

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN
ALTERNATİF MALZEMELER İLE
YÜZEYSEL ZEMİN STABİLİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Adnan Yetkin ÇETİN**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

**Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik
Mühendisliği**

Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Aykut ŞENOL

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN
ALTERNATİF MALZEMELER İLE
YÜZEYSEL ZEMİN STABİLİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Adnan Yetkin ÇETİN
(501091332)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Aykut ŞENOL (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY (İTÜ)

Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (YTÜ)

HAZİRAN 2011

Sevgili Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle, çalışmalarım sırasında gösterdiği her türlü destek, ilgi ve yardımlarından dolayı saygı değer danışman hocam Y. Doç. Aykut ŞENOL' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, laboratuvar çalışmalarım öncesi ve sırasında yardımlarından ötürü sınıf arkadaşlarım Ehsan ETMİNAN ve Sevde BALTAŞI' na, gerekli kaynak ve malzemeleri temin eden değerli hocam Y. Doç. Hasan YILDIRIM' a, Pınar GÜNER şahsında FORTA DIŞ TİCARET İNŞAAT TAAHÜT LTD. ŞTİ' ye ve İTÜ İnşaat Fakültesi, Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı değerli çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan ve tüm eğitim hayatımda maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen çok sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

Haziran 2011

Adnan Yetkin ÇETİN
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
SEMBOLLER.....	ix
TABLO LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. YÜZEYSEL ZEMİN STABİLİZASYONU	5
2.1 Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri.....	6
2.1.1 Dinamik Kompaksiyon	6
2.1.2 Ön Yükleme (Sürşarj) Yöntemi.....	8
2.1.3 Zemin Yer Değiştirmesi (Kontrollü Dolgular).....	10
2.1.4 Geosentetikler ile Güçlendirme	12
2.1.5 Alternatif Yeni Yöntemler	15
3. YÜZEYSEL ZEMİN STABİLİZASYONUNDA ALTERNATİF	
YÖNTEMLER.....	17
3.1 Kireç ile Zemin Stabilizasyonu	17
3.2 Çimento ile Zemin Stabilizasyonu	23
3.3 Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu	29
3.4 Metal Cüruf ile Zemin Stabilizasyonu.....	36
3.5 Kullanılmış Lastikler ile Zemin Stabilizasyonu.....	39
3.6 Yapay Polimerler ile Zemin Stabilizasyonu	43
3.7 Pirinç Kabuğu Külü ile Zemin Stabilizasyonu.....	47
4. ALTERNATİF MALZEMELER İLE ZEMİN STABİLİZASYONUNUN	
LABORATUVARDENEYLERİİLEARAŞTIRILMASI	49
4.1 Malzemeler.....	49
4.1.1 Zemin	49
4.1.2 Uçucu Kül	51

4.1.3 Polipropilen	53
4.1.4 Kopolimer	54
4.2 Deney Düzenegi.....	55
4.2.1 Harvard Minyatür Kompaksiyon Deney Düzenegi.....	57
4.1.2 Serbest Basınç Deneyi	61
4.3 Deney Verilerinin Değerlendirilmesi	62
4.3.1 Yalın Zemin Numunesi	63
4.3.2 Uçucu Kül Karışımları.....	65
4.3.3 Polipropilen Karışımları	67
4.4.4 Kopolimer Karışımları.....	70
4.4.5 Uçucu Kül – Polipropilen Karışımları.....	73
4.4.6 Uçucu Kül – Kopolimer Karışımları	76
4.4.7 Polipropilen – Kopolimer Karışımları.....	80
5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR.....	91
EKLER	95
ÖZGEÇMİŞ.....	119

SEMBOLLER

A	: Yüzey alanı
D_i	: Etkin derinlik
e	: Boşluk oranı
h	: Düşme yüksekliği
H_{dr}	: En uzun drenaj yolu uzunluğu
I_c	: Kıvamindisi
I_L	: Likitlik indisi
I_p	: Plastisite indisi
k	: Permeabilite
LOI	: Organik Miktarı
n	: Porozite
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
R. C.	: Rölatif kompaksiyon
w	: Su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_n	: Doğal su muhtevası
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
w_p	: Plastik limit
w_R	: Rötire limiti
W	: Tokmak ağırlığı
W_h	: Düşürülen ağırlık
γ_k	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
γ_{k(arazi)}	: Araziden elde edilen kuru birim hacim ağırlık
γ_{kmak}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
σ_n	: Normal gerilme
τ_{mak}	: Kayma gerilmesi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Geosentetik Özelliklerinin Belirlenmesi için Kullanılan Testler	14
Tablo 3.1 Zemin Tiplerine Göre Optimum Çimento Oranları	27
Tablo 3.2 Zemin Tiplerine Göre Serbest Basınç Mukavemeti Değerleri.....	28
Tablo 3.3 TSE ve ASTM' ye Göre Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri	33
Tablo 3.4 ASTM-C 618' e Göre C ve F Sınıfı Uçucu Kül Ağırlıkça Bileşen Yüzdeleri	34
Tablo 4.1 Elek Analizi.....	49
Tablo 4.2 Hidrometre Deneyi Analizi	50
Tablo 4.3 Zemin Sınıflandırması	51
Tablo 4.4 Zeminin Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndisi	51
Tablo 4.5 Uçucu Küle Ait Kimyasal Bileşenler ve Ağırlıkça Yüzdeleri	52
Tablo 4.6 Uçucu Küle Ait Fiziksel Özellikler	52
Tablo 4.7 Polipropilen Fiberlere Ait Fiziksel Özellikler	53
Tablo 4.8 Kopolimer Fiberlere Ait Fiziksel Özellikler	54
Tablo 4.9 Harvard Kompaksiyon Deneyine Ait Parametreler.....	61
Tablo 4.10 Deney Numuneleri ve Katkı Maddelerinin Ağırlıkça Yüzdeleri	63
Tablo 4.11 Yalın Numune ile Yapılmış Deneyler ve Deney Sonuçları	64
Tablo 4.12 Yalın Numune ve Uçucu Kül ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları	65
Tablo 4.13 Yalın Numune ve Polipropilen ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları	68
Tablo 4.14 Yalın Numune ve Kopolimer ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları	70
Tablo 4.15 CH, Uçucu Kül ve Polipropilen ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları	73
Tablo 4.16 CH, Uçucu Kül ve Kopolimer ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları	77

Tablo 4.17 CH, Polipropilen ve Kopolimer ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney

Sonuçları	81
-----------------	----

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Dinamik Kompaksiyon Uygulaması ve Oluşan Kraterler.....	7
Şekil 2.2 Düşey Dren Uygulanmış ve Düşey Dren Uygulanmamış Ön Yükleme Yöntemi.....	10
Şekil 2.3 Örnek Kompaksiyon Grafiği	11
Şekil 2.4 Geosentetik Çeşitleri.....	13
Şekil 3.1 Farklı Dane Boyutuna Sahip Kireçler	20
Şekil 3.2 Zemin Parametrelerinin Kireç Oranı ile Değişimi.....	21
Şekil 3.3 Kireç Oranının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi	21
Şekil 3.4 Kireç ile Zemin Stabilizasyonu Uygulaması.....	23
Şekil 3.5 Çimento ile Zemin Stabilizasyonu Uygulaması	27
Şekil 3.6 Yeni Dolgu ve Çimento Stabilizasyonu Karşılaştırması.....	29
Şekil 3.7 Uçucu Külün Normal ve 2000 Kat Büyütülmüş Görüntüsü	34
Şekil 3.8 Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu Çalışması	36
Şekil 3.9 Metal Cürufu.....	37
Şekil 3.10 Metal Cürufu Uygulanan Temel Kesiti	39
Şekil 3.11 Kullanılmış Lastik Çeşitleri.....	41
Şekil 3.12 Yapay Polimer Grupları	44
Şekil 3.13 Kopolimerlerin Kimyasal Yapısı	45
Şekil 3.14 Polipropilenin Molekül Yapısı	46
Şekil 3.15 Pirinç Kabuğu ve Pirinç Kabuğu Külü.....	47
Şekil 4.1 Kil Numuneye ait Granülometri Dağılımı.....	50
Şekil 4.2 Uçucu Küle ait Granülometri Dağılımı.....	53
Şekil 4.3 Normal Durumda ve Deforme Edilmiş Polipropilen Fiberler	54
Şekil 4.4 Normal Durumda ve Deforme Edilmiş Kopolimer Fiberler	55
Şekil 4.5 Kür Zamanının Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi	56
Şekil 4.6 7 Günlük Kür Süresince, Numuneler için Kullanılan Örnek Desikatör	56
Şekil 4.7 Fiber Uzunluklarının Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi	57

Şekil 4.8 Modifiye Edilmiş Minyatür Harvard Kompaksiyon Aleti.....	58
Şekil 4.9 Standart Proktor Deneyi ve Harvard Kompaksiyon Deneyi karşılaştırılması I. Kalibrasyon	59
Şekil 4.10 Standart Proktor Deneyi ve Harvard Kompaksiyon Deneyi karşılaştırılması I. Kalibrasyon	60
Şekil 4.11 Serbest Basınç Deneyi Aleti.....	62
Şekil 4.12 Yalın Numuneye Ait Referans Alınan Deney Seti.....	64
Şekil 4.13 Yalın numune $w = \% 27$, $q_u = 170.5 \text{ kN/m}^2$	65
Şekil 4.14 CH ve Uçucu Kül Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı	66
Şekil 4.15 Uçucu Kül Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi	67
Şekil 4.16 Polipropilen Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi	68
Şekil 4.17 CH ve Polipropilen Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı	69
Şekil 4.18 Farklı Oranlarda CH ve Polipropilen Karışımlarına Ait Resimler	70
Şekil 4.19 Kopolimer Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi	71
Şekil 4.20 CH ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı	72
Şekil 4.21 Farklı Oranlarda CH ve Kopolimer Karışımlarına Ait Resimler	72
Şekil 4.22 CH, Uçucu kül ve Polipropilen Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı	74
Şekil 4.23 CH, Uçucu Kül ve Polipropilen Karışımlarına Ait Mukavemet Değişimleri.....	75
Şekil 4.24 Farklı Oranlarda CH, Uçucu Kül ve Polipropilen Karışımlarına Ait Resimler	76
Şekil 4.25 CH, Uçucu Kül ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı	78
Şekil 4.26 CH, Uçucu Kül ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet Değişimleri.....	79
Şekil 4.27 Farklı Oranlarda CH, Uçucu Kül ve Kopolimer Karışımlarına Ait Resimler	80

Şekil 4.28 CH, Polipropilen ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı	82
Şekil 4.29 CH, Polipropilen ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet Değişimleri	83
Şekil 4.30 Farklı Oranlarda CH, Polipropilen ve Kopolimer Karışımlarına Ait Resimler	84

YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN ALTERNATİF MALZEMELER İLE YÜZEYSEL ZEMİN STABİLİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, İstanbul Eyüp Akpınar bölgesinden alınan yumuşak bir kilin, yüzeysel zemin iyileştirmesi kapsamında, C tipi uçucu kül, eskitilmiş kopolimer ve ağ yapılı polipropilen fiberlerin katkısıyla taşıma gücünün arttırılmasına yönelik bir deneysel çalışma yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları 2010-2011 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi, Ord. Prof Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Araziden elde edilen zemin üzerinde gerçekleştirilen Granülometri analizi ve Atterberg deneyleri sonucunda zemin sınıflandırılması yapılmış ve yüksek plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Modifiye edilmiş, minyatür Harvard #2 kompaksiyon aleti ile farklı su muhtevalarında hazırlanan numunelerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. 7 günlük kür süresinden sonra numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış ve mukavemetleri belirlenmiştir. Katkısız zemine ek olarak, kuru zemin ağırlığının % 5, % 10 ve % 15' i oranlarında uçucu kül içeren kül-kil karışımları, % 0.25, % 0.50, % 0.75 ve % 1.00' ı oranlarında polipropilen-kil karışımları ve % 0.50, % 0.75, % 1.00, % 1.25 ve % 1.50' si oranlarında kopolimer-kil karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler ve yapılan deneyler sonucunda, ayrıca yüksek plastisiteli kil ile bu 3 farklı katkı maddesinin farklı oranlardaki birleşimleri hazırlanmıştır. Bu birleşimler, kil-uçucu kül-kopolimer, kil-uçucu kül-polipropilen ve kil-kopolimer-polipropilen karışımları olarak hazırlanmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, hazırlanan farklı birleşimlerin, yüksek plastisiteli kilin mukavemetini farklı yüzdelerde arttırdığı saptanmıştır.

SHALLOW SOIL STABILIZATION OF HIGH PLASTICITY CLAY BY USE ALTERNATIVE MATERIALS

SUMMARY

In this thesis, an experimental research that, within the scope of the soil stabilization, a high plasticity soft clay from Akpınar vicinity, Istanbul contributed with the C-type fly ash, the decrepit copolymer fibers and the web based structure polypropylene fibers to increase the bearing capacity, is represented. The Laboratory tests had been performed in the Istanbul Technical University of Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Soil Mechanics Laboratory. The soil obtained from the field has been classified as a high plasticity clay by completing the granulometric analysis and the Atterberg limits. The optimum water contents and the maximum dry unit weights of the modified samples prepared with the different water contents in miniature Harvard #2 compaction device were determined. The samples, after 7 days curing time, had been executed to the unconfined compression test. In addition to the plain soil, rates of 5%, 10%, 15% of fly ash-clay mixture containing fly ash by weight of dry soil, rates of 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00% of the polypropylene-clay mixture by the weight of the dry soil and the rates of 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.25%, 1.50% of the copolymer-clay mixture by the weight of the dry soil had been prepared. As a result of these prepared samples and conducted experiments, these 3 materials with different rates in various combinations had been prepared with high - plasticity clay. These combinations were prepared as clay – fly ash - copolymer, clay – fly ash – polypropylene and clay – copolymer – polypropylene mixtures. Finally from the experimental research, it had been determined that the prepared combinations increased the strenght of high plasticity clay with different percentages.

1. GİRİŞ

Yumuşak zeminler üzerine yapılması planlanan yol inşaatlarında, taşıma gücünün yetersiz kalması durumu ülkemizde olduğu gibi Dünya'nın birçok ülkesinde çok karşılaşılan bir problemdir. Bu sorunun ortadan kalkması için uygulanan genel çözüm, yumuşak zemin tabakasının yeterli derinliğe kadar kazılarak kaldırılması ve bunun yerine kırma taş, çakıl ve kum karışımının belirlenen değişik granülometrilere sıkıştırılarak serilmesidir. Mukavemeti düşük, yumuşak, ince daneli zeminin; mukavemeti yüksek, sıkı, iri daneli zeminle yer değiştirmesi işlemi, işveren ve yüklenici için zaman ve maliyet açısından büyük sorunlarda oluşturabilmektedir. Özellikle yol yapıları gibi yüzey alanının ve kazı hacminin büyük olduğu yapılarda, kontrollü dolgu uygulamalarının getirisi olan büyük maliyetler, geoteknik mühendisliğini alternatif yöntemler geliştirmeye yöneltmiştir. Arazide bulunan, zayıf mühendislik özelliklerine sahip mevcut zemin ile alternatif malzemelerin belirli oranlarda zemin ile karıştırılması son yıllarda sıkça uygulanan, maliyet ve yapım sürecinde büyük tasarruf sağlayan avantajlı bir yöntemdir. Zemin iyileştirme yöntemi olarak bugüne kadar birçok farklı alternatif malzeme üzerinde çalışılmış ve uygulamalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları doğal yollarla elde edilirken, bazıları sanayi ürünü veya sanayi artığı malzemelerdir.

Ülkemizde, elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan iki önemli üretim kaynağı bulunmaktadır. Bunlar hidroelektrik enerjisi sağlayan barajlar ve genellikle yakıt olarak pulverize kömürün kullanıldığı termik santrallerdir. Ayrıca pulverize kömür yakıt olarak demir – çelik gibi ısıl işlemin kullanıldığı çeşitli sanayi sektörlerinde de kullanılmaktadır. Pulverize kömürün yakılarak kullanıldığı tüm sanayi sektörlerinde, ortaya çıkan çok ince küle “uçucu kül” adı verilir. Ortaya çıkan bu uçucu küller, gerek taşıma ve gerekse depolama sırasında önemli sorunlar oluştururlar. Uçucu küller kuru olarak atık depolarına atılmakta ya da suyla karıştırılmak suretiyle kül barajlarına pompalanmaktadır. Dünyada ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 500 milyon ton civarındadır. Ortaya çıkan bu 500 milyon tonun % 75' ten fazlası değerlendirilememektedir. Almanya, Belçika, Hollanda gibi çevreye duyarlı

lkelerde uçucu kül değerlendirilmesi % 95 civarındayken, ABD, İngiltere, Çin gibi sanayi yoğun ülkelerde bu oran % 30 - % 50 arasında değişmektedir (şenol, 2003). Ülkemizde kömür ile çalışan 16 adet termik santralin oluşturduğu toplam uçucu kül miktarı yılda ortalama 15 - 16 milyon ton civarındayken, 2050 yılında bu miktarın yılda 50 milyon tona çıkması tahmin edilmektedir. Türkiye’ de uçucu külün endüstrideki net kullanımı konusunda yeterli bilgi bulunmasa da çeşitli yayınlarda, üretilen toplam uçucu külün %5’ i kadarı imento ve beton üretiminde katkı olarak kullanıldığı vurgulanmıştır. Termik santrallerden açığa çıkan atıkların, önemli evre sorunları yarattığı bilinmektedir. Bu atıkların inşaat sektöründe, özellikle beton ve imento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır. Ancak ortaya çıkacak uçucu kül hacmi çok büyük olduğundan, geoteknik mühendisliği gibi yeni kullanım alanlarının uygulamaya geçirilmesi son derece önemlidir.

Polimerler hayatımız için yaşamsal önemi olan büyük moleküllerdir. Ancak doğal polimerlerin haricinde, hepimizin gündelik hayatta en çok duyduğu ya da bildiği polimerler plastikler ve kauçuklardır. Yapay polimerler birçok sektörde olduğu gibi inşaat mühendisliğinde de yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Altyapı ürünlerinden, ev dekorasyon ürünlerine kadar yapı malzemesinin her alanında plastik malzemeleri ya da plastik bazlı kompozit malzemeleri görülebilir.

Yzeyssel zemin stabilizasyonu kapsamında, polipropilen, polyester ve kopolimer gibi polimerler, son yıllarda alternatif malzeme arayışında olan geoteknik mühendisliğinin ilgi alanına girmiştir. Yüksek ekme mukavemetine sahip bu malzemelerin zemin içinde kullanıldıklarında, gerilmeleri üstlenip dağıtma eğilimi oluşmaktadır. Ayrıca yapay polimerlerin ucuz maliyetleri ve kolay elde edilmeleri nedeniyle, yzeyssel zemin stabilizasyonunda kullanılmalarının büyük faydaları olacaktır. Atıkların ve yapay polimerlerin, yan ürün ve dolgu malzemesi olarak inşaat sektöründe kullanılması, dolgu kalınlığının azalmasına, mukavemetinin artmasına ve doğanın korunmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca, bu atıkların değerlendirilmesi ile depolama ya da geri dönüştürmeden kaynaklanan evre kirliliği ve ek maliyetler azalacaktır. Bu sebeplerle artık belirli atık maddelerin yol ve üstyapı inşaatlarında kullanılması gittikçe ciddileşen bir seçenek olarak görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında, atık madde olan uçucu kül ile yapay polimer sınıfına giren polipropilen fiber ve kopolimer fiberlerin mühendislik özellikleri ve çevresel değerlendirmesi yapılmış, yüzeysel zemin stabilizasyonunda alternatif malzemeler olarak kullanılmasına yönelik deneyler ile çalışma tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, yalın numune ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, zeminin sıkışabilirlik ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Ardından 3 alternatif malzemenin değişik oranlarda zemin ile karışımlarının, zeminin sıkışabilirlik ve mukavemet özelliklerine etkileri gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmanın son kısmında ise bu 3 farklı malzemenin, ikili kombinasyonları ile zemin karıştırılmış ve bu kombinasyonların zeminin sıkışabilirliği ve mukavemet özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2. YÜZEYSEL ZEMİN STABİLİZASYONU

Günümüzde üst yapıdan gelen yüklerin fazlalaşması, deprem ve toprak kayması gibi doğal afetler göz önüne alındığında zeminlerin mühendislik özellikleri inşaat mühendisliği yapılarına temel oluşturması adına yetersiz kalmaktadır. Özellikle yumuşak zeminler olarak nitelendirilen siltli ve killi zeminler, başta mukavemet olmak üzere elverişsiz mühendislik özelliklerine sahiptirler. Söz konusu elverişsiz mühendislik özelliklerini, inşa edilmesi düşünülen yapı göz önünde bulundurularak güçlendirmeye zemin iyileştirme denilmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması işlemidir. Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki amaçlar için yapılır;

- Zayıf zeminlerin mukavemetlerini artırmak,
- Toplam oturmaı azaltıp konsolidasyonu hızlandırmak,
- Permeabiliteyi düşürerek geçirimsizliği sağlamak,
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlamak,
- İstinat duvarlarını desteklemek,
- Zeminin potansiyel sıvılaşma riskini azaltmak,
- Deprem ve heyelan gibi doğal afetlere karşı önlem almak.

Uygulanacak zemin iyileştirme yöntemi, zaman, maliyet ve uygulanabilirlik faktörleri göz önüne alındığında;

- Mevcut problemin türüne,
- İyileştirilmesi gereken zemin tabakasının derinliğine,
- Zemin profili özelliklerine (Granülometri, kıvam, aşırı konsolidasyon oranı, YASS, vb.)

göre değişkenlik gösterir.

Uygulama açısından zemin iyileştirme yöntemleri başlıca üç ana grupta toplanabilir;

- i. Sadece inşaat aşamasında uygulanan geçici iyileştirme yöntemleri,
- ii. Zemine herhangi bir malzeme karıştırmadan uygulanan kalıcı iyileştirme yöntemleri,
- iii. Zemine çeşitli malzemeler karıştırarak uygulanan kalıcı iyileştirme yöntemleri.

Genel olarak zemin iyileştirme yöntemlerinde en önemli faktörlerden birisi, uygulama derinliğidir. Zemin iyileştirme yöntemleri, uygulama derinliğine bağlı olarak;

- Derin zemin stabilizasyonu
- Yüzeysel zemin stabilizasyonu

şeklinde sınıflandırılırlar.

2.1 Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri

Günümüzde gelişen teknolojinin ve yöntemlerin yardımıyla zemin iyileştirme yöntemleri zemin yüzeyinden onlarca metre derinlere kadar etkili olabilmektedir. Derin zemin stabilizasyonun gerekli olmadığı durumlarda uygulanan yöntemlere yüzeysel zemin stabilizasyonu denir. Yüzeysel zemin stabilizasyonları genelde üstyapı yüklerinin çok fazla olmadığı yapılarda veya demiryolu ve karayolu gibi yol inşaatlarında kullanılırlar.

Problemli zeminlerin varlığı ve derin zemin stabilizasyonu yöntemlerinin getirdiği yüksek maliyetler sebebiyle pek çok yüzeysel zemin stabilizasyonu yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerden bazıları zeminlere çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek, bazıları ise herhangi bir madde katmaksızın uygulanan yöntemlerdir. Bazı yüzeysel zemin stabilizasyonu yöntemleri şunlardır.

2.1.1 Dinamik Kompaksiyon

Mobil bir vinç yardımıyla, belirli bir yükseklikten belirli bir ağırlığın zemin üzerine düşürülerek zeminin boşluk oranının azaltılması işlemine dinamik kompaksiyon denir (Yumuşak zeminlere uygulandığı takdirde dinamik konsolidasyon olarak da adlandırılır.).

Yaygın olarak kullanılan bu yöntemde; düşürülen ağırlığa, düşme yüksekliğine ve zemin tipine göre büyük derinliklere kadar etki edebilmektedir. Günümüzde mobil vinçler 150 ton' a kadar ağırlıkları kaldıracabilecek özellikte olsalar da, dinamik kompaksiyon uygulamalarında genel olarak kullanılan ağırlık 10 ila 20 ton arasında değişmektedir. Ayrıca mobil vinçlerin düşürme yüksekliği 40 m' ye kadar çıkarılabilirken bu yükseklik genelde 10 m - 20 m arasında değişiklik gösterebilir (Bowles, 2001).

Bu yöntemde, düşürülen ağırlık ve düşme yüksekliği belirlendikten sonra düşürme aralığı ve tekrar adedi belirlenmelidir. Belirtilen tüm öğeler belirlendikten sonra kompaksiyon işlemi tüm araziye uygulanır. Düşürülen ağırlıklar sebebiyle oluşan kraterler tatbikin tekrar işleminden önce, dozerler ve iş makineleri yardımıyla düzeltilir ve/veya granüler zemin ile doldurulurlar. Tekrarlı geçişler tamamlandıktan sonra zeminin hedeflenen sıkılığa yada kıvama ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilmelidir. Bu kontrol, yöntem uygulanmadan ve uygulandıktan sonra gerçekleştirilecek olan çeşitli arazi deneyleri ile (SPT, CPT, v.b.) yapılabilir. Şekil 2.1' de dinamik kompaksiyon uygulaması ve dinamik kompaksiyon sonucu zeminde oluşan kraterler gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Dinamik Kompaksiyon Uygulaması ve Oluşan Kraterler (Şengezer, 2010)

Dinamik kompaksiyon kil, silt veya kum, çakıl gibi birçok doygunluğa ulaşmış zeminde uygulanabilir, fakat zemindeki ince dane oranı arttıkça, dinamik kompaksiyonun etkisi azalma eğilimi gösterir. Özellikle doymuş killer, oluşacak anlık boşluk suyu basıncı etkisiyle neredeyse hiçbir iyileştirme etkisi göstermezler. Kısmen doymuş killerde ise yeraltı su seviyesi üzerindeki bölgelerde dinamik kompaksiyonla zemin stabilizasyonu mümkündür (Bowles, 2001).

Dinamik kompaksiyonla ilgili çalışmalar göstermektedir ki, çakıl ve kum gibi granüler zeminlerde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Kil ve silt gibi kohezyonlu zeminlerde ise dinamik kompaksiyonun etkili olabilmesi için, anlık boşluk suyu basıncı ve suyun tahliyesi için çatlakların oluşması gereklidir (Das, 2007).

Kohezyonsuz zeminlerde, Leonard ve diğerlerinin (1980) önerdiği etkin derinlik (D_i) yaklaşık olarak;

$$D_i = \frac{1}{2} \sqrt{W_h \times h} \quad (2.1)$$

formülü ile hesaplanır. Burada;

D_i : Etkin Derinlik (m)

W_h : Düşürülen Ağırlık (ton)

h : Düşme Yüksekliği (m)

Kohezyonlu zeminlerde ise Menard ve Broise (1975) etkin derinlik (D_i) için (2.2) bağıntısını önermişlerdir.

$$D_i = \sqrt{W_h \times h} \quad (2.2)$$

D_i : Etkin Derinlik (m)

W_h : Düşürülen Ağırlık (ton)

h : Düşme Yüksekliği (m)

Genellikle dinamik kompaksiyon / konsolidasyon;

- Uygulanacak alanın 5000 ila 10000 m²'yi geçmediği,
- Zemin derinliği kazılamayacak kadar büyük olduğu,
- 2-12 Hz arasındaki titreşimlerin zarar vermeyeceği,

durumlarda ekonomik bir iyileştirme yöntemidir (Bowles, 2001).

2.1.2 Ön Yükleme (Sürşarj) Yöntemi

Özellikle suya doymuş yumuşak zeminlerde, üstyapıdan kaynaklanacak büyük oturma miktarlarını ortadan kaldırmak ve zeminin taşıma gücünü arttırmak için, tasarlanan üst yapı yüküne eşdeğer bir dolgu yüküyle yumuşak zeminin yüklenerek konsolide edilme işlemine ön yükleme (Sürşarj) yöntemi denir. Suyu doymuş kil ve

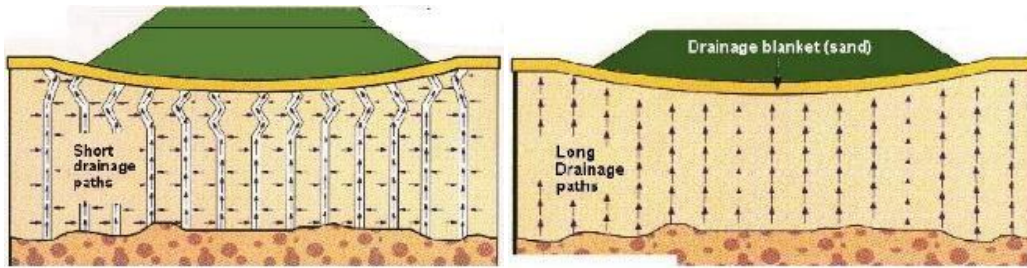
silt gibi yumuşak zeminlerin, ilave bir yüke maruz kaldıklarında üzerlerinde oluşan ilave basınç ilk olarak zemin içerisinde bulunan su tarafından üstlenilir. Bunun sonucunda zemin içinde artık boşluk suyu basıncı oluşur. Bu boşluk suyu basıncının sönümlenmesi zeminin permeabilitesine bağlı olup düşük permeabiliteli (geçirgenlikli) zeminlerde uzun sürer. İlave yük sebebiyle oluşan bu artık boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ile zeminin sahip olduğu yüksek su muhtevası, drene olur ve oturma hızlandırılır. Suyun drene olmasıyla zeminin boşluk oranı azalır. Dolayısıyla daha yoğun ve güçlü bir zemin elde edilerek, ileride meydana gelebilecek olası oturmaların önüne geçilir.

Uygulanan ilave yük, istenen oturma miktarı sağlandıktan sonra kaldırılır. Taşıma gücü artan ve yapabileceği potansiyel oturma miktarı azalan zemin üzerine uygulanması planlanan üst yapının imalatına geçilebilir. Önyüklemeye ile hızlandırılmış konsolidasyon tekniği, üst yapının oturduğu zeminin killi, yumuşak ve aşırı sıkışabilir olması halinde çok başarılı sonuçlar vermektedir. Diğer yöntemlere göre daha ekonomik olmakla beraber, oturmaların tamamlanması için gerekli süre daha uzun olabilmektedir (Erol, 2008).

Ön yüklemeye yöntemi uygulanırken, en dikkat edilmesi gereken husus sürşarj yüküdür. Sürşarj yükünün arttırılması, maliyeti de arttırırken bununla birlikte oturma süresinin kısılmasına neden olacaktır. Oturma süresinin kısılması da projenin imalatını hızlandıracak ve proje maliyetini azaltacaktır. Dolayısıyla sürşarj yükünün miktarına karar verilirken oturma süresi, yapım maliyeti birlikte ele alınmalı ve 3 değişken için optimum yük miktarı belirlenmelidir.

Ayrıca ön yüklemeye yöntemi uygulanırken sürşarj yükünü ve oturma süresini kısaltmak amacıyla düşey drenler kullanılmaktadır. Düşey drenler genellikle 0.30 m – 0.50 m çapında kum kolonlardan oluşturulurlar. Belirli aralıklarla ve belirlenen uzunluklarda oluşturulan düşey drenlerin içine zeminin barındırdığı su tahliye olur. Pompalar yardımıyla suyun dışarı atılmasıyla konsolidasyon süreci hızlandırılmış olur. Düşey drenler suyun drenaj mesafesini kısaltarak konsolidasyon süresini kısaltırlar. Bu durumda eşit yük altında düşey dren uygulanması halinde, ön yüklemeye yöntemiyle zeminler daha kısa sürelerde sıkıştırılabilirler. Bir diğer açıdan bakılırsa da, düşey dren uygulamaları konsolidasyon süresini değiştirmeden dolgu yükünün azalmasını ve maliyet açısından tasarruf sağlar. Şekil 2.2’ de Düşey dren

uygulanmış ve uygulanmamış iki Ön yükleme yönteminin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Düşey Dren Uygulanmış ve Düşey Dren Uygulanmamış Ön Yükleme Yöntemi (www.imtek.com.tr)

2.1.3 Zemin Yer Değiştirmesi (Kontrollü Dolgular)

Mevcut zemin şartları; karayolu, baraj, köprü ya da yüksek katlı yapılar için her zaman uygun şartlara sahip olmayabilir. Örneğin granüler zeminlerde gevşek, kohezyonlu zeminlerde ise yumuşak durumda bulunan zeminlerin sıkıştırılarak birim hacim ağırlığı ve kayma mukavemeti bununla birlikte ise taşıma gücü arttırılmalıdır. Bazı durumlarda ise mevcut zeminin sıkıştırılması yeterli olmayacak, bunun yerine yetersiz zemin kazılarak yerine daha iyi mühendislik özelliklerine sahip bir zemin yerleştirilmesi gerekecektir. Bu gibi durumlarda, sıkıştırılarak oluşturan belirli kalınlıktaki zeminler kontrollü dolgu olarak adlandırılırlar. Kontrollü dolgular zayıf zemin kaldırılarak uygulanabileceği gibi, ayrıca zemin kotunu yükseltmek veya tesviye amacıyla da kullanılabilirler. Uygulama anında en çok dikkat edilmesi gereken husus, dolgunun en iyi şekilde sıkıştırılmasının gerekmesidir.

