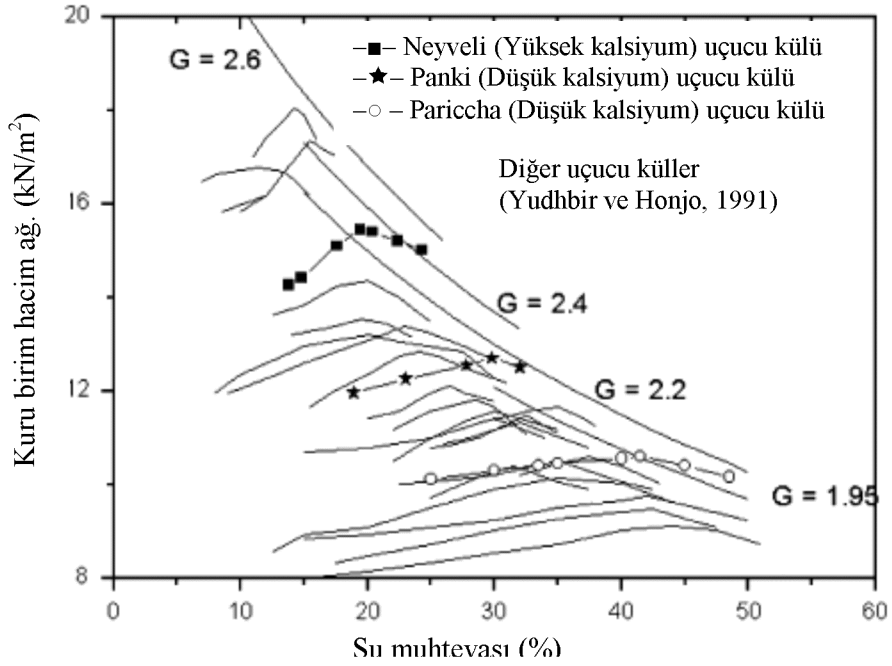
Sıkışabilirlik açısından uçucu küllerin suyla karıştırıldıklarında çok yüksek sertleşme davranışı sergilediği ve sıkıştığı görülmüştür. Bu nedenle uçucu kül numuneleri adeta ‘çimentolaşmış zemin’ gibi hareket ederek suyun zemini terk etmesine engel olurlar. Bundan dolayı da uçucu kül zeminin boşluk oranının zamana bağlı gerilmelerin artmasıyla değişmesi çok zordur. Dolayısıyla F sınıfı uçucu küllerde oturmaya bağlı zeminde yerleşme probleminin oluşması gözlenmez (Das ve Yudhbir, 2006).

Düşük kalsiyum (F sınıfı) ve yüksek kalsiyum (C sınıfı) oranına sahip uçucu küllerde yapılan karşılaştırmada görülmüştür ki, düşük kalsiyum oranına sahip uçucu küldeki düşük kireç miktarı hidrasyonda bir kimyasal değişim oluşturmuyor, fakat yüksek kalsiyum oranına sahip uçucu kül yüksek oranda kireç içermesinden ve serbest haldeki kireç küreciklerinin suyla reaksiyona girmesinden dolayı hidrasyonda önemli derecede kimyasal değişimler oluşturuyor. Aşağıda Şekil 2.4’de içerdiği kalsiyum miktarına göre uçucu küllerde dane çapı dağılımında farklar görülmektedir (Das ve Yudhbir, 2006).



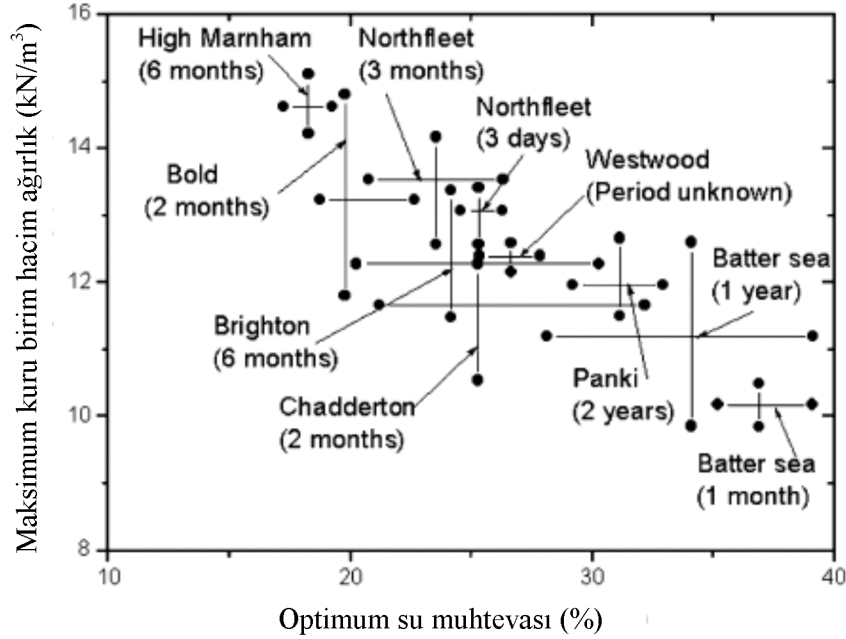
Şekil 2.4: Uçucu küllerin dane çapı dağılımı (Das ve Yudhbir, 2006).

Uçucu küller kompaksiyon özellikleri açısından incelendiğinde F sınıfı uçucu küllerin eğer C sınıfı küllerle kıyaslanırsa, daha yüksek kuru birim hacim ağırlığa fakat daha düşük su muhtevasına sahip oldukları görülecektir. Aşağıdaki kompaksiyon eğrilerinde (Şekil 2.5) F sınıfı Neyveli uçucu kül numunesi ve düşük kalsiyumlu Panki ve Pariccha numunelerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.5: Farklı uçucu küllere ait kompaksiyon eğrileri (Das ve Yudhbir, 2006).

Genellikle aynı termik santralde farklı zamanlarda elde edilen uçucu kül numuneleri arasında bile kompaksiyonda farklılıklar mevcuttur. Şekil 2.6'da aynı santralden 3 günden 2 yıla kadar olan zaman aralığında farklı zamanlarda toplanmış uçucu kül numunelerinde optimum su muhtevaları (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının ($\gamma_{k,maks}$) farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır (Winter ve Clarke, 2002; Yudhbir ve Honjo, 1991).



Şekil 2.6: Farklı numunelerde maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası farklılığı (Das ve Yudhbir, 2006).

2.1.4 Uçucu kül uygulaması

Güneybatı Nijerya'da yapılmış bir uygulamada aşağıda Çizelge 2.3'te özellikleri gösterilen tropikal laterit (kırmızı kil) zeminde uçucu kül kullanılmış, üç zemin numunesinin mühendislik parametrelerine çimentolu uçucu kül eklenmesi durumunda ne şekilde etki oluşacağını hesaplanması amaçlanmıştır. Burada mühendislik özellikler otoyol tasarım ve inşaatına göre araştırılmıştır.

Uçucu külün zemin içerisindeki ağırlıkça yüzdesi %2,5 artışlarla %0-dan %15-e kadar artırılmıştır ve geoteknik özellikler hesaplanmıştır. Uçucu külün yüzdesi arttıkça her bir zeminde plastisite ve mekanik özelliklerinde artan yönde iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Zemin örneklerinin ortalama özellikleri %0 ve %12.5 uçucu kül katkılarına göre kıyaslandığında, likit limit (%39.0-dan %3.3-e), plastisite indisi (%15.3-den %9.3-e), optimum su muhtevası (%15.8-den %9.7-ye) gibi özelliklerin azaldığı, buna karşılık

maksimum kuru birim hacim ağırlığı (1920 kg/m³-den 2180 kg/m³-e) ve CBR (%20.0-den %53.0-e) değerinin yükseldiği görülmüştür. Laterit zeminlerde stabilizasyon için uçucu külün ağırlıkça yüzdesinin %12.5 olması tavsiye edilmiştir zira bu değerden itibaren yüzde arttığında zemin özelliklerindeki iyileşmeler ihmal edilebilecek derecede azalıyor.

Çizelge 2.3: Zemin A, B ve C numunelerin fiziksel özellikleri (Okunade, 2010).

Fiziksel Özellik		Zemin A	Zemin B	Zemin C
Açıklama		Kırmızı- kahverengi kumlu kil	Kırmızı- kahverengi killi kum	Açık- kahverengi kumlu kil
	9,50 mm	100	100	100
	4,75 mm	95,3	95,2	98,1
	2,36 mm	93,3	93,4	94
Dane çapı dağılımı (yüzde geçen elek çapları)	1,18 mm	90	88,4	85,4
	0,600 mm	79,1	80,1	76,2
	0,425 mm	68,6	70,2	62,1
	0,300 mm	59,7	61,4	54,6
	0,150 mm	48,2	43,8	43,5
	0,075 mm	40,1	40,5	31,4
	Çakıl, %		6,7	6,6
Kum, %		53,2	48,9	62,6
İnce dane, %		40,1	40,5	31,4
Özgül ağırlık		2,7	2,86	2,88
Doğal su muhtevası, %		18,8	20	15,9
Likit limit, %		38	42	37
Plastik limit, %		21	28	22
Plastisite indisi, %		17	14	15
Opt. Su muhtevası (Standart Proktor), %		18,1	14,4	15
Maks. Kuru birim hacim ağ. (Standart Proktor), %		1840	1960	1960
AASHTO Sınıflandırma		A-6	A-7-5	A-2-6
Grup indisi		3	2	1
Birleşik zemin sınıflandırma		SC	MI	SC

Aşağıdaki Çizelge 2.4'te A, B ve C numunelerin ortalama zemin özelliklerinin zemine katılan uçucu kül yüzdesinin %0-dan %15-e kadar artışında gösterdiği değişim görülmektedir (Okunade, 2010).

Çizelge 2.4: A, B ve C zemin örneklerine eklenen uçucu külün artan yüzdesine göre zemin özelliklerinin değişimi (Okunade, 2010).

Zemin Özelliği	Kömür Uçucu Kül, Ağırlıkça Yüzde (%)						
	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
Likit Limit, %	39	42	34,7	35	32,7	33,3	31,3
Plastik Limit, %	23,7	28,3	22,7	24,3	23	24	22,7
Plastisite İndisi, %	15,3	13,7	12	10,7	9,7	9,3	8,7
Optimum Su Muhtevası (Standart Proktor), %	15,8	13,7	12,7	10,7	10,4	9,7	9,2
Maks. Kuru Birim Hacim Ağırlık (Standart Proktor), kg/m ³	1920	2036,7	2070	2120	2156,7	2176,7	2203,3
Islak olmayan CBR, %	20	30	36	37,7	43,7	53	55,3

Bu uygulamada yapılan çalışma sonucunda alınan sonuçlara göre,

- Tüm özellikler birlikte dikkate alındığında laterit zeminler için en etkili stabilitenin, çimentolu uçucu külün zemine kuru birim hacim ağırlığının %12.5 oranında katıldığında sağlandığı tespit edilmiştir.
- Uçucu kül laterit zemin ile karıştırıldığında zeminin plastisite ve mekanik özellikleri iyileşir. Bu likit limit ve plastisite indisindeki düşüş ile açıklanabilir.
- Yukarıda belirtilen özelliklerdeki düşüşe karşılık, zeminin kuru birim hacim ağırlığı gibi kompaksiyon özelliğinin ve CBR değerinde artışın yaşandığı gözlenir.

Uçucu külün kullanılması durumunda termik santrallerde atık yığınları haline gelmiş ve ciddi çevre sorunu oluşturabilecek bir atık malzemesinin diğer hafif dolgu malzemelerine ucuz olması nedeniyle de alternatif olacağı ve ekonomik açıdan değerlendirilebileceği görülmektedir (Okunade, 2010).

2.2 Kullanılmış Taşıt Lastik Parçaları

Günümüzde taşıt endüstrisinin bir parçası olan lastikler kullanılarak ömrünü tamamladığı takdirde oluşan atık lastikler çoğunlukla depolanır ve bu durum da insan sağlığı ve çevre kirliliği bakımından artan tehditler oluşturmaya devam etmektedir. Bilim adamları oluşan lastik atıklarının yeniden değerlendirilerek endüstride kullanılmasıyla ilgili hem yeni çözümler, hem de ekonomik olarak yararlar elde etme yolunda fikirler geliştirmektedirler.

Lastik parçaları başarılı bir şekilde inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmıştır. Lastik parçacıklarının boyları genellikle 2.5-30 cm arasında değişmektedir. Hurda Lastik Yönetim Konseyi'nin hesaplamasına göre Amerika Birleşik Devletlerinde yılda 500 milyondan çok parça lastik üretiliyor ve bu da neredeyse kişi başına iki lastik parçası düşmesi anlamına geliyor. (EPA, 1999) Bu lastik parçalarının da yaklaşık %24-lük kısmı stoklanıyor, inşaat alanında kullanılan miktar ise sadece %4 gibi bir yüzde (Pierce ve Blackwell, 2003). Aşağıda Şekil 2.7'de lastik parçaları ile ilgili bir foto görülmektedir (Guleria ve Dutta, 2011).



Şekil 2.7: Lastik parçalarının görünümü (Guleria ve Dutta, 2011).

Türkiye'de de her geçen gün artan taşıt üretimine paralel ortaya çıkan atık lastik miktarı atık lastik depo sahalarında oluşan yangınlar ve bu yangınlar sonucu ortaya çıkan hava kirliliği, çevre kirliliği, bunun yanısıra depolama maliyetleri gibi çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Örneğin 2000 yılında Türkiye'de ömrünü tamamlamış atık lastik miktarı yaklaşık 120 000 civarında olmuştur (Deniz ve Alataş, 2001). Bu

rakamın her geçen yıl arttığı düşünülürse ve bunların yok edilmemesi durumunda ciddi bir çevresel sorunla karşı karşıya olduğumuzu varsayabiliriz.

Türkiye Ulusal mevzuatında lastik endüstrisi tehlikeli atık üreten sanayiler içerisinde yer almasından dolayı önceleri ‘Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’ndeki kriterlere tabi tutuluyordu fakat burada bizzat lastik üretiminden bahsedilmiyordu. Dolayısıyla Çevre Bakanlığı 10.07.2001 yeni tarihli yönetmelikte değişiklik yaparak atık lastikleri ‘Özel İşleme Tabi Atıklar’ listesine dahil ederek onların yeniden kullanılması, taşınması ve yakılması konusunda yeni düzenlemeler getirdi (Doğan, 2005).

Atık lastiklerle ilgili Türkiye’de yapılan bilimsel çalışmalara örnek olarak “Lastik Agregalı Betonların Özelliklerinin Deneysel Olarak İrdelenmesi” (Doğan, 2005), “Atık Taşıtlı Lastiğin Beton İçerisinde Kullanımı ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi” (Emiroğlu, 2006), “Kullanılmış Lastik Granülleri, Kum ve Çimentodan Oluşan Kompozit Zeminin Özelliklerinin Belirlenmesi” (Atapek, 2008), “Atık Taşıtlı Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri” (Sugözü ve Mutlu, 2009), “Kaolinit ve Lastik Lifi Karışımının Kayma Mukavemeti ve Deformasyon Davranışı” (Sarica, 2001), “Gerilmenin Benzinli Lastik Zemin Kaplamalarının Hidrolik Geçirimsizliğine Etkisi” (Özkul, 1998), “Drenajlı ve Drenajsız Yüklemede Lastik Lifli Kil Zeminlerin Kayma Davranışı” (Özkul ve Baykal, 2007) “Lastik – Zemin Kaplamalarının Permeabilitesi” (Baykal ve Alpatlı, 1995), “Petrol Atığı Tabanlı Sıkıştırılmış Lastik – Kil Karışımlarının Geçirimsizliği” (Alpatlı, 1992) gibi çalışmaları gösterebiliriz.

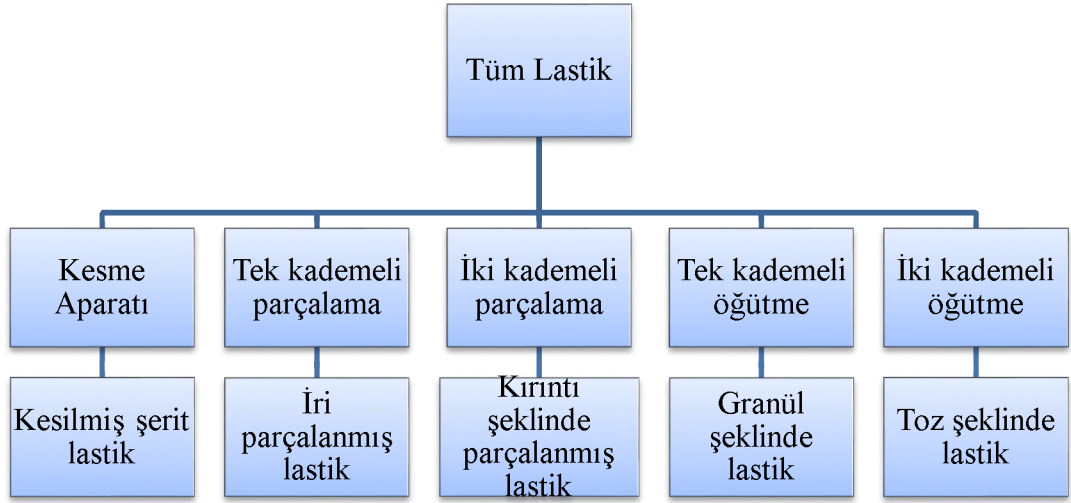
Lastik parçaları inşaat mühendisliğinde dolgu zeminler ve istinat yapılarında hafif dolgu malzemesi olarak, şev stabilitesinde, yol inşaatlarında drenaj tabakası yapımında ve yumuşak zeminlerin güçlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Humphrey’e (1999) göre inşaat mühendisliği uygulamalarında lastik parçalarının kullanılmasının düşük malzeme birim hacim ağırlığı, yüksek dayanıklılık, yüksek hacimsel sıkışabilirlik ve ekonomik olarak alternatiflerine karşı daha ucuz olması gibi yararları vardır (Pierce ve Blackwell, 2003). Bu yararlarının dışında lastik parçalarının çevre sağlığı açısından da yararları mevcuttur. Her sene dünyada artan lastik parça yığınlarının yeniden değerlendirilerek inşaat uygulamalarında kullanılması inşaatla ortaya çıkan maliyetlerin de azalmasında öncü olacaktır. 1994 senesinde ABD’de lastik atıklarından yeniden kullanılması amacıyla sadece %2-lik

kısmın değerlendirilmesine karşılık, bu oran 2001 senesinde artarak %12-ye çıkmıştır (Edinçliler ve diğ., 2010).

Atık lastiği değerlendirme sanayisinde kauçuk içerisindeki çelik ve elyafın ayrıştırılması, lastik boyutlarının küçültülmesi işlemleri yapılarak aşağıda Şekil 2.8’de gördüğümüz beş farklı türde lastik ürünü elde ediliyor (Sugözü ve Mutlu, 2009).

Şekil 2.8: Kullanılmış lastikten elde edilen çeşitli ürün türleri (Sugözü ve Mutlu, 2009).



Lastik ve lastik ürünleri çoğu amaçlar için pratikte homojen malzeme olarak kullanılıyor, fakat şerit lastik, lastik hurdası veya lastik yongası işlemlerine tabi tutulan lastik atığında fiziksel özelliklerde değişiklikler olabilir veya lastiklerdeki demir telleri ve kumaş sökülebilir. Lastik atıkları işlemlere tabi tutularak oluşturulan parça lastik şeritleri, lastik parçaları veya lastik hurdası geoteknik mühendisliğinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılır. Kullanılmış lastiklerin bir başka yeniden değerlendirilme yolu lastik yongasıdır. Diğerlerinin aksine lastik yongası lastiklerin cilalanarak yeniden dönüştürülmesi sanayisinin ürünüdür. Aşınmış lastiklerin yüzeyleri soyularak kauçukla kaplanır. Bu soyulma işlemi sırasında elyaf şeklinde lastik yongası elde edilmiş olur. Aşağıdaki Şekil 2.9’da kullanılmış lastiklerin değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkan lastik ürünleri görülmektedir (Ahmed, 1993).



Şekil 2.9: Kullanılmış lastiklerin çeşitli işlemlere tabi tutulmasıyla elde edilen ince lastik parçaları, lastik şerit parçaları, lastik yongası ve lastik hurdası (Ahmed, 1993).

2.2.1 Şerit lastik parçaları

Şerit lastik parçalarının çapları doğrama makinasının tasarımına göre değişir ve genellikle 50 ile 300 mm arasında değişir (ASTM D 6270-98). Şerit lastiğin kendisine özgü özelliklerinden dolayı dolgu malzemesi olarak bir kaç iyi yönü bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi hafif dolgu malzemesi olarak ekonomik olmasıdır. Sıkıştırılmış şerit lastik parçalarının birim hacim ağırlığı 0.24 g/cm^3 - 0.70 g/cm^3 arasında değişmektedir. Bu da yaklaşık tipik zeminin 0.1 ila 0.4 katı ağırlık demektir. Şerit lastik parçaları dolguda zeminle karıştırılarak da kullanılabilir ve böylece daha az sıkışabilirliğe ulaşılır. Edil ve Bosscher (1994) yaptığı çalışmaya göre şerit lastik parçaları yada şerit lastik parçalı karışımlar düşük gerilmeler altında yüksek sıkışabilirlik kabiliyetine sahiptir.