Zeminlerin mekanik enerji ile sıkıştırılması işlemine kompaksiyon denir. Başka bir ifadeyle kompaksiyon, zemin danelerinin birbirlerine yaklaştırılması ve aralarındaki hava boşluklarının azaltılması sonucu daha sıkı bir yerleşime sahip olmalarını sağlayan mekanik işlemlere verilen işlem olarak tanımlanabilir (Özaydın, 2005). Bu mekanik enerji ve danelerin yüzeylerini kayganlaştıran su yardımı ile danelerin yeniden yerleşmesini ve böylece daha sıkı bir yapı oluşturmasını sağlar.

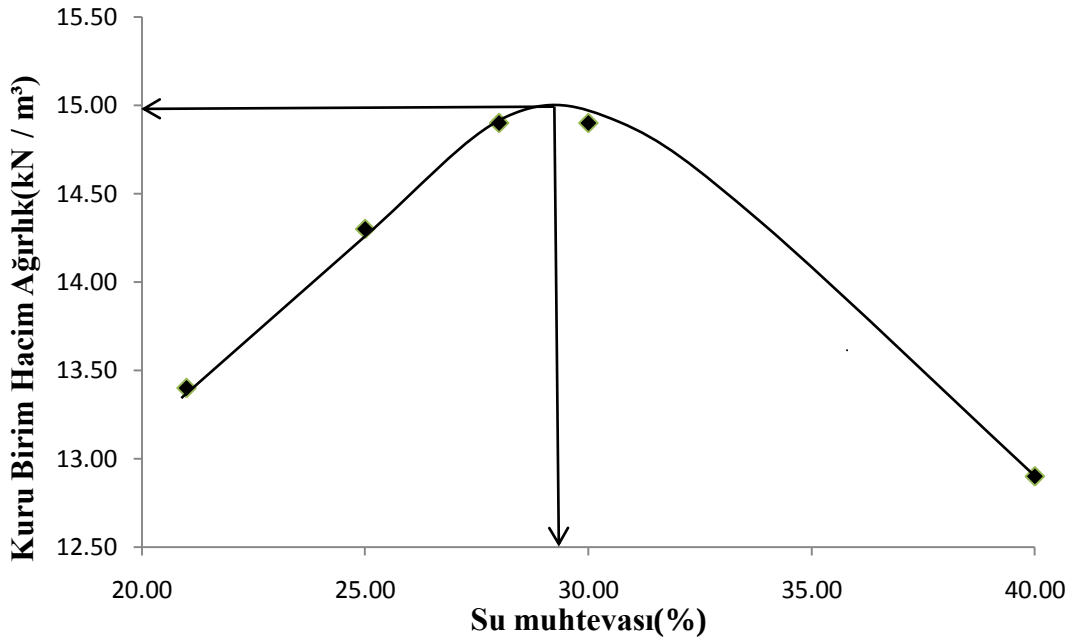
Bir zeminin kompaksiyon durumunu en iyi açıklayan parametre zeminin kuru birim hacim ağırlığıdır (γ_k). Zeminlerin kuru birim hacim ağırlıkları (2.3) bağıntısı ile belirlenmektedir.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + \omega_n} \quad (2.3)$$

γ_n : Doğal birim hacim ağırlık

ω_n : Doğal su muhtevası (%)

Belirli bir kompaksiyon enerjisi için, kuru birim hacim ağırlık ile su muhtevası arasındaki bağıntı en iyi, genellikle Proktor deneyi olarak bilinen Standart Kompaksiyon Deneyi ile incelenebilir. Bu deneyde bir zemin numunesi belli bir şekilde sıkıştırılarak birim hacim ağırlığı ile su muhtevası belirlenir. Bu işlem farklı su muhtevalarında hazırlanmış bir seri zemin numunesi için tekrarlanır. Deney sonuçları, kuru birim hacim ağırlığı / su muhtevası eksen takımında çizilerek Şekil 2.3’ te gösterilen tipik eğriler elde edilir.



Şekil 2.3 Örnek Kompaksiyon Grafiği

Kompaksiyon grafiğinde açıkça görülmektedir ki, su muhtevası belirli bir değere kadar arttıkça, zeminlerin sıkışabilirliği de artmaktadır. Eklenen su zemin daneleri yüzeyinde yağlayıcı etkiye sebep olup danelerin birbiri arasında daha iyi yerleşmesini sağlamaktadır fakat belirli bir su muhtevasından sonra azaltılması istenen boşluklar su ile dolduğu için boşluklar yerine daneler yerleşemez ve sıkışma

oranı azalır. Bu durum göstermektedir ki zeminlerin en iyi sıkışabildiği, kuru birim hacim ağırlığın en yüksek olduğu su muhtevası değeri optimum su muhtevası (ω_{opt}) olarak adlandırılır.

Optimum su muhtevası (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_k) belirlenmesi için kullanılan standart laboratuvar deneyleri;

- Standart Proktor Deneyi (ASTM D-698) ve
- Modifiye Proktor Deneyi (ASTM D-1557) 'dir.

Bu parametrelerin belirlenmesinde kullanılan iki deney arasındaki tek fark enerji miktarlarıdır. Modifiye Proktor deneyinin enerji miktarı daha yüksek olduğu için havaalanları veya üst yapı yüklerinin fazla olduğu dolguların parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır.

Laboratuvardan elde edilen bu veriler dolgunun imal edilme sürecinden sonra dolgunun kontrolü içinde kullanılmaktadır. Kum konisi, plastik balon yada nükleer yöntem ile elde edilecek arazi kuru birim hacim ağırlığının, laboratuvarda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığına oranı, rölatif kompaksiyon olarak adlandırılır ve kompaksiyonun başarı oranını verir.

$$R.C. = \frac{\gamma_{k(arazi)}}{\gamma_{k(mak)}} \times 100 \quad (2.4)$$

R.C. : Rölatif Kompaksiyon

$\gamma_{k(arazi)}$: Araziden elde edilen kuru birim hacim ağırlık

$\gamma_{k(mak)}$: Maksimum kuru birim hacim ağırlık

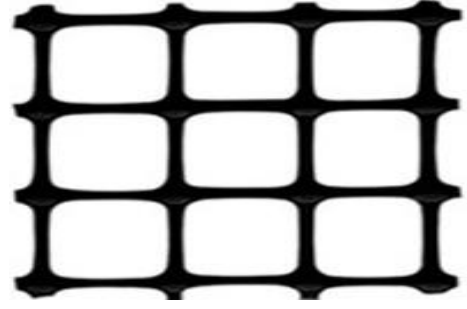
Kontrollü dolgu uygulamalarında, Standart Proktor veya Modifiye Proktor deneyine göre belirlenen rölatif kompaksiyon (R.C.) değerinin genellikle % 90 - % 95' ten küçük olmaması istenir. Ayrıca bu uygulamalarda, optimum su muhtevasına dayanılarak belirlenmiş su muhtevası sınırları da verilmelidir.

2.1.4 Geosentetikler ile Güçlendirme

Geosentetikler, sıkıştırılmış petrol polimer esaslı, ince, esnek levhalardan oluşan, değişik permeabilitelere sahip bir çeşit tekstil malzemeleridir. Geotekstil, geogrid, geonet, geocell ve geomembran (Şekil 2.4) gibi birçok farklı çeşidi vardır. Geosentetikler arasındaki tek fark, sahip oldukları açıklık mesafeleridir. İçlerinde en



a) Geotekstil



b) Geogrid



c) Geonet



d) Geomembran



e) Geocell



f) Geokompozit

Şekil 2.4 Geosentetik Çeşitleri (Shukla, 2002)

büyük açıklık mesafesine sahip olan geosentetik çeşidi geogridlerdir. Geosentetikler birçok zemin mühendisliğinin birçok alanında kullanıldığı gibi en yaygın olarak; ayırma, güçlendirme, drenaj ve filtreleme amacıyla yol inşaatlarında kullanılırlar. Geosentetiklerin yararlı ve etkin kullanılması doğrudan seçilen geosentetiğe, geosentetiğin tipine ve doğru uygulanıp uygulanmamasına bağlıdır. Kullanışlılık ve verim tamamıyla seçilen geosentetiğe ve geosentetiğin kullanılacağı uygulama tipine göre değişmektedir. Geosentetiklerin çeşitli özelliklerinin belirlenebilmesi için kullanılan testler Tablo 2.1' de belirtilmiştir (Skok,v.d.,2003).

Tablo 2.1 Geosentetik Özelliklerinin Belirlenmesi için Kullanılan Testler
(Skok,v.d.,2003)

Özellik	Test Yöntemi
Görünür Elek Açıklığı	ASTM D4751
Su Bırakabilirlik	ASTM D4491
Gerilme Dayanımı	ASTM D4595
Geosentetiğin Dayanıklılığı	ASTM D5819
%5 Gerilmede Sekant Modülü	ASTM D4595
Dikiş Yeri Ayrılma Dayanımı	ASTM D4884
Delinmeye Karşı Dayanıklılık	ASTM D4833
Yırtılma Dayanımı	ASTM D4533
UV Işınları Dayanımı	ASTM D4355
Patlama Dayanımı	ASTM D5617
Permeabilite Oranı	ASTM D5567
Biyolojik Tıkanma	ASTM D1987
Sıcaklık Dayanımı	ASTM D4594
Tıkanma Potansiyeli	ASTM D5101
Sürtünme Katsayısı	ASTM D5321
Kimyasal Dayanıklılık	ASTM D5322
Kurulum Hasarı	ASTM D5818
Sünme Dayanımı	ASTM D5262
Çok Eksenli Gerilme Altında Davranış	ASTM D5617
Geogrid Kimyasal Dayanımı	ASTM D6213
Geotekstil Kimyasal Dayanımı	ASTM D6389

Geosentetiklerin yararları konusunda çeşitli görüşler bulunmaktadır. Bunların başında; maliyetin düşürülmesi, uzun ömür ve yüksek performans gelmektedir. Geosentetiklerden yarar sağlayabilmek için uygulama aşamasında da, tasarım aşamasında da konuya titizlikle yaklaşılmaları gerekmektedir (Erol,2008).

Geosentetiklerin, özellikle zemin güçlendirmesi açısından birçok uygulama alanı vardır. Yalın zemine doğrudan etkiyen yükler, zeminlerin kayma mukavemeti düşük ise göçmeye neden olacaktır fakat geosentetikle güçlendirme uygulamalarında, zeminden daha yüksek mukavemete sahip geosentetikler, üzerlerinde oluşan gerilmeleri tüm zemine dağıtmalarından ötürü, zeminin daha yüksek bir taşıma gücü kapasitesine ulaşmasını sağlayacaklardır.

Yüksek sürtünme ve adezyon kuvvetleri altında mevcut zeminin çekme ve kaymamukavemetlerinin yetersiz olduğu durumlarda geosentetikler zeminde güçlendirmeelemanı olarak kullanılmaktadırlar. Belirli uzunluğun altındaki

geosentetikler istenilen mukavemeti sağlayamamaktadırlar. Geosentetiklerin kompozit olarak kullanılmaları birçok mühendislik özelliğini arttıracak için tek başına kullanılmaları tercih edilmektedir (Erol, 2008).

Geogridler, dolgu tabakasının altına veya içerisine yerleştirildiklerinde, üzerlerinde oluşan gerilmeleri dolgunun bütününe dağıtma özelliğine sahiptirler. Bu özellik dolgu ve geogrid arasındaki sürtünmeden kaynaklanır. Bahsi geçen sürtünme kuvveti geotekstil ve toprak arasında daha yüksek miktarlarda oluşmaktadır. Geotekstillerin dolgu üzerinde güçlendirici etkisine sebep olacak çekme gerilmelerini üstlenmek hemen oluşan bir durum değildir. Bu güçlendirici etkinin oluşması; zeminin özelliklerine, geosentetik tipine ve yüklemeye bağlıdır (Skok,v.d.,2003).

Geosentetikler, maliyeti düşürmesi, uzun ömrü ve sağladığı yüksek performans ile son yıllarda özellikle yüzeysel zemin stabilizasyonunda çokça tercih edilen bir yöntem olmuştur. Şekil 2.4' de geotekstil, geogrid, geonet, geomembran, geocell ve geokompozit gibi yaygın olarak kullanılan geosentetik çeşitleri gösterilmiştir.

2.1.5 Alternatif Yeni Yöntemler

Mühendislik özelliklerinin yetersiz kaldığı ve özellikle taşıma gücünün az olduğu yumuşak zeminlerde genellikle uygulanan zemin stabilizasyonu yöntemi, zayıf ve problemli zeminin kaldırılarak yerine kırma taş ya da granüler malzemeden oluşan kontrollü dolgu tabakasının yerleştirilmesidir. Yol yapıları gibi yüzey alanının ve kazı hacminin büyük olduğu yapılarda, kontrollü dolgu uygulamalarının getirisi olan büyük maliyetler, geoteknik mühendisliğini alternatif yeni yöntemler geliştirmeye yöneltmiştir.

Zemin stabilizasyonu ve iyileştirme yöntemi olarak bugüne kadar birçok farklı alternatif malzeme kullanılmıştır. Bunlardan bazıları doğal yollarla elde edilirken, bazıları sanayi ürünü veya sanayi artığı yapay malzemelerdir. Bugüne kadar yüzeysel zemin stabilizasyonu amacıyla kullanılmış belli başlı alternatif malzemeler aşağıda sıralanmaktadır.

- Kireç
- Çimento
- Uçucu Kül
- Metal Cüruf

- Kullanılmış Lastikler
- Yapay Polimerler
- Pirinç Kabuğu Külü

3. YÜZEYSEL ZEMİN STABİLİZASYONUNDA ALTERNATİF YÖNTEMLER

Günümüzde hızla artan yapılaşma sebebiyle, inşaat mühendisliği yapılarının oluşturulacağı zemini seçme şansı çok azalmıştır. Özellikle ulaşım yapıları çok farklı zemin profilleri üzerinden geçtiği için sıklıkla zayıf zeminlerin yüzeysel stabilizasyonu gereklilik gösterir. Mevcut klasik yüzeysel zemin stabilizasyonu yöntemlerinin yüksek maliyetlere sebep olması ve sağladıkları avantajları daha yüksek seviyeye çekmek amacı ile alternatif malzemelerin yüzeysel zemin stabilizasyonu üzerindeki etkileri araştırılmaya başlanmıştır.

Özellikle son 30 senedir popüler olan alternatif malzemelere her yeni araştırmada bir başkası eklenmiştir. Bu malzemeler, kireç, çimento ve yapay polimer gibi yapı malzemeleri ya da, sanayi atığı olarak ortaya çıkan uçucu kül, metal cürufu, kullanılmış araba lastiği veya pirinç kabuğu külü olabilir. Uzun yıllardır atık malzemelerin alternatif inşaat malzemesi olarak yer altı ya da üst yapılarda kullanılmasına yönelik birçok çalışma ve araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda ki temel iki amaç, yüksek inşaat maliyetlerini düşürmek ve farklı sanayi kirliliklerini faydalı bir şekilde ortadan kaldırmaktır. Özellikle sanayi atıklarının ortadan kaldırılması sorunu tüm dünyada yaşanan ortak büyük bir problemdir. Geoteknik mühendisliği işte bu atık maddelerden bazılarını mevcut zemin ile karıştırarak yüzeysel zemin stabilizasyonu için kullanımını sağlamıştır.

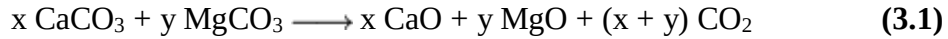
3.1 Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Bölüm 2.1.5' te belirtildiği gibi alternatif katkı maddeleri, özellikle ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Kireç de bu katkı maddeleri içinde en çok tercih edilenler arasında gelir.

Kireç, kireç taşının çeşitli derecelerde pişirilmesi sonucu elde edilen, suyla karıştırıldığında, tipine göre havada veya suda katılaşma özelliği gösteren, beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı madde türüdür. Kireç taşının pişirilme işlemine

kalsinasyon denir. Kalsinasyon reaksiyonu ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) sonucunda meydana gelen Cao söndürülmemiş kalsiyum (kalker) kirecidir.

CaO, parçalar haline getirilmiş tabi kireç taşının özel fırınlarda 900 - 1000 °C sıcaklıkta kızdırılması suretiyle elde edilen ve su ile muamele edilmesi sonucu ısı açığa çıkararak söndürülmüş kalker kireci (kalsiyum hidroksit), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ haline gelebilen bağlayıcı bir malzemedir. Özgül ağırlığı 3,0-3,4 gr/cm³ olan CaO beyaz, amorf bir katıdır. 2580 °C' ye doğru erir, elektrik fırınında uçucu duruma gelir. Isıyla bozulmaz. 100 gram kalkerden teorik olarak 56 gram kireç (CaO) elde edilir. Fakat pratikte verim %54' ü geçmez. Kalkerden başka, CaCO_3 ve MgCO_3 'u aynı zamanda bulunduran dolomit taşlarının da yüksek derecede pişirilmesi ile kireç elde edilir. Bu haldeki kireç CaO ve MgO'den oluşmaktadır. Bu durumda pişirilme işlemi aşağıdaki şekilde olmaktadır;

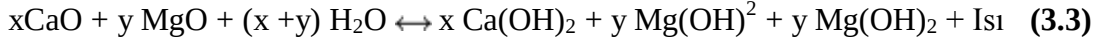
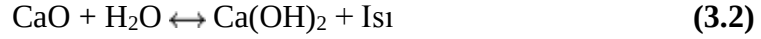


Bu reaksiyon sonunda meydana gelen $x\text{CaO} + y \text{MgO}$ söndürülmemiş dolomit kirecidir. CaO + MgO, parçalar haline getirilmiş dolomit kireç taşının özel fırınlarda 900-1000 °C sıcaklıkta kızdırılması suretiyle elde edilen ve su ile muamele edilmesi sonucu ısı açığa çıkararak söndürülmüş dolomit kireci (kalsiyum hidroksit+magnezyum hidroksit, $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$) haline gelebilen bağlayıcı bir malzemedir (Transportation Research Board (TRB), 1987).

Söndürülmemiş kalker kirecinin öğütülerek belirli inceliğe getirilmesi ile söndürülmemiş toz kalsiyum (kalker) kireci, söndürülmemiş dolomit kirecinin öğütülerek belirli inceliğe getirilmesi ile söndürülmemiş toz dolomit kireci elde edilir. Kireçtaşı pişirilirken sıcaklık 1000 °C' yi geçmezse elde edilen kirece *çalı kireci* adı verilir. Su ile işlem görünce kolay ve iyi söner, çünkü bu tip kireçler gevşek ve gözeneklidir. Eğer kireçtaşı uzun zaman 1400 °C civarında pişirilirse *kömür kireci* elde edilir. Bu nedenle, halk arasında, çalı kireci kömür kirecine nazaran tercih edilir. Kömür kireçleri geç söndüğü ve dağılmadığı için ulaşım yolu uzun olan işyerleri için elverişlidir.

Kireçler CaO halinde kullanılmazlar. Bunların su ile işlem görerek söndürülmeleri gerekir. Kirecin söndürülmesi bir hidratasyon olayıdır. Sönmemiş kirecin üzerine az miktarda su dökülünce bir süre sonra kireç parçasının kabardığı ve yavaş yavaş

çatlayarak dağıldığı, aynı zamanda sıcaklık artışı ve buharlaşma görülür. Söndürme işlemi aşağıda belirtilen iki farklı reaksiyonda da olabilir.



Bu reaksiyonun gerçekleşebilmesi için kirecin ağırlığının 1/3' ü kadar suya ihtiyaç vardır. Reaksiyon sonunda elde edilen Ca(OH)_2 sönmüş kireçtir. Kirecin söndürülmesi sırasında şu hususlara dikkat edilmelidir;

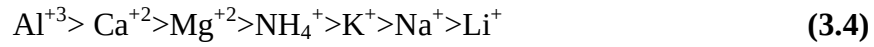
- Kirecin söndürülmesi sırasında %100 oranında bir hacim artışı meydana gelir. Zaten kirecin sönerken kabarıp çatlamasının nedenide budur. Bu nedenle söndürme işlemine önem verilmesi gerekir. Tamamen söndürülmeden yapıda kullanılan kireç, söndürülmesi sırasında yapacağı reaksiyonu kullandığı yerde yaparak,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

Söndürme işlemi teknelerde, kireç kuyularında veya fabrikalarda su püskürtülerek yapılır. İlkel bir yöntem olan kireç kuyularında kireç fazla su ile söndürüldüğünden ürün $\text{Ca(OH)}_2 + n\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir ve yağlı kireç olarak adlandırılır. Fabrikalarda ise sönmüş kireç sadece Ca(OH)_2 ' dir. İnce toz halinde olup, buna hidrate kireç de denir. Bu tozun özgül ağırlığı 2,20-2,45 g/cm³ arasındadır. Birim ağırlığı ise 0,60 - 0,75 g/cm³ arasındadır. Şekil 3.1' de farklı dane boyutlarına sahip kireç çeşitleri gösterilmektedir (TRB, 1987).



Şekil 3.1 Farklı Dane Boyutuna Sahip Kireçler (Little, 1995)

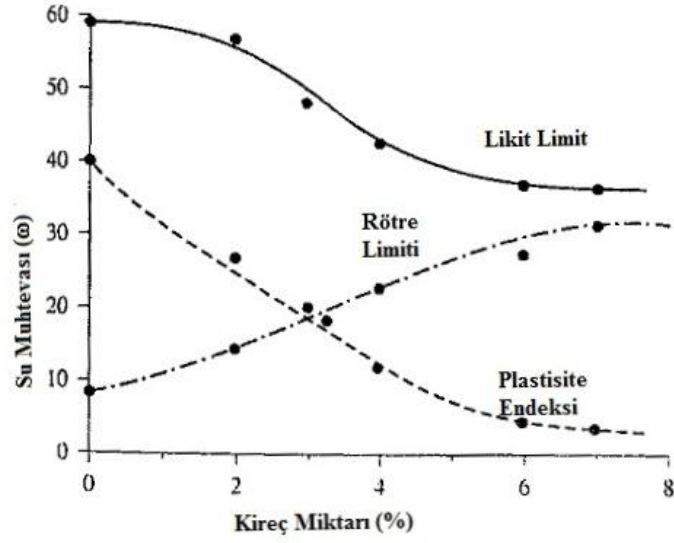
Genellikle ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan kireç türleri, yüksek kalsiyumlu kireçler $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, kalsitik sönmemiş kireçler $[\text{CaO}]$, monohidratdolomitik kireç taşları $[\text{Ca}(\text{OH})_2.\text{MgO}]$, ve dolomitik sönmemiş kireç taşlarıdır. Birçok zeminin stabilizasyonu için kullanılan kireç miktarı yaklaşık olarak zemin kuru ağırlığının % 5 - % 10 arasında değişir. Kireç, killi zemine eklendiği zaman; katyon değişimi ve flokülasyon gibi birçok kimyasal reaksiyon meydana gelir. Aynı zamanda bu reaksiyonların bütününe puzzolonik reaksiyonlar denmektedir. Genellikle kil ile etkileşime giren tek değerli iyonlar, iki değerli kalsiyum iyonları ile değiştirilir. Benzeşme değişimine bağlı olarak katyonlar aşağıdaki seri şeklinde düzenlenirler.



Yukarıdaki dizilimde herhangi bir katyon sağındaki ile iyon değişimi yapabilir. Puzzolonik reaksiyonlar kil minarelleri üzerinde yapısal değişikliklere sebep olur ve kil minarelleri bir araya gelme eğilim gösterir ve daha büyük daneler oluşturur. Bu reaksiyon sonucunda zeminin;

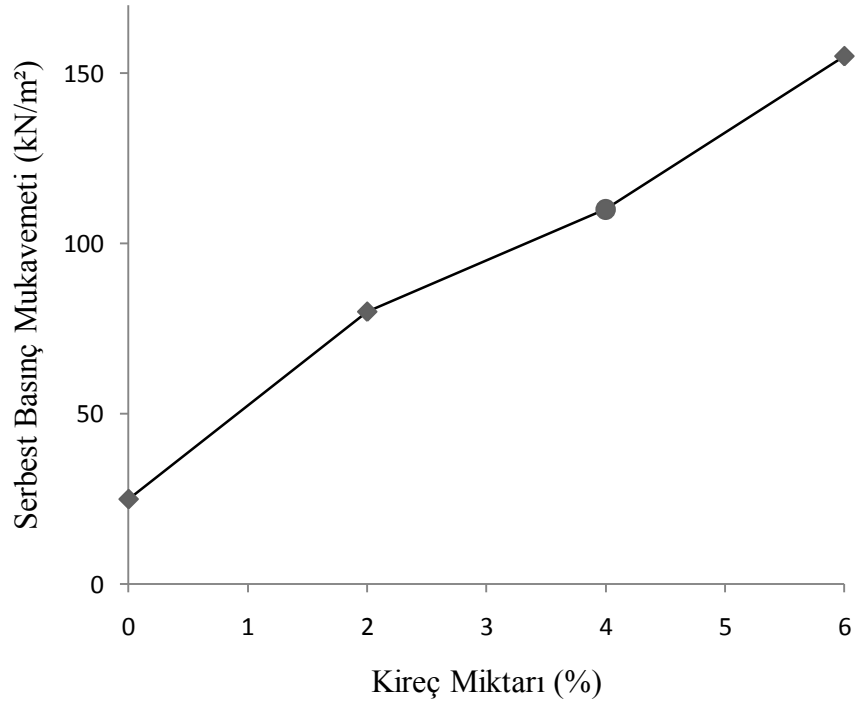
- Likit limit (w_L) düşer,
- Plastik limit (w_P) artar,
- Plastisite indisi (I_p) düşer,
- Rötrelimiti (w_R) artar,
- İşlenebilirlik,
- Mukavemet ve deformasyon özellikleri artar.

Mevcut zeminin içindeki kireç oranının artmasının likit limit, rötrelimiti ve plastisite indisi üzerindeki etkisi Şekil 3.2' de gösterilmektedir. Kireç oranı ilk % 2 - % 3' lük dilimde zeminin işlenebilirliğine ve özelliklerini önemli oranda etkilediği görülmektedir (Das, 2007).



Şekil 3.2 Zemin Parametrelerinin Kireç Oranı ile Değişimi(Das, 2007)

Ayrıca, Neubauer ve Thompson (1972), Vicksburg kili üzerinde yaptıkları kireç stabilizasyonu çalışmalarında kireç oranının, serbest basınç mukavemeti üzerinde etkisini, Şekil 3.3' de gösterildiği üzere incelemiştir.



Şekil 3.3 Kireç Oranının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi (Neubauer ve Thompson, 1972)

Kireç stabilizasyonu sahada 3 farklı şekilde yapılabilir;

- i. Belirlenen miktardaki kireç, sahada zemin ile karıştırılır ve su eklenerek sıkıştırılarak yerleştirilir.
- ii. Zemin, kireç ve su karışımı, istenen oranlarda plantta hazırlanır, arazide sıkıştırılarak yerleştirilir.
- iii. Kireç-su bulamacı basınç ile zemine enjekte edilir. Bu yöntem ile 4.00 m - 5.00 m zemine kadar karışım iletilebilir. Daha sonra çeşitli yöntemlerle zemin-kireç karışımı sıkıştırılır (Das, 2007).

Uygulama açısından, kireç ile stabilizasyon yöntemi oldukça kolaydır. Laboratuvar testleri yardımıyla uygun karışım dizaynı ve uygulama derinliği belirlenir. Genellikle, çeşitli iş makineleri yardımıyla kireç yüzeysel olarak serilir ve keçi ayaklı silindir yardımıyla uygun ve tasarlanan derinliğe kadar karıştırılır.

Dövme (pulverizasyon) ve karıştırma işlemi kil ve kireç bir biri içinde iyice karışana kadar yapılmalıdır. Ayrıca mukavemet ve dayanıklılığı maksimize edebilmek için uygun sıkıştırma ve yeterli kür zamanı uygulama önemlidir. Genellikle kireç stabilizasyonunda kireç yüzeye serildikten sonra ön karıştırma yapılır ve Laboratuvar testlerine göre dizayn edilen kür zamanı kadar bekletilir. Kür zamanı olarak adlandırılan bu süreç yaklaşık 24 - 48 (ya da daha fazla) saat arasında olmalıdır. Kür zamanı sona erdikten sonra kireç-kil karışımı ikinci kez karıştırılarak sıkıştırılır ve yerleştirilir. Kireç içerisinde bulunan sülfat oranı % 0,3' den fazla ise özel karıştırma ve yerleştirme işlemleri uygulanır. ABD' nin Arizona eyaletindeki Riverside' da 2006 yılında uygulanan bir kireç ile zemin stabilizasyonuna ait aşamalar Şekil 3.4' te gösterilmiştir.

Maliyet göz önünde bulundurulduğunda, kısa vadede kireç ile güçlendirilen yol dolgularında daha düşük maliyetler elde edilebilmektedir. 2005 yılında, yakın zamanda yapımına başlanması planlanan ABD' nin Pennsylvania eyaletindeki bir karayolu projesi için geleneksel yöntemlerin kullanılacağı kabulü ile yapılan ön maliyet hesabında yaklaşık maliyet \$29.3 milyon olarak hesaplanmıştır. Bunun dışında, kireç stabilizasyonu yönteminin kullanıldığı ve AASHTO' nun mekanik-ampirik tasarımları ile tutarlı yapılan alternatif ön maliyet hesabında ise maliyet % 25' ten fazla tasarruf ile \$21.6 milyon olarak hesaplanmıştır.



a) Kireç bulamacının araziye nakliyesi

b) Bulamacın dağıtıcıya pompalanması



*c) Bilgisayar kontrollü dağıtıcının kireci
zemin yüzeyine dağıtması*

*d) Keçi ayaklı silindir ile kirecin zemin
ile karıştırılması*

Şekil 3.4 Kireç ile Zemin Stabilizasyonu Uygulaması (Wang ve Reston, 2007)

Projede ortaya çıkan tasarrufun sebebi, mevcut zayıf zeminin kazılıp yerine granüler kontrollü dolgu tabakasının oluşturulması yerine, mevcut zeminin kireç ile stabilize edilerek temel altı malzemesi olarak kullanılmasıdır. Kireç stabilizasyonu ile gereksiz kazı ve dolgu maliyetlerini engellemiştir.

Uzun vadede ise, kireç ile stabilizasyon yöntemi, bakım maliyetlerini düşürmesi nedeniyle performans artışı sağlamaktadır. Örneğin, asfalt altında temel altı malzemesi olarak kullanılacak kireç ile güçlendirilmiş 20 cm kalınlığında bir kil tabakası, 30 yıllık bakım masrafını metrekare başına \$29.51' den, \$27.07' ye düşürmektedir. Alternatif bir stabilizasyon malzemesi olmasının yanında kireç, yol tabanlarının bakımı için mükemmel bir malzemedir. Genel olarak hükümetlerin yeni karayolu yapmak yerine mevcut olanı onarmayı tercih etmeleri, kirecin önemini arttırmaktadır.

3.2 Çimento ile Zemin Stabilizasyonu

Kimyasal karışımlar ile zemin stabilizasyonu, zeminlerin mukavemet ve deformasyon özelliklerini iyileştirmek için derin ve yüzeysel stabilizasyon için de

kullanılabilen yöntemlerdir. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda (özellikle yol inşaatlarında), çimento karışımları kullanımı, kireç kullanımı kadar yaygın bir metottur.

Çimentonun aktif olarak zemin ile karıştırılmasının iki önemli getirisi vardır.

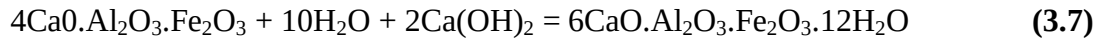
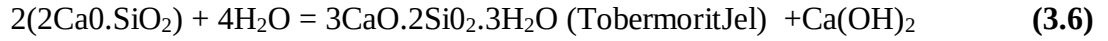
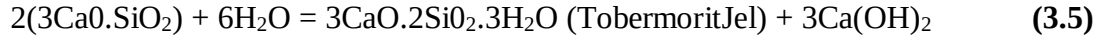
- i. Yumuşak temel altı malzemesinin taşıma gücünü arttırmak.
- ii. Temel altı malzemesinin tasarım kalınlığını azaltmak.

Çimento kullanarak yüzeysel zemin stabilizasyonu özellikle karayolu ve demiryolu gibi yol inşaatlarında ya da havaalanı pistleri gibi hareketli yüklerin büyük değerler alabildiği yollarda tercih edilmektedir. Yüzeysel zemin stabilizasyonu dışında çimentonun kullanıldığı belli başlı alanlar şunlardır.

- Şev stabilizesinin sağlamak.
- Derin stabilizasyon sağlamak.
- Derin kazı stabilizasyonu sağlamak.
- Kazıklarda oluşan negatif yüzey sürtünmesini düşürmek.
- Trafik yükleri, patlatma ve kazık çakma sırasında oluşan titreşimleri azaltmak.
- Dolgu altında oluşan konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak.

Yüzeysel zemin stabilizasyonu için genellikle Portland çimentosu kullanılır. Portland çimento daneleri heterojen yapıya sahiptirler. İçerdiği kimyasallar; trikalsiyum silika (C_3S), dikalsiyum silika (C_2S), trikalsiyumalümin (C_3A), ve tetrakalsiyumalüminoferrit (C_4A). Bu dört bileşen, Portland çimentosunun temel parametreleridir. Çimentonun su ile temasından sonra hızla hidrasyon reaksiyonu başlar ve temel hidrasyon ürünleri; hidrate kalsiyum silika (C_2SH_x , $C_3S_2H_x$), hidrate kalsiyum alümin (C_3AH_x , C_4AH_x) ve hidrate kireç ($Ca(OH)_2$) oluşur. Hidrasyon reaksiyonunda oluşan ilk iki ürün çimentolaşan ana parametreler olup, hidrate kireç, artık ürün olarak oluşur. Belirtilen çimento parçacıkları, komşu parçacıklara bağlanarak birleşmiş bir iskelet matriks form oluştururlar ve bu iskelet form zemin danelerini içine alarak tüm daneleri birbirine bağlar. Silika ve alümin fazları birbirine karışır fakat hiçbir zaman tamamen kristalize olmazlar. Bunlara ek olarak hidrasyon reaksiyonu ortamda bulunan suyun pH'ını yükseltir, bu da hidrate olmuş kristalize kireç parçalarının ayrışmasına sebep olur. Hidrasyon işlemi aynı zamanda zeminin kimyasal yapısında

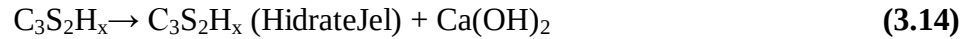
da bozunmaya sebep olur. Hidrasyonun ikinci aşamasında ise hidrojen silika ve alümin bağımsız kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girer ve sertleşme başlar. Zemin stabilizasyonunda bu sertleşmenin olduğu zaman dilimi, kür zamanı ve hidrasyonun ikinci aşaması da puzzolonik reaksiyon olarak adlandırılır. Portland çimentosuna suyun eklenmesiyle başlayan hidrasyon işleminin kimyasal formülasyonu aşağıdaki gibidir.



Bu reaksiyonlardan sonra, zemin-çimento karışımı sırasında ortaya çıkan reaksiyonlar ise aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir. Aşağıda belirtilen reaksiyonlar sadece Portland çimentosunun en önemli bileşeni trikalsiyum silika (C_3S) ile ilgili olan reaksiyonlardır.



Ortamdaki pH miktarı, 12.6' dan küçük olduğu takdirde aşağıdaki reaksiyon gerçekleşir.



Sonuç olarak ortaya çıkan bu kimyasal reaksiyonlar içinde, zeminin stabilizasyonu için en önemli aşama ikinci aşama olan puzzolonik reaksiyondur. Puzzolonik reaksiyon zemin tipine bağlı olarak aylarca devam edebilir. Puzzolonik reaksiyonun sonlanana kadar zemin karışımının mukavemeti artmaya devam edecektir (Bergado ve Anderson,1996).

Genellikle, 3 tip zemin-çimento karışımı bulunmaktadır.

- Plastik zemin-çimento karışımı
- Çimento katkılı zemin karışımı
- Sıkıştırılmış zemin-çimento karışımı

Plastik zemin-çimento karışımları, sıva harcına benzeyen ve belirli oranlarda su, zemin, ve çimento içeren, sıva harcı kıvamında karışımlardır. Bu tip karışımlar genellikle şevlerde ve ya erozyona maruz kalan zeminlerde kullanılmaktadır.

Çimento katkılı zemin karışımları, katılaşmamış ya da yarı-katılaşmış zemin-çimento karışımlarıdır. Diğer karışımlara oranla daha az miktardaki Portland çimentosu, zemine eklenir ve karıştırılarak zeminin fiziksel ve kimyasal özellikleri değişir. Eklenen çimento zeminin plastisitesini ve su tutma kapasitesini düşürür fakat bunun yanında mukavemet ve taşıma gücü kapasitesini arttırır. İyileştirme oranı zemin tipine ve eklenen çimento oranına göre değişir. Genellikle kullanım alanları, yol dolguları, temel altı dolguları ve iksa arkası dolgularıdır.

Sıkıştırılmış zemin-çimento karışımları ise genellikle öğütülmüş zemin ile belirlenmiş miktardaki Portland çimentosu ve suyun karışması ve sıkıştırılmasıyla oluşur. Sonuç olarak oluşan rijit, ortalama mukavemetteki yeni tabaka; ıslanma-kuruma ve donma-çözülme etkilerine karşı yüksek dayanıma sahiptir.

ABD' nin başkenti, Washinton D.C.' de bulunan Dulles Havaalanı için yapılan ve 2008 yılında tamamlanan ek pist çalışmasında çimento ile yüzeysel zemin stabilizasyonu uygulanmıştır. Çalışmaya ait fotoğraflar Şekil 3.5' de gösterilmektedir.

Özellikle kil tipi yumuşak zeminlerde çimento kullanımı; likit limitin düşmesine, plastisite indisinin ve zeminin işlenebilirliğinin artmasına sebep olur. Kil tipi zeminlerde çimento stabilizasyonunun etkin kullanımı için likit limit değerinin 45-50'den, plastisite indisinin ise 25'den küçük olması gerekmektedir. Zemin ile karıştırılması gereken zemin tipine göre optimum çimento oranları Tablo 3.1' de belirtilmiştir (Das, 2007).



a) Zemin ile çimentonu su yardımı ile b) İş makinaları ile CTB (Cement karıştırılması (Çimento oranı %6) Treated Base) oluşturulması

Şekil 3.5 Çimento ile Zemin Stabilizasyonu Uygulaması (<http://www.cement.org>)

Tablo 3.1 Zemin Tiplerine Göre Optimum Çimento Oranları (Das, 2007)

Zemin Sınıflandırması		Hacimsel Oran (%)
AASHTO	Birleşik Zemin Sınıflandırması	
A-2 ve A-3	GP, SP ve SW	6-10
A-4 ve A-5	CL, ML ve MH	8-12
A-6 ve A-7	CL ve CH	10-14

Kireç gibi, çimento ile stabilizasyon da zeminlerin mukavemetini arttırmaktadır. Mukavemetteki artış ise kür zamanı uygulayarak daha çok artmaktadır. Tablo 3.2, bazı zemin tiplerine ait serbest basınç mukavemetlerini ve bu zemin tiplerine, kuru ağırlığa oranla %10 çimento katılarak elde edilen zemin-çimento karışımlarının serbest basınç mukavemetlerini karşılaştırmaktadır.

İyi derecelendirilmiş granüler zeminler ve düşük plastisiteye sahip killer çimento ile stabilizasyon için en uygun zemin tipleridir. İçlerinde çok kalsiyum minerali barındıran kil çeşitleri, çimento ile stabilizasyon için en uygun kil tipleridir. Daha çok sodyum ya da hidrojen barındıran killer ise hem doğada daha yaygındır, hem de kireç ile stabilizasyona daha uygundur. Bu sebeple kullanılacak stabilizasyon için kullanılacak malzemenin seçimine önem verilmelidir.

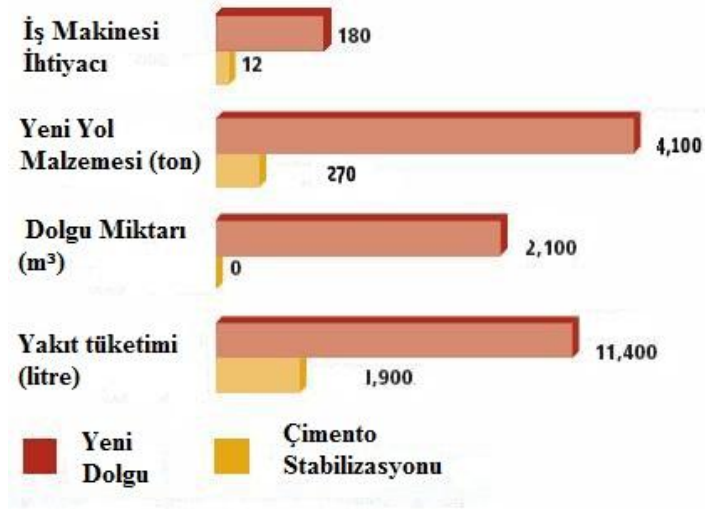
Saha uygulaması kireç stabilizasyonundaki ile aynı prosedüre sahiptir. Belirlenen orandaki çimento, zemin ile yerinde karıştırılır veya santralde karıştırılarak sahaya getirilir ve sıkıştırılır. Sıkıştırma sırasında, laboratuvar da belirlenen optimum su

miktarı da zemin-çimento karışımına eklenmelidir. Yine kireç uygulamasında olduğu gibi çimento-su karışımı (Su - Çimento oranı: 1/10) hazırlanarak, basınçlı sistemle zemine enjekte edilebilir. Bu enjeksiyon yöntemi, zeminin hidrolik iletkenliğini düşürürken, mukavemetini ve taşıma gücünü artırır (Das, 2007).

Tablo 3.2 Zemin Tiplerine Göre Serbest Basınç Mukavemeti Değerleri (Das, 2007)

No:	Zemin Tipi	Serbest Basınç Mukavemeti (kN/m ²)
	Yalın Zemin	
1	Kil, Turba	<350
2	İyi Sıkıştırılmış Kumlu Kil	70-280
3	İyi Sıkıştırılmış Çakıl, Kum, Kil Karışımı	280-700
	Zemin - Çimento (Ağırlıkça %10 Çimento)	
4	Kil, Organic Zemin	<350
5	Silt, Siltli Kil, Kötü Derecelendirilmiş Kum	350-1050
6	Siltli Kil, Kumlu Kil, Kötü Derecelendirilmiş Kum ve Çakıl	700-1730
7	Siltli Kum, Kumlu Kil, Kum, Çakıl	1730-3460
8	İyi Derecelendirilmiş Killi Kum, Çakıl Kum ve Kil Karışımları	3460-10350

Çimento ile yüzeysel stabilizasyon, aynı kireçte olduğu gibi proje maliyetlerinde büyük tasarruflar sağlar. Temel altı zeminin mukavemetini ve taşıma gücünü arttırdığı için, dolgu kalınlıkları azalır; mevcut zemin kullanıldığı için ek kazı ve dolgu maliyetleri ortadan kalkar. Ayrıca bakım masrafları da % 25 - % 50 arasında azalır. Uluslararası Protland Çimentosu Birliğinin (PCA) yapmış olduğu araştırmaya göre; 1.6 km (1 mil) uzunluğunda, 7.30 m (24 feet) genişliğinde ve 15 cm (6 inç) kalınlığındaki bir temel altı tabakasının kazılarak dolgu yapılması ve çimento ile yüzeysel stabilizasyonu karşılaştırılmıştır ve Şekil 3.6' da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Yeni Dolgu ve Çimento Stabilizasyonu Karşılaştırması (Harrison, 2000)

3.3 Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu

Puzzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya bağlayıcılık değeri çok az olan, fakat ince taneli durumdayken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özeliği kazanan silisli (SiO_2) ve alüminli (Al_2O_3) malzemelerdir.

Puzzolonik maddelerin kullanımı binlerce yıl önceye kadar gitmektedir. Bu özellikteki toprak ilk defa Napoli yakınlarındaki Puzzoli kasabasından elde edilmiştir. Vezüv yakınlarındaki bu toprak, camlaşmış volkan toprağı olup, günümüzde kullanılan “puzzolan” sözcüğü buradan gelmektedir.

Puzzolanlar, doğal puzzolanlar ve yapay puzzolanlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal puzzolanlar volkanik kökenli puzzolanlar ve ısıtılmış işlem görmüş killer olarak ikiye ayrılırken yapay puzzolanlar ise;

- Uçucu Kül,
- Silis Dumanı,
- Yüksek Fırın Cürufu,
- Pirinç Kabuğu Külü

olarak yapay yöntemlerle elde edilirler.

Uçucu küller, birçok farklı sektörde en çok kullanılan yapay puzzolandır. Bu malzeme, termik santrallerin içinde öğütülmüş kömürün yanması ile ortaya çıkan bir artık üründür. Santralde ortaya çıkan baca gazları içindeki hafif ve ince tozların, gazların atmosfere salınımından önce elektro filtreler ile tutulmasıyla elde edilir. Ayrıca kömürün yanması sırasında baca gazları ile karışmadan kazan tabanına çöken daha iri daneli küllere ise taban külü (bottom ash) denmektedir.

Uçucu küllerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısıyla çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan uçucu küllerin biriktirilmesi veya atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. Uçucu küllerin neden olduğu çevre problemleri arasında, tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgar erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksin madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Rüzgâr erozyonu ve tozlanma, uçucu küllerin havuzlarda çökertilmesi veya ısıtılarak taşınması sayesinde önlenebilmektedir. Yukarıda sayılan sorunların çözümlenmesi, uçucu küllerin çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması ile mümkün görünmektedir. Uçucu küllerin değerlendirildiği sektörlerin başında ağırlıklı olarak inşaat sektörü gelmektedir. Bundan başka uçucu kül, kimya, seramik, cam, cam-seramik, döküm-metal sanayi, tarım sektöründe zemin ıslahı, çevre, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi ve maden ocaklarında “filler” olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Şenol v.d., 2003a).

Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 500 milyon ton civarındadır. Ortaya çıkan bu 500 milyon tonun % 75’ ten fazlası değerlendirilememektedir. Almanya, Belçika, Hollanda gibi çevreye duyarlı ülkelerde bu oran % 5 civarına düşerken, ABD, İngiltere, Çin gibi sanayi yoğun ülkelerde bu oran % 50 - % 70 arasında değişmektedir.

Ülkemizde kömür ile çalışan 16 adet termik santralin oluşturduğu toplam uçucu kül miktarı yılda ortalama 15- 16 milyon ton civarındayken, 2050 yılında bu miktarın yılda 50 milyon tona çıkması beklenmektedir. Türkiye’ de uçucu kül kullanımı

konusunda yeterli bilgi bulunmasa da çeşitli yayınlarda, üretilen toplam uçucu külün %5' i kadarı çimento ve beton üretiminde katkı olarak kullanıldığı vurgulanmıştır.

Termik santrallerden açığa çıkan atıkların, önemli çevre sorunları yarattığı bilinmektedir. Bu atıkların inşaat sektöründe, özellikle beton ve çimento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır. Ancak ortaya çıkacak uçucu kül hacmi çok büyük olduğundan, yeni kullanım alanlarının uygulamaya geçirilmesi son derece önemlidir.

Uçucu küllerin çimento ve betonda kullanımına ilave olarak farklı inşaat malzemelerinin üretiminde değerlendirilmesi kısıtlı miktarlardaki doğal ham maddelerin bu alanda kullanımını azaltarak, doğanın tahrip edilmesini önlerken, aynı zamanda bu küllerin atılmak üzere depolanması durumunda çevrede meydana gelebilecek problemleri en aza indirmektedir.

Geoteknik mühendisliğinde son yıllarda uçucu külün kullanım alanlarının araştırılması ve alınan olumlu sonuçlarla uygulama alanlarının artmıştır. Özellikle yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda alternatif bir yöntem olarak uçucu kül kullanımı ile başarılı sonuçlar elde edilmeye başlamıştır. Yüzeysel stabilizasyonda uçucu kül uygulaması temel olarak yumuşak zeminin uçucu kül ile karıştırılması ve ardından sıkıştırıcılar yardımıyla sıkıştırılması şeklindedir. Zemin-uçucu kül karışımlarının dayanım özelliklerini belirlemek ve arazi uygulaması için optimum karışım içeriğini bulmak için çeşitli laboratuvar deneylerinin gerçekleştirilmesi gereklidir.

Uçucu külün, yüzeysel zemin stabilizasyonunda kullanılmasına etki eden faktörlerden en önemlisi ise uçucu külün sınıflandırılmasıdır. Bilindiği gibi uçucu külün tek başına bağlayıcılık özelliği ya yok denebilecek kadar azdır, ya da hiç yoktur. Ancak bütün puzzolanlar gibi; öğütülmüş halde, normal sıcaklıkta ve nemli ortamlarda kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşikler meydana getirir. Uçucu küller, kimyasal kompozisyonlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Uçucu küller, içerdiği analitik CaO miktarı bakımından;

- F Tipi; CaO miktarı % 10'dan az olanlara düşük kireçli/kalsiyumlu uçucu kül
- C Tipi; CaO miktarı % 10'dan fazla olanlara yüksek kireçli/kalsiyumlu uçucu kül

olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Uçucu kül yapısındaki kireç ve SO_3 miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır.

Bunlar;

- Esas yapısı silikaaluminatlardan meydana gelen, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı % 70' in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen silikaaluminatlı uçucu küllerdir.
- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50 ile % 70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan silikokalsik uçucu küllerdir.
- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50' in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO_3 ve CaO ihtiva eden sülfokalsik uçucuküllerdir.

Uçucu küller, ASTM-C 618' e göre de iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla,

- Bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 70' in üzerinde olan F sınıfı uçucu küllerdir,
- Linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50' in üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir.

Yukarıda belirtilen silikoaluminatlı uçucu küller, F sınıfındadır. Silikokalsik uçucu küllerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfokalsikuçucu küllerin çoğu, C sınıfı uçucu küller olarak isimlendirilmektedir. Diğer bir sınıflandırma, ENV 197-1' e göre yapılmakta ve uçucu küller, iki kategoriye ayrılmaktadır. Buna göre uçucu küllü çimentolarda kullanılacak olan uçucu küller, silisli ve kalkerli uçucu küller olarak sınıflandırılmıştır (Şenol v.d., 2003b).

TSE ve ASTM standartlarına göre uçucu kül özellikleri ve içinde barındırması gereken kimyasal bileşik yüzdeleri Tablo 3.3' te gösterilmiştir. ASTM-C 618' e göre C ve F sınıflarına ayrılan uçucu küllerin ağırlıkça içinde bulundurması gereken kimyasal bileşenler Tablo 3.4' te gösterilmiştir.

Ayrıca tüm puzzolanik malzemeler gibi uçucu külün de yeterli bağlayıcılığı gösterebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlamış olması gerekmektedir:

- İçerdiği silis ve alümin miktarı yüksek olmalıdır (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzzolanlardaki “SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃” miktarının en az %70 olması istenmektedir.).
- Amorf yapıya sahip olmalıdır.
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır.

Tablo 3.3 TSE ve ASTM’ ye Göre Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

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

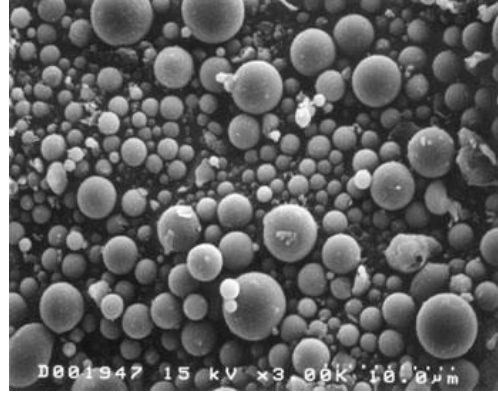
Tablo 3.4 ASTM-C 618’ e Göre C ve F Sınıfı Uçucu Kül Ağırlıkça Bileşen Yüzdeleri

Bileşik	F Sınıfı		C Sınıfı	
	Düşük F' li	Yüksek F' li	Yüksek C' li	Düşük C' li
SiO ₂	46-57	42-54	25-42	46-59
Al ₂ O ₃	18-29	16.5-29	15-21	14-22
Fe ₂ O ₃	6-16	16-24	5-10	5-13
CaO	1.8-5.5	1.3-3.8	17-32	8-16
MgO	0.7-2.1	0.3-1.2	4-12.5	3.2-4.9
K ₂ O	1.9-2.8	2.1-2.7	0.3-1.6	0.6-1.1
Na ₂ O	0.2-1.1	0.2-0.9	0.8-6	1.3-4.2
SO ₃	0.4-2.9	0.5-1.8	0.4-5	0.4-2.5
Li ₂ O	0.6-4.8	1.2-5	0.1-1	0.1-2.3
TiO ₂	1-2	1-1.5	< 1	< 1

Genellikle yüzeyel zemin stabilizasyonu uygulamalarında, C sınıfı uçucu küller tercih edilmektedir. C sınıfı bir uçucu kül ve 2000 kat büyütülmüş görünümü Şekil 3.7’ de gösterilmiştir.



a) C Sınıfı Uçucu Kül



b) C Sınıfı Uçucu Külün Mikroskop Görüntüsü

Şekil 3.7 Uçucu Külün Normal ve 2000 Kat Büyütülmüş Görüntüsü

(Moseley ve Kirsch, 2004)

C sınıfı uçucu kül genellikle bir mühendislik malzemesi olarak puzzolanik özelliklerinden yararlanmak için geri dönüştürülür. Bu tip uçucu kül, diğer aktivatörlerin gerekmediği uygulamalar için idealdir. Geniş zemin stabilizasyon uygulamaları için daha ekonomik bir alternatif sağlar. Daha elverişli duruma gelmesi ve geoteknik uygulamalarda çevreye zararlı olmadıkça uçucu külün kullanılmasına ön ayak olan yeni çevre yasaları yardımıyla Wisconsin’de zemin stabilizasyonu uygulamalarında uçucu kül kullanma potansiyeli belirgin bir şekilde artmıştır. Çeşitli araştırmaların sonuçları herhangi başka bir aktivatör olmaksızın C sınıfı uçucu kül kullanılarak zemin stabilizasyonunun yapılmasını desteklemektedir. Uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin de mühendislik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Şenol vd., 2003b).

Uçucu külleri için kalite gereksinimleri kullanım amacına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uçucu kül kalitesi genellikle kömürün efektif yakılıma miktarından, kullanılan yardımcı ateşleyicilerden (bitümlü ve alt bitümlü kömürler) ve baca gazlarını filtreleme yöntemlerinden etkilenir.

Zemin stabilizasyonu için kullanılan uçucu küllerin kalitesini etkileyen 4 etken aşağıdaki gibidir.

- Organik Miktarı (LOI)
- İncelik
- Kimyasal Bileşim
- Üniformluk

Ateşleme sisteminin etkisi, uçucu kül içinde kalan yanmamış kömür parçacıklarının oranını belirler. Uçucu kül içinde kalan yanmamış kömür parçaları uçucu külün kalitesine en çok etki eden parametrelerin başında gelir. Yüzeysel zemin stabilizasyonu için yüksek LOI değerleri kabul edilebilirken, uçucu külün beton ile karıştırılması durumunda yüksek LOI değeri betonun dayanıklılığına zarar verecektir. AASHTO ve ASTM, LOI limitlerini kullanılacak alanlar doğrultusunda belirlemiştir.

Uçucu külün incelik durumu, kömürün kazanda yakılmadan önce ne kadar iyi öğütüldüğüne bağlı değişir. ASTM incelik değerini 325 no' lu elek (0,044 mm) üzerinde kalan ağırlığın toplam ağırlığı olan oranı olarak tanımlamıştır. Oranın fazla olması, külün içerisinde bulunan yanmamış kömürün fazlalığını göstermektedir. ASTM incelik oranı hakkında gerekli limitleri ASTM-C 618' de belirtmiştir. Yapısal dolgu uygulamalarında inceliğin pek önemi bulunmasa da, asfalt kaplama ve ya beton uygulamalarında uçucu külün inceliği ve granülometrisi büyük önem taşır.

Uçucu külün kimyasal bileşimi doğrudan elde edilen kömürün mineral kimyası ve yakma işlemi sırasında kullanılan ateşleyici ve enerji arttırıcı kimyasalların yapısına bağlıdır. Ayrıca bacada bulunan filtreleme mekanizmasının teknolojisi de uçucu külün kimyasal bileşimini etkiler. Günümüzde bazı termik santraller uçucu külün kimyasal bileşenlerini arttırmak için farklı kimyasal karışımlar da kullanmaktadır. Uçucu küle etki eden bir diğer parametre de üniformluktur. Üniformluk, uçucu külün etkilerinin her yerde aynı olması için önemlidir (Budinski, 2010).

Uçucu kül, yüzeysel zemin stabilizasyonu çalışmalarında aynı kireç ve çimento gibi yumuşak zeminlerin iyileştirmesinde kullanılır. Uçucu kül mekanik ve kimyasal yöntemleri için etkili bir katkı maddesidir. Genellikle taşıma gücü ve şişme problemi olan zeminlerde uygulanır.

Uçucu kül zemin koşullarını iyileştirme yöntemi olarak kullanıldığında aşağıdaki yararları sağlar.

- Mukavemeti artırır.
- Ek kazı ve dolgu maliyetlerini ortadan kaldırarak tasarruf sağlar.
- Uygun olmayan zemin özelliklerini ıslah iyileştirerek yapım hızını artırır.
- Taşıma gücünün artmasıyla uygulanacak dolgu kalınlığı azalır.

Uçucu külün yüzeysel zemin stabilizasyonu olarak uygulama yöntemi kireç ve çimento ile aynıdır. Laboratuvar çalışmalarıyla belirlenen optimum su ve uçucu kül oranına göre dağıtım araçları yardımıyla zemin yüzeyine serilir. Keçi ayaklı silindir ya da benzeri iş makineleriyle belirlenen derinliğe kadar karıştırılır ve sıkıştırıcı iş makineleri tarafından sıkıştırılır. Bazı zemin stabilizasyonu uygulamalarında zemin tipine bağlı olarak uçucu kül, kireç ya da çimento ile karıştırılarak zemine tatbik edilir.

2001 yılında, İngiltere’ de Lancaster şehri ile Harrisburg kasabası arasında yapılan uçucu kül kullanılarak yapılan bir zemin stabilizasyon çalışması Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



a) Uçucu külün dağıtıcıya aktarılması

b) Zemin ile uçucu külün karıştırılması

Şekil 3.8 Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu Çalışması (www.constructionz.com)

3.4 Metal Cüruf ile Zemin Stabilizasyonu

Geoteknik mühendisliğinde, zeminlerin yüzeysel stabilizasyonları için son yıllarda ortaya çıkmış farklı bir alternatif malzeme de metal cürufudur. Metal cürufu (Şekil 3.9), tamamen saf olmayan metallerin sıcak haddehanede eritilmesiyle ortaya çıkan ve yoğunluk farklıyla yüzeyde biriken artık bir sanayi ürünüdür. Bünyesinde çeşitli hafif metalleri barındırdığı gibi, esas olarak silikatlar (SiO_2), kireç ve

alüminyumoksit (Al_2O_3) ihtiva eder. Ayrıca az miktarda da olsa, demir oksit (FeO), magnezyum oksit (MgO) ve sodyum oksit (Na_2O) gibi bazik oksitlere de rastlanır.

Cürufta, ayırma işleminin kolay olması için, metalle arasında büyük yoğunluk farkı bulunması, fırında kolay akması için düşük bir ergime sıcaklığına sahip olması gibi fiziksel özellikler aranır. Gerekğinde, cürufun bu özellikleri kazanması için katkı maddeleri kullanılır. Cüruflar, ekonomik değeri yüksek maddeler içeriyorsa yeniden işlenirler. Ayrıca cüruf çimentosu, tuğla, döşeme taşı, cüruf yünü yapımında kullanılırlar.

Metal cüruflar hafif metalin havaya temas edip oksitlenmesiyle oluşur. Bu nedenle metal küfü olarak da bilinir. Tüm sıvı çelik üretiminin % 8 - % 10' u arası miktarda cüruf oluşmaktadır. 2010 yılı verileri temel alındığında bu rakam yüz binlerce ton cüruf olarak belirlenmiştir. Oluşan bu cürufu bertaraf edilebilmesi için günümüzde kullanılan bilimsel bir metot bulunmamaktadır.



Şekil 3.9 Metal Cürufu (Erol, 2008)

Endüstrileşen toplumların oluşturduğu olumsuz sonuçların en başında çevre kirliliği gelmektedir. Özellikle sanayi atıkları çevrede uzun süre geçmeyecek olan olumsuz etkilere ve doğal yaşamın zarar görmesine sebep olurlar. Sanayi atıkları, işlenen ürünün ardında kalan ve kullanılmayan zararlı maddeleri barındırırlar. Bu maddeler bazen karşımıza pestisitler, siyanürler, organometalik bileşikler ve ağır metaller gibi insan sağlığını ciddi oranda tehlikeye sokan maddeler olarak karşımıza çıkabilirler.

Metal cürufun insan sağlığını tehlikeye sokacak herhangi bir ağır metal ya da kimyasal içerdđiđi saptanmış olmasa da, içinde barındırdığı oksitler ve silikatlar nedeniyle çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Bu yüzden demir-çelik sanayinin yoğun olduğu bölgelerde, metal cürufun çevresel kirliliğe sebep olmaması için kontrollü olarak saklanması büyük maliyetlere neden olmaktadır. Örneğin İzmir Demir-Çelik A.Ş. yıllık yaptığı 1,32 milyon ton metal üretiminden yaklaşık 120000 ton metal cüruf ortaya çıkarmaktadır (www.izdemir.com.tr).

Sanayi atığı olarak ortaya çıkan yüksek miktardaki metal cürufu, son yıllarda geoteknik mühendisliği çerçevesinde, alternatif yüzeysel zemin stabilizasyonu malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylece hem artık maddelerin çevreye olan zararları kontrol altına alınmış olup hem de inşaat sektöründe temel altı dolgusu olacak yumuşak zemin stabilizasyonu sağlanmaktadır.

Yollar Fenni şartnamesi 14. Kısımda yer alan dolgu malzemesi olarak kullanılabilme imkânı bu bölümde metal cürufu üzerinde yapılan deneylerle araştırılmıştır. Likit limit ve plastisite indeksi için aranan şartlara metal cürufu uygunluk gösterir. Metal cürufu aynı zamanda Yollar Fenni şartnamesi 66. Kısımda ve 67. Kısımda yer alan alttemel ve temel malzemesi olarak değerlendirilmesi hususunda, hava tesirlerine karşı dayanıklılık (Na_2SO_4), aşınma kaybı (Los Angeles), likit limit, plastisite indisi deneyleri için aranan şartlara da uygundur (Erol, 2008).

Yüzeysel zemin stabilizasyonunda metal cürufun kullanımı yeni yeni gelişmeye başlayan bir araştırma konusu olduğu için, bu konuda çok fazla çalışma ve uygulama bulunmamaktadır, fakat 2008 yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak yerleşkesinde, yüksek lisans tezi kapsamında yapılan bir dolgu çalışmasında metal cürufu zeminin stabilizasyonu için kullanılmıştır. 170 m uzunluğunda ve 3 m kalınlığındaki dolgu tabakasının zemin sınıfı düşük plastisiteli siltli kil (SC – SL) olarak belirlenmiştir. Sözkonusu yolun inşasında iki ayrı kesit tipi kullanılmıştır. 170 m’lik kesitin ilk 50 m’ sinde temel tabakası metal cürufundan teşkil edilmiştir. Kalan 120 m’ lik kısımda ise Karayolları Teknik şartnamesi’ nde (2006) belirtilen hususlardan faydalanılmıştır. Metal cürufu kullanılan kesitte 20 cm’ lik sıkıştırılmış alt temel kırmataş üzerine 20 cm’ lik sıkıştırılmış metal cürufu temel tabakası yapılmıştır (Şekil 3.10). Üzerine serilen 10 cm’ lik kırmataş koruma tabakası üzerine beton temel inşaedilmiştir. Gövde üzerine 8 cm’lik asfalt tabakası serilerek yol inşaatı tamamlanmıştır.