Şerit lastik taneleri drenaj özelliğine de sahip olduğundan, dolguda yükleme sırasında şev stabilitesi problemlerine yol açan aşırı boşluk basıncına neden olmazlar. Salgado ve Yoon (2003) yaptığı çalışmalarda test amaçlı oluşturulan dolguda sonuçların drenaj açısından oldukça tatmin edici olduğunu gözlemlemişler. Dolguda şev stabilitesi problemi, yolda çatlamlar yada kaymalar ortaya çıkmamış. Drenaj özellikleri suya doygunken dolgunun yada istinat yapısının stabilitesine etki eder, dolayısıyla düşük permeabiliteye sahip, suya doygün dolguda aşırı boşluk suyu

basıncı oluştuğunda şev stabilitesi sorununa yol açar. Sıkıştırılmış şerit lastik parçalarının permeabilite değerleri kaba daneli çakıllarda olduğu gibi 2.0 ile 0.75 cm/s arasındadır (Ahmed, 1993)

2.2.2 Lastik hırdası

Lastik hırdasının geometrik özellikleri dikdörtgen veya kare şeklinde-dir. Genellikle lastik içindeki teller sökülmüş şekilde 12 ile 50 mm çapındadır. Humphrey'e (1999) göre lastik hırdasının inşaat mühendisliğinde kullanımında düşük yoğunluk, yüksek dayanım, yüksek ısı izolasyonu ve ekonomiklik gibi yararları vardır. Yüksek eğimde inşa edilen dolgularda dolgu malzemesi olarak zemin-lastik hırdası karışımının kullanılması durumunda, dolgu yüksek kayma mukavemetine ve düşük birim hacim ağırlığına sahip olur. Burada dik eğimin olması kullanılan malzemede tasarruf sağlıyor. Bunun yanısıra hafif dolgu malzemesinin kullanılmış olması daha az oturmaların oluşmasını sağlıyor.

2.2.3 Lastik yongası

Lastik yongası atık lastiklerin yeniden dönüştürme sanayisinde cilalanması işlemleri sırasında ortaya çıkan bir lastik ürünüdür. Elyaf biçiminde olan lastik yongası aşınmış lastiklerin yüzeylerinin kauçukla kaplanması sırasında ortaya çıkar. İnce lastik parçalarının aksine lastik yongası küçük çaplı ve elyaf biçiminde olması onların zeminle kompozit hale gelmesini sağlıyor. Dolgularda lastik yongasının tek başına kullanılması kayma mukavemeti parametrelerinin düşük olması nedeniyle uygun görülmüyor. Lastik yongası zemin iyileştirmede daha çok zemin özelliklerini iyileştirmek için katkı maddesi olarak kullanılır. (Edincliler ve diğ, 2004; Edincliler, 2007)

Zemin kauçuğu olarak da anılan lastik yongası lastik içerisindeki metal tellerden arındırılmış olan, boyut olarak lastik parçalarından küçük olan ince kauçuk parçalarıdır. Dane çaplarını 600 m yada daha altına indirmek için çeşitli yöntemler uygulanabilir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında lastik yongaları günümüzde başarılı bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Düşük zgl ağırlığı nedeniyle lastik yongası hafif dolgu ana malzemesi için düşünülebilir. Lastik yongası hafif dolgu malzemesi olarak kullanıldığı takdirde zemindeki oturmaların azaldığı görülüyor.

2.2.4 Toz lastikler

Toz lastikler lastik doğrama aşamasının yukarıdaki parçalara göre daha küçük boyutlarıdır ve boyutlar 0.075 mm ile 4.75 mm arasında değişmektedir. Toz lastiğin birim hacim ağırlığı elyaf, çelik tel gibi maddeleri içermemesi durumunda diğer hafif dolgu malzemelerinde olduğu gibi tipik zemin yoğunluğundan daha düşük yaklaşık 1.15 g/cm³ kadar olmaktadır. Atık lastikleri toz haline getirmek için mikro değerirmenler yada sıvı azotun kullanıldığı nitrojenle parçalama yöntemleri kullanılmaktadır (Sugözü ve Mutlu, 2009).

2.3 Genleşmiş Polistiren (EPS)

Genleştirilmiş polistiren köpük (EPS-Expanded Polystyrene Foam) petrolden elde edilen, köpük halindeki, kapalı gözenekli, tipik olarak beyaz renkli termo plastik bir malzemedir. Genişletilmiş polistiren (EPS) bugün artık dünyanın değişik yerlerinde, mukavemeti düşük, yumuşak zemin inşaatlarında hafif dolgu malzemesi olarak zemin değişikliğinde kullanılmaktadır.

EPS'nin kullanıldığı yol güzergahları genellikle killi zeminler üzerinde ve heyelanlı bölgelerde bulunur. Polistiren köpüğü ayrıca köprü ayakları ile çevrelediği zemin arasına konularak, zeminden köprü ayaklarına gelen yanal basınçların sönumlendirilmesinde ve köprü ayaklarında zamanla oluşabilecek farklı oturmaların azaltılmasında başarıyla kullanılmaktadır. Bunlara pratikte bir örnek olarak Norveç'te birkaç sene kullanılması düşünölen bir servis köprüsü zeminin taşıma gücünün düşük olmasından dolayı EPS üzerine inşa edilmiştir. Bu uygulamada zemin yumuşak kilden oluştuğu için geleneksel dolgu malzemelerinin kullanılması mümkün olmamıştır (Aytekin ve Çakıroğlu, 1997).

2.3.1 Fiziksel özellikler

Polistiren köpüğü hammadde olarak küçük köpük tanecikleri şeklinde temin edilir. Daha sonra üretimin ön şişirme aşamasından itibaren kimyasal işlemlerden geçerek, endüstride kullanılan blok şekline dönüşür. İşlemler sırasında polistirol taneciklerinin şişmesi sonucu içinde havanın bulunduğu bir sürü kapalı gözenek oluşur. Tanecikler içerisinde kalan havadan dolayı malzemenin yoğunluğu aşırı derecede düşük olur. Elde edilen EPS levhalarındaki polistirenin oranı %2'dir. Geri kalan %98'lik kısım ise hücrelerde hapsolan havadan dolayı yalıtımda EPS levhaları yüksek performans

gösterir. Şekil 2.10'da polistiren köpüğü hammadde olarak ve Şekil 10b'de kimyasal işlemler sonucu elde edilen levha şeklinde görülmektedir (Url-1).



Şekil 2.10a: Polistiren köpüğü hammadde olarak görülmektedir (Url-1).



Şekil 2.10b: Polistiren köpüğü levha şeklinde (Url-1).

Hammaddesi küçük tanecikler halinde temin edilen polistiren, ön şişirme işleminden geçer. Su buharı yardımıyla 1000 dereceye getirilen polistirol tanecikleri, pentan gazı sayesinde şişmeye başlar. Organik bir bileşen olan pentan, polistirol taneciklerini içerisinde çok sayıda kapalı küçük gözenegin oluşmasını sağladıktan sonra hava ile yer değiştirir. Açığa çıkan pentan gazı, üretim sırasında ve üretimi takiben çok kısa sürede atmosferde zaten bulunan karbondioksit (CO₂) ve su buharına (H₂O) dönüşür, çevreye hiçbir zarar vermez. Bu işlem sırasında durgun hava, EPS levhaların bünyesinde bulunan çok sayıdaki küçük kapalı gözenekli hücreler içinde hapsolür ve bu aşamada malzemenin istenilen yoğunluğu büyük ölçüde sağlanır. Yoğunluğa bağlı olmakla birlikte 1 metreküp EPS'de 3-6 milyar arasında gözenekli hücre bulunur. Elde edilen malzemenin %98'i hareketsiz ve kuru hava, %2'si polistirendir.

EPS levhalarının yalıtım konusundaki üstün performansını sağlayan da bu hareketsiz ve kuru havadır (Url-1).

EPS'nin kullanım alanları arasında çeşitli geoteknik uygulamaları olan dolgular, istinat yapıları, şev stabilitesi ve köprü ayaklarında yanal etkileri azaltma gibi çeşitli uygulamaları gösterebiliriz (Elragi ve diğ, 2004).

Polistiren köpüğünün kullanımı ilk olarak 1960'lı yıllarda başlamıştır. İlk olarak bu senelerde Amerika Birleşik Devletlerinde yol kaplamada izolasyon malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. İzolasyon malzemesi olarak kullanılmaya başlaması devamında hafif dolgu uygulamalarında da kullanılmasının önünü açtı. Norveç'te 1970'lerde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmaya başlanan EPS, toprak basıncını azaltmada etkili olunca inşaat mühendisliğinde zamanla artan bir şekilde rağbet görmeye başlamıştır. Polistiren köpüğü günümüzde inşaat sektöründe hafif ve sıkışabilir dolgu malzemesi amaçlı ve daha birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Son on senede Japonya'da özellikle zayıf zeminler üzerine inşaat yapılmasının kaçınılmaz olduğu yerlerde köpük kullanımının yaygınlaşması, köpük ürünlerinin kullanımında dünyada lider ülke konumuna yükseltmiştir (Hazarika, 2006).

EPS'nin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde çoğunlukla küçük numuneler üzerindeki laboratuvar testleri kullanılmaktadır. Fakat burada elastik bir malzeme olan EPS numune çapının istenen elastik parametre üzerindeki etkisi çok az bilinmektedir. EPS'nin serbest basınç altındaki davranışı konusunda yapılan çalışmalar malzemenin elastik parametreler üzerinde numune boyutunun önemli etkisinin olduğunu göstermiştir (Hazarika, 2006).

Polistiren köpüğünün yaygınlaşmasının sebeplerinden biri de maliyet, uzun yıllar korunabilen dayanıklılık, çevresel etkiler gibi mühendislik özelliklerine sahip olmasıdır. Sıkıştırma işlemlerine tabi tutulan uygulamalarda deformasyon yönünde polistiren köpüğünün gösterdiği katılık özelliği dikkate değerdir. Burada katılık, polistiren köpüğü yüzeyine uygulanan normal gerilmenin aynı yönde EPS yüzeyinde meydana gelen deformasyona oranı olarak tanımlanır (Horvath,1997). Malzeme özellikleri hakkında fikir edine bilmek için Çizelge 2.5'teki genişmiş polistiren (EPS) genel özelliklerine bakılabilir.

Çizelge 2.5: Genleşmiş polistiren (EPS) genel özellikleri (Url-2).

Teknik Özellik	İlgili Standart	Birim	EPS Genleşmiş Polistiren			
Yoğunluk	DIN 53420	kg/m ³	15	20	30	
Yapı Malzemesi Klasmanı	DIN 4102	-	B1	B1	B1	
Isı İletkenlik	Lab. Değeri DIN 52612	W / mK	0,036- 0,038	0,034- 0,036	0,031- 0,033	
	Hesap Değeri DIN 4108	W / mK	0,04	0,04	0,035- 0,040	
%10 Deformasyonda Basınç Dayanımı	DIN 53421	N/mm ²	0,07- 0,12	0,12- 0,16	0,18- 0,26	
%2'den Küçük Deformasyonda Basınç Dayanımı	-	N/mm ²	0,012- 0,025	0,020- 0,035	0,036- 0,062	
Makaslama Dayanımı	DIN 53427	N/mm ²	0,09- 0,12	0,12- 0,15	0,19- 0,22	
Bükülme Dayanımı	DIN 53423	N/mm ²	0,16- 0,21	0,25- 0,30	0,42- 0,50	
Çekme Dayanımı	DIN 53430	N/mm ²	0,15- 0,23	0,25- 0,32	0,37- 0,52	
E - Modülü	-	N/mm ²	0,6-1,25	1,0-1,75	1,8-3,1	
Sıcaklığa Göre Form Dayanımı	Kısa Süreli DIN 53424	°C	100	100	100	
	Uzun Süreli 5.000 N/m ² DIN 53424	°C	80-85	80-85	80-85	
	Uzun Süreli 20.000 N/m ² DIN 18164	°C	75-80	80-85	80-85	
Isısal Uzama Katsayısı	-	1/K	5-7,10 ⁻⁵	5-7,10 ⁻⁵	5- 7,10 ⁻⁵	
Özgül Isı Kapasitesi	DIN 4108	J / (Kg.k)	1500	1500	1500	
Tamamen Suya Batmış Durumda Su Alma Durumu	DIN 53428	7 Gün	Hacmen (%)	3	2,3	2
		1 Yıl	Hacmen (%)	5	4	3,5
Su Buhar Geçirgenliği	DIN 53429	g/ m ² .d	40	35	20	
Buhar Difüzyon Direnç Katsayısı (μ)	DIN 4108	1	20/50	30/70	40/100	
Yanıcılık	DIN 4102	B1: kendiliğinden söner B2: normal	B2 ve B1	B2 ve B1		

2.3.2 Geoteknik özellikleri

Geoteknik uygulamalarda sıkışabilen malzemeler yeraltı yapılarında sık kullanılır, yeraltı yapısının etrafını çevreleyerek zemin ile yapı arasında bir tabaka oluşturur. Gerilme ve deformasyon etkileri altında bu kaplamalar kolayca sıkışabilir. Bu durumda yapıya gelen yüklerin bir kısmı sıkışabilen bu malzemeler tarafından sönmülenererek, yapıya etkiyecek gerilmelerde düşüş sağlanmış oluyor. Çoğu zaman bu şekilde yapıların tasarlanması, sıkışabilir malzeme kullanılmadan yükleri karşılayacak şekilde yapılmasından daha az maliyetli oluyor. Bu durumda sıkışabilir malzeme olarak kullanılan EPS köpüğü dayanma yapıları arkası, kirişlerin yada yapı kemerlerinin altı, boru üstlerine, kısaca sıkışmanın olacağı yerlere göre sınıflandırılır. EPS malzemesi ısı izolasyonu, hafif dolgu malzemesi, düşük genlikteki sismik dalgaların sönmülendirilmesi gibi başka uygulamalarda da kullanılmaktadır (Aytekin, 1997).

Sıkıştırma işlemlerinin yapıldığı uygulamalarda çözüm olarak polistiren köpüğünün bloklar şeklindeki genleşmiş polistiren (EPS) yada diğer türetilmiş ürünler kullanılabilir. EPS blokları maliyetinin düşük olmasının yanısıra, katılığının daha düşük olmasıyla diğer polistiren köpüğü ürünleri arasında seçiliyor. Çeşitli geoteknik uygulamalarda kullanılan EPS'nin dayanıklılık özelliğinin 30 seneden fazla olduğu kanıtlanmıştır (Aytekin, 1997).

Sıkışabilir kaplama uygulamasında en düşük yoğunlukta EPS'nin elde edilmesi için, polistiren köpüğünün yoğunluğu düşerken Young modülü ve basınç dayanımı da düşmektedir. EPS'nin minimum yoğunluğu üretimdeki etkenlere bağlıdır, fakat genellikle $0,010 \text{ g/cm}^3$ civarındadır. Düşük yoğunluğa, buna karşılık yüksek dayanıklılığa sahip EPS köpüğü için C578 ASTM standardının geçici olarak kullanılması ABD'de yapılan çalışmalara göre uygun bulunmuştur. Standarda göre EPS'nin yoğunluğu 0.012 g/cm^3 , minimum yoğunluk ise 0.011 g/cm^3 olarak belirlenmiştir (Aytekin, 1997).

Sonuç olarak yukarıda kendisinden bahsedilen ve de deneysel çalışmamızda kullanacağımız polistiren köpüğünün dünyada olduğu gibi Türkiye'de de yapılmış çalışmaları mevcuttur. Bunlara örnek olarak "Haliç Tarama Çamuru-Çimento-Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri" (Horoz, 2007), "Uçucu Kül-Çimento-Genleşmiş Polistiren Köpük Daneleri Karışımının Geoteknik

Özellikleri” (Sever, 2004), “Polistiren Köpüğün Hafif Dolgu Olarak Kullanılması” (Aksoy, 1998), “Uçucu kül - Çimento - Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri” (Haşal ve Aksoy, 2000), “Yol İnşaatlarında Genleştirilmiş Polyester Kullanımı” (Aytekin, 1997) gibi bilimsel araştırmaları gösterebiliriz. EPS'nin geoteknik mühendisliğinde hafif dolgu malzemesi olarak kullanılması yönünde çalışmalar devam etmektedir. Sonraki bölümde bu çalışmalardan farklı olarak polistiren köpüğünün çimento ve kum ile karıştırılarak hafif dolgu malzemesi olarak kullanılmasının incelendiği deneysel çalışma anlatılmaktadır.

3. EPS, KUM VE ÇİMENTO KARIŞIMINDAN OLUŞAN HAFİF DOLGU MALZEMESİ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Amaç

Tez kapsamında yapılmış olan deneysel çalışmanın amacı EPS-çimento-kum karışımından oluşan hafif dolgu malzemesinin geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla çalışmada kendini taşıyamayan zayıf bir zemindeki stabilite sorununa çözüm olarak normal zeminlere göre çok daha hafif, dayanıklı ve sıkışabilirliği yüksek malzeme üretilmesine çalışılmıştır.

3.2 Deneysel Çalışma

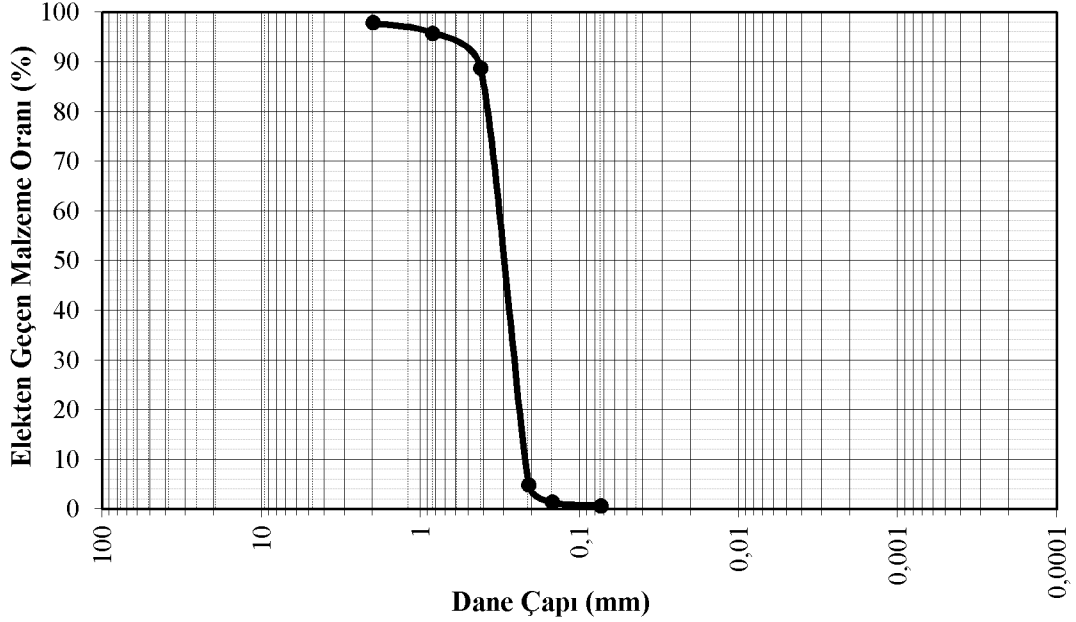
Bu bölümde EPS-kum-çimento karışımından oluşan hafif dolgu malzemenin laboratuvar ortamında hazırlanması, özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış olan deneylerden bahsedilmiştir. Karışımda kullanılan kum malzemesinin özelliklerinin belirlenmesi amaçlı elek analizi, kesme kutusu deneyleri yapılmış ve relatif sıklığı belirlenmiştir. EPS katkılı hafif dolgu malzemesinin laboratuvar ortamında mühendislik özelliklerinin tayin edilmesi için elek analizi, özgül ağırlık, relatif sıklık, kesme kutusu, serbest basınç, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve sabit seviyeli permabilite deneyi gibi laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

3.2.1 Kumun elek analizi

Elek analizi, zeminlerin bir seri standart elekten geçirilmesi ile yapılmaktadır. Belirli çaplardaki (büyükten küçüğe doğru) eleklerden geçen numune ağırlıklarının başlangıçtaki numune ağırlığına olan oranlarının oluşturduğu eğriye numunenin dane çap dağılımı ya da granülometri eğrisi denir. Deneyde kullanılacak olan kumun dane çapı dağılımını belirlemek için elek analizi yapılmıştır.

Deney sırasında kum numunesi sırasıyla büyükten küçüğe doğru eleklerden geçirildi. Her elek üzerinde kalan miktar toplamdan çıkarılarak o elekten geçen kum ağırlığı bulundu. Daha sonra ise geçen kum ağırlıkları numunenin toplam ağırlığına

oranlanarak geçen yüzdelere göre kum numunesine ait dane çapı dağılımı çizildi. Aşağıdaki Şekil 3.1’de deneysel çalışmada kullanılan kuma ait dane çapı dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.1: Deneysel çalışmada kullanılmış kuma ait dane çapı dağılımı.

Yukarıdaki kumun granülometrik eğrisine göre numunedeki kum tanelerinin %80’den fazlasına ait dane çaplarının 0.2 – 0.4 mm arasında kaldığı görülmektedir. Burada elek analizine tabi tutulan numunenin yaklaşık %98’inin No. 4 ile No. 200 elekleri arasında kalan ince kum numunesi olduğu ortaya çıkmıştır. Granülometrik eğriye göre kum numunesine ait efektif dane çapı (D_{10}), malzemenin yüzde altmışının daha küçük olduğu çap (D_{60}) ve malzemenin yüzde otuzunun daha küçük olduğu çap (D_{30}) belirlenmiştir. Belirlenen bu çaplara göre kum numunesinin üniformluk katsayısı (C_u), derecelenme katsayısı (C_c) gibi değerler bulunmuştur. Aşağıdaki çizelgede kum numunesinin granülometrik özellikleri ve değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Numunede kullanılmış kuma ait granülometrik özellikler.