Şekil 3.10 Metal Cürufu Uygulanan Temel Kesiti (Erol, 2008)

Çalışma sonucunda yapılan ölçümlerde cüruf temel ile yapılan 50 m' lik kısmında ortalama oturma miktarı 42 mm olarak belirlenmiştir. Buna karşın standart metotla yapılan 120 m' lik kısımda ortalama oturma miktarı 103 mm olarak belirlenmiştir (Erol, 2008).

3.5 Kullanılmış Lastikler ile Zemin Stabilizasyonu

Çevresel faktörlere karşı oldukça dayanıklı yüksek molekül yapılı polimerlerden oluşan doğal ve sentetik kauçuklardan üretilen ürünlerin kullanılmasının ardından, faydalı ömürlerini tamamlamaları ile çevrede zor ortadan kalkacak “atık lastikler” oluşmaktadır. Çevrede zor ayrışır olmaları, atık lastiklerin önemli bir çevre problemi olmalarının asıl nedeni değildir. Ne kadar zor ayrışsalar da atıklar tabiatta sonunda ortadan kaldırılabilir. Buna yakma ile destek de olunabilmektedir. Ancak, üretilen atık lastiklerin çok önemli miktarlarda olması bu atıkların giderilmesindeki en önemli yönü ortaya koymaktadır (Gönüllü, 2004).

Araba lastikleri ana malzeme olarak, uzun polimer zincirlerinin oluşturduğu ham kauçuktan oluşur. Bir polimer zinciri yüz binlerce adet monomer tabir edilen ufak molekül kimyasal maddelerin birleşmesi ile oluşmaktadır. Ham kauçuğu meydana getiren polimer zincirleri birbirlerinden bağımsız yapıda oldukları için bağ kuvvetleri zayıftır ve bunun sonucu olarak ham kauçuk birçok etkiye karşı dayanıksızdır. Bu yüzden ham kauçuk kullanıma uygun bir malzeme değildir.

1839 yılında Charles GOODYEAR birbirleri üzerinden kayabilen bu polimer zincirlerinin birbirlerine kükürt bağları ile bağlanabileceğinin keşfetti. Daha sonra kükürt tarafından polimer zincirleri arasında oluşturulan bu bağlara çapraz bağ olarak

adlandırılmıştır. Bu çapraz bağların oluşması için ham kauçuk üzerinde uygulanan işleme vulkanizasyon denir.

Vulkanizasyon kauçuğu sertleştirmek için bir yöntemdir. Kauçuk karışımı malzemenin içinde yer alan kimyasal bağların kuvvetlenmesini sağlayan yüksek sıcaklıkla gerçekleşen işlemdir. Böylece kauçuk soğuduğunda kırılmaz ve ısındığında erimez. Vulkanizasyon ile oluşturulan çapraz bağlar ne sağlamlık zaafı yaratacak kadar az, ne de esneklik kaybettirecek kadar çok olmamalıdır. Vulkanizasyon işleminin olumsuz getirisi ise polimer zincirlerinin yapısını bozduğu için, polimerler asla orijinal yapılarına geri dönememektedir. Bu da kullanılmış lastiklerin geri dönüşümünü imkansız kılar. Geri dönüştürülemeyen araba lastikleri ancak bertaraf edilerek ya da tekrar kullanarak ortadan kaldırılabilirler.

ABD’ de 2001 yılında ortaya çıkan ömrünü tamamlamış araç lastiklerinin % 77,6’ sı çeşitli uygulamalarla tekrar kullanılmış veya bertaraf edilmiştir. Geri kalan kullanılamayan kısım ise lastik yığınları haline getirilmiş veya yasal olmayan bir şekilde parçalanmadan tüm lastikler halinde gömülmüştür. Parçalanmış veya bütün haldeki lastik yığınları çevresel problemler doğuracağı bilinmektedir. Bunların en önemlileri sivrisinekler ve muhtelif kemirgenler için üreme ortamları oluşturması ve ciddi yangınlara neden olmasıdır (Zornberg v.d., 2005).

Diğer bir önemli tekrar kullanım yöntemi ise ömrünü tamamlamış lastiklerin yakılarak “Lastikten Yakıt (TDF)” elde edilmesidir. Bu yaklaşık olarak ortaya çıkan tüm ömrünü tamamlamış lastiklerin % 17’ sine karşı gelmektedir (Bosscher v.d., 1997). Lastiklerin yakılarak önemli oranlarda enerji elde edilse de bu yöntem, yanma işlemi sırasında atmosfere salınacak zararlı gazlar ve oluşturacağı hava kirliliği nedeniyle tercih edilmemelidir.

Ömrünü tamamlamış lastiklerin bertaraf edilmesi için son on yıldır içinde inşaat mühendisliği uygulamalarının da bulunduğu çeşitli alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Ömrünü tamamlamış lastikler; hafif olmaları, düşük yanal gerilmeleri, düşük ısı geçirgenliği ve iyi drene olmaları özellikleri ile tasnif edilirler. Birçok ülke, bu tip atıklardan kurtulmak için teşvik oluşturduğu için ömrünü tamamlamış lastik yığınları çok ekonomiktir. Ekonomik olması ve mühendislik özellikleri nedeniyle ömrünü tamamlamış lastikler; yapısal olmayan ses yalıtım duvarları, hafif dolgular, zayıf zeminlerin dolgusu, istinat duvarları geri dolgusu,

sınır drenleri ve asfalt donma bariyerleri gibi uygulamalarda da kullanılmaktadırlar (Erol, 2008). Kullanılmış lastikler günümüzde birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılmaktadır. Kullanılmış lastiklerden uygulamalarda çok farklı çeşitlerde tekrar yararlanılmaktadır. Lastikler toz, granüle veya şeritler halinde ufaltılarak kullanıldıkları gibi bütün halde ya da birçok lastiğin bir araya getirilmesi ile oluşan balyalar halinde de tekrar kullanılabilir (Şekil 3.11).



a) Bütün halde bulunan lastikler



b) Şerit halinde bulunan lastik parçaları



c) Granüler halde bulunan lastik parçaları



d) Balya halinde bulunan lastikler

Şekil 3.11 Kullanılmış Lastik Çeşitleri (Mukesh v.d., 2004)

Şekil 3.11d' de görünen lastik balyaları, kullanılmış lastiklerin hidrolik pres makineleriyle sıkıştırılmasıyla oluşur. Sıkıştırılmış lastik grubu tekrar açılmaması için çelik veya halatlarla sarılarak bütünlüğünü koruması sağlanır. Lastik balyalar ile deneysel çalışmalar hala sürdüğü için henüz zemin stabilizasyonunu ile ilgili başarılı bir uygulama gerçekleştirilmemiştir, fakat lastik balyalar farklı mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

Bütün halde bulunan lastikler (Şekil 3.11a) birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılmaktadırlar. Bütün lastikler, iç ve dış duvarlarda ana inşa

malzemesi olarak, istinat duvarların yüzey kaplamalarında ve şevlerde yada istinat yapılarında donatı elamanı olarak kullanılabilirler.

Günümüzde lastik parçalarının inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanım alanları bütün haldeki lastiklere oranla çok daha fazladır. Bununda en büyük uygulama alanı, ulaşım alanında dolgu malzemesi olarak kullanılmasıdır. Parçalanmış lastikler (Şekil 3.11b ve Şekil 3.11c) birçok dolgu ve istinat duvarı uygulamasında hafif olması, kayma mukavemetinin yüksek olması, kolay drene olması ve ısı geçirimsizliğinin düşük olması gibi faydaları sebebiyle kullanılmıştır. Dolgu uygulamalarında parçalanmış lastikler dolgunun yalıtılması için kullanılmıştır. Lastik parçaları birçok uygulamada da drenaj elemanı, filtreleme ve son örtü tabakası olarak dolgularda kullanılmıştır. Parçalanmış ömrünü tamamlamış lastiğin hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi atık lastik ürünlerinin inşaat mühendisliğinde kullanılma alanlarından en genişini oluşturmaktadır (Erol, 2008).

Yukarıda belirtilen çeşitler göz önüne alındığında, işlenmiş atık lastiklerin en yaygın kullanım yöntemi; lastik parçacıklarının zemin karışımı içerisinde boşlukları doldurmak suretiyle, lastik parçası –zemin karışımı elde edilmesidir. 1995 yılından beri ABD’ de 70’ ten fazla inşaat mühendisliği projesi ömrünü tamamlamış lastik kullanılmak suretiyle başarı ile tamamlanmış olup, bu uygulamalarda esas amaç herhangi bir yakılma işlemine maruz bırakılmadan ömrünü tamamlamış lastiklerin tekrar faydalanabilmektir (Zornberg v.d., 2005).

Özellikle lastik şeritlerinin genel özelliklerinin belirlenebilmesi için birçok laboratuvar ve saha çalışması yapılmıştır. Lastik şeritleri ilk olarak organik zeminlerde granüller dolgu malzemesi yerine, hafif dolgu malzemesi olarak, oturmaları azaltmak için kullanılmıştır. O uygulamadan sonra şerit haldeki lastiği mineral zemin yerine dolgu olarak veya yol temellerinde agrega olarak kullanıldığı çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu çalışmalar göstermiştir ki inşasında lastik şeritleri kullanılan dolgular, çoğunlukta taşıma gücü açısından normal dolgular kadar iyi bazı durumlarda da en azından yumuşak zemin dolguları kadar performans göstermiştir.

ABD’ de ömrünü tamamlamış lastikler ile genel şartlar ve uygulamadaki dikkat edilmesi gereken noktalar 1998 yılında hazırlanan “*Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*” (ASTM D6270–98) standardında belirlenmektedir.

3.6 Yapay Polimerler ile Zemin Stabilizasyonu

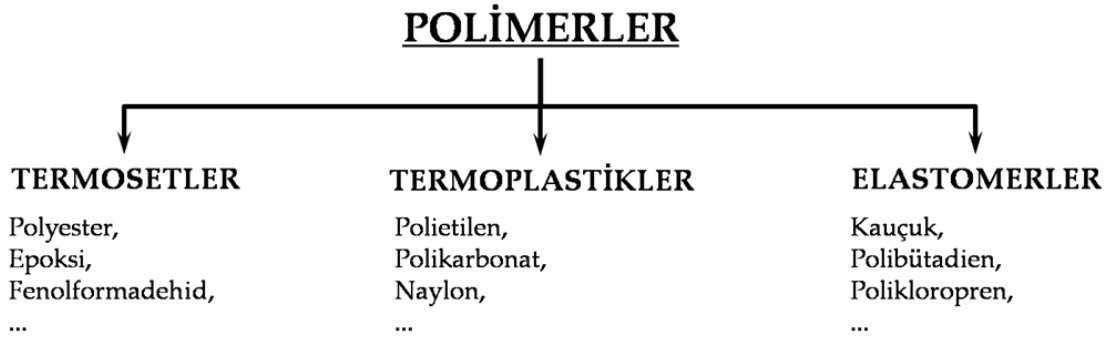
Polimerler veya polimer zincirleri, monomer denilen küçük basit moleküllerin birbirine kovalent bağlar ile bağlanmasıyla ve devamlı olarak birbirini takip etmesi sonucu meydana gelen makro bileşiklerdir. Aynı tür monomerlerin birleşerek oluşturduğu polimer zincirine homopolimer, iki farklı tür monomerin birleşerek oluşturduğu zincire kopolimer, üç farklı türüm oluşturduğu yapıya ise terpolimer adı verilir. Günümüzde polimerlerin birçok kullanım alanı vardır.

Polimerler yaşamsal önemi olan büyük moleküllerdir. İnsan vücudunda bulunan polimerler, protein ya da enzimler gibi biyolojik kimyasallar iken bitkilerde bulunan polimerler ise selüloz ya da nişasta gibi moleküllerdir. Gündelik hayatta en çok bilinen polimerler plastikler ve kauçuklardır.

Polimerlerin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- Hafiftirler
- Kolay şekillendirilebilir ve kolay tasarlanabilirler
- Kimyasal etkilere karşı dayanıklıdır
- Atmosferik koşullara karşı dayanıklıdırlar
- Mekanik dayanımları yüksektir
- Yalıtıkandırlar, elektrik, ısı ve sesi iletmezler
- Hijyeniktirler
- Özellikleri istekler doğrultusunda değiştirilebilir
- Optik Özellikler (Şeffaflık, Matlık)
- Düşük maliyetlidirler

Polimerler elde edildikleri kaynaklara bağlı olarak doğal polimerler ve yapay polimerler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal ve yapay polimerler de kendi içerisinde yapısal özelliklerine göre gruplandırılırlar. Doğal polimerler; Elastikler, Polisakkaritler, Proteinler ve Polinükleotitler olarak kendi içinde ayrılırken, yapay polimerler ise Termoplastikler, Termosetler ve Elastikler olarak gruplara ayrılmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Yapay Polimer Grupları (Utracki ve Jamieson, 2010)

Yapay polimerler birçok sektörde olduğu gibi inşaat mühendisliğinde de yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Altyapı ürünlerinden, ev dekorasyon ürünlerine kadar yapı malzemesinin her alanında plastik malzemeleri ya da plastik bazlı kompozit malzemeler görülebilir. En sık kullanılan altyapı ürünü polivinil klorür (PVC) bazlı plastik su borularıdır.

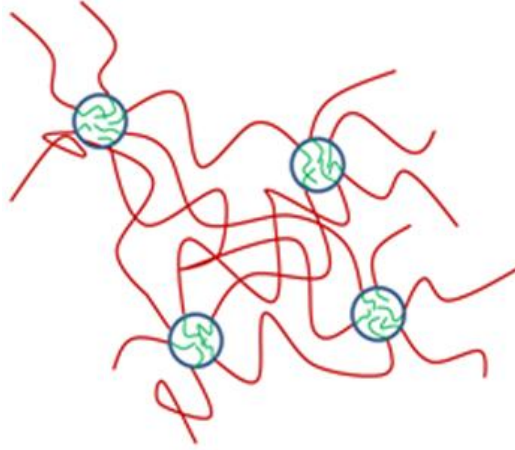
Evlerin içinde ise duvarlarda plastik ürünlerinin hızla yayıldığı boya sektörüyle karşılaşılır. Plastik bazlı boyalarda akrilikler, poliüretanlar, poliesterler, epoksiler ve melamin reçineleri bulunabilir. Bu kimyasallar boyanın duvarlara ve birbirine daha iyi tutunmasını sağlamakla birlikte boyaya daha güzel bir son görünüm kazandırır. Son yıllarda artan bilimsel araştırmalar sayesinde ise bu polimerler nano-parçacıklarla geliştirilerek, su tutmayan, kendi kendini temizleyen ya da UV ışınlarından koruyan ileri teknoloji ürünü boyalar piyasaya çıkmıştır.

Düşük maliyet ve uzun süreli kullanım sağlayan, polyester fiberlerle güçlendirilmiş ve epoksi reçine ile kalıplanan su depoları, evyeler ve banyo küvetleri de yapı endüstrisinde kullanılan plastiklerdir. Özel kalıplama teknikleriyle sandalyeler, banklar, çöp kutuları gibi gündelik hayatta her an karşımızda duran parçalar da plastikten üretilir. Bu tür yapı malzemeleri üretirken polyesterden polipropilen, epoksidenpoliakriliğe farklı plastikler kullanılabilir. Hangi plastiğin ve hangi güçlendirme elyafının kullanılacağını, üretilen parçanın maruz kalacağı fiziksel ya da kimyasal etkenler belirler.

Yüzeyel zemin stabilizasyonu kapsamında, polipropilen, polyester ve kopolimer gibi polimerler, son yıllarda alternatif malzeme arayışında olan geoteknik mühendisliğinin ilgi alanına girmiştir. Yüksek çekme mukavemetine sahip bu

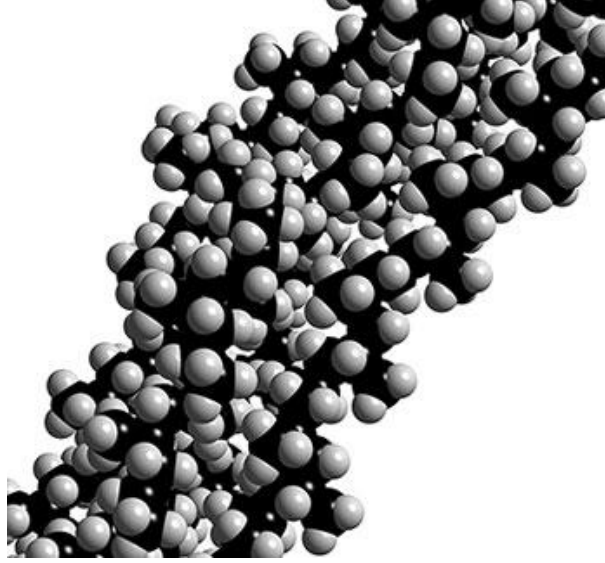
malzemelerin zemin içinde kullanıldıklarında, gerilmeleri üstlenip, dağıtma eğilimi oluşmaktadır.

Kopolimer, iki farklı özellik taşıyan monomerin birleşerek oluşturduğu yapıya denir. İki monomerin sentezinden oluşan kopolimerler kendini oluşturan iki farklı monomerin sahip olduğu iki farklı özelliği de taşımaktadır. Böylece kendini oluşturan monomerlerden daha üstün bir davranışa sahip olurlar. Ayrıca kopolimerler termoplastik ve termosetlere benzer reaksiyon gösterirler, akıcı veya katı formda olabilirler (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Kopolimerlerin Kimyasal Yapısı (www.polimernedir.com)

Polipropilen (PP), otomotiv sanayinde kullanılan parçalardan, tekstil ve yiyecek paketlemesine kadar çok geniş kullanım alanı olan termoplastik bir polimerdir. Polipropilen, yorulmaya karşı çok iyi direnç gösterir. Düşük maliyetlidir, iyi bir darbe dayanımı vardır. Sürtünme katsayısı düşük olup, çok iyi elektrik yalıtımı sağlar. Kimyasal direnci iyidir. Tüm termoplastik işleme proseslerine uygundur. Polipropilenin, erime sıcaklığı 160 santigrat derece civarındadır. Buna karşın UV ışını dayanımı azdır, yüksek termal genleşme gösterir, boya ve kaplaması zordur, dış hava şartlarına karşı dayanımı azdır, oksitlenme yapar, yanıcı bir madde olup klor içeren solventler ile etkileşime girer. Şekil 3.14’ te polipropilenin molekül yapısı gösterilmiştir. En yaygın ticari termoplastik polimer olan polipropilen 2001 senesinde tüm dünyada 45 milyon ton üretilerek 65 milyar dolarlık bir pazar yaratmıştır. Özellikle izotaktik polipropilen (iPP) düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemeti sayesinde çok yüksek güç/ağırlık oranına sahiptir. Bu sebeple de otomotiv parçalarından tekstil ve paketleme endüstrisine kadar her alanda en yaygın kullanılan polimerdir.



Şekil 3.14 Polipropilenin Molekül Yapısı (Utracki ve Jamieson, 2010)

Zeminler ile karıştırılan polimer bazlı fiberler zeminlerin mühendislik davranışlarında önemli değişikliklere ve iyileştirmeye sebep olur. Fiber ile güçlendirilmiş zeminler üzerinde üç eksenli basınç deneyi, serbest basınç deneyi, CBR deneyi, kesme kutusu deneyi, çekme ve eğilme dayanımı testleri gibi birçok test yapılmıştır. Zemin içinde dağılmış fiberlerin kazandırdığı en büyük avantaj ise, zemin ile karıştığında rastgele dağıldığı için zayıf bir kesit oluşturmamasıdır (Kumar v.d., 2007).

Polimer bazlı fiberlerin zeminler üzerinde etkisi hakkında yapılan çalışmalarda, bu fiberlerin kireç ve çimento ile zemine karıştırılmalarının ayrı ayrı etkilerinden daha fazla olduğu ve fiberlerin zemin içerisinde donatı vazifesi üstlendiği gözlemlenmiştir. Fiberlerin zemin içerisinde donatı vazifesi görebilmeleri için fiber yüzeyi ve zemin arasında yüksek bir sürtünme kuvvetinin oluşması gerekmektedir. Bu sürtünme kuvveti gerilmelerin zemin ve fiber üzerinde yayılmalarına ve dağılmalarına olanak sağlayacaktır. Kil ve silt gibi kohezyonlu zeminlerde bu sürtünme miktarı, kum ve çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerden daha fazla olacağı için polimer bazlı fiberlerin yumuşak ve kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmaları daha uygundur.

Çalışmanın 4. kısmında, ağ yapılı polipropilen ve eskitilmiş kopolimer fiberler, ayrı ayrı, uçucu kül ile birlikte ve birbirleri ile olan farklı oranlardaki karışımlarının yüksek plastisiteli kil stabilizasyonunda ki etkileri, laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir.

3.7 Pirinç Kabuğu Külü ile Zemin Stabilizasyonu

Bir çeşit sanayi artığı olan pirinç kabuğu; yapı malzemesi, gübre, yalıtım malzemesi ve yakıt olarak kullanıldığı gibi alternatif bir yüzeysel stabilizasyon malzemesi olarak geoteknik mühendisliğinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Pirinç kabuğu büyüme döneminde pirinç tohumlarını koruyucu özellikte olması nedeniyle opaline silika ve lignin gibi sert maddelerden oluşur ve insanlar için hazmedilemediği için pirinçten ayıklanmak zorundadır. Pirinç kütlesinin toplam % 10' unun oluşturan pirinç kabuğu, yakıldıktan sonra yalnızca kütlesinin % 20' sini koruyabilmektedir (Şekil 3.15).



a) Pirinç kabuğu



b) Pirinç kabuğu külü

Şekil 3.15 Pirinç Kabuğu ve Pirinç Kabuğu Külü (www.gasifiers.bioenergylists.org)

Tayland gibi pirinç üreten ülkeler tarafından sanayi artığı olan pirinç kabuğu külünün ortadan kaldırma problemi, farklı sektörlerde kullanmak için araştırmalar başlatmıştır. Pirinç kabuğu külü, geoteknik mühendisliğinde, yüzeysel stabilizasyonda kullanılan uçucu kül, metal cüruf gibi yapay puzzolan sınıfına girmektedir ve benzer kimyasal özelliklere sahiptir. Bu sebeple son yıllarda pirinç kabuğu külünün yumuşak zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunda kullanılmasına yönelik araştırmalar başlamıştır.

Brooks, yüksek plastisiteli kil ile farklı oranlarda pirinç kabuğu külü karışımları üzerinde yapmış olduğu laboratuvar deneylerinde pirinç kabuğu külünün etkisini gözlemlemiştir. Yapmış olduğu C.B.R. (California Bearing Ratio) ve serbest basınç deneyleri sonucunda optimum pirinç kabuğu külü oranını ağırlıkça % 12 olarak hesaplamıştır. Ağırlıkça % 12 pirinç kabuğu külü kullandığı kil-pirinç kabuğu külü karışımı, serbest basınç testinde % 97 artış sağlarken bu oran C.B.R. testinde % 47 olmuştur (Brooks, 2009).

Pirinç kabuğu külü ile zemin stabilizasyonu üzerindeki çalışmalar son zamanlarda hızla artmakta olmasına rağmen, henüz başarılı bir uygulama gerçekleştirilmemiştir.

4. ALTERNATİF MALZEMELER İLE ZEMİN STABİLİZASYONUNUN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI

4.1 Malzemeler

4.1.1 Zemin

Deneyisel çalışmada kullanılan zemin, İstanbul' un Eyüp ilçesinde Akpınar bölgesinden alınmıştır. Araziden alınan zemin numunesi üzerinde kıvam limitleri, elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılarak hakim zemin tipi belirlenmiştir.

İlk olarak araziden gelen zemin sınıfını belirlemek için elek analizi deneyi yapılmıştır. Tablo 4.1' de gösterilen elek analizi sonuçlarına göre toplam zeminin % 97.2' si 200 no' lu elekten geçmiştir.

Tablo 4.1Elek Analizi

Numunenin Toplam Ağırlığı			500 gr	
Yıkama Esnasındaki Kayıp			486 gr	
Elek No	Çap (mm)	Kalan Ağırlık (gr)	Elekten Geçen	
			(gr)	(%)
3/4	19.000	0.0	500.0	100.0
3/8	9.000	0.0	500.0	100.0
4	4.000	0.2	499.8	100.0
10	2.000	0.6	499.2	99.8
18	1.000	0.5	498.7	99.7
40	0.425	1.4	497.3	99.5
70	0.212	4.3	493.0	98.6
100	0.150	2.9	490.1	98.0
200	0.076	4.1	486.0	97.2

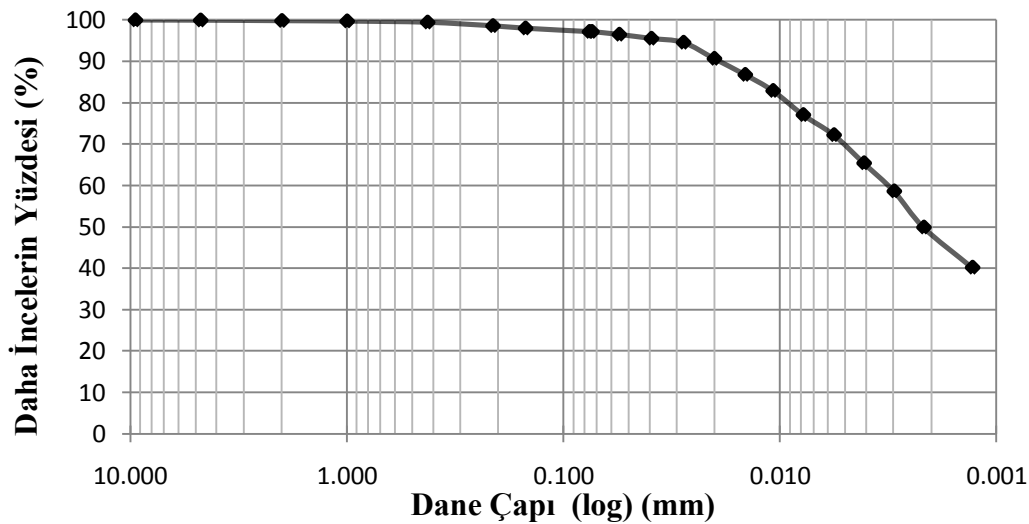
İçinde % 97.2 oranında ince dane bulunduran zeminin sınıflandırılması için, hidrometre deneyi yapılarak ince dane dağılımı ve Atterberg limitleri belirlenmiştir.

Hidrometre deneyi için 200 no'lu elek altına geçen zeminden 50 gr alınarak, sodyumhegzametafosfat (NaPO_3)₆ çözeltisinde 1 gün bekletilmiştir. Çözelti içinde birbirinden ayrılan kil, hidrometre deneyine tabi tutulmuştur ve 24 saat boyunca hidrometre okumaları alınmıştır. Hidrometre deneyi sonucunda ince danelerin dane boyutları belirlenmiş ve Tablo 4.2' de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Hidrometre Deneyi Analizi

Geçen Süre (dak.)	Hidrometre Okuması (R_{h1})	$R_h = R_{h1} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Test Numunesine Göre (%)	Ana Numuneye Göre (%)
1/4	52.0	53.0	50.0	8.175	0.074	100.0	97.2
1/2	51.0	52.0	49.7	8.232	0.055	99.3	96.5
1	50,5	51.5	49.2	8.313	0.039	98.3	95.5
2	50.0	51.0	48.7	8.394	0.028	97.3	94.6
4	48.0	49.0	46.7	8.719	0.020	93.3	90.7
8	46.0	47.0	44.7	9.044	0.014	89.3	86.8
15	44.0	45.0	42.7	9.369	0.011	85.3	82.9
30	41.0	42.0	39.7	9.857	0.008	79.3	77.1
60	38.5	39.5	37.2	10.263	0.006	74.3	72.2
120	35.0	36.0	33.7	10.832	0.004	67.3	65.4
240	31.5	32.5	30.2	11.401	0.003	60.3	58.6
480	27.0	28.0	25.7	12.132	0.002	51.3	49.9
1440	22.0	23.0	20.7	12.944	0.001	41.3	40.1

Zeminin elek analizi ve hidrometre sonuçlarına göre granülometri eğrisi belirlenmiş ve Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Birleşik zemin sınıflandırmasına göre zeminin, % 3' ü kum, % 27' si silt ve % 70' i kil olarak belirlenmiştir ve Tablo 4.3' te özetlenmiştir.



Şekil 4.1 Kil Numuneye ait Granülometri Dağılımı

Tablo 4.3 Zemin Sınıflandırması

	Çakıl	Kum	Silt	Kil
%	0	3	27	70

Zeminin büyük çoğunluğu ince danelerden oluştuğu için zemin sınıflandırması, Atterberg limitlerine göre belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen Casagrandelikit limit deneyi sonrası zeminin likit limiti, %78 olarak belirlenmiştir.

Zeminin plastik limiti tayini için zemin, yaklaşık 3 mm çapında üzerinde yüzey çatlakları oluşana kadar yoğurulur. Bu durumdaki su muhtevası zeminin plastik limitini belirler. Zeminin belirlenen plastik limiti, % 28 olarak belirlenmiştir.

Likit limit (w_L) ve plastik limiti (w_P) belirlenen zeminin plastisite indisi (I_p);

$$I_p = \omega_L - \omega_P \quad (4.1)$$

formülü kullanılarak $I_p=50$ olarak belirlenmiştir ve Tablo 4.4’ te özetlenmiştir.

Tablo 4.4 Zeminin Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndisi

Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite Endeksi
$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	$I_p (\%)$
78	28	50

Yapılan deneyler sonucunda zemin sınıflandırması, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)’ne göre CH (Yüksek Plastisiteli Kil) ve Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemi (AASHTO)’ ne göre A-7 olarak belirlenmiştir. AASHTO, A-7 zemin sınıfını zayıf temel malzemesi olarak tanımlamıştır.

4.1.2 Uçucu Kül

Uçucu kül, Ankara’ ya 120 km mesafede bulunan ve Türkiye’de en yüksek verimle çalışan Çayırhan Termik Santrali’ nden gelmiştir. C sınıfına ait uçucu külün içinde barındırdığı puzolonik kimyasallar ve ağırlıkça yüzdeleri Tablo 4.5’ te, fiziksel özellikleri ise Tablo 4.6’ da sunulmuştur.

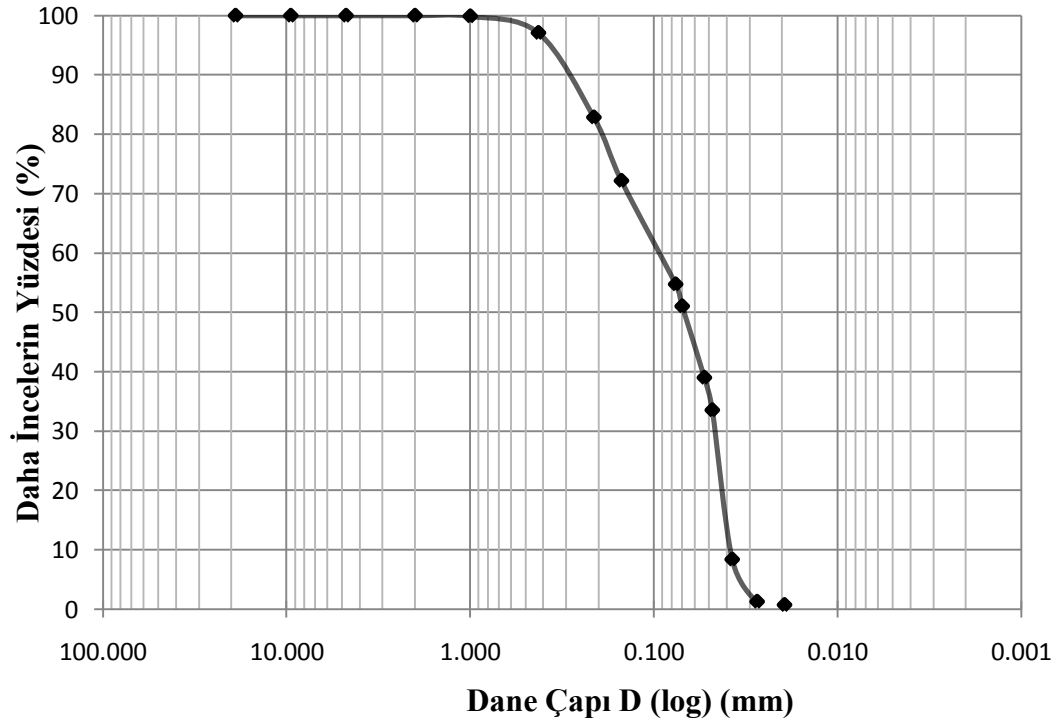
Tablo 4.5 Uçucu Küle Ait Kimyasal Bileşenler ve Ağırlıkça Yüzdeleri

Kimyasal Bileşikler	Ağırlıkça %
$\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	1.25
H_2O	0.20
SiO_2	45.00
Al_2O_3	13.90
Fe_2O_3	8.26
CaO	15.11
MgO	6.68
SO_3	4.26
Na_2O	2.13
K_2O	2.78
Klorür (Cl)	0.06
Kızdırma Kaybı	0.22
S.CaO	0.15
Çözünmeyen Kalıntı	-
TOPLAM	% 100

Tablo 4.6 Uçucu Küle Ait Fiziksel Özellikler

Özgül Yüzey (cm^2/gr)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Aktivite Endeksi (%)
2100	2,34	83

Uçucu külün dane dağılımının belirlenmesi için, elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonucunda uçucu küle ait granülometri eğrisi Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Uçucu Küle ait Granülometri Dağılımı

4.1.3 Polipropilen

Polipropilen fiberler (lifler) betonarme döşeme imalatlarında beton içerisinde donatı amaçlı kullanılabilen, dayanımı yüksek, polimer esaslı, sentetik fiberlerdir. ASTM C-1116 gerekliliklerine uygun polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri Tablo 4.7’ de belirtilmiştir.