Granülometrik Özellikler	Değerleri
Efektif Dane Çapı, D_{10} (mm)	0,22
D_{60} (mm)	0,35
D_{30} (mm)	0,27
Uniformalık Katsayısı, C_u	1,60
Derecelenme Katsayısı, C_c	0,95

3.2.2 Kumun relatif sıklığı

Relatif sıklık arazideki zeminin sıklık yada gevşeklik derecesini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir terimdir. İri daneli zeminlerin kayma mukavemeti ve sıkışmaya karşı direnci zeminlerin sıklığı ile ilişkilidir. İri daneli zeminlerin sıklık durumunu hesaplamak için, zeminin tabii haldeki boşluk oranı e_n belirlenir, zeminin maksimum sıklığındaki ve minimum sıklığındaki boşluk oranlarıyla kıyaslanır. Bu kıyaslama relatif sıklık D_r olarak tanımlanır ve yüzde ile ifade edilir. Bağıntı 3.1 ile relatif sıklık hesaplanır (Das, 2006).

$$D_r = \frac{e_{maks} - e_0}{e_{maks} - e_{min}} \times 100 \quad (3.1)$$

Relatif sıklık değerinin yüksek olduğu zeminler sıkı, değer düşük olduğu zeminler ise gevşek olarak tanımlanır. Bu değer aralıkları Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2: Zeminlerin relatif sıklığına göre sınıflandırılması (Das, 2006).

Relatif Sıklık (%)	Yerleşim Sıklığı
0 – 15	Çok Gevşek
15 – 50	Gevşek
50 – 70	Orta
70 – 85	Sıkı
85 – 100	Çok Sıkı

Yukarıdaki relatif sıklık tanımlaması kapsamında çimento – EPS – kum karışımında kullanılacak olan kumun sıklık derecesini tespit etmek için relatif sıklık hesabı yapılmıştır (Çizelge 3.3). Bu hesabı yapabilmek için kullanılan silindirik kabın ağırlığı 1271.7 g, hacmi ise 196.35 cm³ olarak belirlenmiştir. Numunenin en gevşek haldeki boşluk oranını bulmak için kum, kabın içerisine akıtılarak doldurulmuştur. Doldurulan kumun ağırlığı bulunarak kabın hacmine oranlanmış ve kumun en gevşek durumdaki birim hacim ağırlığı bulunmuştur. Daha sonra kum numunesi aynı kabın içerisine sıkıştırılarak doldurulmuş ve sıkışık durumdaki kumun ağırlığı belirlenmiştir. Buradan da sıkışık haldeki kumun birim hacim ağırlığı bulunmuştur. Böylece kumun gevşek ve sıkışık durumlardaki birim hacim ağırlıkları ile dane birim hacim ağırlığına göre sırasıyla maksimum ve minimum boşluk oranları bulunmuştur. Aşağıdaki Çizelge 3.3’te relatif sıklık hesabı görülmektedir.

Çizelge 3.3 Kum numunesinin relatif sıklık deneyi hesabı, maksimum ve minimum boşluk oranları.

Relatif Sıklık Hesapları (D_r)	Değerler	Birim
Kap ağırlığı	1271,4	g
Kap hacmi, V	196,35	cm ³
Dane birim hacim ağırlığı, γ_s	2,69	g/cm ³
Sıkı numunelerin maksimum ağırlığı (W_{maks})	340,0	g
Gevşek numunelerin minimum ağırlığı (W_{min})	294,8	g
$\gamma_{maks} = W_{maks} / V$	1,73	g/cm ³
$e_{min} = \gamma_s / \gamma_{maks} - 1$	0,55	
$\gamma_{min} = W_{min} / V$	1,50	g/cm ³
$e_{maks} = \gamma_s / \gamma_{min} - 1$	0,80	

Yukarıdaki çizelgeye göre bulunan maksimum boşluk oranı e_{maks} ve minimum boşluk oranı e_{min} değerlerinin relatif sıklık denkleminde yerlerine konulmasıyla, relatif sıklık yüzdelere karşı gelen tabii boşluk oranları e_n aşağıdaki Çizelge 3.4'teki gibi kolaylıkla tespit edilebilir.

Çizelge 3.4: Kum numunesine ait sıklık değerinin belirlenmesi.

Relatif sıklık, D_r (%)	Boşluk oranı, e
10	0,775
20	0,750
30	0,725
40	0,700
50	0,675
60	0,650
70	0,625
80	0,600
90	0,575
100	0,550

Hafif dolgu malzemesinde kullanılacak olan kumun elek analizi sonucu elde edilen granülometri eğrisine göre, malzemenin D_{60} , D_{30} ve D_{10} çaplarının değerleri belirlenerek üniformluk ile derecelenme katsayıları bulunmuş, relatif sıklık hesabı yapılmış, daha sonraki başlıklarda diğer malzemelerle birlikte anlatılmış olan özgül ağırlık ve kesme kutusu deney sonuçlarına göre kumun birim hacim ağırlığı ile kayma mukavemeti parametreleri bulunmuştur. Elek analizi, relatif sıklık ve kesme kutusu gibi deneyler sonucu belirlenmiş olan kuma ait bu özellikler bir çizelge şeklinde Çizelge 3.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.5: Deneysel çalışma kapsamında kullanılmış kum numunesine ait özellikler.

Özgül Ağırlık (kN/m^3)	26,9
Maksimum Boşluk Oranı (e_{maks})	0,80
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	0,55
Efektif Dane Çapı, D_{10} (mm)	0,22
D_{60} (mm)	0,35
D_{30} (mm)	0,27
Uniformluk Katsayısı, C_u	1,60
Derecelenme Katsayısı, C_c	0,95
Kohezyon, c (kPa)	0
Kayma Mukavemeti Açısı, Φ (derece)	41

3.2.3 Özgül ağırlık

Zemin numunesinin dane birim hacim ağırlığının (γ_s) suyun birim hacim ağırlığına (γ_w) oranı özgül ağırlık olarak tanımlanır ve G_s olarak gösterilmektedir. Özgül ağırlığı belirlemek için gerekli gereçler 500 ml hacimli cam balon, terazi, etüv, termometre, pipet, buharlaştırma kabı, vakum pompasından oluşmaktadır.

Deneyde, etüvde kurutulmuş cam balon su ile doldurularak tartıldı. Ayrıca etüvde kurutulup tartılan kum numunesi soğutulduktan sonra piknometreye konulup, kum daneleri arasındaki boşlukları da tamamen kapsayacak şekilde su doldurularak tartıldı. Daha sonra cam balon içindeki karışım buharlaştırma kabına boşaltıldı ve etüve konularak kuruması sağlandı. En sonunda etüvde kuruyan kum numunesi tartıldı ve kumun dane birim hacim ağırlığının suya oranı belirlendi. Çimento ve EPS'nin özgül ağırlıkları kullanılan malzemenin teknik özelliklerinden belirlendi. Hafif dolgu malzemesi üretimi için hazırlanan karışımda kullanılacak çimento, genişmiş polistiren (EPS) ve kum malzemelerine ait özgül ağırlıklar Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6: Karışımda kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları.

Karışımda kullanılan malzemeler	Özgül Ağırlık (G_s)
Çimento (PÇ 42.5R)	3,11
Kum	2,69
Genleşmiş Polistiren (EPS)	0,011

Yukarıdaki çizelgede de görüldüğü üzere polistiren köpüğünün özgül ağırlığının kum ve çimentonun özgül ağırlıklarına oranla çok daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

3.2.4 EPS – çimento – kum karışımının hazırlanması

Hafif dolgu malzemesi olarak üretilecek olan EPS – çimento – kum karışımının hazırlanma aşamasında 42.5R Portland çimentosu, çakıl boyutunda üniform genişmiş polistiren (EPS) daneleri ve kum kullanılmıştır. Daha önce laboratuvarında belirlenmiş olan EPS teknik özelliklerine göre malzemenin birim hacim ağırlığı (γ_n) 0,011 g/cm³ olarak belirtilmiştir. Polistiren köpüğü ile ilgili teknik özellikler tablosu bir önceki bölümde gösterilmiştir. Aşağıda Şekil 3.2’de karışımda kullanılmış polistiren daneleri görülmektedir.



Şekil 3.2: Karışımda kullanılan genişmiş polistiren (EPS) daneleri.

Kullanılan polistiren daneleri yuvarlak yüzeye sahiptir ve boyutları 3.5 – 4.0 mm çapındadır. Portland çimentosu ise silt boyutlarında, ince daneli bir malzeme olup, ortalama çapı 0.01 mm civarındadır ve priz alma süresi yaklaşık 60 dakikadır. Burada çimentonun birim hacim ağırlığı EPS dane birim hacim ağırlığınının 250 katı kadardır. Karışımlarda suyun çimentoya oranı başlangıçta 0.70 olarak alınmıştır, fakat bu durumda karışımdaki ince malzemeler çökerek segregasyon oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedenle suyun çimentoya oranı yeniden düzenlenerek 0.45 olarak tayin edilmiştir. Çimento ile karıştırılarak hafif dolgu olarak kullanılacak malzeme

genleşmiş polistiren (EPS) daneleri ve kumdan oluşmaktadır. Malzemede kullanılan EPS ve kuma ait ağırlıkça oranlar aşağıda Çizelge 3.7’de görülmektedir.

Çizelge 3.7: Karışımındaki malzemede kullanılan EPS ve kumun ağırlıkça yüzde değişimi.

Karışım	Çimento/Malzeme	Malzeme	
		EPS (%)	Kum (%)
Numune 1	6/1 ve 12/1	100	0
Numune 2	6/1 ve 12/1	75	25
Numune 3	6/1 ve 12/1	50	50
Numune 4	6/1 ve 12/1	25	25

Yukarıdaki çizelgede ifade edilen oranlar ağırlıkça değerlendirilmiş olup, hafif dolgu malzemesi amaçlı hazırlanmış olan karışımında malzemeyi polistiren köpüğü (EPS) ile kum oluşturmakta, karışım hazırlanırken çimentonun bu malzemeye olan ağırlıkça oranlarına göre çalışılmıştır.

Numuneler hazırlanırken önce karışımında kullanılan çimentonun malzemeye oranı 6/1 olarak belirlenmiştir. Bu orana bağlı olarak hazırlanan numuneler ilerde de anlatılacağı üzere 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç deneylerine tabi tutulmuş, fakat istenilen seviyede basınç dayanımına ulaşamamıştır. Daha sonra çimento/malzeme oranı 12/1 olarak belirlenmiş ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda aşılması istenilen basınç dayanımının (300 kPa) sağlandığı görülmüştür. Çimento/malzeme oranının 6/1 olduğu karışımların hazırlanmasında kullanılacak bileşenlerin ağırlıkları ve karışımın toplam hacmi aşağıdaki Çizelge 3.8’de verilmektedir. Burada karışımın toplam hacmi, numune hazırlanırken 4.4 cm çapında ve 10.0 cm yüksekliğindeki 3’er kalıba yerleşecek şekilde düzenlenmiştir.

Çizelge 3.8: Çimento/malzeme (6/1) oranına ait farklı EPS yüzde karışımlardaki bileşen ağırlıkları.

6/1	Çimento (g)	Su (g)	Malzeme (g)	Malzeme			Toplam V (cm ³)
				EPS (g)	Kum (g)	EPS (%)	
No 1	35	15,75	5,8	5,8	0,0	100	557,2
No 2	45	20,25	7,5	5,6	1,9	75	547,2
No 3	65	29,25	10,8	5,4	5,4	50	546,0
No 4	119	53,55	19,8	5,0	14,9	25	552,3

Yukarıdaki çizelgede olduğu gibi yine çimentonun malzemeye oranının 12/1 olduğu karışımların hazırlanmasında karışım içerisindeki çimento, kum ve polistiren köpüğünün miktarının ne kadar olacağı aşağıdaki Çizelge 3.9'da görülmektedir. Yine burada karışım içerisindeki her bir malzemenin birim hacim ağırlıkları bilindiğinden, deneysel çalışmada kullanılmış olan kalıpların tutumuna uygun olarak karışımın toplam hacimleri hesaplanmış buna göre numune hazırlanırken bileşenlerin kullanılacağı miktarlar belirlenmiştir.

Çizelge 3.9: Çimento/malzeme (12/1) oranına ait farklı EPS yüzde karışımlardaki bileşen ağırlıkları.

12/1	Çimento (g)	Su (g)	Malzeme (g)	Malzeme			Toplam V (cm ³)
				EPS (g)	Kum (g)	EPS (%)	
No 1	66	29,7	5,5	5,5	0,0	100	550,7
No 2	85	38,3	7,1	5,3	1,8	75	549,4
No 3	120	54,0	10,0	5,0	5,0	50	550,1
No 4	204	91,8	17,0	4,3	12,8	25	551,7

3.2.5 Kesme kutusu deneyi

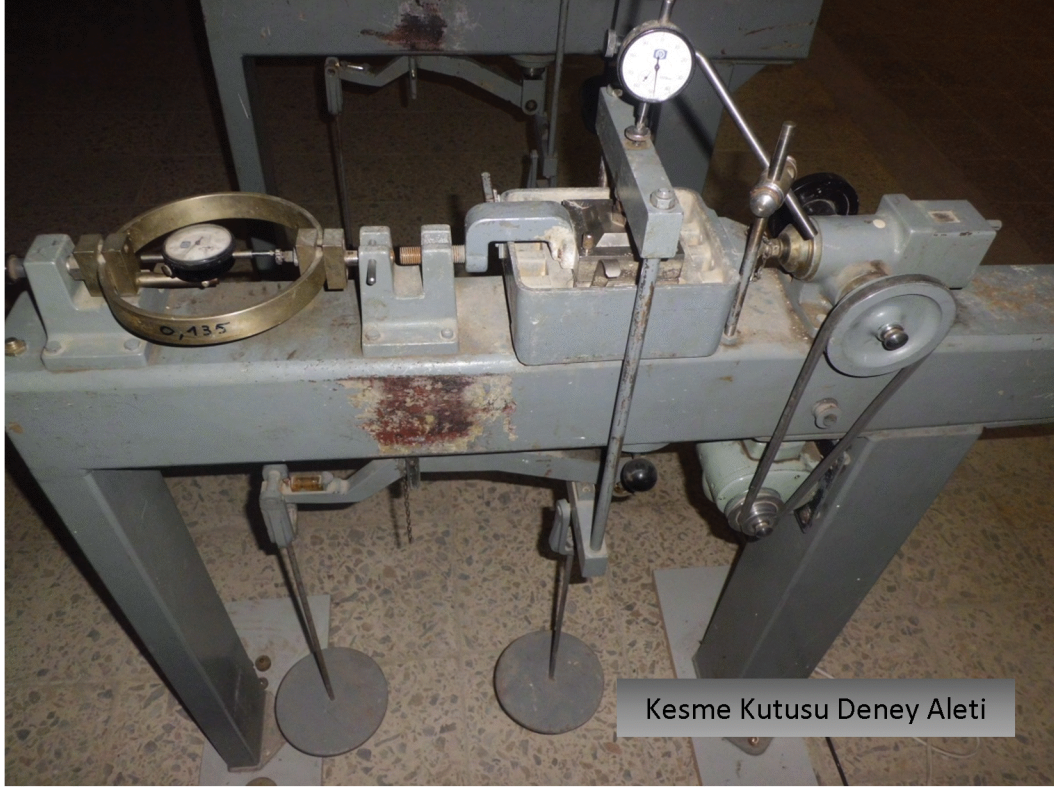
Kesme kutusu deneyi laboratuvar ortamında temellerin, şevlerin ve istinat duvarlarının stabilite analizi için zeminlerin kayma mukavemeti açısı (ϕ) ve kohezyon (c) gibi mühendislik parametrelerini belirlemek amacı ile yapılır. Kesme kutusu testi vasıtasıyla zeminlerin kırılma düzlemlerindeki kayma mukavemetleri belirlenir. Biraz daha açmak gerekirse, bir zemin numunesi üst ve alt parçadan oluşan rijit kare yada daire kesitli kalıpların içine yerleştirilir. Daha sonra bu numuneye düşeyde normal gerilme, yatayda ise kayma gerilmesi uygulanarak kesilmeye çalışılır. Burada zemin numunesinin kaymaya karşı gösterdiği mukavemet kayma gerilmesi (τ) olarak nitelendirilir ve bu kayma gerilmesi Mohr-Coulomb teorisine göre aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.2)$$

Bu bağıntı Mohr-Coulomb kırılma hipotezi olarak tanımlanmaktadır.

Kesme kutusu deneyi bilinen en eski ve en basit kayma testidir. Kesme kutusuna yerleştirilen zemin numunesi başlangıçta arazide koşullara uygun olarak normal yüke tabi tutulur. Bu normal gerilmeler altında kesme kutu içerisindeki zemin sıkışmaya, konsolidasyona başlar. Zeminin konsolidasyonu tamamlandıktan sonra, numuneye

uygulanan kesme kuvveti ile gereken hızda kesilir. Bu sırada alınan ölçümler yatay hareket, düşey hareketler ve kesme kuvvetidir. Aşağıdaki Şekil 3.3'te laboratuvarında kullanılan kesme kutusu deney aletinin resmi görülmektedir.



Şekil 3.3: Laboratuvarında kullanılan kesme kutusu deney aleti.

EPS – çimento – kum karışımı hafif dolgu malzemesi için kullanılacak EPS ve karışımda kullanılacak kumun kayma mukavemeti açısı, kohezyon ve kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

Numuneler deney için kare şeklindeki kesme kutusu kalıplarına yerleştirilmiştir. Kare kalıbın boyutları $6 \times 6 \text{ cm}^2$, dolayısıyla kalıp 36 cm^2 kesme alanına sahiptir. Deney sırasında normal ve kayma gerilmeleri 36 cm^2 alana sahip olan numuneye etki ediyor. Deneye başlamadan EPS numunesi kalıba iyice sıkıştırılarak yerleştirilir. Kum malzemesine yapılmış kesme kutusu deneylerinde de %20, %50 ve %80 sıklığına göre kum numuneler kesme kutusu kalıplarına yerleştirilir. Burada kumun yüzde olarak sıklıkları daha önce relatif sıklık (D_r) testine göre belirlenmiştir.

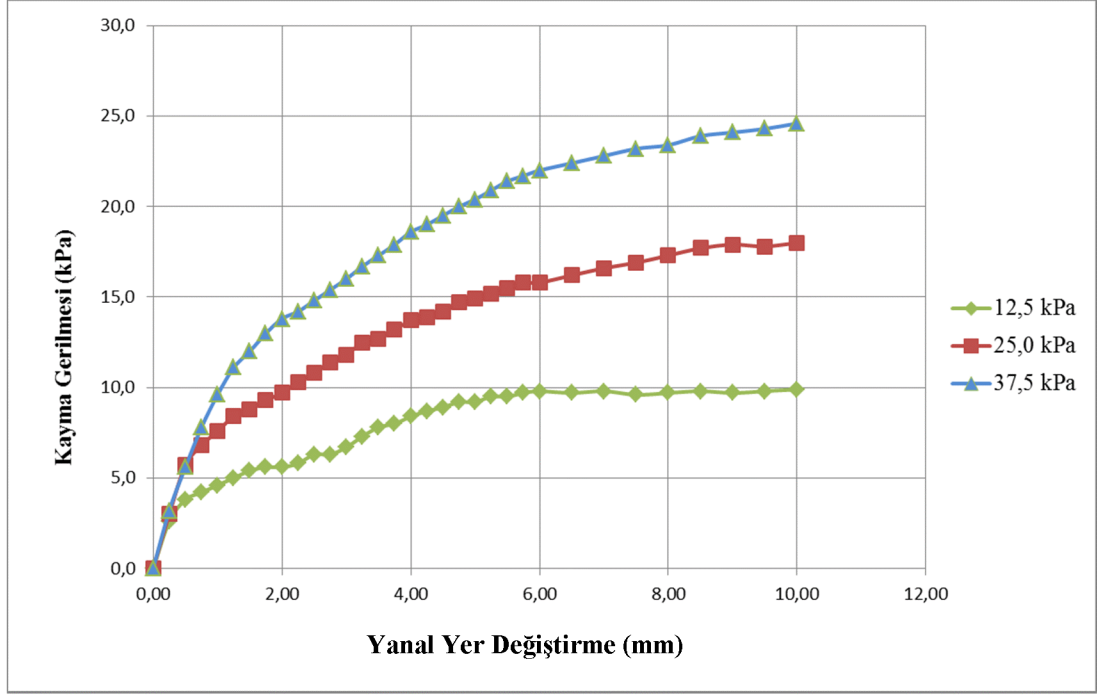
Kesme kutusu deneyini geliştirilmiş polistiren (EPS) malzemeye uygularken yükleme kademeleri 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa olarak değil de, 12.5 kPa, 25 kPa ve 37.5 kPa olarak alınmıştır. Bunun nedeni polistiren köpüğünün aşırı derecede hava boşluğu içermesinden dolayı ilk kademe olan 100 kPa yük uygulandığında ve

kesilmeden önce konsolidasyona bırakıldığında, malzemenin %20'lik düşey deformasyon sınırını aşmasıdır. Bu durumda okumalar alınamamakta ve sıkışan numune kesme kutusu kalıbının alt parçası içerisinde kaldığı için yatay kayma gerilmesi kalıp başlığına uygulanmaktadır. 100 kPa olan ilk yükleme kademesi yerine 1/8 oranında olan 12.5 kPa değerindeki bir yükleme uygulandığında ise numunenin konsolidasyonunu tamamladığında 3.5 mm oturduğu gözlenmiş ve EPS malzemesine kesme kutusu deneyi uygulanabilmektedir.

İkinci yükleme kademesi olan 200 kPa değerindeki yükleme yerine 1/8 oranındaki yükleme olan 25 kPa'lık yükleme sırasında polistiren köpüğü numunesinin kesme kuvveti uygulanmadan önce 7.1 mm oturduğu gözlenmiştir. Sonuncu yükleme kademesi olan 300 kPa değerindeki yükleme yerine yine 1/8 oranındaki yükleme olan 37.5 kPa normal gerilmenin uygulanması sırasında numunenin 9.7 mm oturduğu gözlenmiştir. Her üç yükleme kademesindeki bu oturmaların kesme kutusu deneyinin uygulanabilmesi için sorun oluşturmadığı görülmüştür.

Genleştirilmiş polistiren malzemesine uygulanmış kesme kutusu deney sonuçları EK A'da görülmektedir. 12.5 kPa, 25 kPa ve 37.5 kPa büyüklüğünde normal gerilme (σ_n) yüklemesi altında yanıl yerdeğiştirme okumaları alınmıştır. Daha sonra bu okumalar değeri 0.135 olan yay faktörü ile çarpılarak kayma gerilmeleri (τ) elde edilmiştir. Her yük kademesindeki normal gerilme değerleri de alan düzeltmesine göre yeniden düzenlenerek, kendisine denk gelen kayma gerilmesi hizasına yazılmıştır.

Polistiren köpüğü (EPS) üzerinde yapılmış kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilmiş verilere göre her yükleme kademesine ait kayma gerilmesi (kPa) – yanıl yer değiştirme (mm) eğrilerine ait grafikte yükleme kademesi arttıkça kayma gerilmesinde de artış gözlemlendiğini Şekil 3.4'e bakarak söyleyebiliriz. Bu grafikteki eğrilerden de görüleceği üzere yükleme kademelerinin artırılmasıyla birlikte polistiren köpüğüne ait kesme mukavemetinde artışlar olmaktadır. Bunun nedeni numunenin üzerine aldığı normal yüklerin artmasıyla birlikte daha çok sıkışması, dolayısıyla numunenin kesilmesinin de zorlaşacağıdır. Ayrıca kayma gerilmesi-yanıl yer değiştirme grafiğine göre her üç numunenin kesilmeye çalışıldığı başlangıç noktasından itibaren belli sınıra kadar doğrusal eğilim gösterdiği görülüyor



Şekil 3.4: 12.5 kPa, 25 kPa ve 37.5 kPa'lık yüklemeye kademesine göre kayma gerilmesi - yanıl yer değiştirme eğrileri.

Hesaplanan kayma gerilmeleri ve normal gerilmelere göre her yüklemeye kademesine ait maksimum kayma gerilmesi, nihai kayma gerilmesi ve bunlara karşı gelen maksimum ve nihai normal gerilmeler aşağıdaki çizelgedeki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.10: EPS'ye ait maksimum ve nihai gerilmeler.

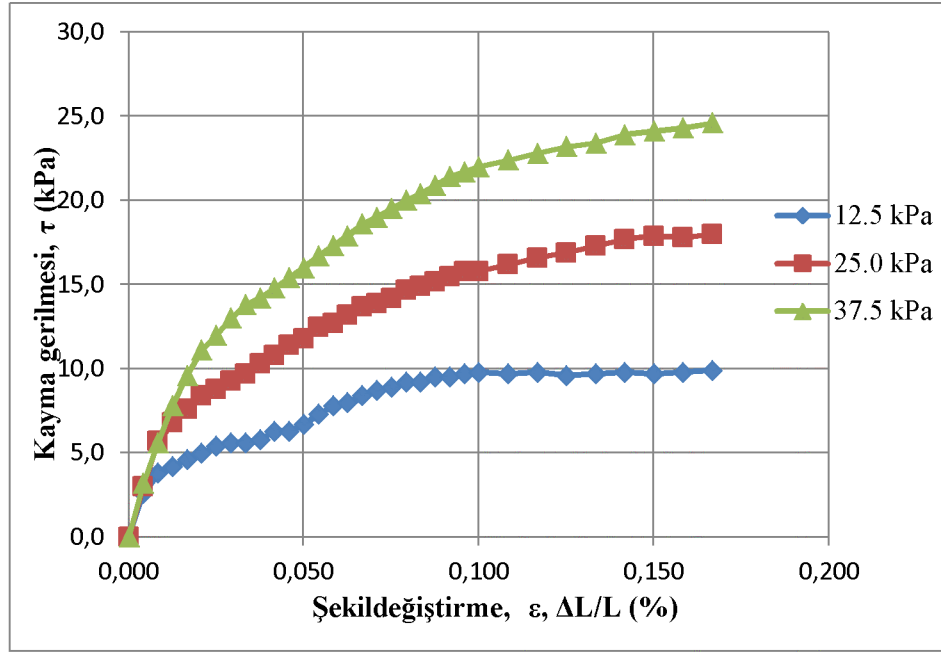
Deney No	τ_{maks} (kPa)	τ_f (kPa)	σ_{maks} (kPa)	σ_f (kPa)
1	9,9	9,9	15,0	15,0
2	18,0	18,0	30,0	30,0
3	24,6	24,6	45,0	45,0

- EPS'nin elastisite modülü

Genellikle malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin elastik bölge diye nitelendirilen başlangıç bölgesinde gerilme sıfırdan başlayıp belli bir sınıra erişinceye kadar, gerilmeler ile şekildeğiştirmeler orantılı ve doğrusaldır. Bu ilişkiyi belirten doğrunun eğimine elastisite modülü (E) denir (Bakioğlu, 2001).

EPS'nin elastisite modülünün hesabı için ilk önce kesme kutusu deneyinden elde edilen yanıl yer değiştirmeler kesme yüzeyi boyuna oranlanarak şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Daha sonra kayma gerilmelerinin şekil değiştirmelere oranlanması ile numunenin her yük kademesi için elastisite modülü bulundu. Aşağıdaki Şekil 3.5'te polistiren köpüğünün her yüklemeye kademesi için kayma gerilmesi-şekildeğiştirme

eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerin doğrusal bölgesindeki kayma gerilmeleri şekil değiştirmelere orantılanarak elastisite modülü bulunmuştur.



Şekil 3.5: EPS numunesinin yükleme kademelerine göre kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.

Buna göre EPS'nin 12.5 kPa, 25.0 kPa ve 37.5 kPa yükleme kademelerindeki elastisite modülleri sırasıyla 650 kPa, 713 kPa ve 600 kPa olarak bulunmuştur. Bu üç değerın ortalaması alındığında polistiren köpüğünün elastisite modülünün 654 kPa olduğu belirlenmiştir.

- EPS'nin Poisson oranı

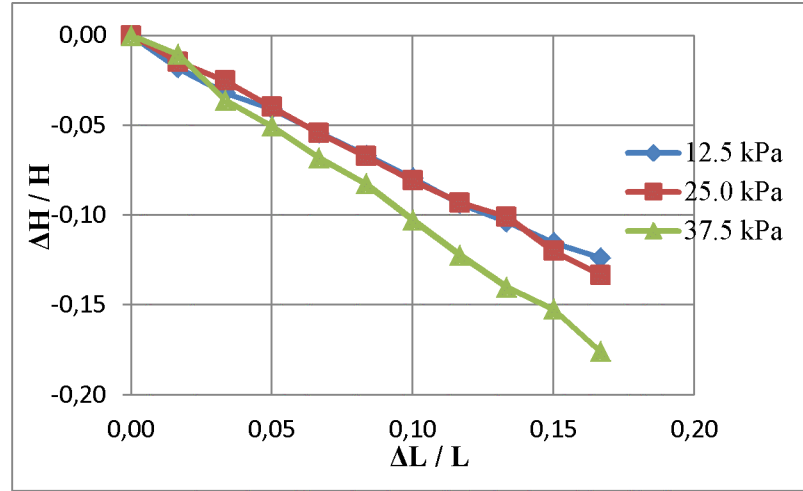
Malzemelerde çekme deneyi sırasında boyuna uzamalara karşın enine doğrultuda kısaltmalar gözlenir. Boyuna ve enine şekil değiştirme oranları sabit olup

$$\nu = -\varepsilon_b / \varepsilon_e \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Bu orana Poisson Oranı adı verilir.

Kesme kutusu deneyi sırasında elde ettiğimiz yanal yer değiştirme ve düşey yer değiştirme değerlerine göre EPS'nin poisson oranı belirlenebilir. Burada numunenin genişliği (L) 60 mm'dir ki, bu aynı zamanda kesme yüzeyi genişliğidir. Numunenin yüksekliği (H) ise konsolidasyon süreci tamamlandıktan sonra ilk yükleme için 21.59 mm, ikinci yükleme için 17.85 mm ve son yükleme için ise 15.29 mm'dir.

Aşağıdaki Şekil 3.6'da EPS'nin her yükleme kademesi için boyuna şekil değiştirme oranına şekil değiştirme oranlarına ait eğriler görülmektedir.



Şekil 3.6: EPS'nin her yükleme kademesi için $\Delta H/H - \Delta L/L$ eğrileri.

Polistiren köpüğüne ait poisson oranının 12.5 kPa ve 25.0 kPa yük kademeleri için 0.75, 37.5 kPa yükleme kademesi için ise 1 olduğu görülmektedir.

- EPS'nin kayma modülü

Polistiren köpüğüne ait elastisite modülü ve poisson oranı belirlendiğine göre kayma modülü (G) de bulunabilir. Bilindiği üzere kayma modülü, kayma gerilmesi ile elastik birim kayma arasındaki oran olarak tanımlanır. Hook yasalarındaki bağıntılara göre kayma modülü, elastisite modülü ve poisson oranı cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.4)$$

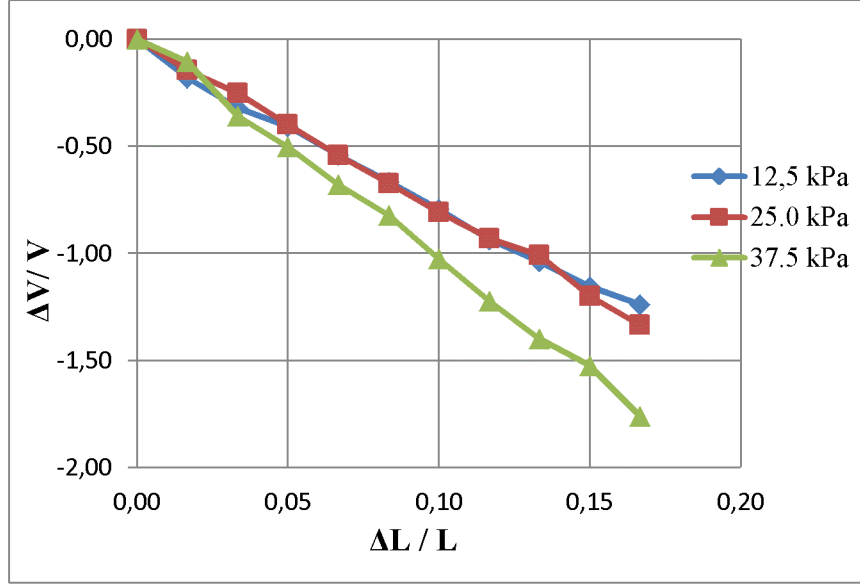
Bağıntı 3.4'e göre yapılan hesap sonucunda 12.5 kPa, 25.0 kPa ve 37.5 kPa yüklemelere göre bulunan kayma modülü değerleri Çizelge 3.11'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.11: EPS'nin farklı yükleme kademelerine göre kayma modülü.

Yükleme Kademesi	Elastisite Modülü, E (kPa)	Poisson Oranı, ν	Kayma Modülü, G (kPa)
12.5 kPa	650	0,75	186
25.0 kPa	713	0,75	204
37.5 kPa	600	1,00	150

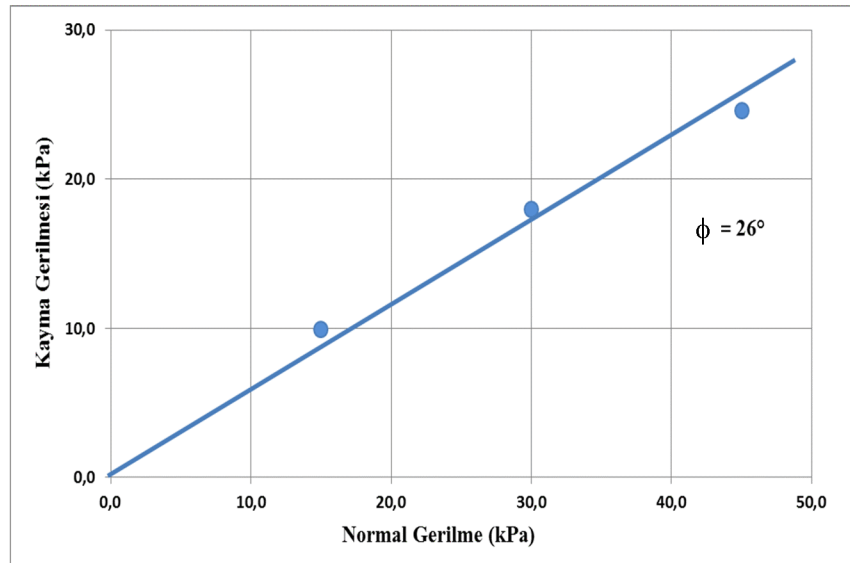
Çizelge 3.11'deki kayma modülü değerlerinin ortalaması alındığında polistiren köpüğüne ait kayma modülünün 180 kPa değerinde olduğu görülmektedir.

EPS'nin genişleme durumunu (ψ) görmek için Şekil 3.7'de hacimsel şekildeğiştirme – enine şekildeğiştirme oranlarına ait eğriler gösterilmektedir. Burada polistiren köpüğünün enine şekildeğiştirmesi arttıkça hacimsel olarak büzüldüğü görülmektedir.



Şekil 3.7: EPS'nin her yükleme kademesi için $\Delta V/V$ - $\Delta L/L$ eğrileri.

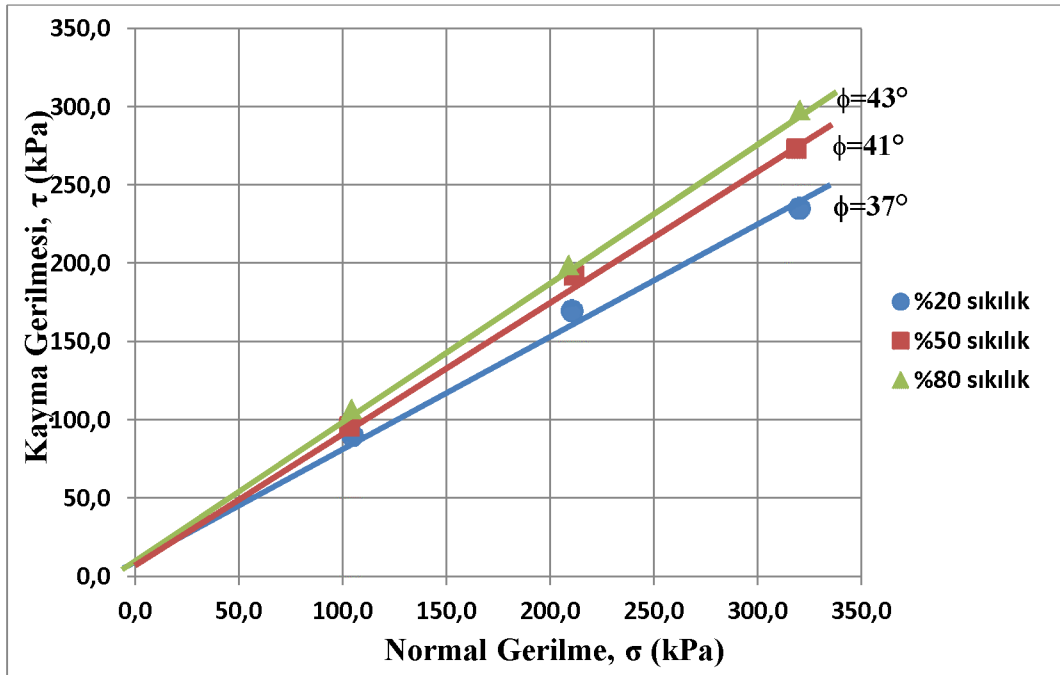
Her yük kademesi için belirlenmiş olan maksimum kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler kullanılarak Mohr–Coulomb kırılma zarfı çizilir. Aşağıdaki şekilde genişletilmiş polistiren malzemesine ait normal gerilme – kayma gerilmesi eğrisine göre polistiren köpüğünün kayma mukavemeti açısı (ϕ) belirlenmiştir.



Şekil 3.8: EPS malzemesine ait normal gerilme - kayma gerilmesi eğrisine göre kayma mukavemeti açısının (ϕ) belirlenmesi.

Yapılmış olan kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen normal gerilme – kayma gerilmesi eğrisinden genişletilmiş polistiren (EPS) malzemesinin kayma mukavemeti açısı (ϕ) 26° olarak bulunmuştur. Aynı zamanda yukarıdaki Şekil 3.4'e bakacak olursak eğride kayma gerilmesinin başlangıç noktasından itibaren arttığı görülmektedir, dolayısıyla bu da malzemenin kohezyonsuz olduğu anlamına geliyor. Kohezyonsuz bir malzeme olarak belirlenen EPS'nin tabii durumdaki kayma mukavemeti açısı da, bu malzemedan yapılmış bir şevin göçmeden ayakta kalabilmesi için gerekli olan açıdır.

Daha önce genişletilmiş polistiren malzemesi için yapılmış olan kesme kutusu deneyleri EPS – çimento – kum karışımında kullanılacak olan kum numuneler için de yapılmıştır. Burada üç farklı sıklıkta kum numunesi için kesme kutusu deneyleri yapılmış ve aşağıdaki Şekil 3.9'da de görülen kayma gerilmesi – normal gerilme eğrileri çizilmiştir.



Şekil 3.9: Farklı sıklıklardaki kum örneklerine ait kayma mukavemeti açıları.

3.2.6 Serbest basınç deneyi

Laboratuvarında zeminlerin serbest haldeki basınç mukavemetini belirlemek amacıyla serbest basınç deneyi yapılır. Serbest basınç mukavemeti, zemine yanal bir gerilme uygulanmadan, aksel yüklemeye altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi belirlenerek saptanır. Göçmenin olduğu gerilme değeri zeminin serbest basınç mukavemeti olarak tanımlanır. Bu deney kil veya kendi içsel mukavemetlerine sahip

olan çimento katkılı zeminler gibi kohezyonlu malzemeler üzerinde gerçekleştirilmesine rağmen çakıl ve kum gibi kuru veya kohezyonsuz zeminlere uygulanmaz (Bardet, 1997).

Deneyin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için elimizde olan numunelerin örselenmemiş olması gerekmektedir. Çimento ve kum katkılı EPS hafif dolgu zeminlerin teşkilinde yukarıda anlatılmış olan çimento katkılı zeminlerde olduğu gibi kohezyonlu davranış söz konusu olduğu için serbest basınç deneyi yapılması uygun görülmüştür. Serbest basınç deneyinin çimento – EPS – kum karışımına uygulanması aşağıda Şekil 3.10’da görülmektedir. Burada serbest basınç deneyleri yapılırken yükleme hızı 1.5 mm/dak hızında tutulmuştur.



Şekil 3.10: Çimento - EPS - kum karışımında serbest basınç deneyi uygulaması.

Hazırlanan EPS – çimento – kum karışımının serbest basınç mukavemetinin 300 kPa değerini aşması hedeflenmiştir. Bu değer doğal zeminlerin basınç mukavemeti değerinden yüksek olması itibarıyla güvenilir olarak kabul edilmiştir. Serbest basınç deneyleri kapsamında EPS – çimento – kum karışımlarında bu değere ulaşmak için çimento, kum ve polistiren malzemeleri karıştırılarak farklı oranlarda karışımlar elde edilmiştir. Bu karışımlara ait hacimce ve ağırlıkça oranlar aşağıdaki Çizelge 3.12’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.12: Karışımdaki malzemelerin yüzde (%) cinsinden ağırlıkça oranları.

Çimento/ Malzeme Oranı	Çimento (%)	Su (%)	Malzeme		
			EPS (%)	Kum (%)	Ağırlıkça EPS Oranı (%)
6/1 Oranı	61,9	27,8	10,3	0,0	100
6/1 Oranı	61,9	27,8	7,7	2,6	75
6/1 Oranı	61,9	27,8	5,2	5,2	50
6/1 Oranı	61,9	27,8	2,6	7,7	25
12/1 Oranı	65,2	29,3	5,4	0,0	100
12/1 Oranı	65,2	29,3	4,1	1,4	75
12/1 Oranı	65,2	29,3	2,7	2,7	50
12/1 Oranı	65,2	29,3	1,4	4,1	25

Daha sonra bu karışımlar 28 günlük priz sürelerine göre serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Çimento/malzeme ağırlıkça oranı 6/1 olarak tayin edilerek elde edilen karışımlara ait 28 günlük priz sürelerine göre serbest basınç deneyleri yapılmış ve çizilen normal gerilme – düşey deformasyon eğrilerine ait grafikler EK B'ye konulmuştur. Bu grafiklerin değerlendirilmesi sonucunda çimento/malzemenin 6/1 olduğu ve % 25 EPS içeren malzemelerin dışında kalan oranlarda polistiren içeren malzemelerin normal gerilmelerin oldukça düşük olduğu aşağıdaki Çizelge 3.13'te görülmüştür.