Tablo 4.7 Polipropilen Fiberlere Ait Fiziksel Özellikler (Forta Katalog, 2011)

Malzeme	Polipropilen
Renk	Şeffaf
Form	Fibrile edilmiş fiber sistem
Asit/Alkali Direnci	Mükemmel
Yoğunluk	0.91
Su Emme	Yok
Çekme Gerilmesi	758 Mpa
Uygunluk	ASTM C-1116 ve CE
Uzunluk	54 mm

Ağ yapıya sahip, renksiz, doku olarak yumuşak ve pürüzsüz yapıya sahip polipropilen, deforme edildiği takdirde açılarak genişlemekte ve ağ yapısı ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.3).



a) Polipropilen fiberler



b) Deforme edilmiş polipropilen fiberler

Şekil 4.3 Normal Durumda ve Deforme Edilmiş Polipropilen Fiberler

4.1.4 Kopolimer

Kopolimer fiberler (lifler) betonarme döşeme imalatlarında beton içerisinde donatı amaçlı kullanılabilen, dayanımı yüksek, polimer esaslı, sentetik fiberlerdir. ASTM C-1116 gerekliliklerine uygun kopolimer fiberlerin fiziksel özellikleri Tablo 4.8’ de belirtilmiştir.

Tablo 4.8 Kopolimer Fiberlere Ait Fiziksel Özellikler (Forta Katalog, 2011)

Malzeme	Kopolimer
Renk	Gri
Form	Tekil Fiber
Asit/Alkali Direnci	Mükemmel
Yoğunluk	0.91
Su Emme	Yok
Çekme Gerilmesi	570 Mpa
Uygunluk	ASTM C-1116 ve CE
Uzunluk	54 mm

Fiziksel işleme tabi tutularak eskitilmiş kopolimer malzemenin yüzeyi bu işlem sonucunda pürüzlü bir yüzeye sahip olmuştur. Bu pürüz malzemenin yüzeysel sürtünmesini arttırmaya yönelik oluşturulmuştur. Gri renkte ve sert bir dokuya sahip olan kopolimer fiberlere, birbirleri etrafında bükülerek burgulu bir yapı kazandırılmıştır. Herhangi bir bağlayıcı yapıya sahip olmaya kopolimer fiberler, deforme edilmesi halinde birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 4.4).



a) Kopolimer fiberler

b) Deforme edilmiş kopolimer fiberler

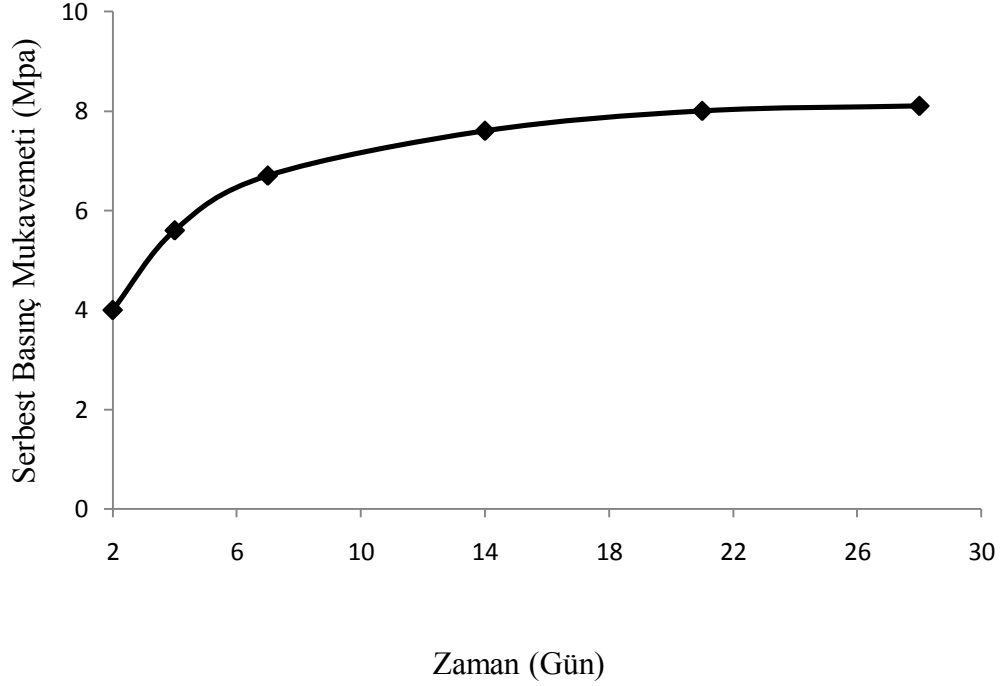
Şekil 4.4 Normal Durumda ve Deforme Edilmiş Kopolimer Fiberler

4.2 Deney Düzenegi

Laboratuvar çalışmaları, 2010-2011 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Ord. Prof Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı' nda gerçekleştirilmiştir. Araziden elde edilen zemin üzerinde gerçekleştirilen sınıflandırma deneyleri sonucunda zemin sınıflandırılması yapılmış ve yüksek plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Modifiye edilmiş, minyatür Harvard #2 kompaksiyon aleti ile farklı su muhtevalarında hazırlanan numunelerin optimum su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra numuneler, 7 gün nem odasında bekletildikten sonra serbest basınç deneyine tabii tutulmuş, su muhtevaları ve mukavemetleri belirlenmiştir.

Uçucu kül gibi puzolan malzemelere, zemin stabilizasyonu çalışmalarında uygulanan kür zamanının belirlenmesi için Şekil 4.5 kullanılmıştır.

Kireç – uçucu kül için yapılan bu çalışmada, 20 C° ve bağıl nem oranı %95’ den fazla olan ortamda bekletilen kireç – uçucu kül – kil karışımlarının serbest basınç mukavemetlerinin zaman ile olan ilişkisi incelenmiştir (Li v.d., 2010).



Şekil 4.5 Kür Zamanının Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi (Li v.d., 2010).

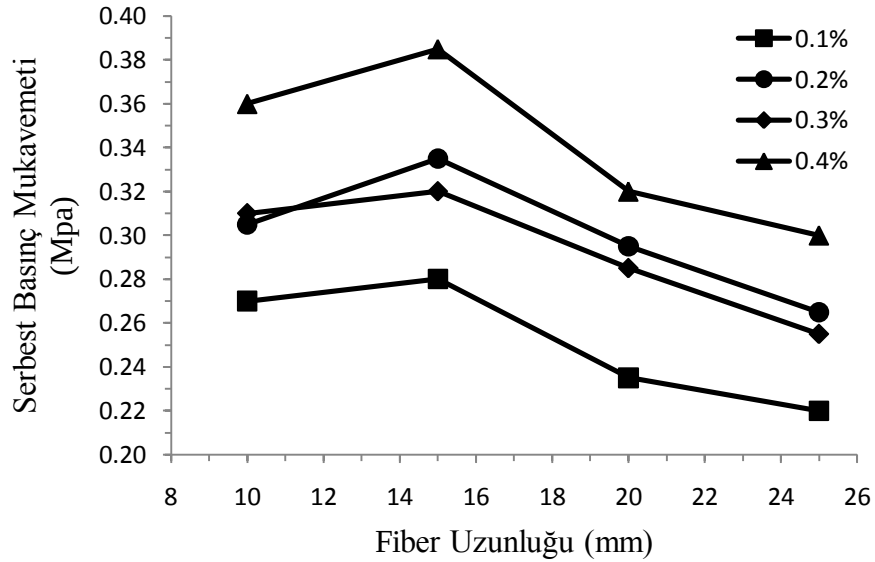
Puzolan malzemelerin kür zamanının, serbest basınç mukavemetine etkisi Şekil 4.5’ te gösterilmiştir. Serbest basınç mukavemetinin, kür zamanı ile artışı açıkça görülmektedir, fakat yedinci günden sonra bu artış bariz oranda azalmıştır. Saha uygulamalarında zamanın maliyet üzerindeki etkisi ve yedinci günde serbest basınç mukavemetinin % 85’ lere ulaştığı göz önüne alınarak kür zamanı 7 gün olarak belirlenmiştir.

Kür zamanı boyunca ortamdaki bağıl nemi korumak için, numuneler hazırlandıktan sonra Şekil 4.6’ da gösterilen desikatörler içinde korunmaktadır. Ayrıca bu desikatörlerin içindeki hava kapatıldıktan sonra vakumlanarak bağıl nemin korunması sağlanmaktadır.



Şekil 4.6 7 Günlük Kür Süresince, Numuneler için Kullanılan Örnek Desikatör

Yüksek çekme gerilmesine sahip polimer fiberlerin uzunlukları, zemin fiber karışımlarının dayanımlarını etkilediği belirlenmiştir. Şekil 4.7’ de görüldüğü gibi polimer yapıli fiberler için bu uzunluk 15 mm’ de en iyi sonuçları vermektedir (Jiang v.d., 2010).



Şekil 4.7 Fiber Uzunluğunun Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi (Jiang v.d., 2010)

Deneysel çalışmada, polimer fiberlerin zemin ile arasında oluşacak sürtünme kuvveti için gerekli miktarda yüzey alanı ve üstleneceği gerilmeleri dağıtması, fiberlerin

uzunluğu arttıkça artacaktır. Fakat bu uzunluk kompaksiyon işlemi sırasında yerleştirme zorluğu yaratacak ve uygulanan enerjinin bir kısmı bu sebep ile sönümlenecektir. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında kullanılacak fiberler için optimum uzunluk belirlenmesi gerekmiştir. Çalışmada kopolimer fiberler için bu uzunluk 15 mm, polipropilen fiberler için ise 25 mm olarak kullanılmıştır. Polipropilen fiberlerin 25 mm olarak kullanılmasının nedeni, ağ yapılı olması ve ağ yapının etkin olabilmesi için uzunluluğun arttırılmasıdır.

4.2.1 Harvard Minyatür Kompaksiyon Deney Düzenegi

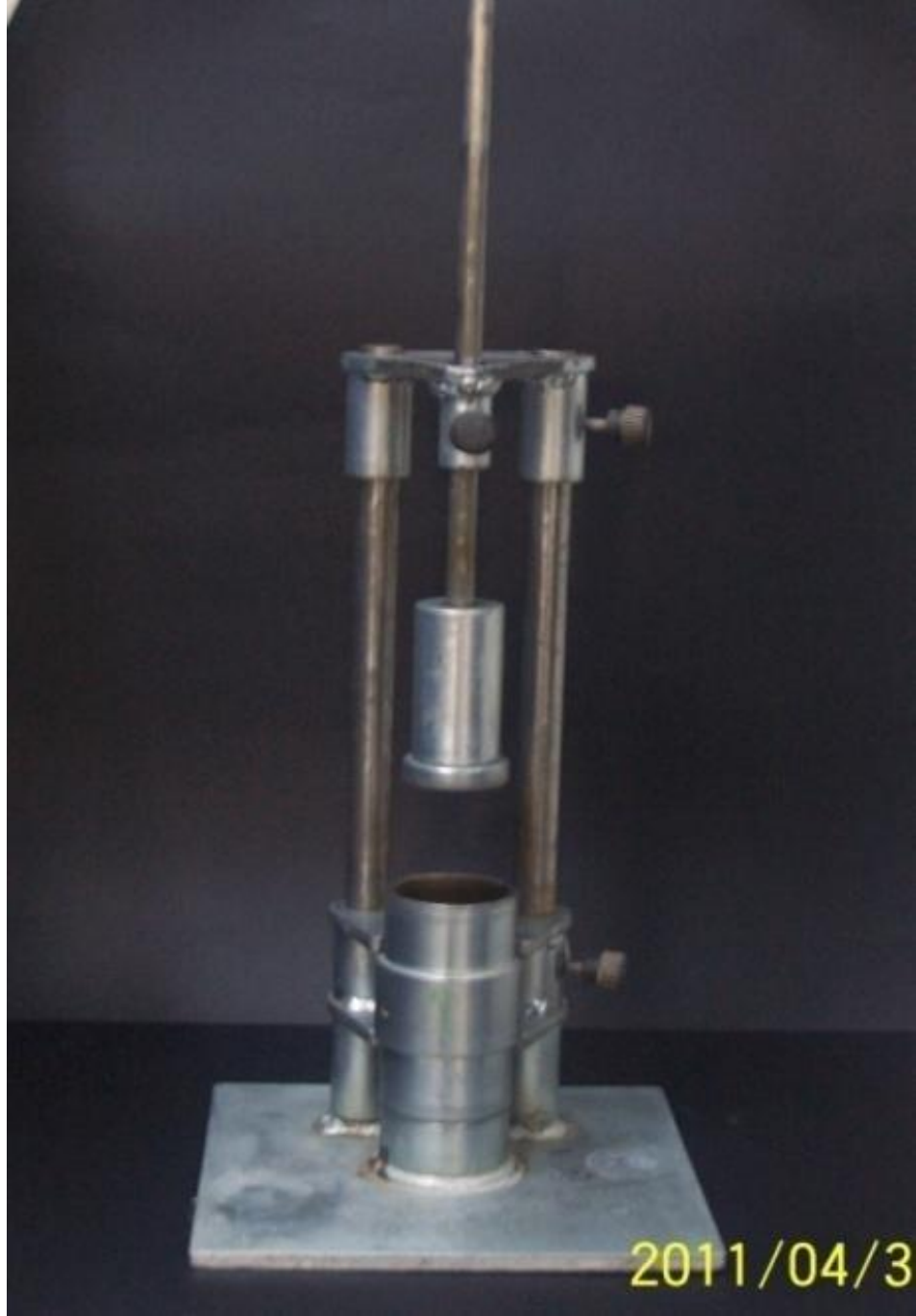
Modifiye edilmiş minyatür Harvard kompaksiyon deneyi, kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{mak}) belirlenmesi ve aynı zamanda serbest basınç mukavemeti için numune hazırlanmasını sağlayan bir çeşit kompaksiyon deneyidir.

Harvard kompaksiyon deneyi, Standart Proktor deneyi gibi zeminin su muhtevası ile sıkışabilirliği arasındaki ilişki incelenir. Zeminler optimum su muhtevasındaiken, maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip olurlar ve maksimum sıkışırılar.

Şekil 4.8' de gösterilen Modifiye edilmiş minyatür Harvard kompaksiyon aletininana bileşenleri aşağıdaki gibidir.

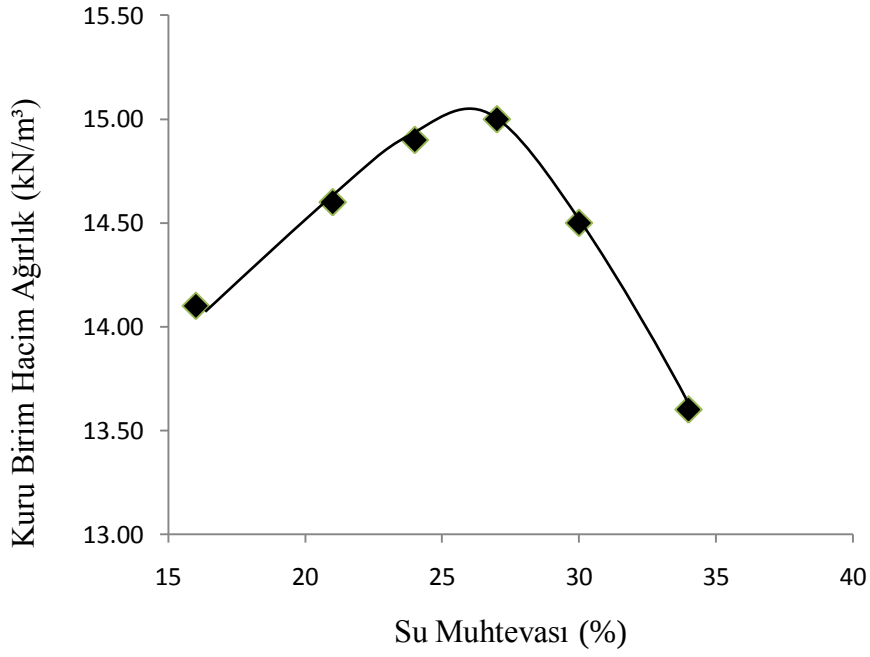
- Ana gövde
- Tokmak
- Kalıp
- Kalıp sabitleyici
- Yükseklik ayarı sabitleyicisi

Standart proktor deneyine göre farklı fiziksel özelliklere sahip olan Harvard kompaksiyon aleti, 720.7 gr tokmak ağırlığına ve çapı 4.94 cm ve yüksekliği 10 cm olan ($V=191.56 \text{ cm}^3$) kalıba sahiptir.

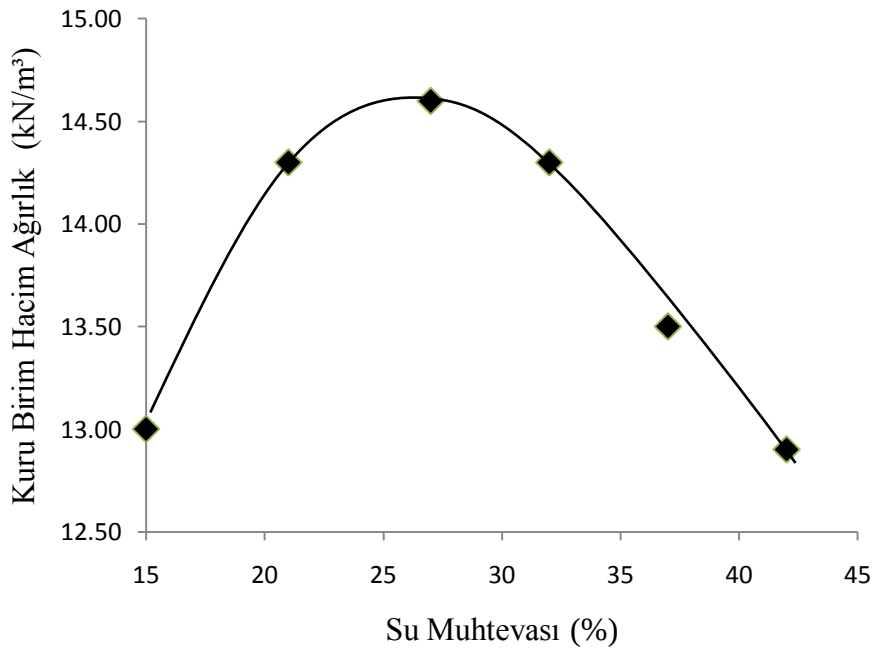


Şekil 4.8 Modifiye Edilmiş Minyatür Harvard Kompaksiyon Aleti

Deneylere başlamadan önce Harvard kompaksiyon aleti, standart proktor enerjisine göre kalibre edilmiş ve belirlenen 25 vuruş sayısı, 3 tabaka ve 15cm tokmak düşüş yüksekliği parametreleri belirlenmiştir. Yalın numune üzerinde kalibrasyon kontrolü amacı ile gerçekleştirilen standart proktor ve Harvard kompaksiyon deneyleri enerji olarak birbiri ile eşleşmediği görülmüştür (Şekil 4.9).



a) Standart Proctor Deneyi ($w_{opt} = \% 26$; $\gamma_{kmaks} = 15.00 \text{ kN/m}^3$)



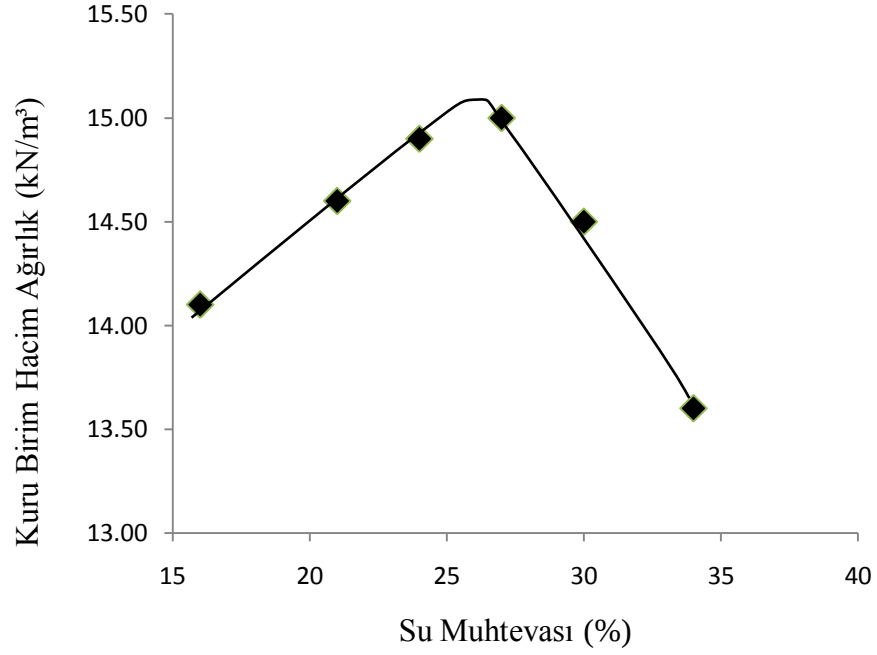
b) Harvard Kompaksiyon Deneyi $N = 25$ ($w_{opt} = \% 27$; $\gamma_{kmaks} = 14.60 \text{ kN/m}^3$)

Şekil 4.9 Standart Proktor Deneyi ve Harvard Kompaksiyon Deneyi karşılaştırılması

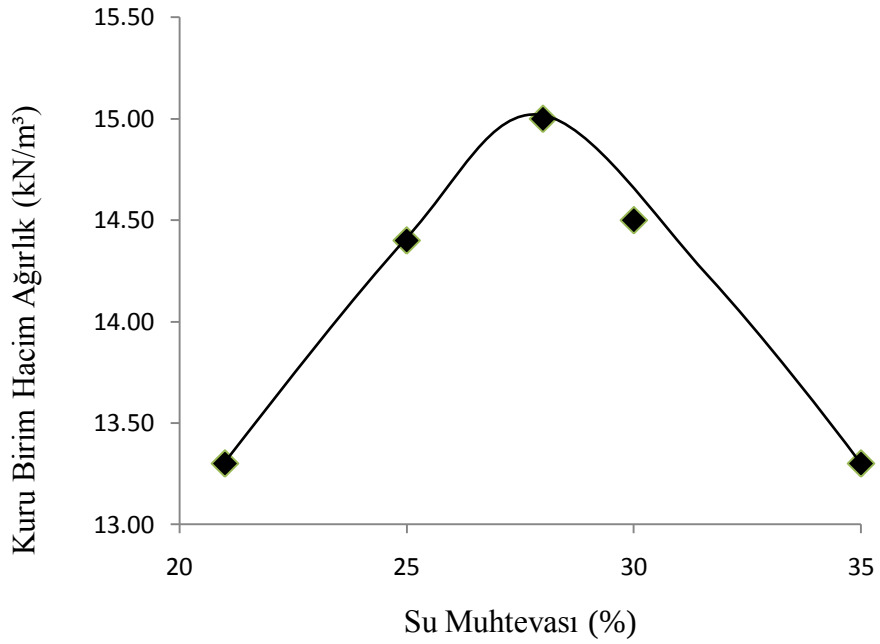
I. Kalibrasyon

Birinci kalibrasyon için uygulanan enerjinin yetersiz kalması sonucu vuruş sayısı 27' ye çıkarılarak diğer parametreler değiştirilmemiştir. İkinci kalibrasyon

sonucunda uygulanan enerji, standart proktor enerjisini sağlamış (Şekil 4.10) ve deneylerde Tablo 4.9’ da belirtilen parametreler kullanılmıştır.



a) Standart Proctor Deneyi ($w_{opt} = \% 27$; $\gamma_{kmaks} = 15.00 \text{ kN/m}^3$)



b) Harvard Kompaksiyon Deneyi $N = 27$ ($w_{opt} = \% 27$; $\gamma_{kmaks} = 15.00 \text{ kN/m}^3$)

Şekil 4.10 Standart Proktor Deneyi ve Harvard Kompaksiyon Deneyi Karşılaştırılması II. Kalibrasyon

Tablo 4.9Harvard Kompaksiyon Deneyine Ait Parametreler

	Standart Proctor Deneyi	Modifiye Proktor Deneyi	Harvard Kompaksiyon Deneyi
Vuruş Sayısı	25	56	27
Tabaka Sayısı	3	5	3
Tokmak Ağırlığı (gr)	2500	4500	720,7
Yükseklik (cm)	30,5	45,7	15
Hacim (cm ³)	944	2304	191
Enerji (grcm/cm ³)	6058,00	24992,19	6534,81

Harvard kompaksiyon deneyinde zemin 3 tabaka halinde ve üzerine 720.7 gr ağırlığındaki tokmağın her tabaka için 15 cm yükseklikten 27 kere düşürülmesi ile sıkıştırılmaktadır. Kalıp sıkıştırılmış zemin ile tamamen dolduktan sonra kütlesi belirlenip bundan sıkıştırılmış zeminin yoğunluğu veya birim hacim ağırlığı hesaplanabilir. Aynı zeminden alınacak örneklerden su muhtevası saptandıktan sonra kuru birim hacim ağırlığı hesaplanır. Deney 5 veya 6 kere tekrarlanarak zeminin su muhtevası ile sıkıştırılmış kuru yoğunluğu arasındaki ilişki deneysel olarak saptanmış olur ve sonuçlar grafik üzerinde gösterilir.

40 no' lu elek altındaki zemin ile hazırlanan en az 5 farklı su muhtevası için 5 farklı kuru birim hacim ağırlığı belirlenir ve bunlar, kuru birim hacim ağırlığı (kN / m^3) ve su muhtevası (%) eksenlerine çizilerek maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmak}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}) belirlenir.

4.1.2 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi üç eksenli basınç deneyinin özel bir halidir. Üç eksenli kesmede numune izotropik basınç altındadır. Serbest basınçta ise yanal basınç yoktur. Üç eksenli basınç deneyi zeminin tabiattaki halini daha iyi temsil etmektedir ama tek eksenli basınç deneyi daha hızlı, ucuz ve zahmetsiz bir deneydir. Serbest basınç deneyi, örselenmemiş kohezyonlu numuneler üzerinde yapılır ve deney sonucunda serbest basınç mukavemeti elde edilir. Numunenin kırıldığı gerilme değeri, numunenin serbest basınç mukavemeti olarak adlandırılır (Das, 1997). Serbest basınç deneyinin uygulanması için Şekil 4.11' de göster deformasyon kontrollü serbest basınç deneyi aleti kullanılır.



Şekil 4.11 Serbest Basınç Deneyi Aleti

Deney başlangıcında öncelikle numunenin çapı ve boyu ölçülür. Serbest basınç deneyinde numunenin boyunun, çapının 2 katı olması beklenir ($D / H = \frac{1}{2}$). Deney başı su muhtevası ve numune ağırlığı belirlenir. Numune serbest basınç aletinin içine biri sabit diğeri hareket eden iki plak arasına yerleştirilir ve üst tabaka tam olarak numunenin üst yüzeyine gelecek şekilde ayarlanır. Aletin yük halkası saati ve düşey deformasyon saati sıfırlanır ve yükleme başlatılır. Numune iki plaka arasında sıkıştırılır ve okumalar alınır. Düşey yük elastik ve lineer davranan bir yük halkası, düşey deformasyon ise düşey deformasyon saati ile ölçülür. Okumalar en yüksek değere ulaşp düşünceye kadar alınır. Bazı numunelerde, özellikle de yumuşak killerde okumalar sürekli devam edebilir. Bu durumda TS 1900'e göre numunenin düşey deformasyonu % 20 olunca deney bitirilir. Aynı şekilde TS 1900'e göre deney süresi 10 dakikayı geçmemelidir. Yükleme bittikten sonra numune alınır ve deney sonu su muhtevası belirlenir (Das, 1997).

4.3 Deney Verilerinin Değerlendirilmesi

Laboratuvar çalışmaları, 23.12.2010 – 22.04.2011 tarihleri arasında İTÜ İnşaat Fakültesi, Ord. Prof. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan çalışmalarda, elek analizi,

atterberg limitleri tayini ve ıslak analiz (hidrometre) deneyleri dışında, standart proktor, 45 adet Harvard kompaksiyon deneyi ve 253 adet serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deney programı olarak, önce kalibrasyon ve proktor deneyleri uygulandı. Daha sonra yalın numune üzerinde deneylere devam edildi. Çalışmanın devamında, 3 farklı malzemenin ağırlıkça farklı yüzdelere zemin ile karışımı ve daha sonra bu 3 farklı malzemenin ikili kombinasyonlarının yalın malzemeye karışımları üzerinde çalışıldı. Tüm deney programına ait hazırlanan numuneler ve eklenen katkı maddelerinin toplam ağırlığa göre yüzdeleri Tablo 4.10’ da özetlenmiştir.

Tablo 4.10 Deney Numuneleri ve Katkı Maddelerinin Ağırlıkça Yüzdeleri

	MALZEME	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
1	Yalın Numune	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Kopolimer	%0.50	%0.75	%1.00	%1.25	%1.50	-	-	-	-
3	Polipropilen	%0.25	%0.50	%0.75	%1.00	-	-	-	-	-
4	Uçucu Kül	%5	%10	%15	-	-	-	-	-	-
5	Uçucu Kül	%5	%10	%15	%5	%10	%15	%5	%10	%15
	Kopolimer	%0.75	%1.00	%1.25	%0.75	%1.00	%1.25	%0.75	%1.00	%1.25
6	Uçucu Kül	%5	%10	%15	%5	%10	%15	%5	%10	%15
	Polipropilen	%0.25	%0.50	%0.75	%0.25	%0.50	%0.75	%0.25	%0.50	%0.75
7	Kopolimer	%0.50	%0.75	%1.00	%0.50	%0.75	%1.00	%0.50	%0.75	%1.00
	Polipropilen	%0.25	%0.50	%0.75	%0.25	%0.50	%0.75	%0.25	%0.50	%0.75

4.3.1 Yalın Zemin Numunesi

Gerçekleştirilen kalibrasyon deneyleri ve standart proktor deneyi haricinde, yalın numune ile 2 set deney daha yapılmıştır. Bu deneylerin amacı, yalın numunede ve Harvard proktor aletinde herhangi bir problem yaşanıp yaşanmadığının kontrol etmektir.