Çizelge 3.13: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ağırlıkça oranında EPS miktarlarına ait serbest basınç deneyi ortalama normal gerilmeler.

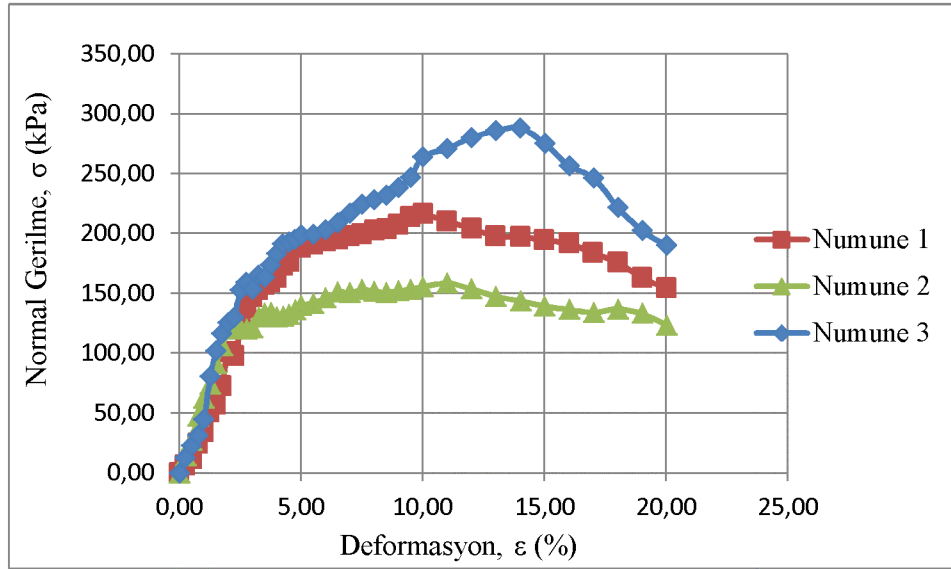
EPS oranı (%)	Numune No	γ_n (g/cm ³)	Deformasyon, ϵ (%)	Normal Gerilme, σ (kPa)	Ortalama (kPa)
100	1	0,13	13,00	25,47	26,17
	2	0,12	11,00	24,03	
	3	0,12	11,00	29,01	
75	1	0,14	19,00	34,54	34,84
	2	0,14	17,00	35,17	
	3	0,13	17,00	34,82	
50	1	0,20	16,00	42,44	42,25
	2	0,25	11,00	51,15	
	3	0,21	9,00	33,17	
25	1	0,38	10,00	176,20	213,38
	2	0,38	12,00	237,26	
	3	0,40	5,50	226,67	

%25 EPS içeren malzemenin çimento ile karışımından oluşan hafif dolgu malzemesinin de yine çalışmada istenilen en az 300 kPa normal gerilme seviyesine ulaşamadığı yukarıdaki çizelgeye göre görülmüştür. Ayrıca çimento ile polistiren köpüğünün birim hacim ağırlıklarının çok farklı olmasından dolayı, belli bir hacmi

doldurabilmek için çok hafif olan %25 ağırlıkça oranındaki EPS'ye karşılık büyük miktarda kum ve çimentonun kullanılması gerekmektedir ve bu da ekonomik olmayan bir çözümdür. Bunun yanısıra %25 EPS kullanıldığı takdirde karışımında kum ve çimentonun birim hacim ağırlıkları etkili olacağından hafif dolgu malzemesinin ağırlığının artacağı gözlenmiştir.

Yapılan çalışmada karışımdaki çimento miktarının iki kat artırılarak çimento/malzeme oranının 12/1 olarak alınması kararlaştırılmış ve bu sayede hafif dolgu malzemesi üretiminde daha az yoğunluğa ve daha yüksek mukavemete sahip karışımın, malzeme içerisinde daha fazla EPS miktarları kullanılarak elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda 12/1 ağırlıkça oranında çimento/malzeme karışımları hazırlanarak, serbest basınç deneyleri vasıtasıyla düşey deformasyonlara bağlı basınç dayanımlarının değişimi belirlenmiştir.

Numuneler hazırlandıktan sonra ilk aşamada 7 günlük kür süresinin sonunda deneye tabi tutulmuş ve maksimum normal gerilmeler belirlenmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.11'de nem odasında 7 gün kalmış 12/1 çimento/malzeme oranında ve malzemede %50 EPS katkıli numunelerin normal gerilme – düşey deformasyon eğrisine ait grafik görülmektedir.



Şekil 3.11: Ağırlıkça 12/1 çimento/malzeme ve malzeme %50 EPS katkıli karışımlarının 7 günlük basınç dayanımlarının deformasyona göre değişimi.

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere 12/1 oranındaki numunelerin mukavemet değerleri 6/1 oranındaki numunelere kıyasla çok daha iyi sonuçlar verdiği açıktır. Buna göre

karışım içerisindeki malzemenin %50'si polistiren köpüğünden oluştuğu zaman ortalama basınç mukavemetinin 221 kPa civarında olduğu aşağıdaki Çizelge 3.14'e göre de görülmektedir. Bu durumda hafif dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığının da 0.37 g/cm³ civarında olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.14: 7 günlük 12/1 çimento/malzeme ve %50 EPS ağırlıkça oranında karışımlara ait serbest basınç deneyi sonuçları.

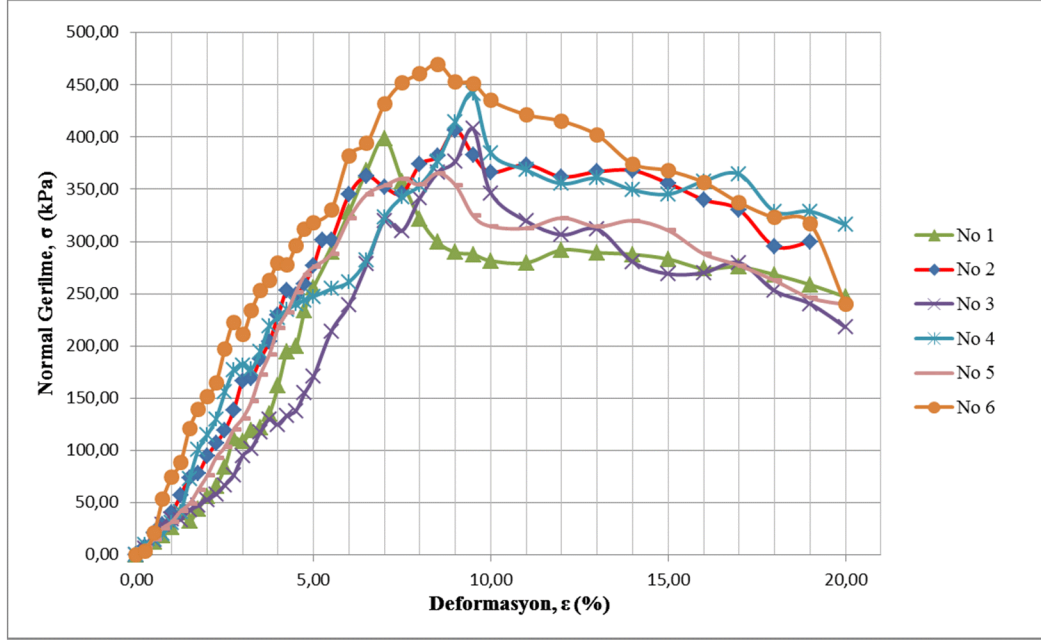
EPS oranı (%)	Numune No	γ_n (g/cm ³)	Deformasyon, ϵ (%)	Normal Gerilme, σ (kPa)	Ortalama (kPa)
50	1	0,35	11,00	158,65	221,14
	2	0,33	10,00	216,32	
	3	0,42	14,00	288,44	

12/1 çimento/malzeme ağırlıkça oranında ve malzemede %100, %75, %50 ve %25 oranında EPS katkılı numunelerin 28 günlük serbest basınç deneyi sonuçlarını grafik şeklinde EK B'de görebiliriz. Bu sonuçları çizelge şekline getirdiğimizde aşağıdaki Çizelge 3.15'te karışımlara ait sonuçları görebiliriz.

Çizelge 3.15: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve %100, %75 ve %25 EPS ağırlıkça oranlarında karışımlara ait serbest basınç deneyi sonuçları.

EPS oranı (%)	Numune No	γ_n (g/cm ³)	Deformasyon, ϵ (%)	Normal Gerilme, σ (kPa)	Ortalama (kPa)
100	1	0,22	15,00	72,31	64,49
	2	0,22	14,00	55,30	
	3	0,21	17,00	65,85	
75	1	0,30	17,00	123,90	119,02
	2	0,30	17,00	111,72	
	3	0,28	16,00	121,43	
25	1	0,68	2,50	2224,50	1744,10
	2	0,62	2,25	1958,80	
	3	0,64	5,50	1049,00	

Buradaki sonuçlara göre malzemede %100 ve %75 polistiren dane katkılı karışımlarla, yine çalışmada istenilen basınç dayanımı elde edilememekte, bununla birlikte %25 oranında EPS bulunan malzeme ile çimento karışımında çok yüksek basınç dayanımı elde edilmesine rağmen, daha önce belirtildiği üzere üretilen hafif dolgu malzemesinin ekonomik olması gerektiğinden karışım içindeki malzemenin %50-sinin polistiren köpüğünden oluşması çalışmada en uygun oran olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.12: Ağırlıkça 12/1 çimento/malzeme ve malzeme %50 EPS katkıli EPS - çimento - kum karışımlarının 28 günlük basınç dayanımlarının deformasyona göre değişimi.

Yukarıdaki Şekil 3.12’de altı tane çimento – EPS – kum malzemelerinden ve malzeme içinde köpüğün ağırlıkça oranının %50 olan karışımın 28 günlük serbest basınç deneyi sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara göre çizilmiş olan normal gerilme – deformasyon eğrilerinde basınç dayanımının ulaştığı maksimum değerler aşağıdaki Çizelge 3.16’da gösteriliyor.

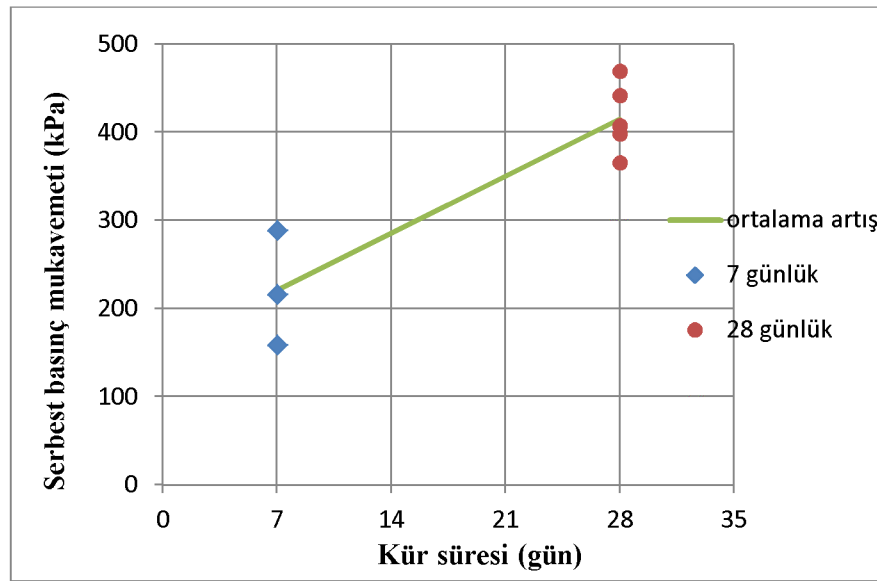
Çizelge 3.16: %50 EPS katkıli malzeme ve çimento karışımlarına ait 28 günlük serbest basınç deneyi sonuçlarına göre numune basınç dayanımları ve ortalaması.

Numune No	Deformasyon, ε (%)	Normal Gerilme, σ (kPa)	Ortalama Gerilme, σ_{ort} (kPa)
1	9,0	406,7	415,0
2	7,0	398,4	
3	9,5	407,8	
4	9,5	441,7	
5	8,5	365,4	
6	8,5	469,8	

Görüldüğü üzere çalışmamızın başında ulaşılmaması istenilen 300 kPa değerinde basınç dayanımının 12/1 ağırlıkça oranında ve malzemesi %50 polistiren katkıli karışımlarda sağlandığı görülmüştür. Serbest basınç deneyine tabi tutulan toplam altı

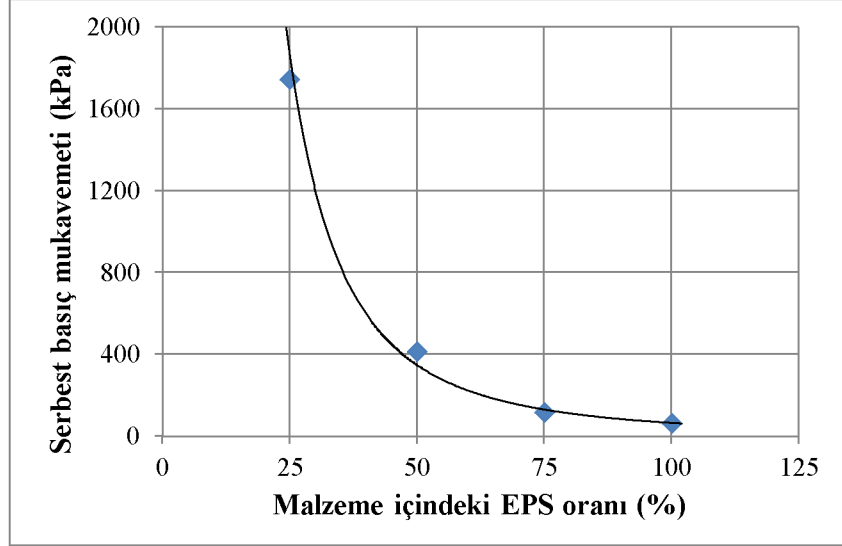
numunenin hepsi istenen şartı sağlamış bulunmakta ve bu numunelerin ortalama basınç dayanımı 415 kPa olup, bu değeri yaklaşık %8,7 düşey deformasyona uğradığında almaktadır.

Çimento/malzeme oranının 12/1 olduğu karışımlarda malzeme içerisindeki %50 EPS'ye ait serbest basınç değerlerinin kür süresine göre değişimi aşağıdaki Şekil 3.13'e bakarak görülebilir. Burada karışım içerisindeki malzemenin %50'sini EPS içermesi durumunda 7 günlük ve 28 günlük karışımların serbest basınç deneyleri sonucu elde ettiği mukavemetler karşılaştırılmış, numunelere ait kür sürelerinin artmasıyla birlikte serbest basınç mukavemetlerinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.13: Ağırlıkça 12/1 çimento/malzeme ve malzeme %50 EPS katkılı karışımların kür süresine göre basınç dayanımlarının artışı.

Serbest basınç deneyleri sonucu belirlenen çimento/malzeme ağırlıkça oranı 12/1 olan karışımlara ait 28 günlük serbest basınç mukavemetleri malzeme içerisindeki polistiren köpüğü miktarına göre değişmektedir. Bu değişiklik Şekil 3.14'teki değerlerden anlaşılmaktadır. Buna göre malzeme içerisindeki EPS oranı azaldıkça karışımın serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. Malzeme içerisindeki EPS oranının %100 olduğu durumdaki serbest basınç mukavemeti 60 kPa civarında olmasına karşılık, oranın %25 olduğu durumda mukavemetin ortalama 1700 kPa'a yükselerek karışımın serbest basınç mukavemetinde ciddi bir artış sağlandığı gözlenmektedir. Ayrıca 12/1 çimento/malzeme oranına ait 28 günlük serbest basınç mukavemetinin malzeme içindeki EPS oranlarına göre üstel bir fonksiyon biçiminde değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.14: 12/1 çimento/malzeme oranındaki karışımlara ait 28 günlük serbest basınç mukavemetinin malzeme içindeki EPS oranına göre değişimi.

3.2.7 CBR deneyi

Kaliforniya Taşıma Oranı zeminin mekanik mukavemetini bulma amaçlı karayolu, havaalanı kaplamalarında yaygın bir şekilde kullanılan bir penetrasyon direnci deneyidir. Bu test 2. Dünya savaşından önce Kaliforniya eyaleti Ulaştırma birimi tarafından geliştirilmiştir (Atapek, 2008).

CBR deneyi, alet pistonunun belirli alandaki zemin numunesinin penetrasyonu için gerekli direncin belirlenmesi şeklinde yürütülür. Belirlenen direnç daha sonra bir kırma taş numunesinin aynı derinlikte penetrasyonu için gerekli olan dirence bölünür. Elde edilen oran Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) olarak adlandırılır. Burada kırma taş CBR değerinin %100 olduğu bir malzeme olarak değerlendiriliyor ve bu malzemeye pistonun 2.5 mm ve 5.00 mm batması için gerekli olan kuvvet sırasıyla 1362 kg ve 2043 kg'dır. Diğer zemin türleri de bu sayılara bölünerek sahip oldukları CBR değerleri bulunur. Bu değerlere göre zeminler CBR deneyine göre aşağıdaki Çizelge 3.17'de sınıflandırılır.

Çizelge 3.17: CBR Sınıflandırılması (Kumbasar ve Kip, 1999).

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

Yukarıda da belirtildiği üzere CBR deneyleri zeminlerin yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi amaçlı yapılmaktadır. Zemin yüzeyi ne kadar sert olursa, o kadar yüksek CBR değeri alınır.

Şekil 3.15'te 7 günlük ve 28 günlük polistiren köpüğü-çimento-kum karışımından oluşan malzemenin CBR deneyine tabi tutulduğu alet görülmektedir.



Şekil 3.15: CBR deneyine tabi tutulmuş EPS karışım numunesi ve deney aleti.

CBR deneyi yapıldıktan sonra sonuçları değerlendirildiğinde şu hususlara dikkat etmek gerekir (Kumbasar ve Kip, 1999):

- Deney sonuçları yük-penetrasyon eğrisi olarak eksen takımında çizildiğinde eğer eğri yukarıya doğru dışbükey ise 2.50 mm ve 5.00 mm'ye karşı gelen yük değerleri belirlenir ve standart yüke bölünerek CBR değerleri bulunur. Burada 2.50 mm'ye karşı gelen CBR değeri 5.00 mm'ye denk gelen değerden daha büyük ise deney tekrarlanır. Deney tekrarlandıktan sonra yine aynı durum söz konusu ise 5.00 mm'deki CBR değeri deney sonucu olarak değerlendirilir.
- Deney sonuçlarını eksen takımında yük-penetrasyon eğrisi şeklinde gösterdiğimizde eğer eğri yukarıya doğru içbükey ise başlangıç nokta doğruya göre yeniden düzenlenir. Bu durumda başlangıç noktadan itibaren

2.50 mm ve 5.00 mm uzaklıktaki yük değerleri standart değerlere bölünerek yeni CBR yüzdeleri belirlenir. Bu işlemden sonra yine 2.50 mm ve 5.00 mm uzaklıktaki CBR değerlerinden ilki daha büyükse deney tekrarlanır. İkinci kez sonuçlar yine aynı çıkarsa 5.00 mm'deki değer zeminin CBR değeri olarak belirlenir.

CBR yüzdesi aşağıdaki Bağıntı 3.5'te verilen bağıntıdan bulunabilir.

$$CBR (\%) = \frac{\text{Deneyde belirlenen yük}}{\text{Kırma taş standart yükü}} \times 100 \quad (3.5)$$

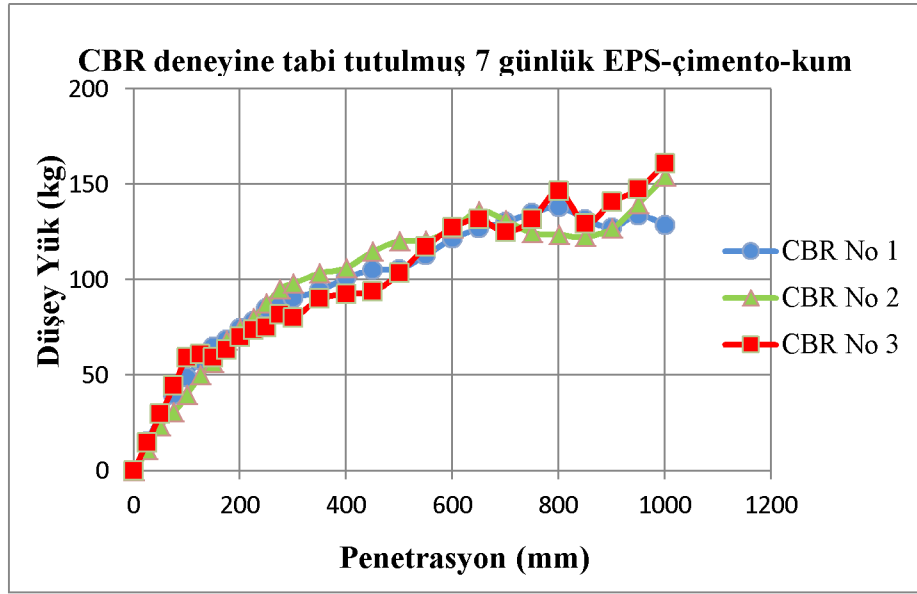
EPS-çimento-kum karışımıyla hazırlanan numuneler için CBR deneyleri yapılmıştır. Daha önce serbest basınç deneyleri sonucunda belirlenmiş, ağırlıkça malzeme/çimento oranı 1/12 olan EPS katkılı numuneleri CBR değerlerini bulmak için deneye tabi tutulmuştur. Burada karışımdaki malzemenin ağırlıkça oranı %50 EPS olarak belirlenmişken, diğer yarısı kum olarak belirlenmiştir. CBR deneyi için hazırlanan numunelerin 7 günlük ve 28 günlük nem odasına bırakılarak bu süre sonundaki değerleri ölçülmüştür. 7 ve 28 günlük CBR değerleri için altışar tane numune hazırlanmıştır. Aşağıda Şekil 3.16'da 28 gün nem odasında kalmış ve 28 gün sonunda CBR deneyi yapılmış numunelere ait resim görülmektedir.