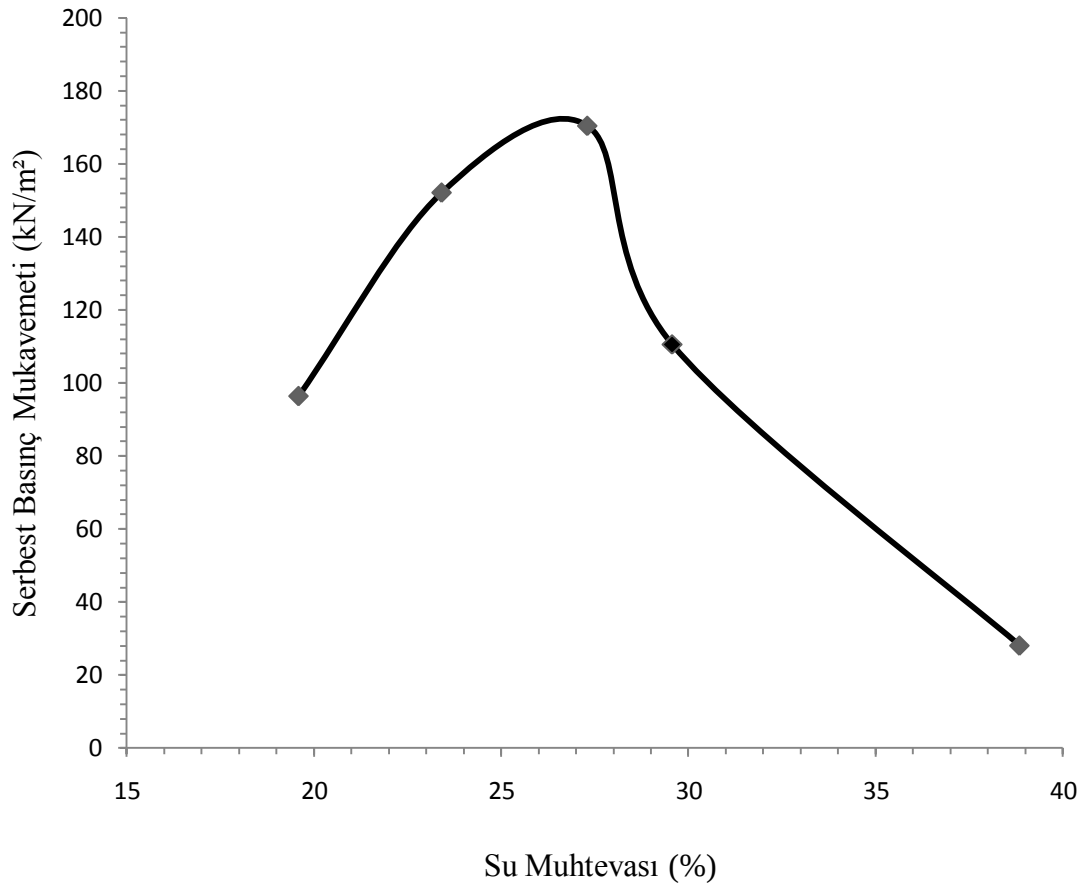
Yalın numune ile hazırlanan tüm deney setleri, bu deney setlerine ait optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve maksimum serbest basınç mukavemetleri Tablo 4.11’ de verilmiştir. Gerçekleştirilen standart proktor ve 25 vuruş kullanılarak hazırlanan kalibrasyon deneyi haricinde, en yüksek serbest basınç mukavemetini veren deney seti, referans olarak kabul edilmiştir. Referans deney

numunesinde elde edilen serbest basınç mukavemeti 170.5 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

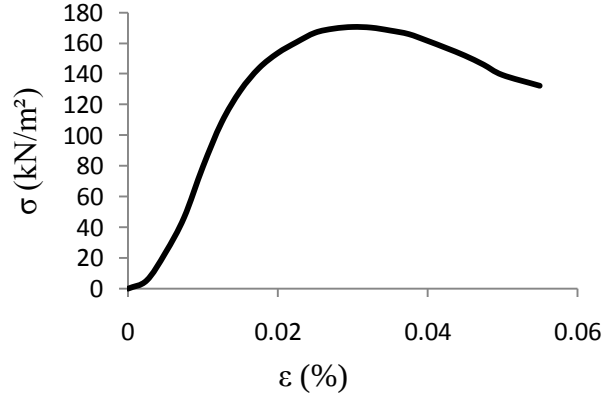
Tablo 4.11 Yalın Numune ile Yapılmış Deneyler ve Deney Sonuçları

No	Tarih	Açıklama	w_{opt} (%)	γ_{mak} (kN/m^3)	q_u (kN/m^2)
1	16.12.2010	Yalın CH	25	14.60	165.8
2	22.12.2010	Yalın CH	27	15.00	170.5
3	24.12.2010	Yalın CH	26	15.00	-
4	30.12.2010	Yalın CH	25	14.90	168.7
5	29.03.2011	Yalın CH	26	15.00	169.2

Referans kabul edilen yalın numune ile hazırlanmış deney setine ait 5 adet serbest basınç deneyi ve bu deneylere ait su muhtevaları Şekil 4.12’ de gösterilmiştir. Ayrıca maksimum serbest basınç mukavemeti gösteren deney numunesinin göçme durumu Şekil 4.13’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Yalın Numuneye Ait Referans Alınan Deney Seti



Şekil 4.13 Yalın numune $w = \% 27$, $q_u = 170.5 \text{ kN/m}^2$

4.3.2 Uçucu Kül Karışımları

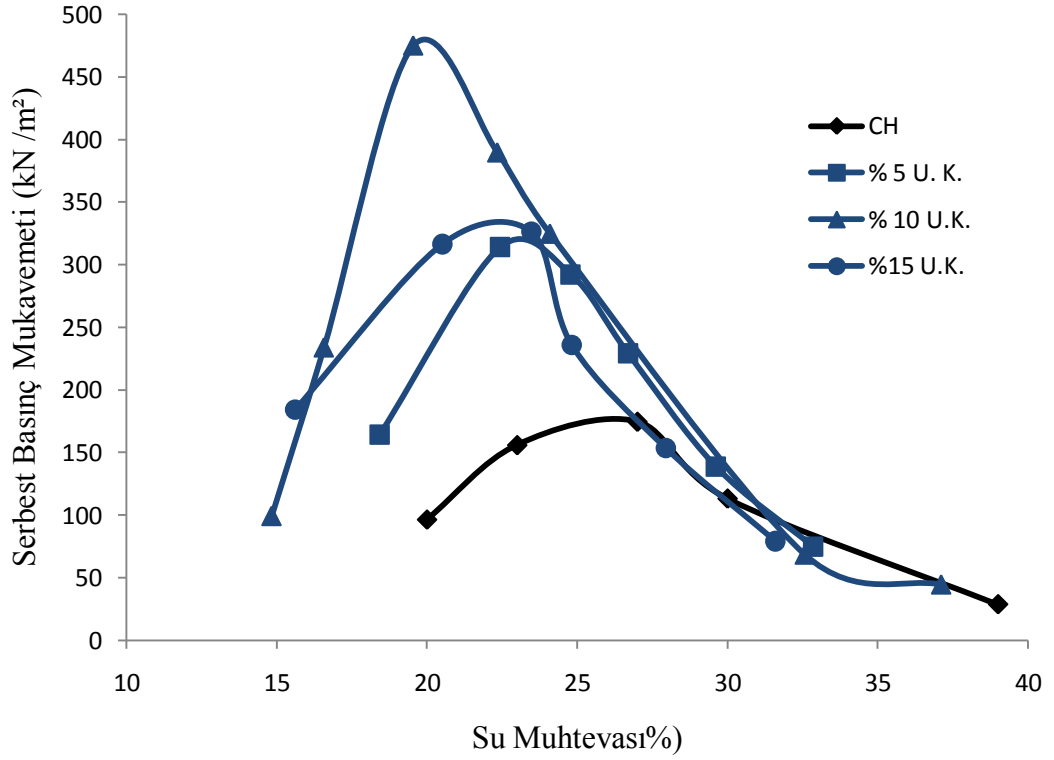
Uçucu külün yalın CH numunesi üzerindeki etkisi ve maksimum serbest basınç mukavemetini kazandıracak uçucu kül yüzdesinin belirlenmesi için toplam ağırlığın % 5, % 10 ve % 15' i kadar uçucu kül katılan 3 farklı deney seti hazırlanmıştır. Yalın numune ve uçucu kül ile hazırlanan tüm deney setleri, bu deney setlerine ait optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve maksimum serbest basınç mukavemetleri Tablo 4.12' de verilmiştir.

Maksimum serbest basınç mukavemeti değeri % 10 uçucu kül - % 90 kil barındıran deney setinden elde edilmiş olup bu değer, $475 \text{ kN} / \text{m}^2$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.12 Yalın Numune ve Uçucu Kül ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları

No	Tarih	Açıklama	w_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN / m^3)	q_u (kN / m^2)
1	13.01.2011	CH + % 10 Uçucu Kül	24	15.60	475
2	14.01.2011	CH + % 5 Uçucu Kül	24	15.60	314
3	14.01.2011	CH + % 15 Uçucu Kül	25	15.50	326

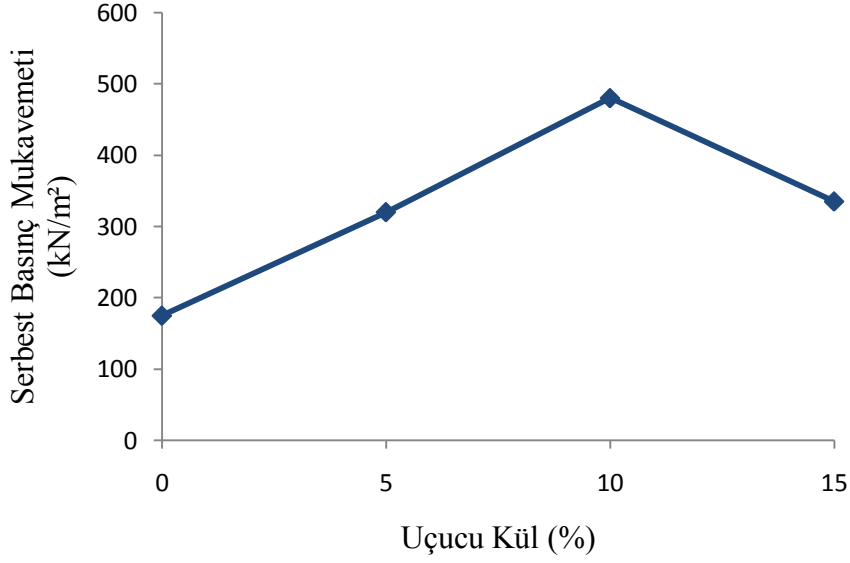
3 farklı, uçucu kül – kil karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemeti – su muhtevası dağılımı Şekil 4.14’ te gösterilmiştir. Deney verileri göz önüne alındığında % 10 uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımda, zeminin mukavemeti % 279 artmıştır.



Şekil 4.14 CH ve Uçucu Kül Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Grafiği

Maksimum serbest basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, toplam karışım içinde uçucu kül yüzdesinin mukavemet üzerindeki etkisi Şekil 4.15’ te görülmektedir.

Deneyler ile uçucu kül oranındaki artışın, numunelerin serbest basınç mukavemetleri üzerinde arttırıcı bir etki oluşturduğu, fakat bu oranın bir miktar sonunda numunenin serbest basınç mukavemetini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda belirlenen optimum uçucu kül oranı, toplam ağırlığın % 10’ u olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.15 Uçucu Kül Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi

4.3.3 Polipropilen Karışımları

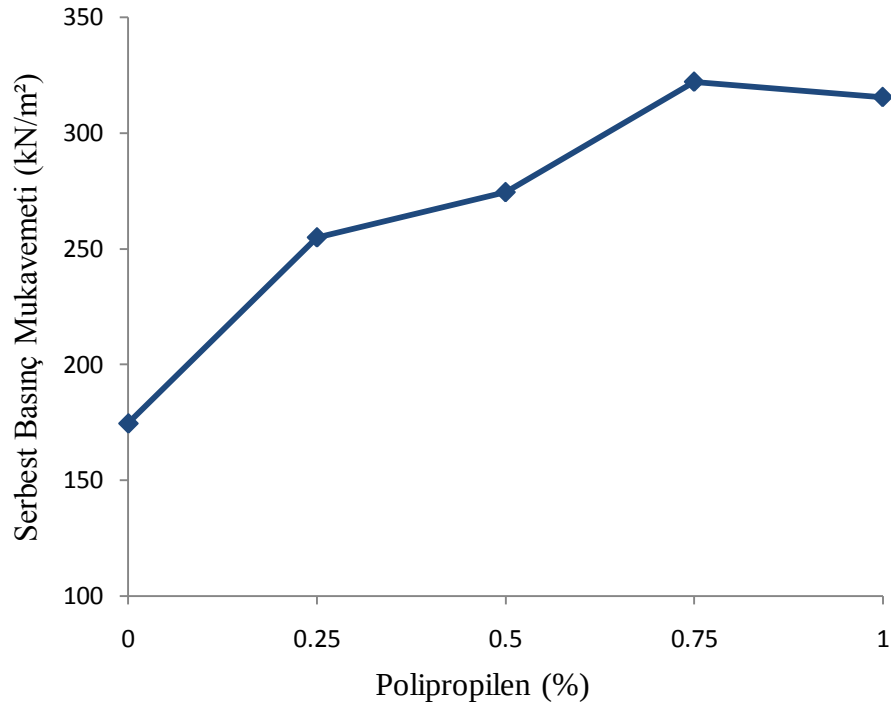
Polipropilen fiberlerin yalın CH numunesi üzerindeki etkisi ve maksimum serbest basınç mukavemetini kazandıracak polipropilen yüzdesinin belirlenmesi için toplam ağırlığın % 0.25, % 0.50, % 0.75, % 1.00 ve % 1.25' i kadar polipropilen ihtiva eden 5 farklı deney seti hazırlanması planlanmıştır, fakat % 1.25 polipropilen fiber zemin ile karıştırıldıktan sonra sıkıştırılamamıştır. Birim hacim ağırlığı çok düşük olan fiberlerin zemin ile karışımında hacmi iyice artmış ve kompaksiyon aletinde % 24 su muhtevasına kadar zemin ile karışamamıştır. Bu sebeple % 1.25 polipropilen karışımı deney programında çıkarılmış ve deneylere 4 set numune ile devam edilmiştir.

Yalın numune ve polipropilen ile hazırlanan tüm deney setleri, bu deney setlerine ait optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve maksimum serbest basınç mukavemetleri Tablo 4.13' te verilmiştir.

Maksimum serbest basınç mukavemeti değeri % 0.75 polipropilen - % 99.25 kil barındıran deney setinden elde edilmiş olup bu değer, 317 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Maksimum serbest basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, toplam karışım içinde uçucu kül yüzdesinin mukavemet üzerindeki etkisi Şekil 4.16' da görülmektedir.

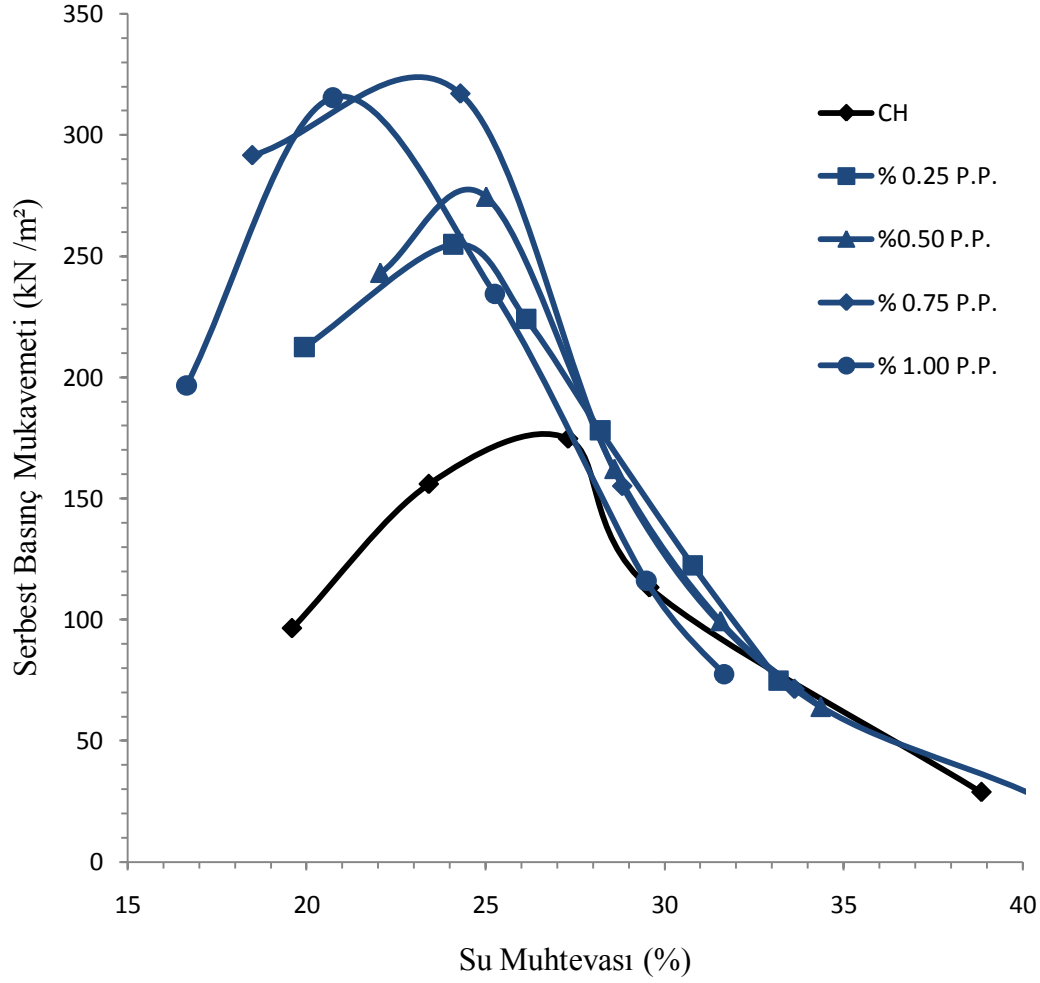
Tablo 4.13 Yalın Numune ve Polipropilen ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları

No	Tarih	Açıklama	w_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN / m^3)	q_u (kN / m^2)
1	03.03.2011	CH + % 0,25 Polipropilen	26	14.60	255
2	03.03.2011	CH + % 0,5 Polipropilen	25	14.50	275
3	04.03.2011	CH + % 0,75 Polipropilen	25	14.50	317
4	07.03.2011	CH + % 1 Polipropilen	26	14.60	315



Şekil 4.16 Polipropilen Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi

4 farklı, polipropilen – kil karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemeti – su muhtevası dağılımı Şekil 4.17’ de gösterilmiştir. Deney verileri göz önüne alındığında % 0.75 polipropilen kullanılarak hazırlanan karışımda, zeminin mukavemeti % 186 artmıştır.



Şekil 4.17 CH ve Polipropilen Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Grafiği

Yalın kil numunesi ile karıştırılan polipropilen fiberleri, zemin ile homojen karıştırma konusunda büyük sorunlar yaratsa da, ağ yapısından dolayı zemini sararak tabakalar arasında bütünlük sağlamaktadır (Şekil 4.18).

Polipropilenin zemin içindeki ağırlıkça yüzdesi arttıkça bu avantajlı durum olumsuz bir hal almaya başlamıştır. Polipropilen fiberler fazlaştıkça, arasına zemin danelerini almakta ve numune bütünlüğü bozularak yoğun polipropilen birikmiş yerlerde zayıf kesit oluştuğu görülmektedir.



a) %1.00 PP + CH

b) %0.75 PP + CH

c) %0.25 PP + CH

Şekil 4.18 Farklı Oranlarda CH ve Polipropilen Karışımlarına Ait Resimler

4.4.4 Kopolimer Karışımları

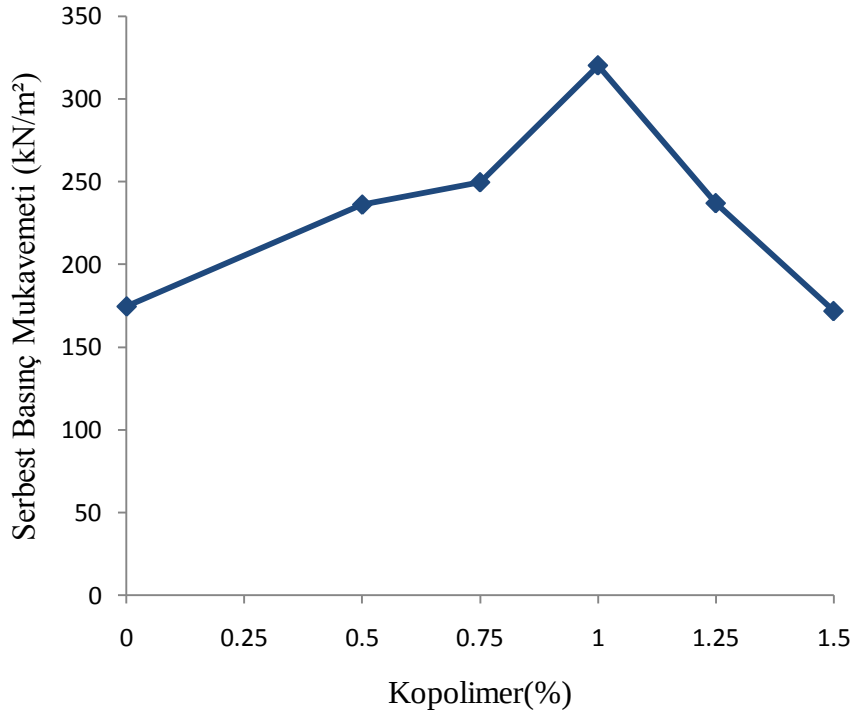
Kopolimer fiberlerin yalın CH numunesi üzerindeki etkisi ve maksimum serbest basınç mukavemetini kazandıracak polipropilen yüzdesinin belirlenmesi için toplam ağırlığın % 0.50, % 0.75, % 1.00, % 1.25 ve % 1.50' si kadar kopolimer ihtiva eden 5 farklı deney seti hazırlanmıştır. Yalın numune ve kopolimer fiberler ile hazırlanan tüm deney setleri, bu deney setlerine ait optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve maksimum serbest basınç mukavemetleri Tablo 4.14' te verilmiştir.

Tablo 4.14 Yalın Numune ve Kopolimer ile Hazırlanmış Deneyler ve Sonuçları

No	Tarih	Açıklama	w_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN / m^3)	q_u (kN / m^2)
1	03.01.2011	CH + % 0.5 Kopolimer	26	15.20	236
2	03.01.2011	CH + % 1.00 Kopolimer	26	15.00	320
3	05.01.2011	CH + %1.50 Kopolimer	26	14.80	172
4	22.02.2011	CH + % 0.75 Kopolimer	25	15.10	250
5	22.02.2011	CH + % 1.25 Kopolimer	26	15.00	237

Maksimum serbest basınç mukavemeti değeri % 1.00 kopolimer - % 99.00 kil barındıran deney setinden elde edilmiş olup bu değer, 320 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

Maksimum serbest basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, toplam karışım içinde uçucu kül yüzdesinin mukavemet üzerindeki etkisi Şekil 4.19’ da görülmektedir.

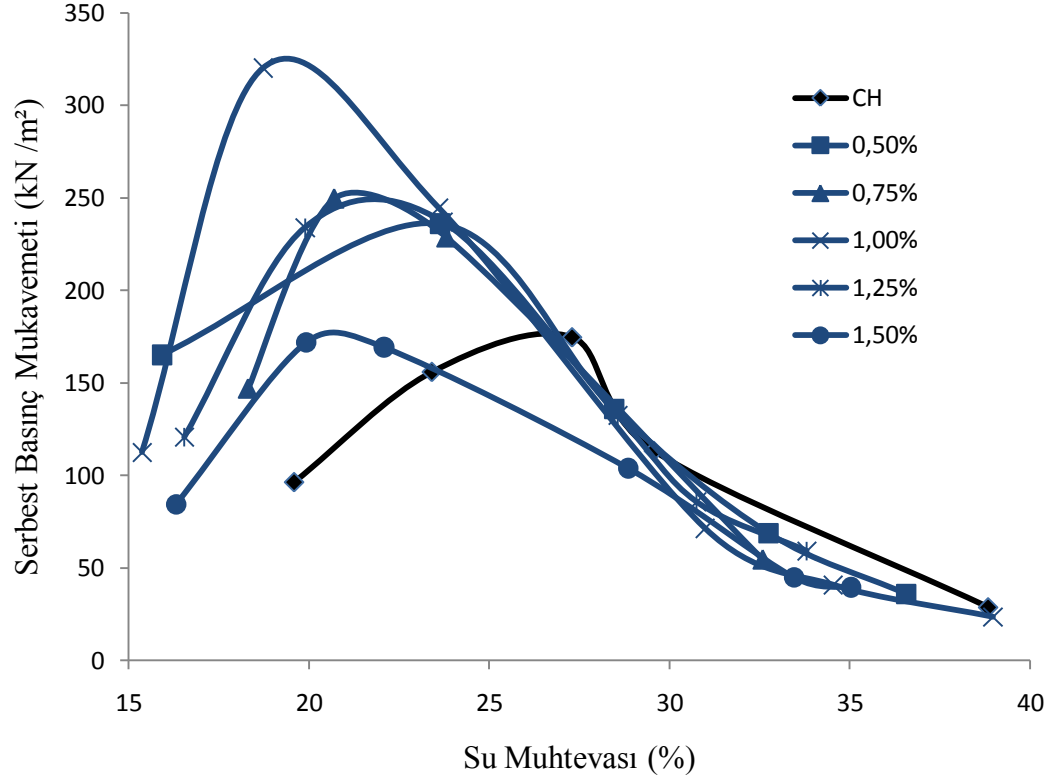


Şekil 4.19 Kopolimer Oranının Mukavemet Üzerindeki Etkisi

5 farklı, kopolimer – kil karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemeti – su muhtevası dağılımı Şekil 4.20’ de gösterilmiştir. Deney verileri göz önüne alındığında % 1.00kopolimer fiber kullanılarak hazırlanan karışımda, zeminin mukavemeti % 188 artmıştır.

Yalın kil numunesi ile karıştırılan kopolimer fiberler, rahatlıkla zemin ile homojen olarak karışabilmektedirler. Serbest basınç deneyleri göstermiştir ki, kopolimer – kil karışımının kullanıldığı deneylerde, maksimum mukavemeti, maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahip numune yerine, su muhtevası 1 kademe daha düşük olan numuneler vermiştir. Ayrıca kopolimer – kil karışımlarında karşılaşılan en büyük problem, tabakalar arasında zayıf kesit oluşumudur (Şekil 4.21). Numunenin

hazırlanıldığı kalıbın yüzey alanı küçük olduğundan, 3 tabaka halinde hazırlanan numunelerde, düşük su muhtevalarında zayıf kesit oluşumu yaşanmıştır.



Şekil 4.20 CH ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı



a) %1.25 Kopolimer + CH b) %1.00Kopolimer + CH c) %0.50 Kopolimer + CH

Şekil 4.21 Farklı Oranlarda CH ve Kopolimer Karışımlarına Ait Resimler

4.4.5 Uçucu Kül – Polipropilen Karışımları

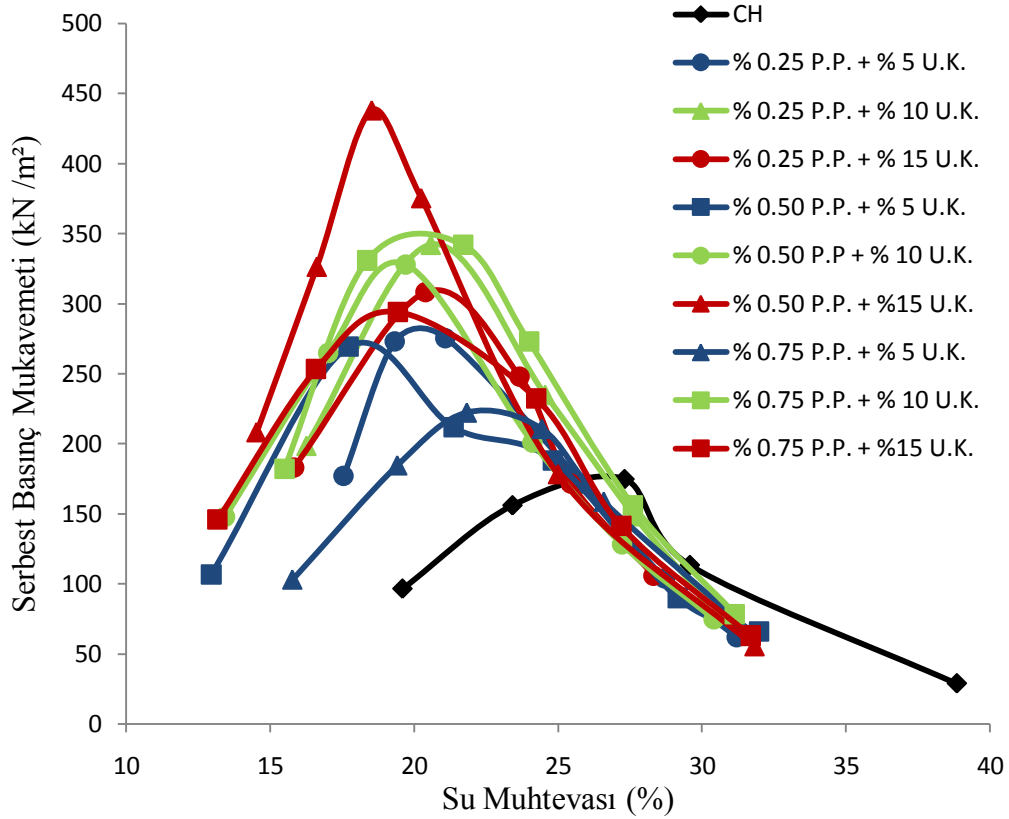
Uçucu kül ve polipropilen fiberler ile ayrı ayrı yalın numune üzerinde deneyler yapılmış ve bu malzemelerin ağırlıkça farklı yüzdelerinin, yalın zemine olan etkileri belirlenmiştir. Yalın numune ile karıştırılacak uçucu kül – polipropilen fiber oranları için 9 farklı karışım belirlenmiş ve detaylı açıklaması, bu karışımlar sonucunda belirlenen optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve maksimum serbest basınç mukavemetleri Tablo 4.15’ de verilmiştir. Üç farklı uçucu kül oranı için (% 5, % 10, % 15) üç farklı polipropilen oranı (% 0.25, % 0.50, % 0.75) seçilmiştir.

9 farklı orana sahip uçucu kül – polipropilen – kil karışımının kompaksiyon deneyleri sonucunda optimum su muhtevaları % 24 - % 26 arasında dağılırken, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise $14.90 \text{ kN} / \text{m}^3$ - $15.10 \text{ kN} / \text{m}^3$ arasında öbekleşmiştir. Kompaksiyon deneyleri sonucunda 9 farklı deney setinin oranlarının, numunelerin sıkışmasına etkisinin olmadığı görülmüştür.

Tablo 4.15 CH, Uçucu Kül ve Polipropilen ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları

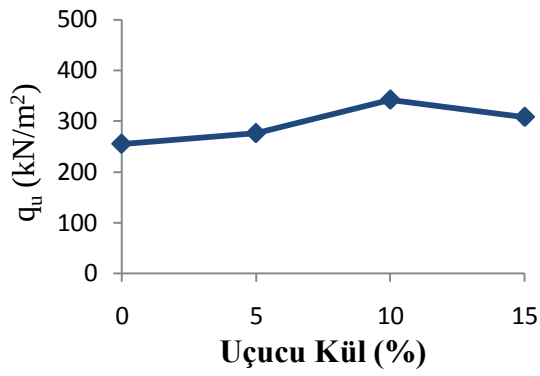
No	Tarih	Açıklama	w_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN / m^3)	q_u (kN / m^2)
1	05.04.2011	CH + % 0.5 PP + % 5 UK	25	15.00	269
2	05.04.2011	CH + % 0.5 PP + % 10 UK	24	15.00	328
3	07.04.2011	CH + % 0.5 PP + % 15 UK	25	15.00	438
4	07.04.2011	CH + % 0.75 PP + % 5 UK	26	15.10	222
5	08.04.2011	CH + % 0.75 PP + % 10 UK	25	15.10	342
6	08.04.2011	CH + % 0.75 PP + % UK	25	15.00	394
7	08.04.2011	CH + % 0.25 PP + % 5 UK	26	14.90	276
8	08.04.2011	CH + % 0.25 PP + % 10 UK	25	15.10	342
9	08.04.2011	CH + % 0.25 PP + % 15 UK	25	15.10	308

9 farklı, uçucu kül – polipropilen – kil karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemeti – su muhtevası dağılımı Şekil 4.22’ de gösterilmiştir. Deney verileri göz önüne alındığında %0.50 polipropilen fiber ve % 15 uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımda, zeminin mukavemeti % 258 artmıştır.

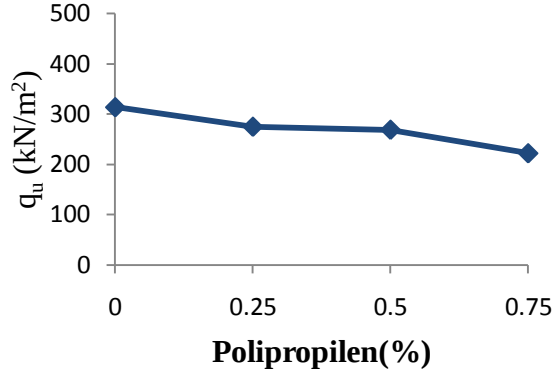


Şekil 4.22 CH, Uçucu kül ve Polipropilen Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı

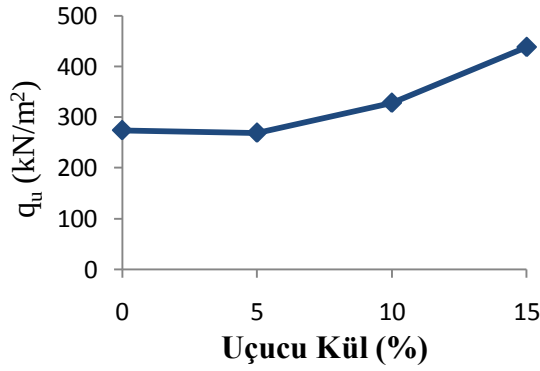
Maksimum serbest basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, toplam karışım içinde uçucu kül ve polipropilen yüzdesinin mukavemet üzerindeki etkisi hakkında 6 farklı yaklaşım yapılabilir (Şekil 4.23). Genellikle görülmektedir ki, uçucu kül – kil karışımlarına polipropilenin eklenmesi, serbest basınç mukavemetinde azalma meydana getirmektedir. Bunun sebebi olarak, zaten uçucu kül katkısıyla gevrekleşen zemin numunesi, polipropilen ile gerekli kaynaşmayı göstermemiş olması beklenebilir. Ayrıca farklı uçucu kül oranları içinse polipropilen katkısının çok az olduğu görülmektedir.



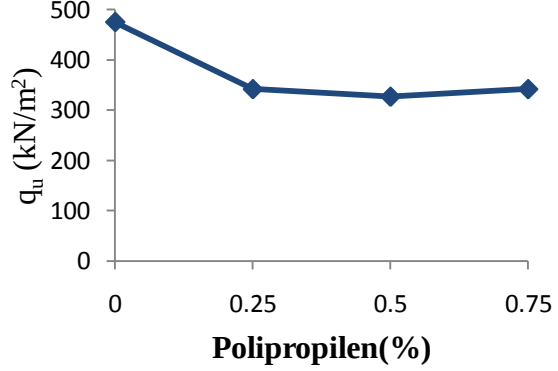
a) CH + %0.25 Polipropilenin Uçucu Kül Oranı ile Değişimi



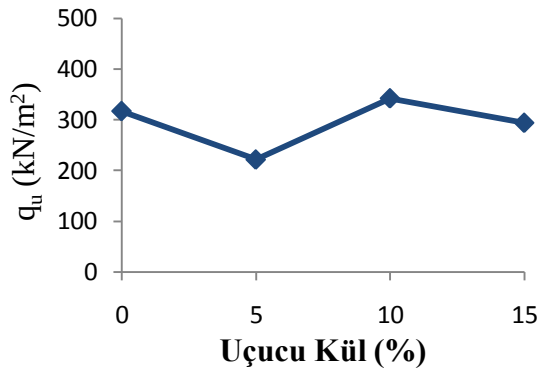
b) CH + %5 Uçucu Külün Polipropilen Oranı ile Değişimi



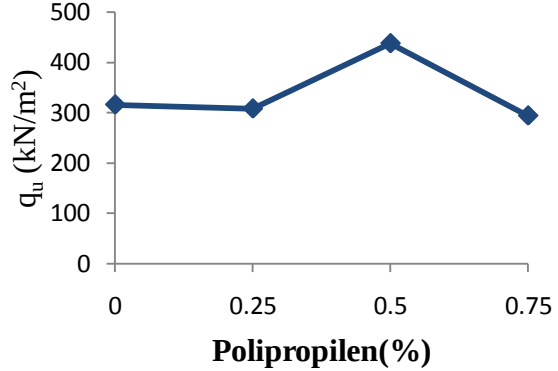
c) CH + %0.50 Polipropilenin Uçucu Kül Oranı ile Değişimi



d) CH + %10 Uçucu Külün Polipropilen Oranı ile Değişimi



e) CH + %0.75 Polipropilenin Uçucu Kül Oranı ile Değişimi



f) CH + %15 Uçucu Külün Polipropilen Oranı ile Değişimi

Şekil 4.23 CH, Uçucu Kül ve Polipropilen Karışımlarına Ait Mukavemet Değişimleri

Yalın kil numunesi ile karıştırılan polipropilen fiberleri gibi, uçucu kül – polipropilen –kil karışımlarında da homojen karıştırma konusunda büyük sorunlar yaratmıştır

fakat, polipropilen ağ yapısından dolayı zemini sararak tabakalar arasında bütünlük sağlamıştır (Şekil 4.24). Polipropilenin zemin içindeki ağırlıkça yüzdesi arttıkça bu avantajlı durum olumsuz bir hal almaya başlamıştır, uçucu kül katkısıyla daha da gevrekleşen malzemede düşük su muhtevalarında kopukluklar yaşanmıştır.



a) %0.25 Polipropilen + %15 Uçucu kül b) %0.50 Polipropilen + %10 Uçucu Kül c) %0.75 Polipropilen + %5 Uçucu Kül

Şekil 4.24 Farklı Oranlarda CH, Uçucu Kül ve Polipropilen Karışımlarına Ait Resimler

4.4.6 Uçucu Kül – Kopolimer Karışımları

Uçucu kül ve kopolimer fiberler ile ayrı ayrı yalın numune üzerinde deneyler yapılmış ve bu malzemelerin ağırlıkça farklı yüzdelерinin, yalın zemine olan etkileri belirlenmiştir. Yalın numune ile karıştırılacak uçucu kül – kopolimer fiber oranları için 9 farklı karışım belirlenmiş ve detaylı açıklaması, bu karışımlar sonucunda belirlenen optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve maksimum serbest basınç mukavemetleri Tablo 4.16’ da verilmiştir. Üç farklı uçucu kül oranı için (% 5, % 10, % 15) üç farklı kopolimer oranı (% 0.75, % 1.00, % 1.25) seçilmiştir.

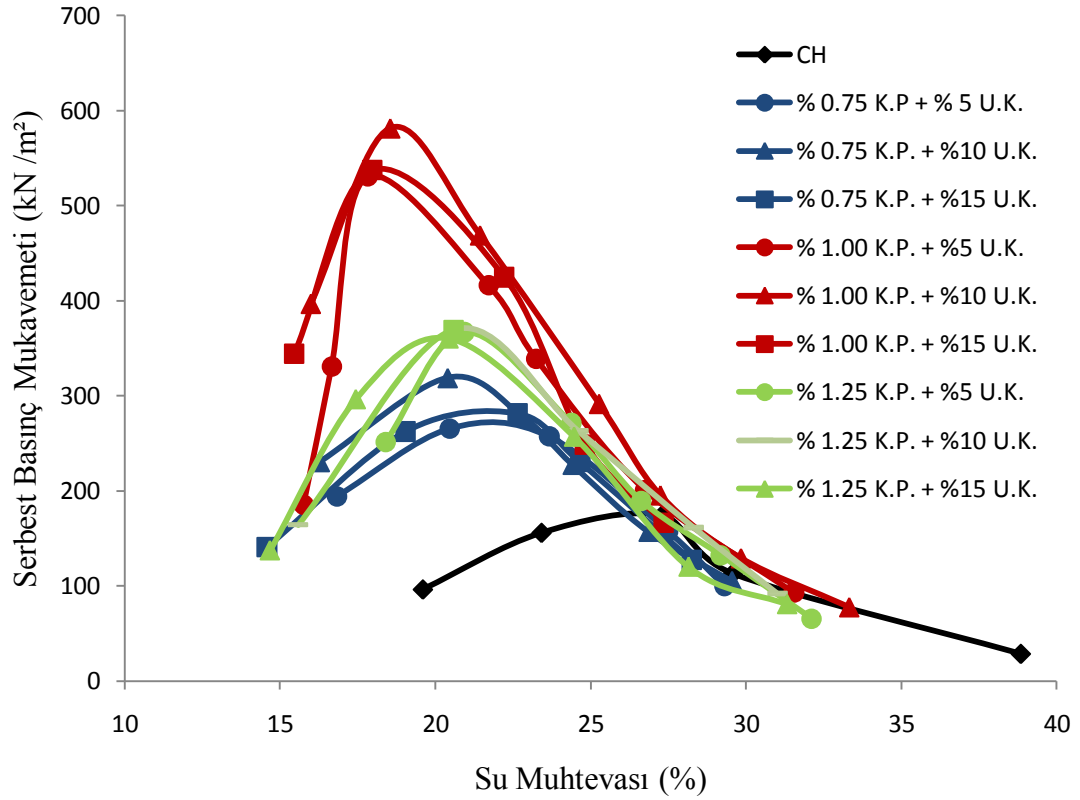
9 farklı orana sahip uçucu kül – kopolimer – kil karışımının kompaksiyon deneyleri sonucunda optimum su muhtevaları %24 - %25 arasında dağılırken, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise $14.90 \text{ kN} / \text{m}^3$ - $15.20 \text{ kN} / \text{m}^3$ arasında öbekleşmiştir.

Kompaksiyon deneyleri sonucunda 9 farklı deney setinin oranlarının, numunelerin sıkışmasına etkisinin olmadığı görülmüştür.

Tablo 4.16 CH, Uçucu Kül ve Kopolimer ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları

No	Tarih	Açıklama	W_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN / m^3)	q_u (kN / m^2)
1	07.03.2011	CH + % 0.75 Kopolimer + % 5 Uçucu Kül	24	15.10	266
2	08.03.2011	CH + % 0.75 Kopolimer + % 10 Uçucu Kül	24	15.20	319
3	08.03.2011	CH + % 0.75 Kopolimer + % 15 Uçucu Kül	24	15.10	282
4	09.03.2011	CH + % 1.00 Kopolimer + % 5 Uçucu Kül	24	15.00	531
5	09.03.2011	CH + % 1.00 Kopolimer + % 10 Uçucu Kül	25	14.90	581
6	22.03.20011	CH + % 1.00 Kopolimer + % 15 Uçucu Kül	25	14.90	537
7	22.03.20011	CH + % 1.25 Kopolimer + % 5 Uçucu Kül	25	14.90	367
8	25.03.2011	CH + % 1.25 Kopolimer + % 10 Uçucu Kül	24	14.90	369
9	25.03.2011	CH + % 1.25 Kopolimer + % 15 Uçucu Kül	24	14.90	361

9 farklı, uçucu kül – kopolimer – kil karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemeti – su muhtevası dağılımı Şekil 4.25’ te gösterilmiştir. Deney verileri göz önüne alındığında %1.00 kopolimer fiber ve %10 uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımda, zeminin mukavemeti % 342 artmıştır.

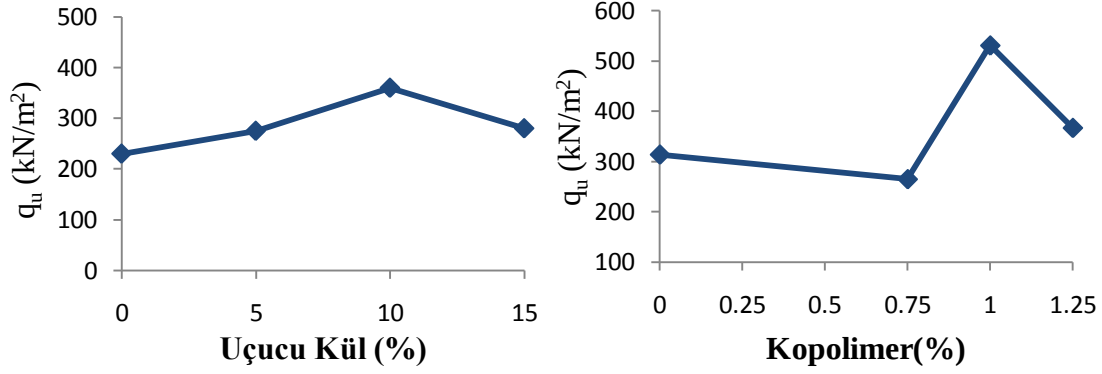


Şekil 4.25 CH, Uçucu Kül ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı

Maksimum serbest basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, toplam karışım içinde uçucu kül ve kopolimer yüzdesinin mukavemet üzerindeki etkisi hakkında 6 farklı yaklaşım yapılabilir. Farklı kopolimer yüzdeleri kullanılan karışımlar için uçucu kül katkısı, serbest basınç mukavemetinde belirgin artışlar yaratmıştır, fakat farklı uçucu kül yüzdeleri için kopolimer miktarındaki artış daha tutarlı ve tekrar eden şekilde gerçekleşmiştir. % 5, % 10 ve % 15 uçucu kül katkılı numunelerdeki kopolimer miktarı, 3 karışım içinde % 1.00' de maksimum sonucu verdiği Şekil 4.26' da açıkça görülebilmektedir.

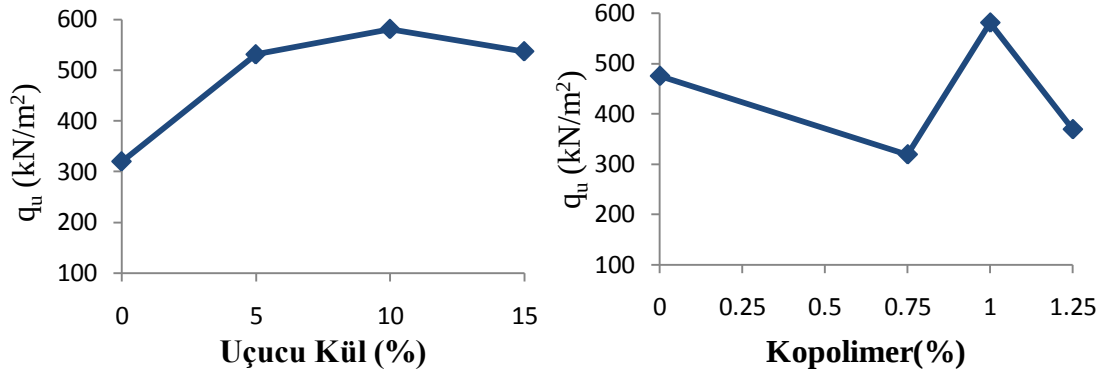
Yalın kil numunesi ile karıştırılan kopolimerfiberler, rahatlıkla zemin ile homojen olarak karışabilmektedirler.Serbest basınç deneyleri göstermiştir ki,kopolimer – kil karışımında olduğu gibiuçucu kül – kopolimer – kil karışımlarında da % 1.00 kopolimer ve % 10 uçucu kül kullanımı sonucu maksimum serbest basınç mukavemetleri elde edilmiştir.Ayrıca kopolimer – kil karışımlarında karşılaşılan

tabakalar arasında zayıf kesit oluşumu, uçucu kül – kopolimer – kil karışımlarında da yaşanmıştır (Şekil 4.27).



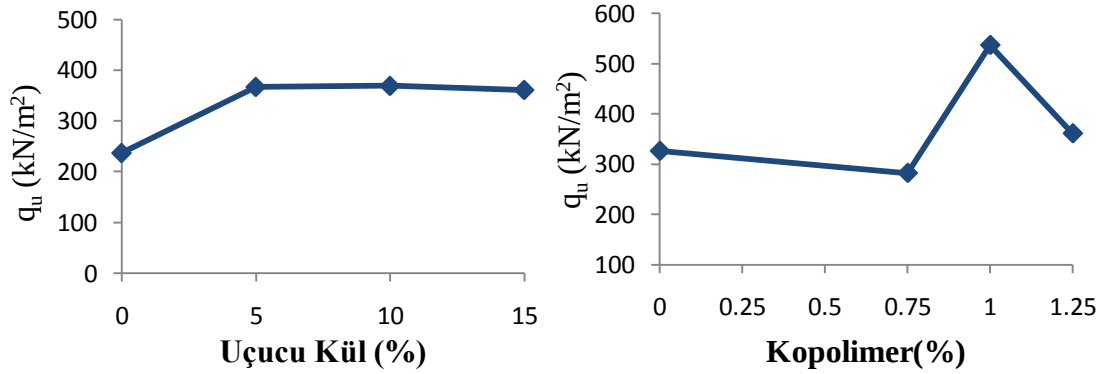
a) CH + %0.75 Kopolimerin Uçucu Kül Oranı ile Değişimi

b) CH + %5 Uçucu Külün Kopolimer Oranı ile Değişimi



c) CH + %1.00 Kopolimerin Uçucu Kül Oranı ile Değişimi

d) CH + %10 Uçucu Külün Kopolimer Oranı ile Değişimi



e) CH + %1.25 Kopolimerin Uçucu Kül Oranı ile Değişimi

f) CH + %15 Uçucu Külün Kopolimer Oranı ile Değişimi

Şekil 4.26 CH, Uçucu Kül ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet Değişimleri



a) %0.75 Kopolimer +
%15 Uçucu kül

b) %1.25Kopolimer +
%10 Uçucu Kül

c) %1.00Kopolimer + %5
Uçucu Kül

Şekil 4.27 Farklı Oranlarda CH, Uçucu Kül ve Kopolimer Karışımlarına Ait Resimler

4.4.7 Polipropilen – Kopolimer Karışımları

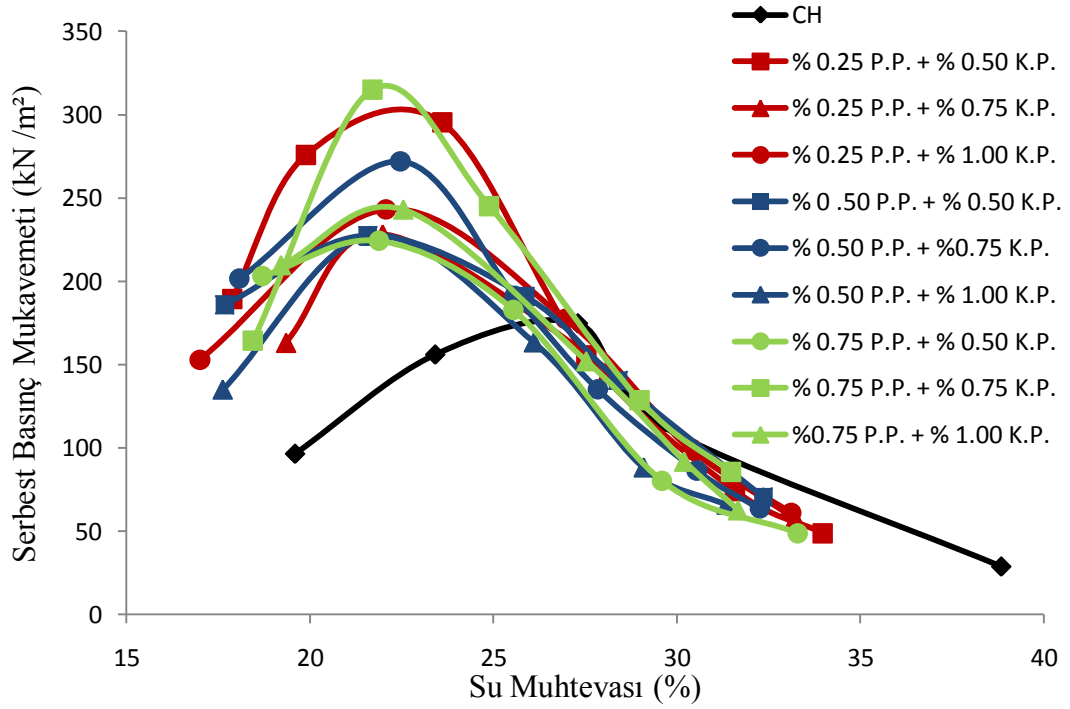
Polipropilen ve kopolimer fiberler ile ayrı ayrı yalın numune üzerinde deneyler yapılmış ve bu malzemelerin ağırlıkça farklı yüzdelerinin, yalın zemine olan etkileri belirlenmiştir. Yalın numune ile karıştırılacak polipropilen – kopolimer fiber oranları için 9 farklı karışım belirlenmiş ve detaylı açıklaması, bu karışımlar sonucunda belirlenen optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ve maksimum serbest basınç mukavemetleri Tablo 4.17’ de verilmiştir. Üç farklı polipropilen oranı için (% 0.25, % 0.50, % 0.75) üç farklı kopolimer oranı (% 0.50, % 0.75, % 1.00) seçilmiştir.

9 farklı orana sahip polipropilen – kopolimer – kil karışımının kompaksiyon deneyleri sonucunda optimum su muhtevaları % 25 - % 27 arasında dağılırken, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise $14.70 \text{ kN} / \text{m}^3$ - $15.10 \text{ kN} / \text{m}^3$ arasında öbekleşmiştir. Kompaksiyon deneyleri sonucunda 9 farklı deney setinin oranlarının, numunelerin sıkışmasına etkisinin olmadığı görülmüştür.

Tablo 4.17 CH, Polipropilen ve Kopolimer ile Hazırlanmış Deneyler ve Deney Sonuçları

No	Tarih	Açıklama	W_{opt} (%)	γ_{kmak} (kN / m ³)	q_u (kN / m ²)
1	12.04.2011	CH + % 0.25 Polipropilen + %0.50 Kopolimer	25	15.10	296
2	12.04.2011	CH + % 0.25 Polipropilen + %0.75 Kopolimer	26	15.10	228
3	13.04.2011	CH + % 0.25 Polipropilen + %1.00 Kopolimer	25	15.10	243
4	13.04.2011	CH + % 0.50 Polipropilen + %0.50 Kopolimer	25	14.80	274
5	14.04.2011	CH + % 0.50 Polipropilen + %0.75 Kopolimer	25	14.80	272
6	14.04.2011	CH + % 0.50 Polipropilen + %1.00 Kopolimer	26	14.80	227
7	14.04.2011	CH + % 0.75 Polipropilen + %0.50 Kopolimer	27	14.70	224
8	15.04.2011	CH + % 0.75 Polipropilen + %0.75 Kopolimer	25	14.80	315
9	15.04.2011	CH + % 0.75 Polipropilen + %1.00 Kopolimer	26	14.70	243

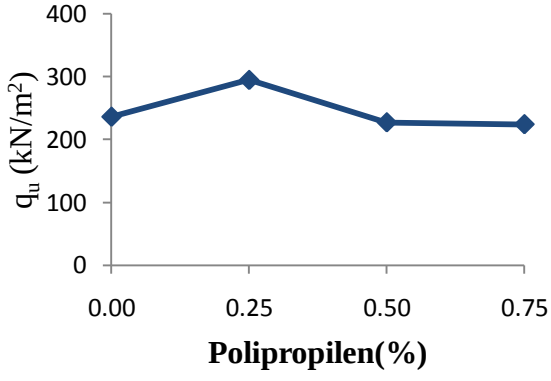
9 farklı, polipropilen – kopolimer – kil karışımı üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemeti – su muhtevası dağılımı Şekil 4.28’ de gösterilmiştir. Deney verileri göz önüne alındığında % 0.75 kopolimer fiber ve % 0.75 polipropilen kullanılarak hazırlanan karışımda, zeminin mukavemeti % 185 artmıştır.



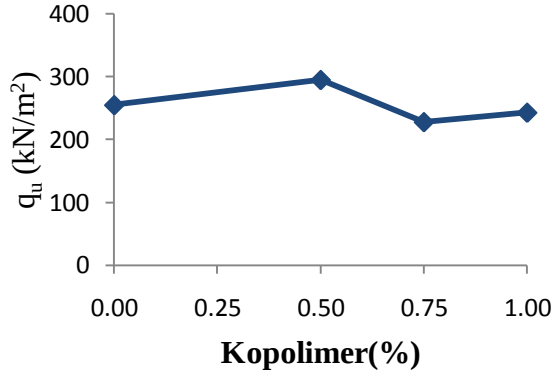
Şekil 4.28 CH, Polipropilen ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet – Su Muhtevası Dağılımı

Maksimum serbest basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, toplam karışım içinde polipropilen ve kopolimer yüzdesinin mukavemet üzerindeki etkisi hakkında 6 farklı yaklaşım yapılabilir (Şekil 4.29).

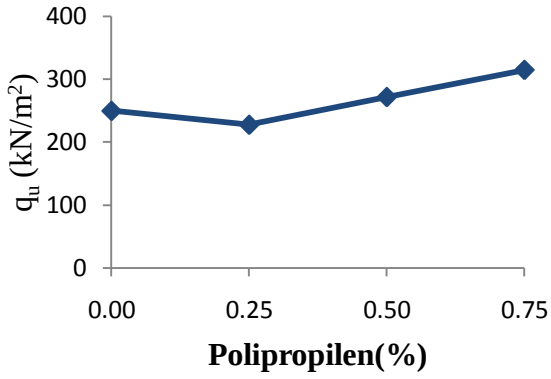
Yalın kil numunesi ile karıştırılan polipropilen fiberlerde ki gibi, polipropilen – kopolimer – kil karışımlarında da homojen karıştırma konusunda büyük sorunlar yaratmıştır fakat, polipropilen ağ yapısından dolayı zemini sararak tabakalar arasında bütünlük sağlamıştır. Kullanılan kil – polipropilen- kopolimer karışımı, malzemelerin ayrı kullanımına göre genellikle daha düşük serbest basınç mukavemeti sonuçları vermiştir. Bunun sebebinin zemine katılan polimer malzemenin oranının yüksek olması ve numune içinde farklı süreksizlikler yaratarak dayanımı düşürmesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca farklı yüzdelerdeki karışımlar, serbest basınç mukavemetinde dalgalanmalar yaratmış ve tutarlı bir sonuç alınamadığından, polipropilen ve kopolimerin birbiri üzerindeki etkisi hakkında bir yorum yapılamamıştır (Şekil 4.30).



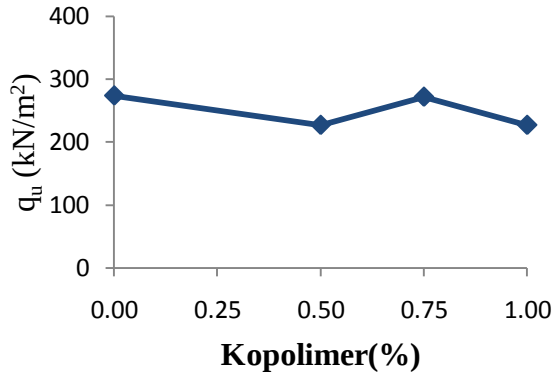
a) CH + %0.50 Kopolimerin
Polipropilen Oranı ile Değişimi



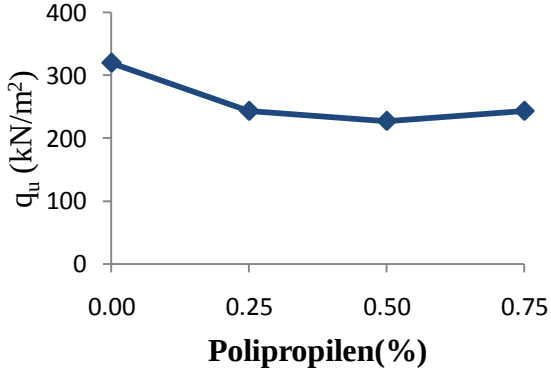
b) CH + %0.25 Polipropilenin
Kopolimer Oranı ile Değişimi



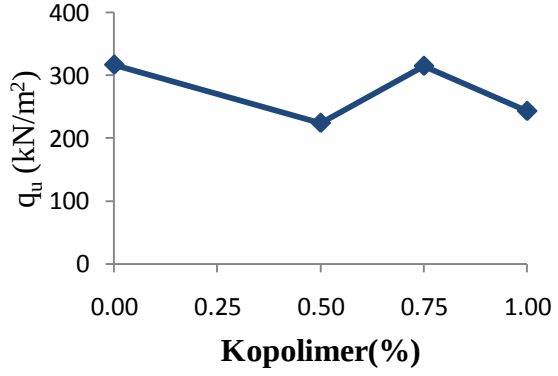
c) CH + %0.75 Kopolimerin
Polipropilen Oranı ile Değişimi



d) CH + %0.50 Polipropilenin
Kopolimer Oranı ile Değişimi



e) CH + %1.00 Kopolimerin
Polipropilen Oranı ile Değişimi



f) CH + %0.75 Polipropilenin
Kopolimer Oranı ile Değişimi

Şekil 4.29 CH, Polipropilen ve Kopolimer Karışımlarına Ait Mukavemet Değişimleri



*a) %1.00 Kopolimer +
%0.75 Polipropilen*



*b) %0.75 Kopolimer +
%0.75 Polipropilen*



*c) %1.00 Kopolimer +
%0.50 Polipropilen*

Şekil 4.30 Farklı Oranlarda CH, Polipropilen ve Kopolimer Karışımlarına Ait Resimler

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yumuşak zeminler üzerine üst yapı inşa edilirken karşılaşılan sorunlar dünyanın birçok bölgesinde olduğu gibi Türkiye’ de de en yaygın problemlerden bir tanesidir. Yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en genel yöntemler, çalışmanın ilk bölümlerinde geniş olarak anlatılmıştır. Bu anlatılan yöntemlerin birçoğu yüksek maliyeti sebebiyle, zayıf zeminlerin stabilizasyonu konusunda alternatif yöntemler belirlenmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yapılan çalışmada; uçucu kül ile polipropilen ve kopolimer gibi polimerlerin yüzeysel zemin stabilizasyonunda kullanılması ve bu malzemelerin yüzeysel dolguların mukavemetine etkileri incelenmiştir.

Araştırmanın ikinci kısmında zemin stabilizasyonun tanımı ve amaçlarıyla alınmıştır. Ardından yüzeysel zemin stabilizasyonun dünya üzerinde yaygın olarak uygulanan yöntemler, bu yöntemlerin faydaları ve dezavantajlarına değinilmiştir.

Araştırmanın üçüncü kısmı olan yüzeysel zemin stabilizasyonunda alternatif yöntemlerin kullanımı irdelenmiştir. Kireç, çimento... v.b. gibi inşaat mühendisliğinde yapı malzemesi olarak sıkça kullanılan malzemelerin dışında, uçucu kül, metal cürufu, kullanılmış lastikler, yapay polimerler ve pirinç kabuğu gibi yeni malzemeler, yüzeysel zemin stabilizasyonu kapsamında yeni yöntemler olarak incelenmiştir. Bu malzemelerin kimyasal analizleri ele alınarak, yüzeysel zemin stabilizasyonu için kullanım şekilleri anlatılmıştır. Ayrıca sanayi atığı olan ve potansiyel çevre kirliliği problemi oluşturabilecek, uçucu kül, metal cürufu, kullanılmış lastikler ve pirinç kabuğu külünün yüzeysel zemin stabilizasyonunda kullanılarak, endüstride faydalı olarak değerlendirilmesi vurgulanmıştır.

Araştırmanın son kısmında, uçucu kül, polipropilen fiber ve kopolimer fiber gibi alternatif malzemeler ile zemin stabilizasyonunun laboratuvar deneyleri ile değerlendirmesi yapılmıştır. Bir yüksek plastisiteli kil (CH) üzerinde yapılan, minyatür Harvard kompaksiyon deneyi ve 7 günlük kür süresinden sonra gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonrası zeminin, sıkışabilirlik ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvar deneyleri kapsamında önce yalın numune

ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 oranlarında C sınıfı uçucu kül ile karıştırılmıştır. Ardından yalın numune ile ağırlıkça % 0.25, % 0.50, % 0.75 ve % 1.00 oranlarında ağ yapılı polipropilen fiberler karıştırılmıştır. En son yalın malzeme ile ağırlıkça % 0.50, % 0.75, % 1.00, % 1.25 ve % 1.50 oranları ile karıştırılan bir diğer alternatif malzeme ise kopolimer fiberler olmuştur.

Yalın numune ile ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılan uçucu kül, polipropilen ve kopolimerin ardından, bu 3 malzemenin ikili birleşimleri değişik oranlarda yalın numune ile karıştırılmış ve tüm bu karışımlar üzerinde kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Zemine eklenen bütün malzemeler ve onların farklı oranlarındaki karışımları ile gerçekleştirilen kompaksiyon deneyleri sonucunda, eklenen malzemelerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerinde çok ufak etkileri olduğu belirlenmiştir. Zemine katılan maddeler ve oranlarının değişmesi, zeminin sıkışabilirliğine her hangi bir katkıda bulunmamaktadır. Yalın zeminin optimum su muhtevası % 27, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $15.00 \text{ kN} / \text{m}^3$ iken, tüm karışımlar için optimum su muhtevası % 24 - %27 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı $14.70 - 15.60 \text{ kN} / \text{m}^3$ aralığında değişmiştir. Karışımların eklenmesi zeminin optimum su muhtevasını azaltmıştır. Uçucu külün, zemin ile karıştırılması, maksimum birim hacim ağırlığı arttırırken, polipropilen ve kopolimer gibi birim hacim ağırlığı düşük malzemelerin eklenmesi de maksimum kuru birim hacim ağırlığı azaltmıştır.
- Uçucu kül – zemin karışımları üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerine göre, en büyük serbest basınç değerini ağırlıkça % 10 uçucu kül katılan karışım vermiştir. Ağırlıkça %10 uçucu kül eklenen karışımın serbest basınç mukavemeti değeri $475 \text{ kN} / \text{m}^2$ olarak belirlenmiştir. Bu karışımın serbest basınç değeri, yalın numunenin serbest basınç değerini göz önüne alındığında % 279 artmıştır. Ayrıca uçucu kül katkısı, zemin ile meydana gelen puzolonik reaksiyondan ötürü zemini daha gevrekleştirse de, mukavemeti arttırmıştır.