Şekil 3.16: 28 gün nem odasında kalmış ve CBR deneyi yapılmış numuneler.

CBR deneyi için numuneler hazırlanırken, karışımlar yüksekliği 17.8 cm ve çapı 15.20 cm olan kalıplara konular. Karışımlar hazırlandıktan sonra kalıplara konulurken deney sırasında üzerlerine ağırlık konması için 5 cm yüksekliğinde boşluk bırakılır. EPS – çimento – kum karışımları kalıba konulurken kalıp yüzeyi yağlandı.

7 günlük EPS – çimento – kum karışımı numuneler üzerinde yapılmış olan CBR deneyleri sonucu Şekil 3.17’de verilen düşey yük – penetrasyon grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.17: CBR deneyine tabi tutulmuş 7 günlük EPS - çimento - kum karışım numunelerine ait düşey yük - penetrasyon grafiği.

7 günlük CBR değerlerini belirlemek için grafiklerden elde edilen eğrilerin 2.50 mm ve 5.00 mm penetrasyon değerlerine karşı gelen düşey yük değerleri bulunmuş, daha sonra her bir numune için uygun CBR yüzdesi bulunmuştur. Burada düşey yük değerlerini 2.50 mm ve 5.00 mm penetrasyona karşı gelen sırasıyla 1362 ve 2043 kg kırma taş standart yüküne bölerek CBR yüzdeleri bulunmuştur. Sonuçlar Çizelge 3.18’de verilmektedir.

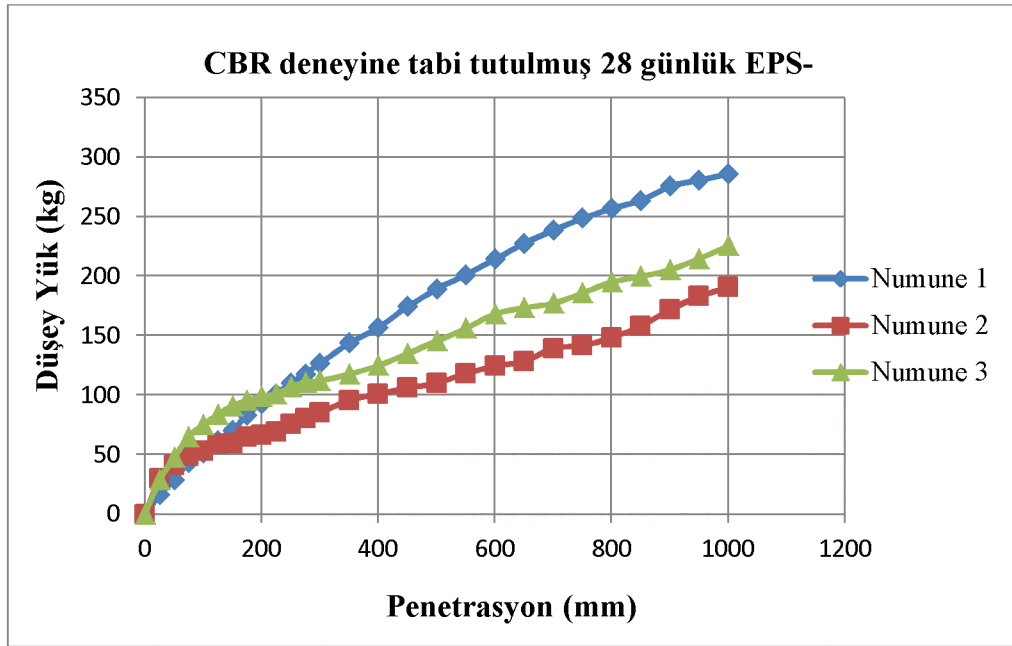
Çizelge 3.18: 7 günlük numunelerin CBR değerleri.

CBR Deneyi	Penetrasyona karşı gelen düşey yük		Elde edilen CBR yüzdeleri (1/100)		Seçilen CBR Değeri (%)
	2.50 mm	5.00 mm	2.50 mm	5.00 mm	
Numune 1	85,3	105,7	0,06	0,05	6
Numune 2	87,7	120,3	0,06	0,06	6
Numune 3	75,3	103,5	0,06	0,05	6

7 gün sonunda nem odasından çıkarılarak suya doymun durumda CBR deneyine tabi tutulan 1, 2 ve 3 numaralı numunelerin ortalama CBR değeri %6 olarak bulunmuştur. EPS – çimento – kum karışımı hafif dolgu malzemesinin CBR değerlendirilmesi sonucu malzemenin Çizelge 3.15'e göre 'zayıf' sınıfı içerisinde kaldığı görölmektedir.

7 günlük CBR değerleri belirlendikten sonra 28 günlük CBR değerleri için yeniden karışımlar hazırlanmış ve hazırlanan 3 numunenin Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerlerinin ortalaması alınarak, Çizelge 3.16'ya göre CBR sınıflandırılması yapılmıştır.

28 günlük EPS – çimento – kum karışımı numuneler üzerinde yapılmış olan CBR deneyleri sonucu aşağıdaki Şekil 3.18'de verilen düşey yük – penetrasyon grafikleri elde edilmiştir. Burada üzerinde deney yapılmış olan numunelerin karışımında çimentonun malzemeye ağırlıkça oranı 12/1 ve malzeme içinde bulunan kum ve EPS ağırlıkça oran olarak yarı yarıyadır.



Şekil 3.18: CBR deneyine tabi tutulmuş 28 günlük EPS - çimento - kum karışım numunelerine ait düşey yük-penetrasyon grafiği.

Deney sırasında her bir numune için penetrasyon değerlerine karşı gelen düşey yük okumaları elde edilmiştir. Daha sonra bu okumaların aletin ring faktörü ile çarpılması gereklidir. Bu grafikteki eğrilere göre numunelerin aşağıdaki gibi CBR değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.19'da grafiklerden elde edilen eğrilerin 2.50 mm ve 5.00 mm penetrasyon değerlerine karşı gelen düşey yük değerleri bulunarak, her bir numune için uygun

CBR yüzdesi bulunmuştur. Burada düşey yük değerlerini 2.50 mm ve 5.00 mm penetrasyona karşı gelen sırasıyla 1362 ve 2043 kg kırma taş standart yüküne bölerek CBR yüzdeleri bulunmuştur.

Çizelge 3.19: 28 günlük numunelerin CBR değerleri.

CBR Deneyi	Penetrasyona karşı gelen düşey yük		Elde edilen CBR yüzdeleri (1/100)		Seçilen CBR Değeri (%)
	2.50 mm	5.00 mm	2.50 mm	5.00 mm	
Numune 1	110,2	189,3	0,08	0,09	9
Numune 2	75,7	110,2	0,06	0,05	5
Numune 3	106,9	145,7	0,08	0,07	7

3.2.8 Sabit seviyeli permabilite deneyi

Zemin içerisindeki hava boşluklarının birbirleri ile bağlantılı olması nedeniyle zemin içerisindeki boşluk suyu zeminin türüne bağlı olarak hareket etmektedir. Burada suyun hareketi zeminin türüne bağlı olarak farklı hızlarda olur. Permeabilite değeri permeabilite katsayısı k , bir başka deyişle hidrolik iletkenlik olarak tanımlanır ve SI birim sistemine göre birimi cm/s olarak gösterilmektedir.

Zeminlerin permeabilite katsayısı akışkanın viskozitesi, zemindeki boşlukların büyüklüğü, dane dağılımı, boşluk oranı (e), zeminin suya doygunluk derecesine bağlıdır. Çizelge 3.20’de permeabilite katsayısının zemin türlerine göre değerleri verilmektedir.

Çizelge 3.20: Permeabilite katsayısının zemin tipine göre değişimi (Das, 2002).

Zemin tipi	Hidrolik iletkenlik, k (cm/s)	Permeabilite Değeri
Çakıl	$1,0 - 1 \times 10^2$	Yüksek
Kaba kum	$1,0 - 1 \times 10^{-2}$	Orta
İnce kum	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	Düşük
Siltler	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$	Çok Düşük
Kil	$< 1 \times 10^{-6}$	Pratik olarak geçirimsiz

Laboratuvarında k katsayısı sabit seviyeli permeabilite deneyi yada düşen seviyeli permeabilite deneyi sayesinde belirlenir. Sabit seviyeli permabilite deneyi kaba daneli (kum, çakıl), yüksek geçirimsizliğe sahip zemin numuneleri için yapılır. Buna karşılık düşen seviyeli permeabilite deneyi ince daneli (silt, kil), orta veya düşük geçirimli zemin numuneleri üzerinde yapılır (Bardet, 1997).

Serbest basınç deneyi sonucunda belirlenen 12/1 çimento/malzeme ağırlıkça oranı ve %50 EPS katkılı malzemeden oluşan karışımların hafif dolgu malzemesi olarak

kullanıldığı zaman dolguda bulunan boşluk suyunun permeabilite davranışını belirlemek için 7 ve 28 günlük sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler kapsamında, gerekli hesaplamalar yapılarak dolgu malzemesinin permeabilite özellikleri belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük deneylere ait veriler EK D’de gösterilmektedir.

Sabit seviyeli permeabilite deneyi için hazırlanan numune CBR kalıbında üretilmiştir, dolayısıyla kalıp ve numune yükseklikleri sırasıyla 17.80 cm ve 12.90 cm, numune çapı (D) ise 15.20 cm’dir. Hesaplanan alan 181.46 cm² ve numunenin hacmi ise 2340.83 cm³ olarak bulunmuştur.

Sabit seviyeli permeabilite deneyi sırasında 181.46 cm² enkesitine sahip numunenin içinden 2 dakikalık aralıklarda geçen su miktarını belirlemek için, öncelikle Bağntı 3.6’deki hız denklemi olan Darcy kuralına göre suyun akış hızı bulunur.

$$V=ki \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklem aşağıdaki Bağntı 3.7’de gösterilen t zamanda numune enkesitinden (A) geçen suyun debisi denkleminde yerine konur.

$$Q=Avt=A x k x i x t \quad (3.7)$$

Burada i düşey doğrultuda suyun hareketini sağlayan hidrolik eğim olup değeri,

$$i=\frac{\Delta H}{L} \quad (3.8)$$

bağntısından hesaplanır. Burada ΔH suyun giriş ve çıkış noktaları arasındaki yük kaybını, L ise numunenin yüksekliğini göstermektedir.

Permeabilite katsayısı k yukarıdaki denklemlere göre düzenlenirse,

$$k=\frac{Q}{Ait} \quad (3.9)$$

Çimento – EPS – kum karışımı üzerinde yapılmış 7 günlük ve 28 günlük sabit seviyeli permeabilite deneylerinde belirlenen 2 dakikalık zaman aralıklarındaki su hacimleri Bağntı 3.8’de yerlerine konarak permeabilite katsayısı için Çizelge 3.21’deki değerler bulunur.

Çizelge 3.21: Belirlenmiş oranda çimento - EPS - kum karışımına ait 7 ve 28 günlük permeabilite katsayı ve akım hızları.

Kür süreleri	Su hacimleri, Q (cm ³)	Permeabilite katsayıları, k (cm/s)	Akım hızı, v (cm/s)	Ortalama k (cm/s)
7 günlük	565	4,96 x 10 ⁻²	2,59 x 10 ⁻²	4,84 x 10 ⁻²
	550	4,83 x 10 ⁻²	2,53 x 10 ⁻²	
	540	4,74 x 10 ⁻²	2,48 x 10 ⁻²	
28 günlük	535	4,70 x 10 ⁻²	2,46 x 10 ⁻²	4,55 x 10 ⁻²
	520	4,57 x 10 ⁻²	2,39 x 10 ⁻²	
	500	4,39 x 10 ⁻²	2,30 x 10 ⁻²	

7 günlük numune için yapılmış sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen ortalama permeabilite katsayısı değeri $4,84 \times 10^{-2}$ cm/s olarak bulunmuştur.

Yine üretilen 28 günlük hafif dolgu malzemesi için yapılan sabit seviyeli permeametre deneyi sonucunda elde olunan ortalama permeabilite katsayısı $4,55 \times 10^{-2}$ cm/s olarak bulunmuştur.

7 günlük ve 28 günlük permeabilite katsayıları kıyaslandığında kür süresinin uzamasıyla üretilen hafif dolgu malzemesinin geçirimsizliğinin düştüğü gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında hazırlanan hafif dolgu malzemesinin ve içerisinde bulunan kum, EPS gibi malzemelerin mühendislik özellikleri laboratuvarında yapılan özgül ağırlık, relatif sıklık, kesme kutusu, serbest basınç, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonuçlarına göre belirlenmiştir. Karışımda seçilen 12/1 çimento/malzeme ağırlıkça oranında, %50 polistiren köpüğü katkılı karışımda ve karışım içerisinde bulunan EPS ve kum gibi malzemeler üzerinde yapılmış olan deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Kesme kutusu deneyinde kayma gerilmesi – normal gerilme eğrilerine göre bulunan kayma mukavemeti açıları (ϕ) %20 sıklığında kum için 37° , %50 sıklığında kum için 41° ve %80 sıklığında kum için ise 43° 'dir. Buna karşılık EPS için yapılan kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kayma mukavemeti açısı 26° olarak bulunmuştur. Ayrıca kesme kutusu deneyi sırasında okunan düşey ve yanal yerdeğiştirmelere göre polistiren köpüğünün elatisite modülü ve poisson oranı hesabı yapılmıştır. Bu hesaplara göre bulunan elatisite modülü ortalama olarak 654 kPa, poisson oranı ise birinci ve ikinci numuneler için 0.75, üçüncü numune için ise 1 olarak bulunmuştur.
- Serbest basınç deneyinde çalışmamızın başında ulaşılması istenilen 300 kPa değerinde basınç dayanımının 12/1 ağırlıkça oranında ve malzemesi %50 polistiren katkılı karışımlarda sağlandığı görülmüştür. Serbest basınç deneyine tabi tutulan toplam altı numunenin hepsi istenen şartı sağlamış bulunmakta ve bu numunelerin ortalama basınç dayanımı 415 kPa olup, bu değeri yaklaşık %8,7 düşey deformasyona uğradığında almaktadır.
- 28 gün sonunda nem odasından çıkarılarak suya doygun durumda CBR deneyine tabi tutulan 1, 2 ve 3 numaralı numunelerin ortalama CBR değeri %7 olarak bulunmuştur. EPS – çimento – kum karışımli hafif dolgu malzemesinin CBR değerlendirilmesi sonucu malzemenin 'orta' sınıfı içerisinde kaldığı görülmektedir.

- 7 günlük ve 28 günlük permeabilite katsayıları kıyaslandığında kr süresinin uzamasıyla üretilen hafif dolgu malzemesinin geçirimsizliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Çizelge 3.15'e göre bulunan 7 günlük ve 28 günlük sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucu bulunan permeabilite katsayıları sırasıyla $4,84 \times 10^{-2}$ cm/s ve $4,55 \times 10^{-2}$ cm/s olarak tespit edilmiş, bu sayılara göre her iki numunenin de 'düşük' geçirimsizliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuçlar literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırıldığında imento, polistiren köpüğü ve kum karışımının şev stabilitesi açısından yeterli olduğu ve dolgu ağırlığını azaltmada oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aksoy, İ. H.**, (1992). Uçucu Külün Geoteknikte Kullanımı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, 21-23 Ekim 1992, İ.T.Ü., Cilt 2, Sf. 248-259, İstanbul.
- Aksoy, İ. H.**, (1998). Polistiren Köpüğün Hafif Dolgu Olarak Kullanılması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, 22 - 23 Ekim, Cilt 2, Sf. 428 – 437, İstanbul.
- Alkaya, D.**, (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 5, No 1, Sf. 61-72.
- Alpatlı, M.**, (1992). Hydraulic Conductivity of Compacted Waste Rubber - Clay Mixtures as Earthen Liners for Petroleum Based Contaminants, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, İstanbul.
- American Coal Ash Association**, 1997. 1996 Coal Combustion Product-Production and Use, Alexandria, Virginia.
- Aruntaş, H.Y.**, (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Univ. Cilt 21, Sayı 1, Sf. 193-203.
- ASCE**, 2008, <http://www.asce.org>, American Society of Civil Engineers, USA.
- ASTM C618**, 2008, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Standard for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D2487 - 06e1**, 2006, Standard Practice for Soil Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), American Standard for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Atapek, B. A.**, (2008). Determination of properties of composite soil with used tire granulates, sand and cement, ITU, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, İstanbul.
- Aytekin, M.**, (1997). Numerical modeling of EPS geofom used with swelling soil, Geotextiles and Geomembranes, Vol 15, No 1-3, February-June 1997, pp. 133-146.

- Aytekin, M., ve Çakıroğlu, M.,** (1997). Yol İnşaatlarında Genleştirilmiş Polyester Kullanımı, İnşaat Mühendisleri Odası, Alındığı tarih: 04.12.2011, adres: <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/12628.pdf>
- Bakioğlu, M.,** (2001). Cisimlerin Mukavemeti, 1. Baskı, Beta Basım A.Ş., İstanbul.
- Bardet, J. P.,** (1997). Experimental Soil Mechanics, Prentice Hall Inc., New Jersey, USA.
- Baykal, G. ve Alpatlı, H. M.,** (1995). Permeability of Rubber-Soil Liners under Confinement, *Geotechnical Special Publication*, ASCE, 46, pp. 718-731.
- Brooks, R., Udoeyo, F.F. ve Takkalapelli, K.V.,** (2011). Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1 May, 2011, Vol 23, No 5, pp. 711-716.
- Das, B. M.,** (2002). Principles of Geotechnical Engineering, Brooks / Cole Publishing Co., Pacific Grove, California, USA.
- Das, B. M.,** (2006). Principles of Geotechnical Engineering, Nelson Education Ltd./Thomson Canada Ltd., Toronto, Canada.
- Das, S. K., ve Yudhbir,** (2006). Geotechnical Properties of Low Calcium and High Calcium Fly Ash, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol 24, pp. 249–263
- Deniz, V., ve Alataş, C.,** (2001). Atık Lastik Yönetimi, 4. *Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, 7-10 Kasım, Mersin.
- Doğan, Ö.,** (2005). Lastik Agregalı Betonların Özelliklerinin Deneysel İrdelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, Ankara.
- Edincliler, A., Baykal, G., ve Saygılı, A.,** (2010). Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction, *Waste Management*, Vol 30 (2010) pp. 1073–1080.
- Elragi, A., Negusse, D.ve Kyanka, G.,** (2004). Sample Size Effects on the Behavior of EPS Geofoam, *Geofoam Research Center*, Geo-Institute Soft Ground Technology Conference, ASCE, 280 – 291.
- Emiroğlu, M.,** (2006). Atık Taşıtlı Lastiğin Beton İçerisinde Kullanımı ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, Elazığ.
- Guleria, S. P. ve Dutta, R. K.,** (2011). Unconfined Compressive Strength of Fly Ash–Lime–Gypsum Composite Mixed with Treated Tire Chips, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, August 2011, 1255-1263.

- Hamamcı, R. B.,** (1991). Effect of Rubber, Carbon Black and Fly Ash on Physical Properties of Pavements, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, Istanbul.
- Haşal, E.,** (2000). Uçucu Kül-Çimento-Köpük Karışımının Hafif Dolgu Olarak Geoteknik Özellikleri, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, İstanbul.
- Horoz, Ç.,** (2007). Haliç Tarama Çamuru-Çimento-Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, İstanbul.
- Hazarika, H.,** (2006). Stress-strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 24, No 2, April 2006, pp. 79-90.
- Horvath, J. S.,** (1997). The Compressible Inclusion Function of EPS Geofoam, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 15, No 1-3, February-June 1997, pp. 77-120.
- Kokusho, T., Nakashima, S., Kubo, A. ve Ikeda, K.,** 2011. Soil Investigation of Fly Ash Deposit Improved by Heavy Compaction Method, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, October 20 2011.
- Köprülü, K.,** (1991). Hydraulic Conductivity and Strength of Rubber Reinforced Fly Ash As Liner Material, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, Istanbul.
- Kumbasar, V. ve Kip, F.,** (1999). Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan Kitabevi, 6. Baskı, İstanbul, Türkiye.
- Mehmetoğlu, D.,** (1994). Compacted Fly Ash Mixtures As Highway Safety Barriers, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, Istanbul.
- Okunade, E.A.,** (2010). Geotechnical Properties of Some Coal Fly Ash Stabilized Southwestern Nigeria Lateritic Soils, *Canadian Center of Science and Education*, December 2010, Vol 4, No 12, pp. 66-73
- Ozkul, Z. H.,** (1998). The Effect of Stress on the Hydraulic Conductivity of Rubber Soil Liners Permeated with Gasoline, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, Istanbul.
- Ozkul, Z. H. ve Baykal, G.,** (2007). Shear Behavior of Compacted Rubber Fiber Clay Composite in Drained and Undrained Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 767 - 781, ASCE.
- Önalp, A.,** (2007). Geoteknik Bilgisi I: Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, Yenilenmiş 3. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Pierce, C. E., Blackwell, M. C.,** (2003). Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill, *Waste Management*, Vol 23, pp. 197–208
- Sarica, R.,** (2001). Shear Strength and Deformation Behavior of Rubber Fiber Kaolinite Mixtures, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, Istanbul.
- Sever, S.,** (2004). Uçucu Kül-Çimento-Genleşmiş Polistiren Köpük Daneleri Karışımının Geoteknik Özellikleri, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, İstanbul.
- Sugözü, İ. ve Mutlu, İ.,** (2009). Atık Taşıt Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 1, No 1, Sf. 35-46
- Tan, O. ve İyisan R.,** (2004). Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sf. 417-426, İzmir.
- TCMB,** 2004. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *Ar-Ge Enstitüsü, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara.
- Türkel, S.,** (2008). Değişik İklim Koşullarının Kontrollü Düşük Dayanımlı Malzeme Üzerine Etkileri, İnşaat Mühendisleri Odası, Alındığı tarih: 04.12.2011, adres: <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/12641.pdf>
- TS EN 197 - 1,** 2002, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standart Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Url-1** <http://tipor.com.tr/?i=icerik_goster.php&id=35>, alındığı tarih: 31.10.2011
- Url-1** <http://www.orcangroup.com/eps5_main.htm>, alındığı tarih: 07.09.2011
- Winter, M.G. ve Clarke, B.G.,** (2002). Improved use of pulverized fuel ash as general fill, *In Proceedings of Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, Vol 155(2), pp. 1331–1341.
- Yudhbir ve Honjo, Y.,** (1991). Application of geotechnical engineering to environmental control, *In Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Vol 2., pp. 431–466.

EKLER

EK A: EPS kesme kutusu deneyi hesap ve sonuçları.

EK B: Kuma ait kesme kutusu deneyleri kayma gerilme – deformasyon eğrileri ve kayma mukavemeti açıları

EK C: EPS – çimento – kum karışımlarına ait serbest basınç deneyleri gerilme – deformasyon grafikleri

EK D: Sabit seviyeli permeabilite deneyleri

EK A**Çizelge A.1:** EPS için kesme kutusu deneyi (12.5 kPa yükleme kademesi).

Deney başı numune ağırlığı : 1,44 g Yay faktörü : 0,135kg/div Yükleme kademesi, σ_n : 12,5 kPa			<u>Konsolidasyon için</u> Başlangıç Δh Okuması: 9,00 mm Bitiş Δh Okuması: 5,59 mm	
Yanal yerdeğiştirme, ΔL (1/100)	Kuvvet Halkası	Düşey yerdeğiştirme, Δh (mm)	Düzeltilmiş Alan, A_L (cm^2)	Kayma Gerilmesi τ (kPa) $\sigma_n = 12,5$ kPa
0	0,0	5,59	36,0	0,0
25	7,0		35,9	3,0
50	10,0		35,7	3,8
75	11,0		35,6	4,2
100	12,0	5,20	35,4	4,6
125	13,0		35,3	5,0
150	14,0		35,1	5,4
175	14,5		35,0	5,6
200	14,5	4,90	34,8	5,6
225	15,0		34,7	5,8
250	16,0		34,5	6,3
275	16,0		34,4	6,3
300	17,0	4,71	34,2	6,7
325	18,5		34,1	7,3
350	19,5		33,9	7,8
375	20,0		33,8	8,0
400	21,0	4,42	33,6	8,4
425	21,5		33,5	8,7
450	22,0		33,3	8,9
475	22,5		33,2	9,2
500	22,5	4,15	33,0	9,2
525	23,0		32,9	9,5
550	23,0		32,7	9,5
575	23,5		32,6	9,7
600	23,5	3,88	32,4	9,8
650	23,0		32,1	9,7
700	23,0	3,57	31,8	9,8
750	22,5		31,5	9,6
800	22,5	3,35	31,2	9,7
850	22,5		30,9	9,8
900	22,0	3,10	30,6	9,7
950	22,0		30,3	9,8
1000	22,0	2,92	30,0	9,9

Çizelge A.2: EPS için kesme kutusu deneyi (25.0 kPa yükleme kademesi).

Deney başı numune ağırlığı : 1,44 g
Yay faktörü : 0,135 kg/div
Yükleme kademesi, σ_n : 25,0 kPa

Konsolidasyon için
Başlangıç Δh Okuması: 9,00 mm
Bitiş Δh Okuması: 1,85 mm

Yanal yerdeğiştirme, ΔL (1/100)	Kuvvet Halkası	Düşey yerdeğiştirme, Δh (mm)	Düzeltilmiş Alan, A_L (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kPa) $\sigma_n = 25,0$ kPa
0	0,0	1,85	36,0	0,0
25	8,0		35,9	3,0
50	15,0		35,7	5,7
75	18,0		35,6	6,8
100	20,0	1,59	35,4	7,6
125	22,0		35,3	8,4
150	23,0		35,1	8,8
175	24,0		35,0	9,3
200	25,0	1,40	34,8	9,7
225	26,5		34,7	10,3
250	27,5		34,5	10,8
275	29,0		34,4	11,4
300	30,0	1,14	34,2	11,8
325	31,5		34,1	12,5
350	32,0		33,9	12,7
375	33,0		33,8	13,2
400	34,0	0,88	33,6	13,7
425	34,5		33,5	13,9
450	35,0		33,3	14,2
475	36,0		33,2	14,7
500	36,5	0,65	33,0	14,9
525	37,0		32,9	15,2
550	37,5		32,7	15,5
575	38,0		32,6	15,8
600	38,0	0,41	32,4	15,8
650	38,5		32,1	16,2
700	39,0	0,19	31,8	16,6
750	39,5		31,5	16,9
800	40,0	0,05	31,2	17,3
850	40,5		30,9	17,7
900	40,5	-0,29	30,6	17,9
950	40,0		30,3	17,8
1000	40,0	-0,53	30,0	18,0

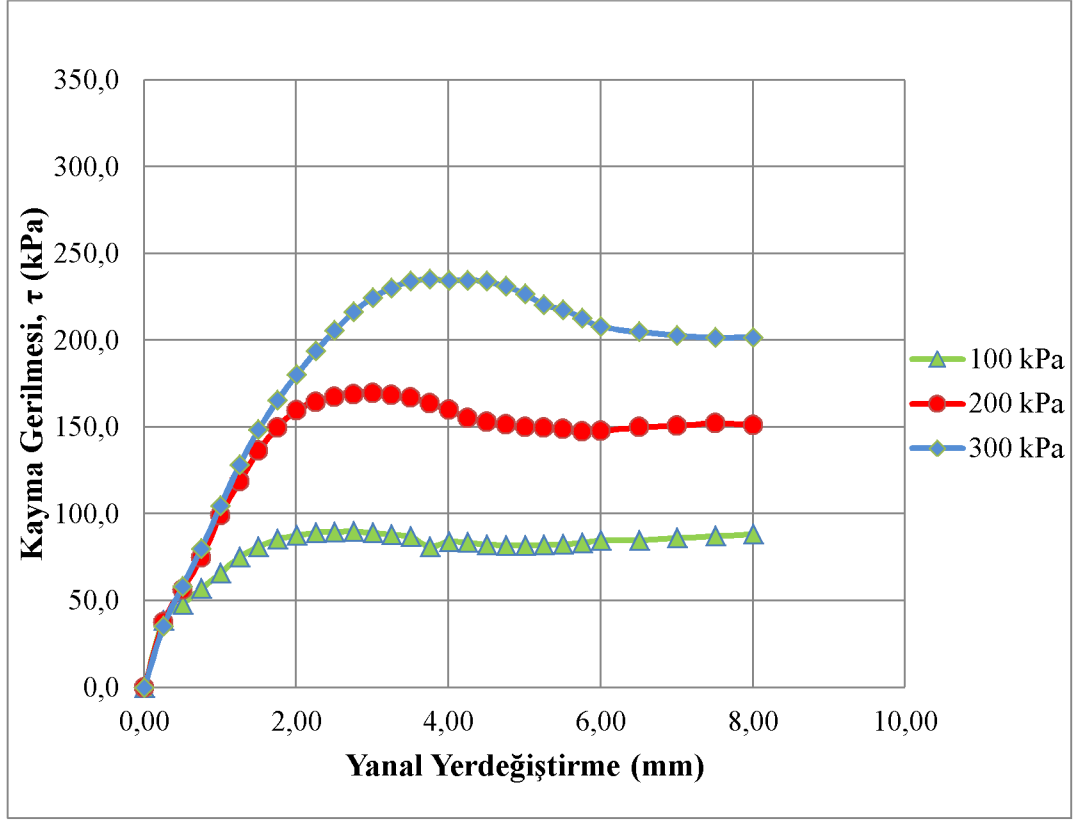
Çizelge A.3: EPS için kesme kutusu deneyi (37.5 kPa yükleme kademesi).

Yanal yerdeğiştirme, ΔL (1/100)	Kuvvet Halkası	Düşey yerdeğiştirme, Δh (mm)	Düzeltilmiş Alan, A_L (cm^2)	Kayma Gerilmesi τ (kPa) $\sigma_n = 37,5$ kPa
0	0,0	-0,71	36,0	0,0
25	9,0		35,9	3,2
50	16,0		35,7	5,6
75	22,0		35,6	7,8
100	27,0	-0,87	35,4	9,6
125	31,0		35,3	11,1
150	33,5		35,1	12,0
175	36,0		35,0	13,0
200	38,0	-1,26	34,8	13,8
225	39,0		34,7	14,2
250	40,5		34,5	14,8
275	42,0		34,4	15,4
300	43,5	-1,58	34,2	16,0
325	45,0		34,1	16,7
350	46,5		33,9	17,3
375	48,0		33,8	17,9
400	9,5	-1,85	33,6	18,6
425	50,5		33,5	19,0
450	51,5		33,3	19,5
475	52,5		33,2	20,0
500	53,5	-2,27	33,0	20,4
525	54,5		32,9	20,9
550	55,5		32,7	21,4
575	56,0		32,6	21,7
600	56,5	-2,58	32,4	22,0
650	57,0		32,1	22,4
700	57,5	-2,78	31,8	22,8
750	58,0		31,5	23,2
800	58,0	-3,25	31,2	23,4
850	58,5		30,9	23,9
900	58,5	-3,54	30,6	24,1
950	58,5		30,3	24,3
1000	58,5	-3,70	30,0	24,6

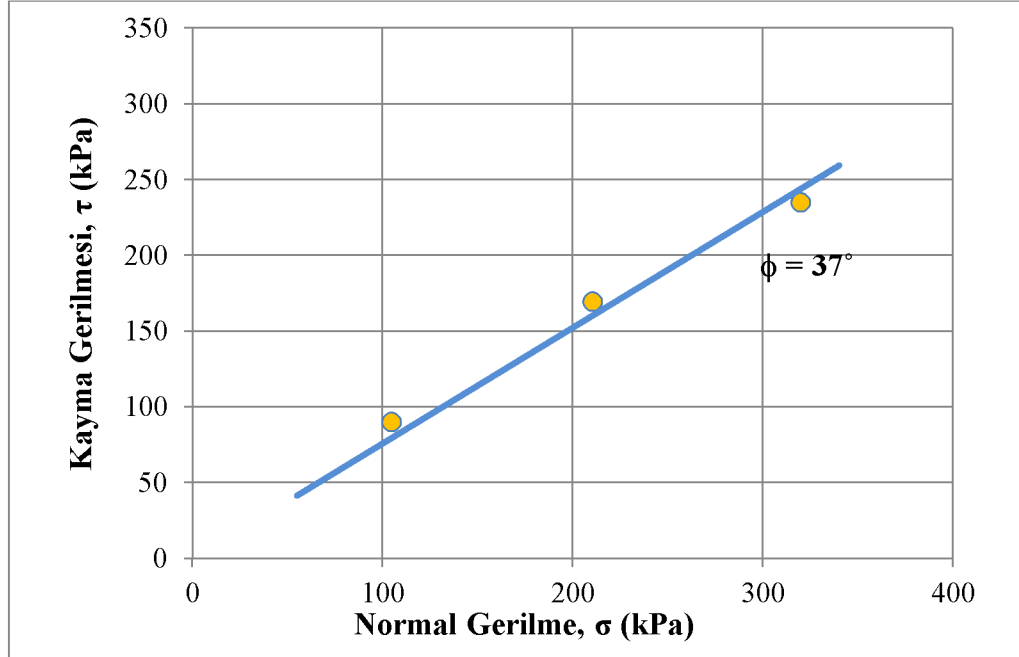
Çizelge A.4: EPS'nin kesme kutusu deney hesabı ve sonuçları.

Yanal yerdeğiştir me (ΔL)	Düzeltilmiş Alan (A_i)	Yanal yerdeğiştirme Okumaları			Kayma Gerilmesi τ (kPa)			Normal Gerilme σ (kPa)		
		$\sigma_n =$ 12.5 kPa	$\sigma_n =$ 25.0 kPa	$\sigma_n =$ 37.5 kPa	$\sigma_n =$ 12.5 kPa	$\sigma_n =$ 25.0 kPa	$\sigma_n =$ 37.5 kPa	$\sigma_n =$ 12.5 kPa	$\sigma_n =$ 25.0 kPa	$\sigma_n =$ 37.5 kPa
(1/100 mm)	(cm^2)									
0	36,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	25,0	37,5
25	35,85	7,0	8,0	9,0	2,6	3,0	3,2	12,6	25,1	37,7
50	35,70	10,0	15,0	16,0	3,8	5,7	5,6	12,6	25,2	37,8
75	35,55	11,0	18,0	22,0	4,2	6,8	7,8	12,7	25,3	38,0
100	35,40	12,0	20,0	27,0	4,6	7,6	9,6	12,7	25,4	38,1
125	35,25	13,0	22,0	31,0	5,0	8,4	11,1	12,8	25,5	38,3
150	35,10	14,0	23,0	33,5	5,4	8,8	12,0	12,8	25,6	38,5
175	34,95	14,5	24,0	36,0	5,6	9,3	13,0	12,9	25,8	38,6
200	34,80	14,5	25,0	38,0	5,6	9,7	13,8	12,9	25,9	38,8
225	34,65	15,0	26,5	39,0	5,8	10,3	14,2	13,0	26,0	39,0
250	34,50	16,0	27,5	40,5	6,3	10,8	14,8	13,0	26,1	39,1
275	34,35	16,0	29,0	42,0	6,3	11,4	15,4	13,1	26,2	39,3
300	34,20	17,0	30,0	43,5	6,7	11,8	16,0	13,2	26,3	39,5
325	34,05	18,5	31,5	45,0	7,3	12,5	16,7	13,2	26,4	39,6
350	33,90	19,5	32,0	46,5	7,8	12,7	17,3	13,3	26,5	39,8
375	33,75	20,0	33,0	48,0	8,0	13,2	17,9	13,3	26,7	40,0
400	33,60	21,0	34,0	49,5	8,4	13,7	18,6	13,4	26,8	40,2
425	33,45	21,5	34,5	50,5	8,7	13,9	19,0	13,5	26,9	40,4
450	33,30	22,0	35,0	51,5	8,9	14,2	19,5	13,5	27,0	40,5
475	33,15	22,5	36,0	52,5	9,2	14,7	20,0	13,6	27,1	40,7
500	33,00	22,5	36,5	53,5	9,2	14,9	20,4	13,6	27,3	40,9
525	32,85	23,0	37,0	54,5	9,5	15,2	20,9	13,7	27,4	41,1
550	32,70	23,0	37,5	55,5	9,5	15,5	21,4	13,8	27,5	41,3
575	32,55	23,5	38,0	56,0	9,7	15,8	21,7	13,8	27,6	41,5
600	32,40	23,5	38,0	56,5	9,8	15,8	22,0	13,9	27,8	41,7
650	32,10	23,0	38,5	57,0	9,7	16,2	22,4	14,0	28,0	42,1
700	31,80	23,0	39,0	57,5	9,8	16,6	22,8	14,2	28,3	42,5
750	31,50	22,5	39,5	58,0	9,6	16,9	23,2	14,3	28,6	42,9
800	31,20	22,5	40,0	58,0	9,7	17,3	23,4	14,4	28,8	43,3
850	30,90	22,5	40,5	58,5	9,8	17,7	23,9	14,6	29,1	43,7
900	30,60	22,0	40,5	58,5	9,7	17,9	24,1	14,7	29,4	44,1
950	30,30	22,0	40,0	58,5	9,8	17,8	24,3	14,9	29,7	44,6
1000	30,00	22,0	40,0	58,5	9,9	18,0	24,6	15,0	30,0	45,0

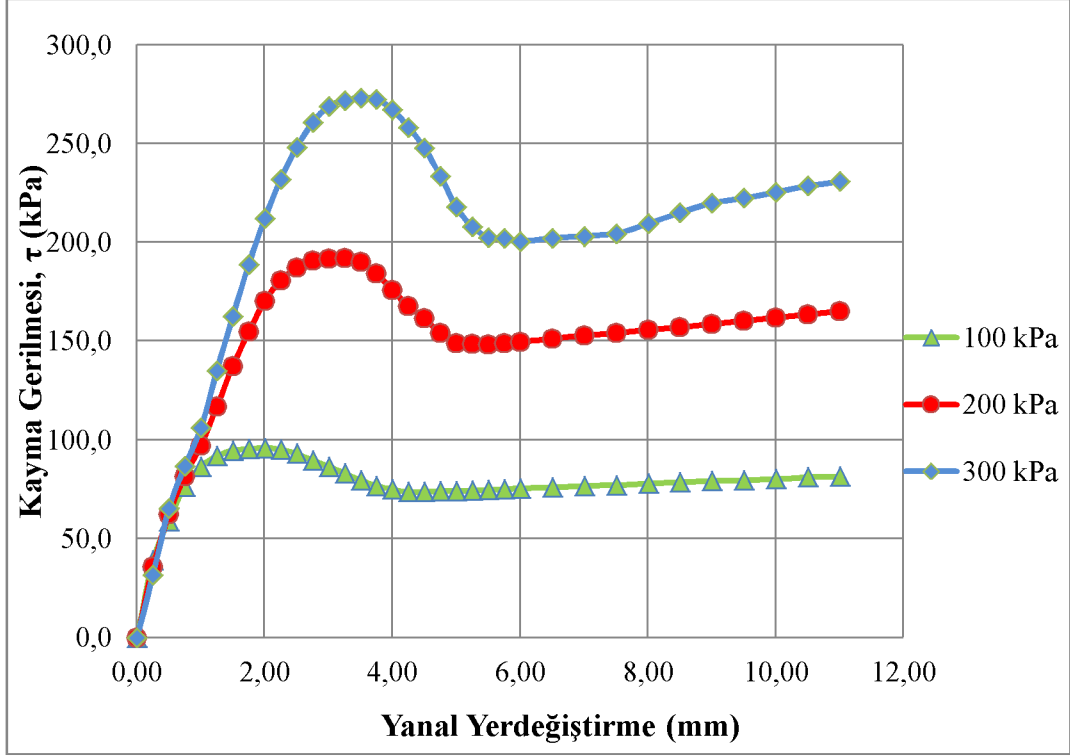
EK B



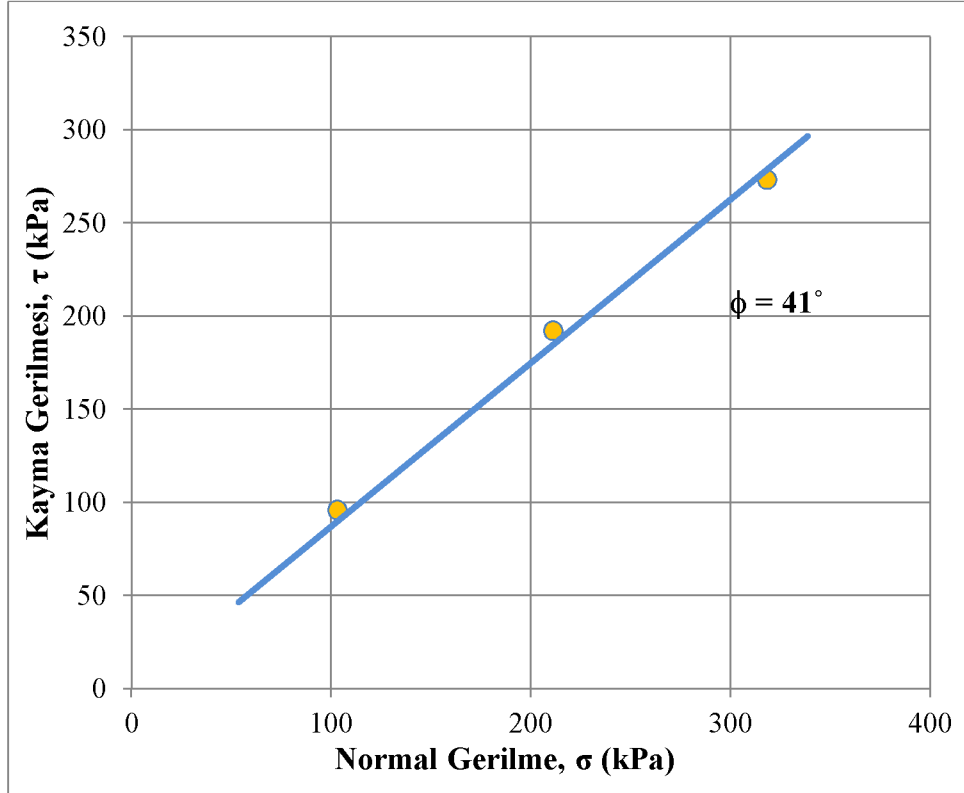
Şekil B.1: %20 sıklıkta kuma ait kayma gerilmesi - yatay yerdeğiştirme eğrisi.



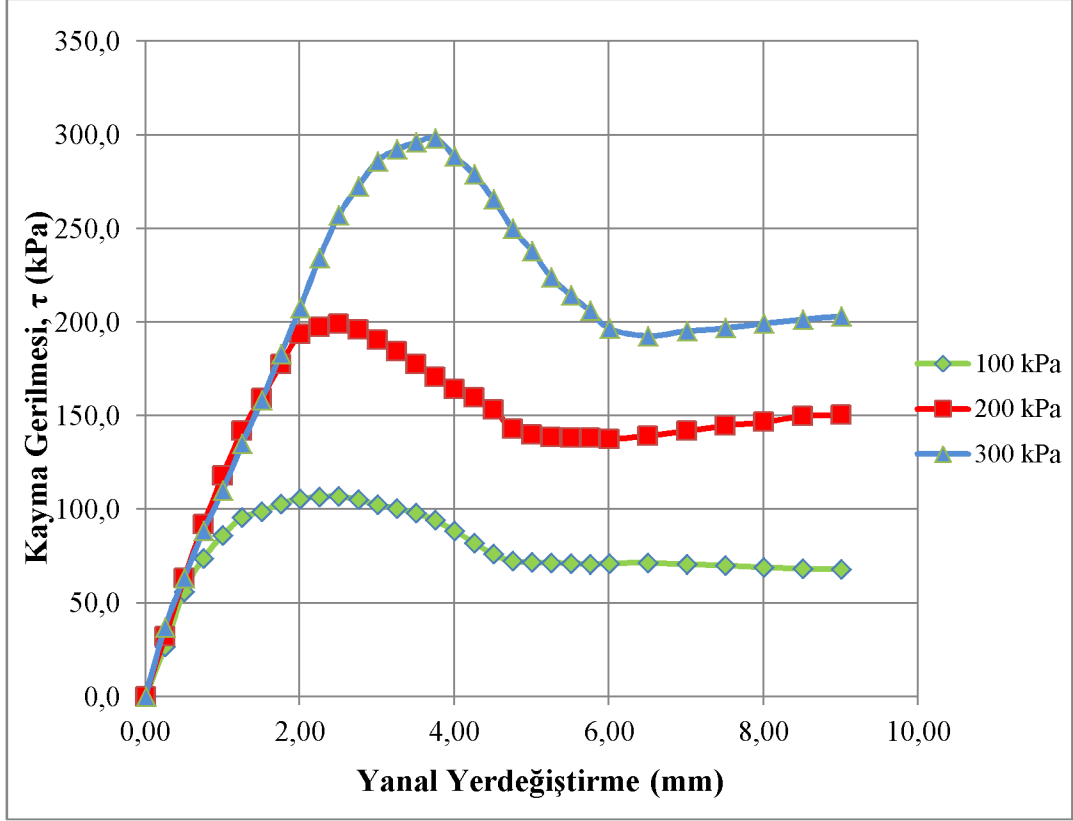
Şekil B.2: %20 sıklıkta kuma ait kayma mukavemeti ağışı.



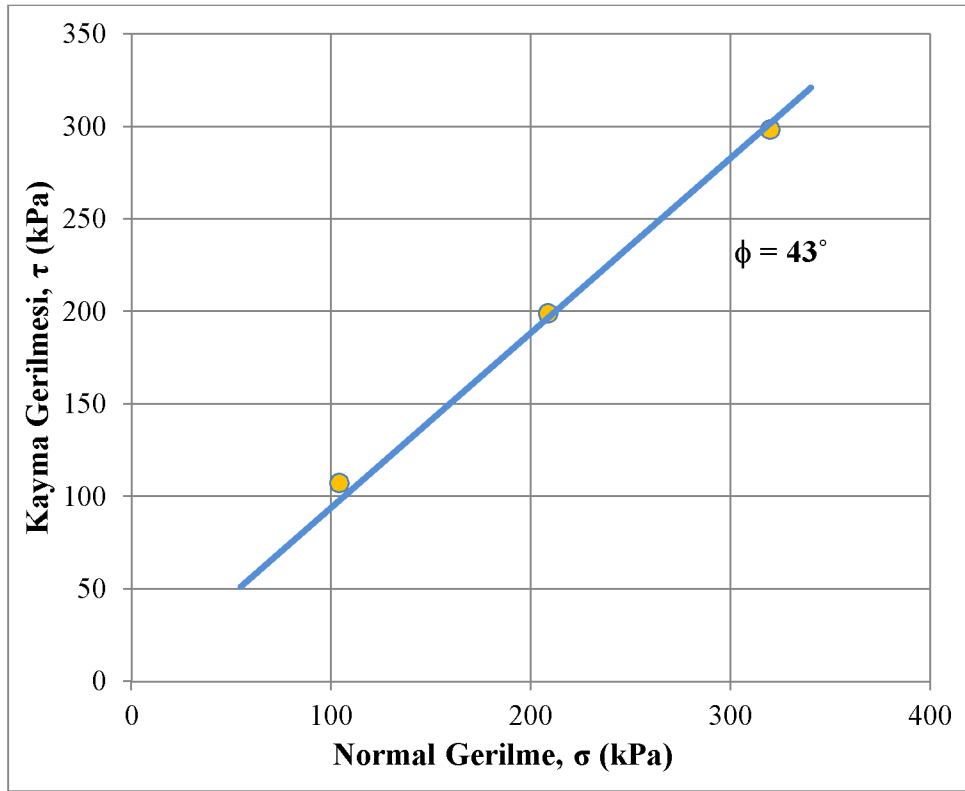
Şekil B.3: %50 sıklıkta kuma ait kayma gerilmesi - yatay yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil B.4: %50 sıklıkta kuma ait kayma mukavemeti açısı.

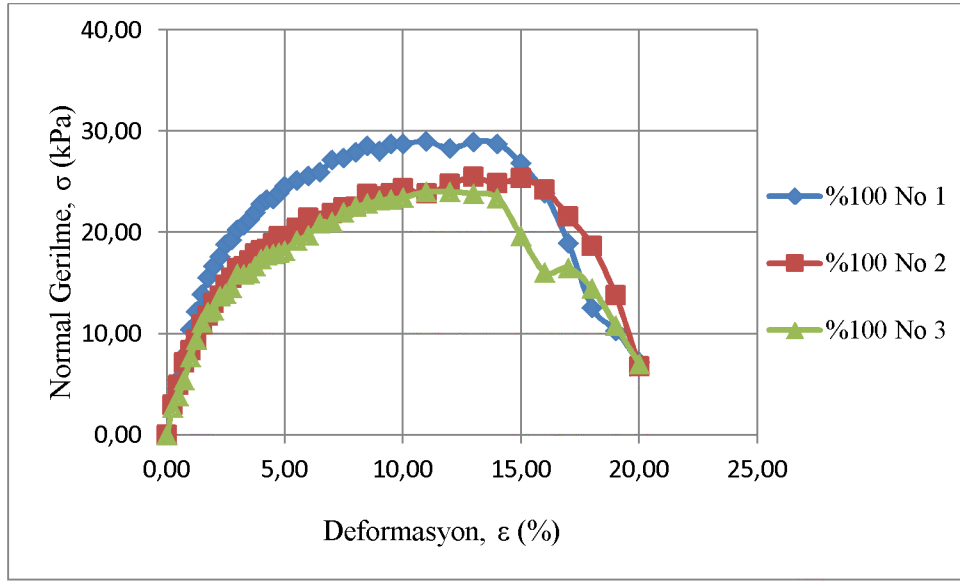


Şekil B.5: %80 sıklıkta kuma ait kayma gerilmesi - yatay yerdeğiştirme eğrisi.

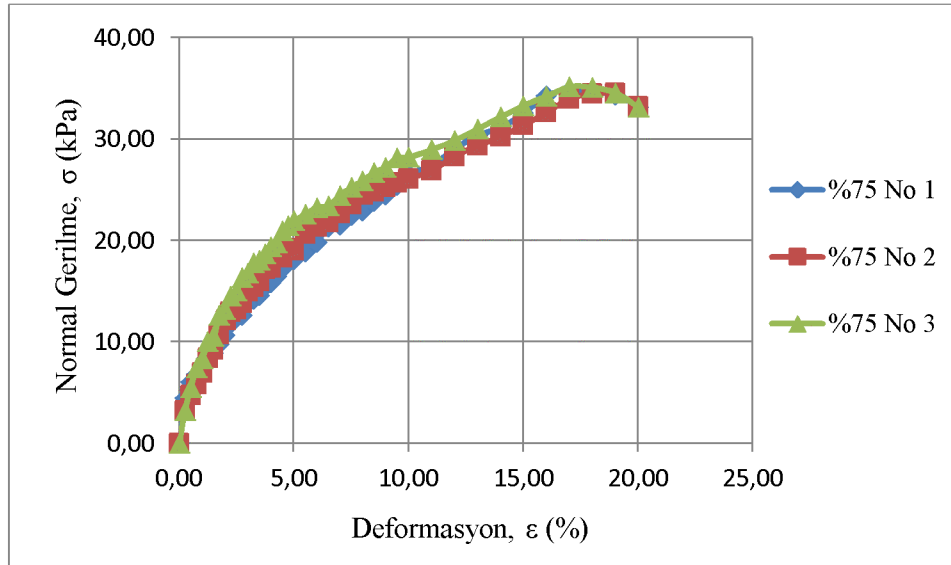


Şekil B.6: %80 sıklıkta kuma ait kayma mukavemeti açısı.

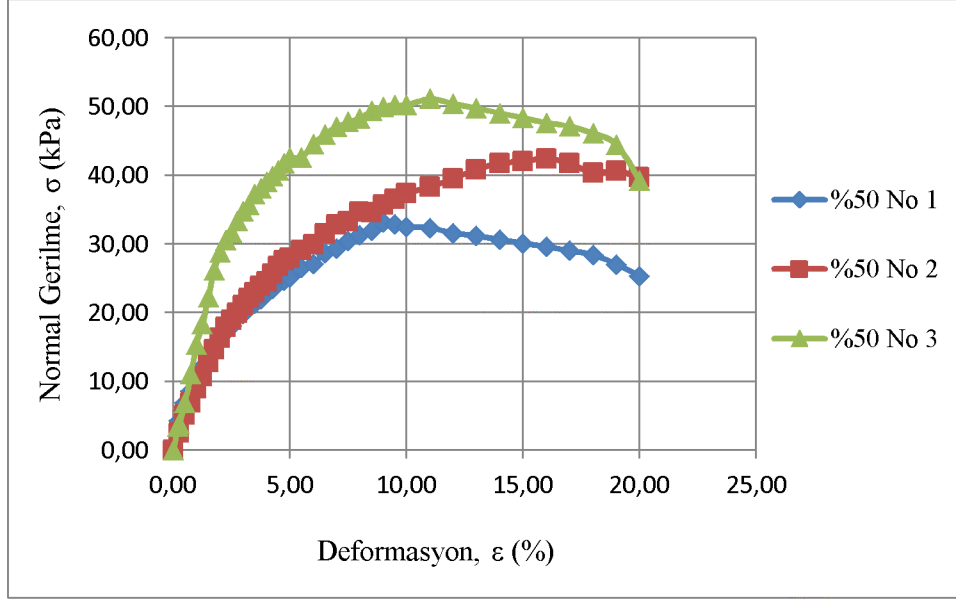
EK C



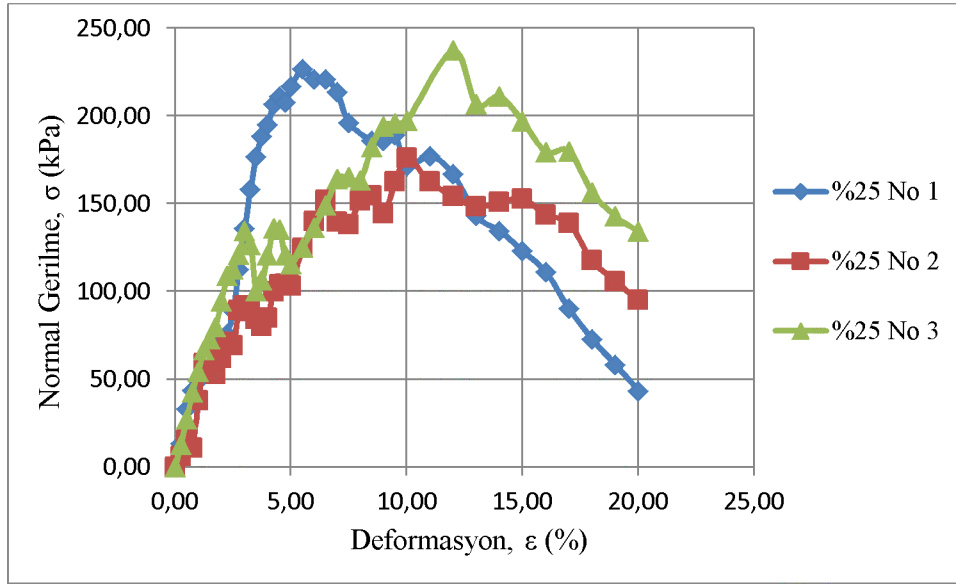
Şekil C.1: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %100 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.



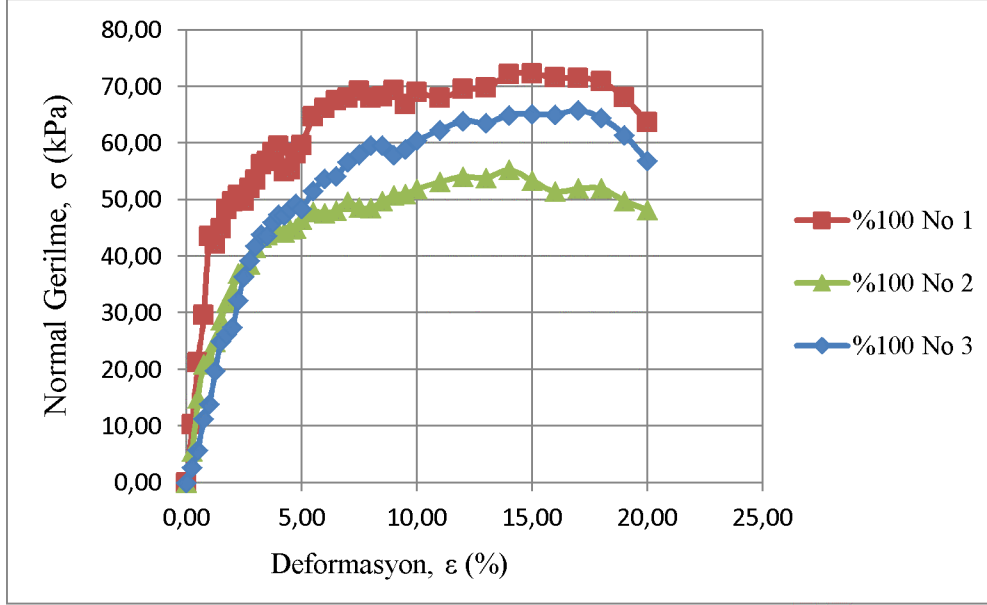
Şekil C.2: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %75 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.



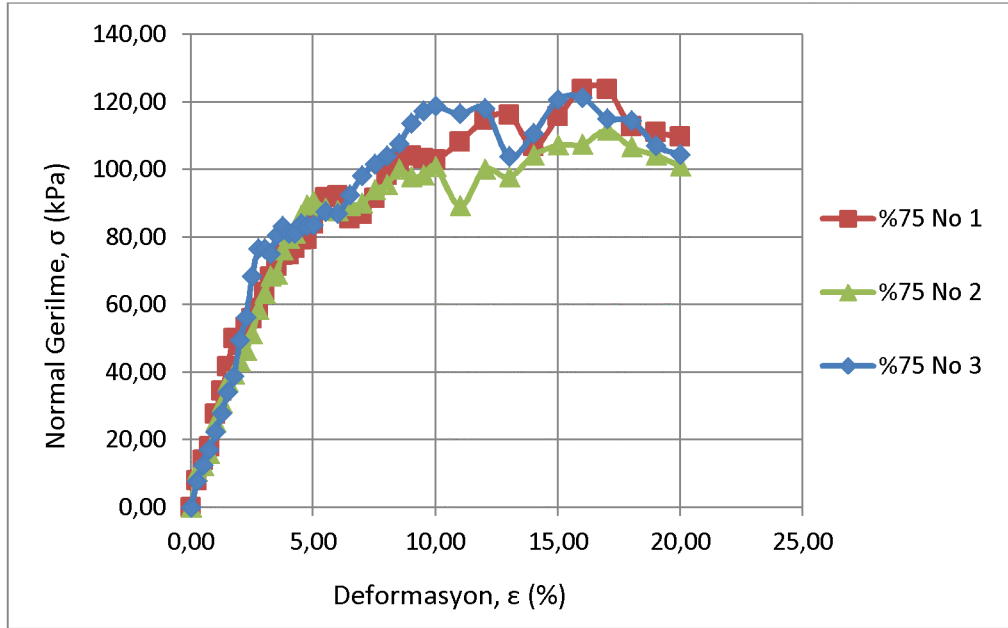
Şekil C.3: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %50 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.



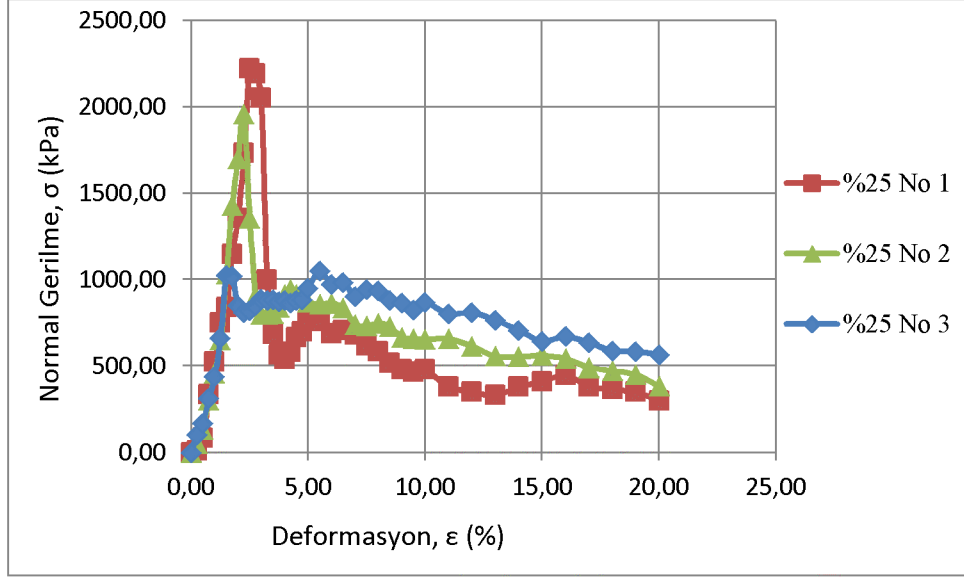
Şekil C.4: 28 günlük 6/1 çimento/malzeme ve malzemede %25 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.



Şekil C.5: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve malzemede %100 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.



Şekil C.6: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve malzemede %75 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.



Şekil C.7: 28 günlük 12/1 çimento/malzeme ve malzemede %25 EPS ağırlıkça oranına göre normal gerilme - deformasyon değişimi.

EK D

Çizelge D.1: 7 günlük sabit seviyeli permeabilite deney verileri.

Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi (7 günlük numune)	
Numunenin Çapı: 15,20 cm	
Numunenin Kesit Alanı: 181,46 cm ²	
Numune Yüksekliği: 12,80 cm	
Numune Hacmi: 2340,83 cm ³	
Kalıp Yüksekliği: 17,80 cm	
Numune Ağırlığı:	
Zaman (dak)	Q (m3)
2	885
4	860
6	820
8	780
10	760
12	710
14	660
16	635
18	610
20	585
22	565
24	550
24	540

Çizelge D.2: 28 günlük sabit seviyeli permeabilite deney verileri.

Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi (28 günlük numune)

Numunenin Çapı: 15,20 cm

Numunenin Kesit Alanı: 181,46 cm²

Numune Yüksekliği: 12,90 cm

Numune Hacmi: 2340,83 cm³

Kalıp Yüksekliği: 17,80 cm

Zaman (dak.)	Q (cm ³)
2	885
4	860
6	820
8	780
10	760
12	710
14	660
16	635
18	610
20	585
22	565
24	550
24	540

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ruslan AHMEDOV
Doğum Yeri ve Tarihi: AZERBAYCAN – 1986
Adres: ZAQATALA – AZERBAYCAN
E-Posta: ahmedovr@itu.edu.tr
Lisans: İTÜ – İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

1986 yılında Zaqatala/Azerbaycan’da doğmuştur. İlkokul ve lise öğrenimini Suvagil köyü M. Nezirova ve Şeki Lisesinde tamamlamıştır. 2003 senesinde İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Bölümüne girmiştir. 2010 yılında Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği Anabilimdalında Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği programına girmiştir. Türkçe, İngilizce, Rusça ve Azerice dillerini bilmektedir.