- Polipropilen – zemin karışımları üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerine göre, maksimum serbest basınç değerini ağırlıkça % 0.75 polipropilen katılan karışım vermiştir. Ağırlıkça % 0.75 polipropilen eklenen karışımın serbest basınç mukavemeti değeri 317 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Bu karışımın serbest basınç değeri, yalın numunenin serbest basınç değerini göz önüne alındığında % 186 artmıştır. Yalın kil numunesi ile karıştırılan polipropilen fiberleri, yumuşak dokusu ve düşük birim hacim ağırlığı nedeniyle, zemin ile homojen karıştırma konusunda büyük sorunlar yaratsa da, ağ yapısından dolayı zemini sararak tabakalar arasında bütünlük sağlamıştır.
- Kopolimer – zemin karışımları üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerine göre, maksimum serbest basınç değerini ağırlıkça % 1.00 kopolimer katılan karışım vermiştir. Ağırlıkça % 1.00 kopolimer eklenen karışımın serbest basınç mukavemeti değeri 320 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Bu karışımın serbest basınç değeri, yalın numunenin serbest basınç değerini göz önüne alındığında % 188 artmıştır. Kopolimer – kil karışımlarında karşılaşılan en büyük problem, tabakalar arasında zayıf kesit oluşumudur. Numunenin hazırlandığı kalıbın yüzey alanı küçük olduğundan, 3 tabaka halinde hazırlanan numunelerde, düşük su muhtevalarında zayıf kesit oluşumu yaşanmıştır. Ayrıca kopolimer fiberler, sert yapısı nedeniyle zemin içinde donatı görevi görüp, üstlendiği gerilmeleri yüzey sürtünmesi ile zemine dağıtabilmesi, kullanıldığı karışımların mukavemetini arttırmıştır.
- Uçucu kül - polipropilen – zemin karışımları üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerine göre, maksimum serbest basınç değerini ağırlıkça % 0.50 polipropilen fiber ve % 15 uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışım vermiştir. Ağırlıkça % 0.50 polipropilen ve % 15 uçucu kül eklenen karışımın serbest basınç mukavemeti değeri 438 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Bu karışımın serbest basınç değeri, yalın numunenin serbest basınç değerini göz önüne alındığında % 258 artmıştır. Bu karışım grubunda uçucu kül kullanımı, zeminin mukavemeti üzerinde baskın rol oynamış, polipropilen kullanımı göz önüne alındığında da en iyi sonuçlar % 0.50 polipropilen kullanılan karışımlardan elde edilmiştir. Deneyler sonucunda polipropilen kullanımının

uçucu kül ile desteklenmesi serbest basınç mukavemetinin artmasına sebep olmuştur.

- Uçucu kül - kopolimer – zemin karışımları üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerine göre, maksimum serbest basınç değerini ağırlıkça % 1.00 kopolimer fiber ve % 10 uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışım vermiştir. Ağırlıkça % 1.00 kopolimer fiber ve % 10 uçucu kül eklenen karışımın serbest basınç mukavemeti değeri 581 kN /m^2 olarak belirlenmiştir. Bu karışımın serbest basınç değeri, yalın numunenin serbest basınç değerini göz önüne alındığında % 342 artmıştır. Farklı kopolimer oranları kullanılan karışımlar için uçucu kül katkısı, serbest basınç mukavemetinde belirgin artışlar yaratmıştır, fakat farklı uçucu kül yüzdeleri için kopolimer miktarındaki artış daha tutarlı ve tekrar eden şekilde gerçekleşmiştir. Ayrıca zemine kopolimer katkısının uçucu kül katkısına oranla, serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi daha baskın olmuştur. Karışımların maksimum serbest basınç mukavemetleri, kopolimer oranlarına göre öbeklenme meydana getirmiştir. Uçucu kül katkısı ise kopolimer kullanımını destekleyerek, serbest basınç mukavemetini arttırmıştır.
- Polipropilen - kopolimer – zemin karışımları üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerine göre, maksimum serbest basınç değerini ağırlıkça % 0.75 kopolimer fiber ve % 0.75 polipropilen kullanılarak hazırlanan karışım vermiştir. Ağırlıkça % 0.75 kopolimer fiber ve % 0.75 polipropilen eklenen karışımın serbest basınç mukavemeti değeri 315 kN /m^2 olarak belirlenmiştir. Bu karışımın serbest basınç değeri, yalın numunenin serbest basınç değerini göz önüne alındığında % 185 artmıştır. Kullanılan kil – polipropilen- kopolimer karışımı, malzemelerin ayrı kullanımına göre genellikle daha düşük serbest basınç mukavemeti sonuçları vermiştir. Bunun sebebinin zemine katılan polimer malzemenin oranının yüksek olması ve numune içinde farklı süreksizlikler yaratarak dayanımı düşürmesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca farklı yüzdelerdeki karışımlar, serbest basınç mukavemetinde dalgalanmalar yaratmış ve tutarlı bir sonuç alınamadığından, polipropilen ve kopolimerin birbiri üzerindeki etkisi hakkında bir yorum yapılamamıştır.

Tez çalışması kapsamında, uçucu kül, polipropilen ve kopolimer fiberlerin yüzeysel zemin stabilizasyonu çalışmaları, bu malzemelerin alternatif yöntemler olarak kullanılabileceği gözlenmiştir. Uçucu külün bir sanayi artığı olması ve bu artık ürünün zemin stabilizasyonunda kullanılmasının hem çevresel hem de ekonomik olarak büyük getirileri olması sebebiyle geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılması uygun olacaktır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, bu malzemelerin yüksek plastisiteli zemin ile karıştırılması, serbest basınç mukavemetlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Aynı zamanda polipropilen ve kopolimer fiberlerin düşük maliyetleri ve nedeniyle yüzeysel zemin stabilizasyonu uygulamalarında mukavemeti arttırmak amacı ile kullanılmalarının faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- ASTM C-618**, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” American Society for Testing and Materials, USA
- ASTM C-1116**, “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete,” American Society for Testing and Materials, USA
- ASTM D1557**, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort,” American Society for Testing and Materials, USA
- ASTM D6270-98** (1998), “Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications,” American Society for Testing and Materials, USA
- ASTM D-698**, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort,” American Society for Testing and Materials, USA
- BERGADO, D. T. and ANDERSON, L. R.**, (1996), “Soft Ground Improvement in Low Land and Other Environments,” ASCE Press Systems, NY, USA
- BOSSCHER, P. J., EDİL, T. B., KURAOKA, S.**(1997), “Design of Highway Embankments Using Tire Chips,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, 295-304, USA
- BOWLES, J. E.** (2001), “Foundation Analysis and Design”, 5th Edition, McGraw-Hill Book Company, NY, USA
- BROOKS, R. M.** (2009), “Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash,” Department of Civil and Environmental Engineering, Temple University, Philadelphia, USA
- BUDINSKI, K. G.** (2010), “Engineering Materials : Properties and Selection,” 9th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA
- DAS, B.** (1997) “Soil Mechanics Laboratory Manual,” Oxford University Press, UK
- DAS, B.** (2007), “Principles of Foundation Engineering,” 6th Edition, Thomson Learning

- EROL, B.** (2008), “Atık Maddelerin Yol İnşaatlarında Temel Malzemesi Olarak Kullanımı,” İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- FORTA DIŞ TİCARET İNŞAAT TAAHHÜT LTD. STİ. (2011),** “Forta Ferro Fiber Donatı Katalogu”
- GÖNÜLLÜ, M. T.** (2004), “ Atık Lastiklerin Yönetimi,” Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- HARRISON, D. M.** (2000), “The Grouting Handbook : a Step-by-Step Guide to Heavy Equipment Grouting,” Gulf Pub. Co., Houston, Texas, USA
- JIANG, H., CAI, Y., LIU, J.** (2010), “Engineering Properties of Soils Reinforced by Short Discrete Polypropylene Fiber,” Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, USA
- KUMAR, A., WALIA, B. S., BAJAJ, A.** (2007), “Influence of Fly Ash, Lime and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil,” Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, USA
- LEONARDS, G. A., CUTTER, W. A., HOLTZ, R. D.** (1980), “Dynamic Compaction of Granular Soils,” Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.96, No.GT1, pp.73-110,USA
- LI, Z., CHEN, Y., GONG, J.** (2010), “Rapid Curing Technology of Lime – Fly Ash Stabilized Macadam,” Integrated Transportation Systems, ASCE, USA
- LITTLE, D. N.** (1995), “Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime,” The National Lime Association, Kendall/Hunt Pub. Co., Dubuque, Iowa, USA
- MENARD, L. and BROISE, Y.** (1975), "Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation," Geotechnique, Vol. 25, No. 1, March, pp.3-18, UK
- MOSELEY M. P. and KIRSCH K.** (2004), “Ground Improvement,” 2nd Edition, Spon Press, NY, USA
- MUKESH C., LIMBACHIYA, J., ROBERTS, J.** (2004), “Sustainable Waste Management and Recycling : used / post-consumer tyres,” Kingston University, London, UK

- NEUBAUER, C. H. and THOMPSON, M. R.** (1972), "Stability Properties of Uncured lime-Treated Fine-Grained Soil," Highway Research Record No.381, Highway Research Board, pp. 20-26, USA
- ÖZAYDIN, K.** (2005), "Zemin Mekaniği," Birsen Yayınevi, İstanbul.
- SHUKLA, S. K.** (2002), "Geosynthetics and Their Applications," Thomas Telford Publishing, London,UK
- SKOK, E. L., JOHNSON, E. N., BROWN, M.** (2003), "Special Practices for Design and Construction of Subgrades in Poor, Wet and/or Saturated Soil Conditions," Minnesota department of Transportation Office of Research Services, Minnesota, USA
- ŞENGEZER, L.** (2010), "Dynamic Compaction Application in Granular Soils," İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- ŞENOL, A., EDİL, T. B., ACOSTA, H. A., BENSON, C. H.** (2003), "Soft Subgrades Stabilization by Using Various Fly Ashes," Resources, Conservation and Recycling, vol.46, p.p. 365-376
- ŞENOL, A., SHAFIQUE, S. B., EDİL, T. B., BENSON, C. H.** (2003), "Use of Class C Fly Ash for Stabilization of Soft Subgrade," ARI the bulletin of the Istanbul Technical University, Istanbul
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)** (1987), "State-of-the-Art Report: Lime Stabilization Research, Properties, Design, and Construction," National Research Council, Washington, DC, USA
- URL-1** <www.cement.org>, alındığı tarih: 06.05.2011
- URL-2** <www.constructionz.com>, alındığı tarih: 06.05.2011
- URL-3** <www.imtek.com.tr>, alındığı tarih: 06.05.2011
- URL-4** <www.izdemir.com>, alındığı tarih: 06.05.2011
- URL-5** <www.gasifier.bioenergylists.org>, alındığı tarih: 06.05.2011
- URL-6** <www.polimernedir.com>, alındığı tarih: 06.05.2011
- UTRACKI, L.A. and JAMIESON, A. M.** (2010), "Polymer Physics : from suspensions to nanocomposites and beyond," Hoboken, NJ, USA
- WANG, L. and RESTON, E. Y.** (2007), "Analysis of Asphalt Pavement Materials and Systems Emerging Methods : Proceedings of the Symposium on the Mechanics of Flexible Pavements, June 25-30, 2006, Boulder, Colorado," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA

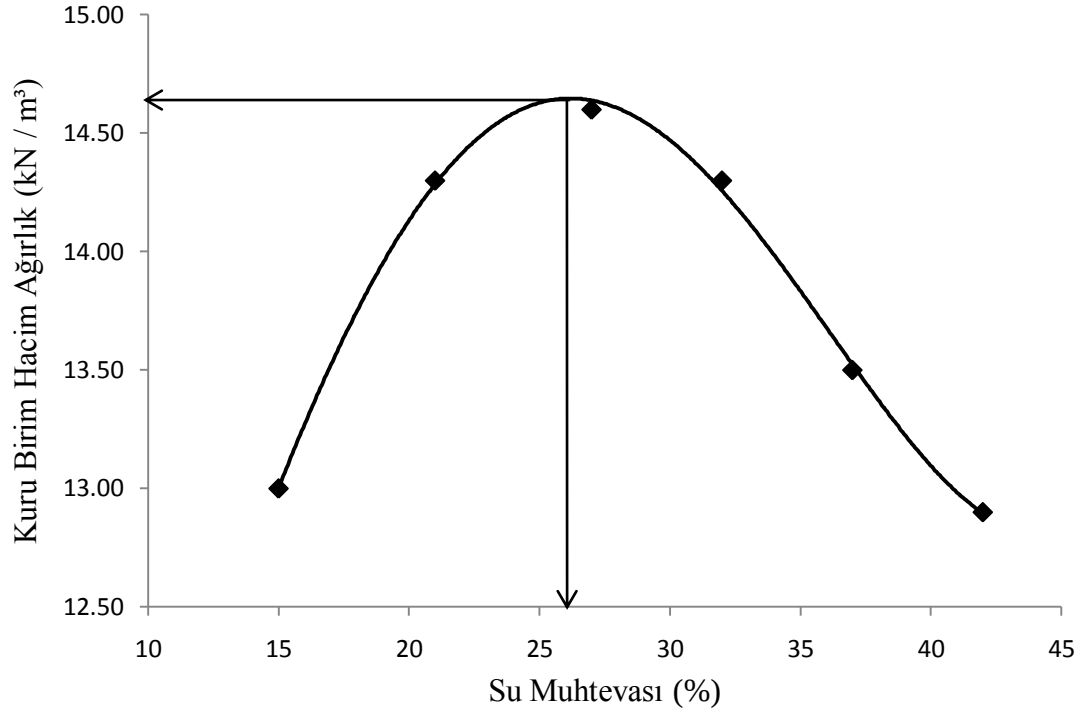
ZORNBERG, J. G., CHRISTOPHER, B. R., ANDOOSTERBAAN, M. D.

(2005), "Tire Bales in Highway Applications: Feasibility and Properties Evaluation," Colorado Department of Transportation Research Branch, Colorado, USA

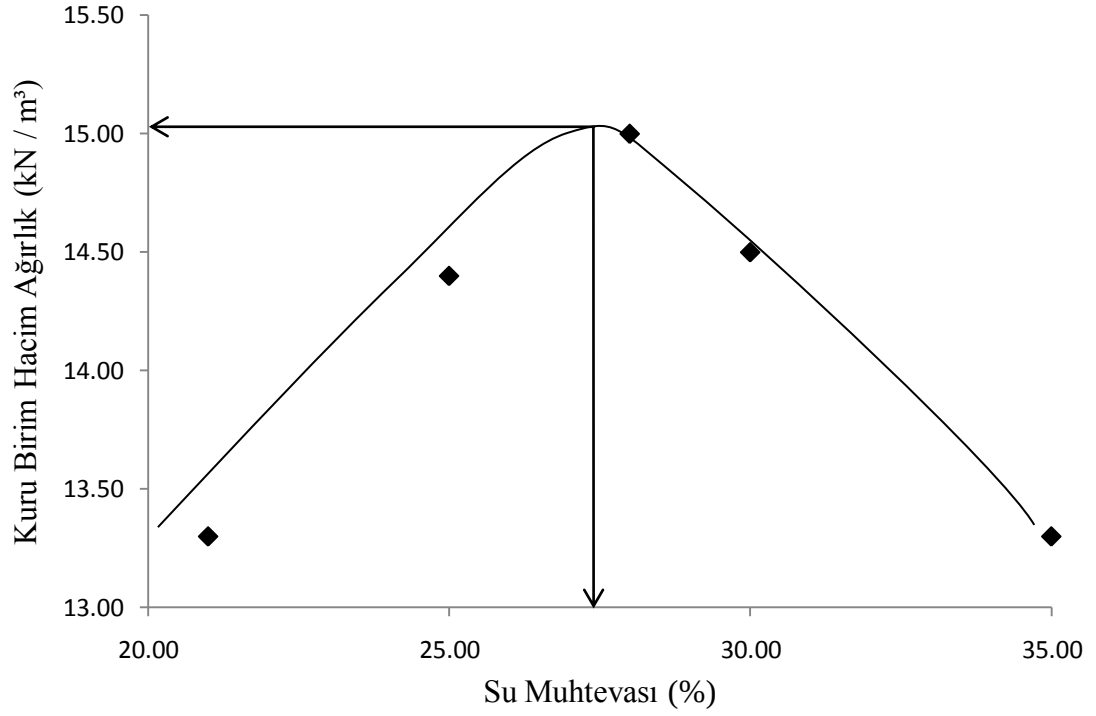
EKLER

EK A : HARVARD KOMPAKSİYON DENEYİ SONUÇLARI

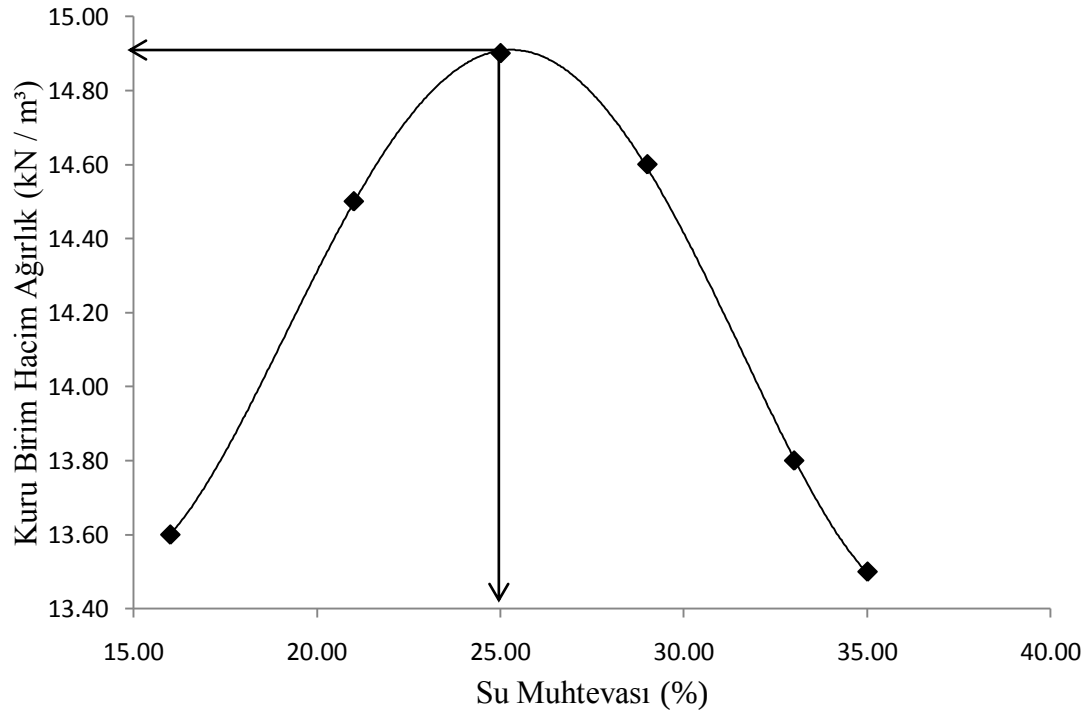
EK A



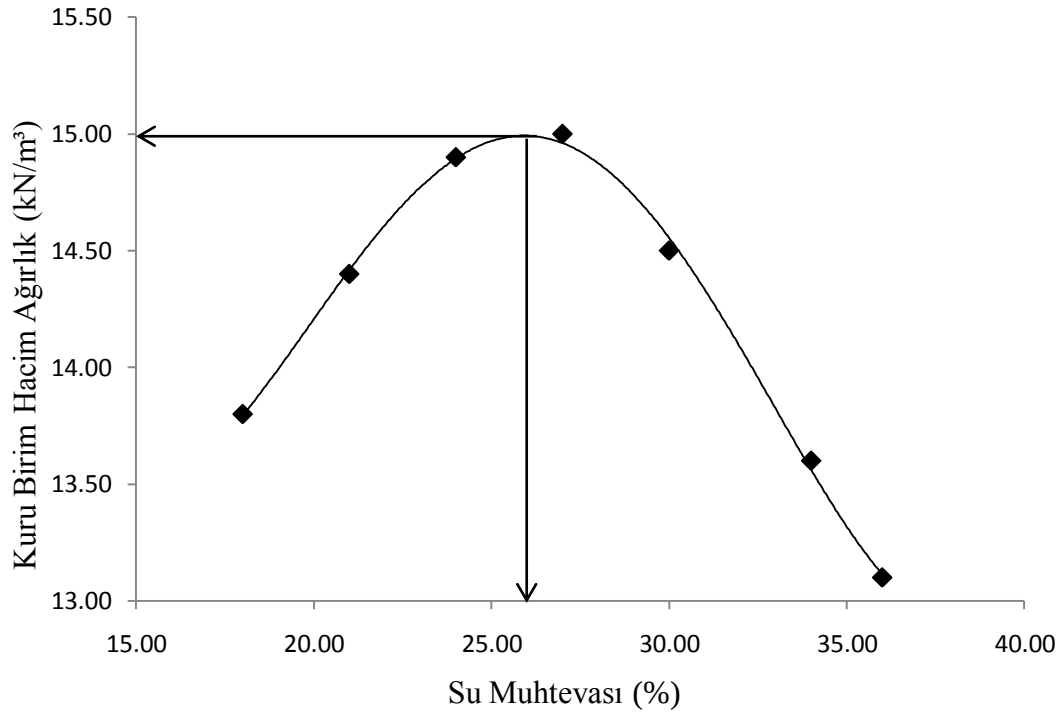
Şekil A.1 Yalın CH, 16.12.2010; $w_{\text{opt}}: \% 25$, $\gamma_{\text{kmak}}: 14.60 \text{ kN/m}^3$



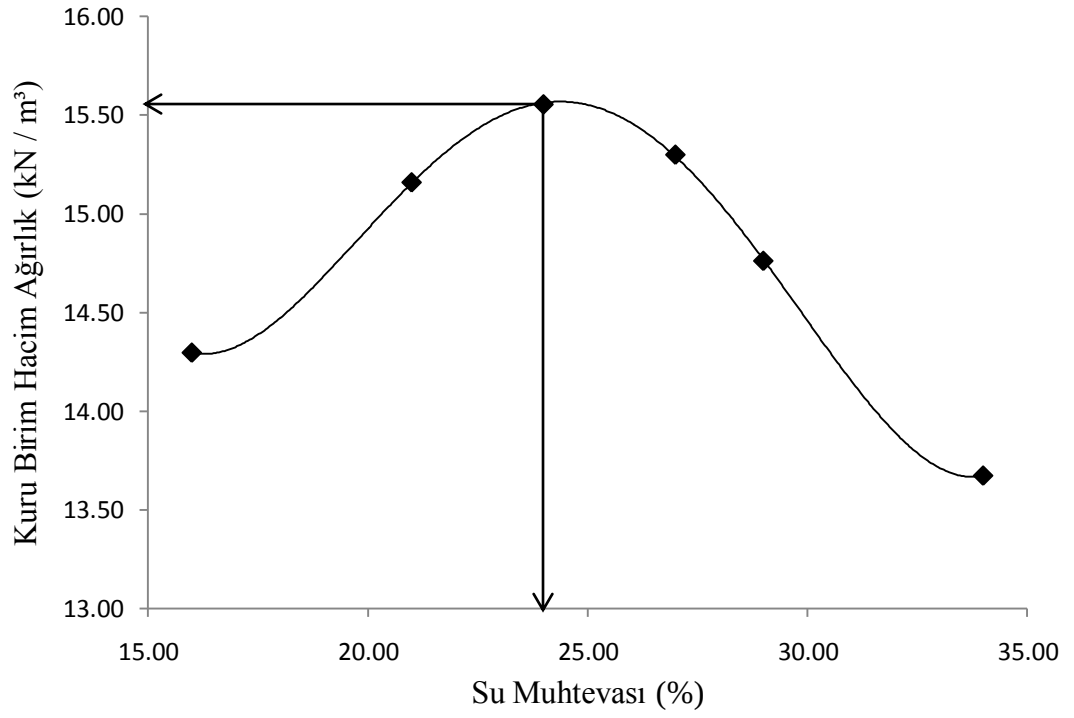
Şekil A.2 Yalın CH, 22.12.2010; $w_{\text{opt}}: \% 27$, $\gamma_{\text{kmak}}: 15.00 \text{ kN/m}^3$



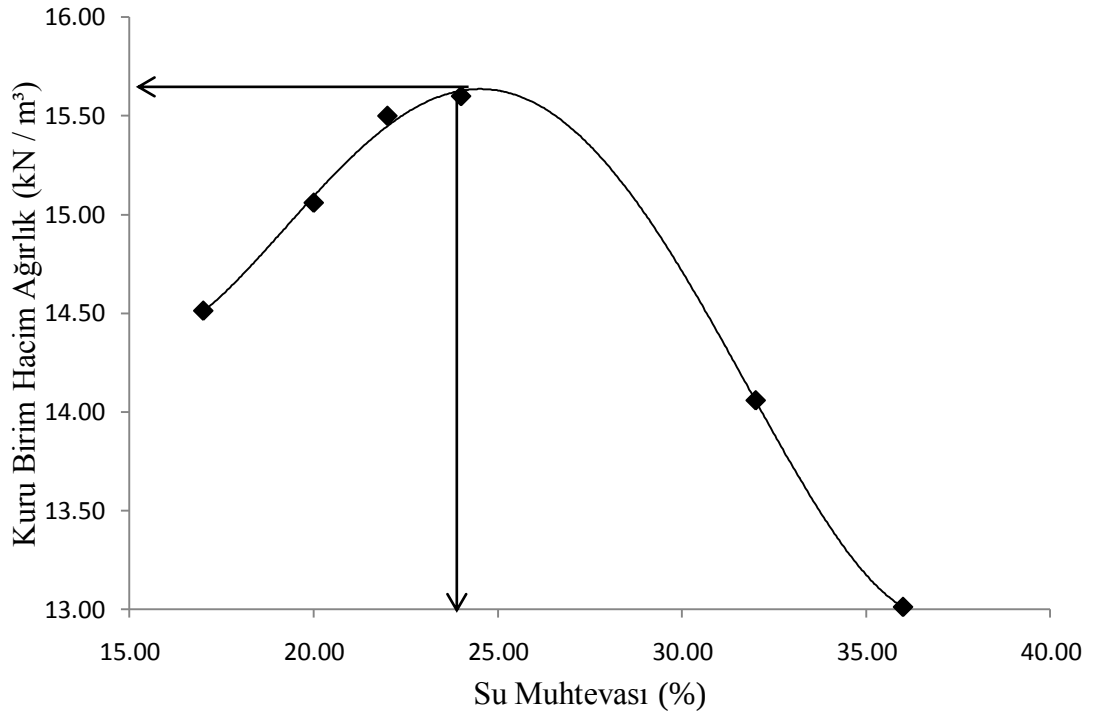
Şekil A.3 Yalın CH, 30.12.2010; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.90 kN/m^3



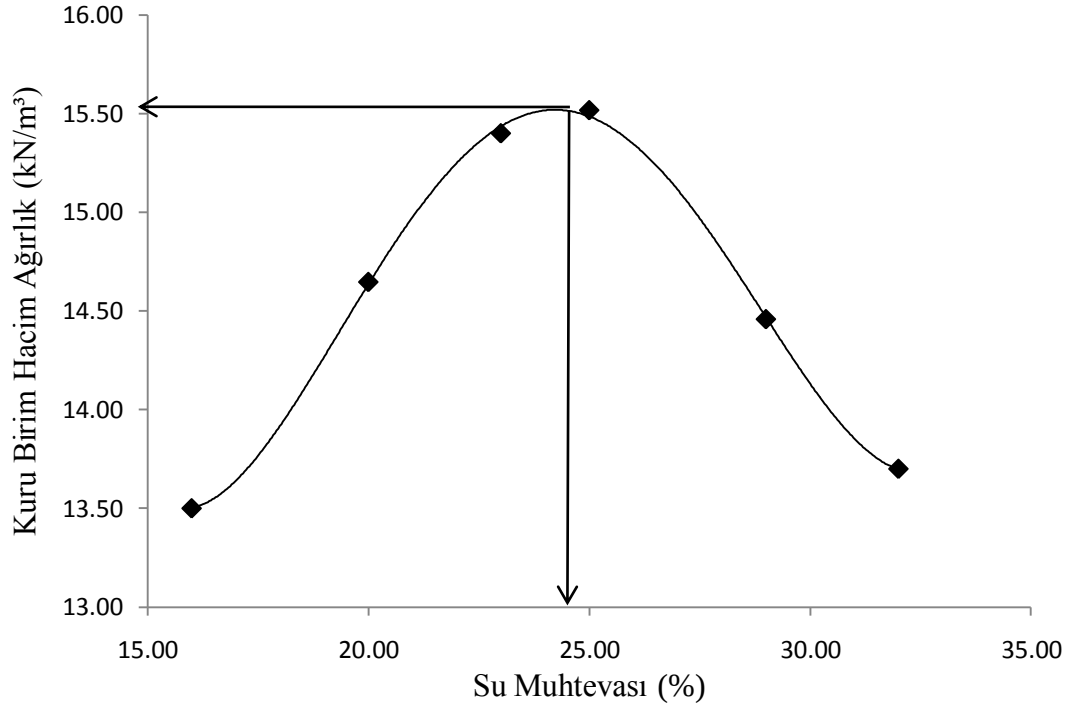
Şekil A.4 Yalın CH, 22.12.2010; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 15.00 kN/m^3



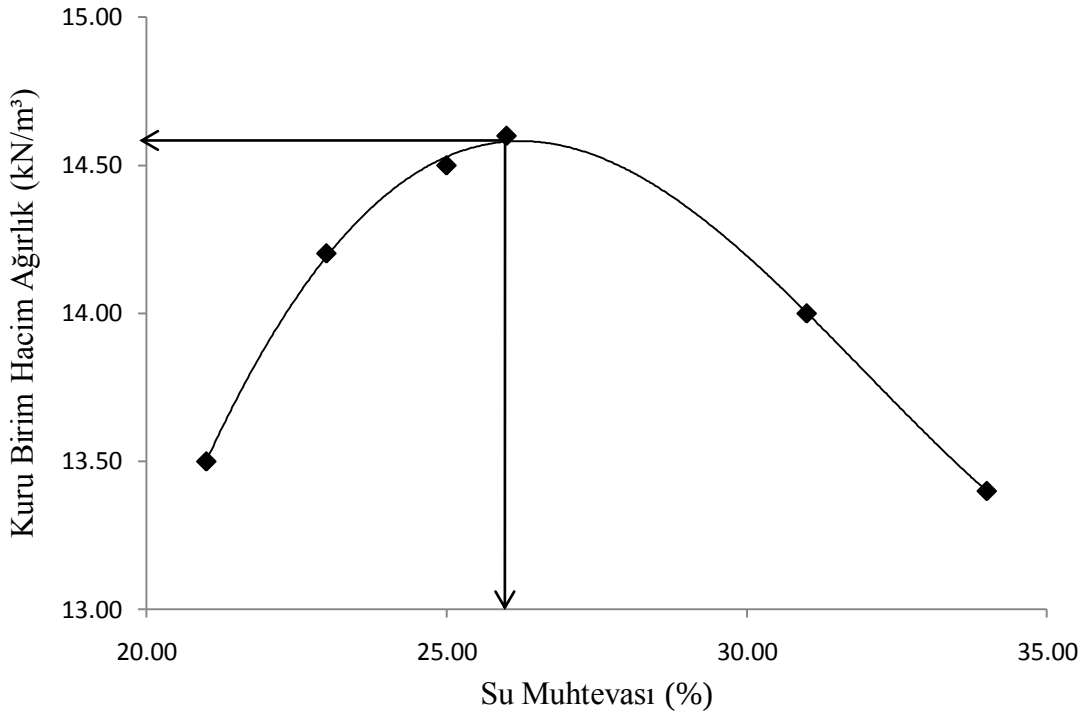
Şekil A.5 CH + % 5 U.K., 14.01.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 15.60 kN/m^3



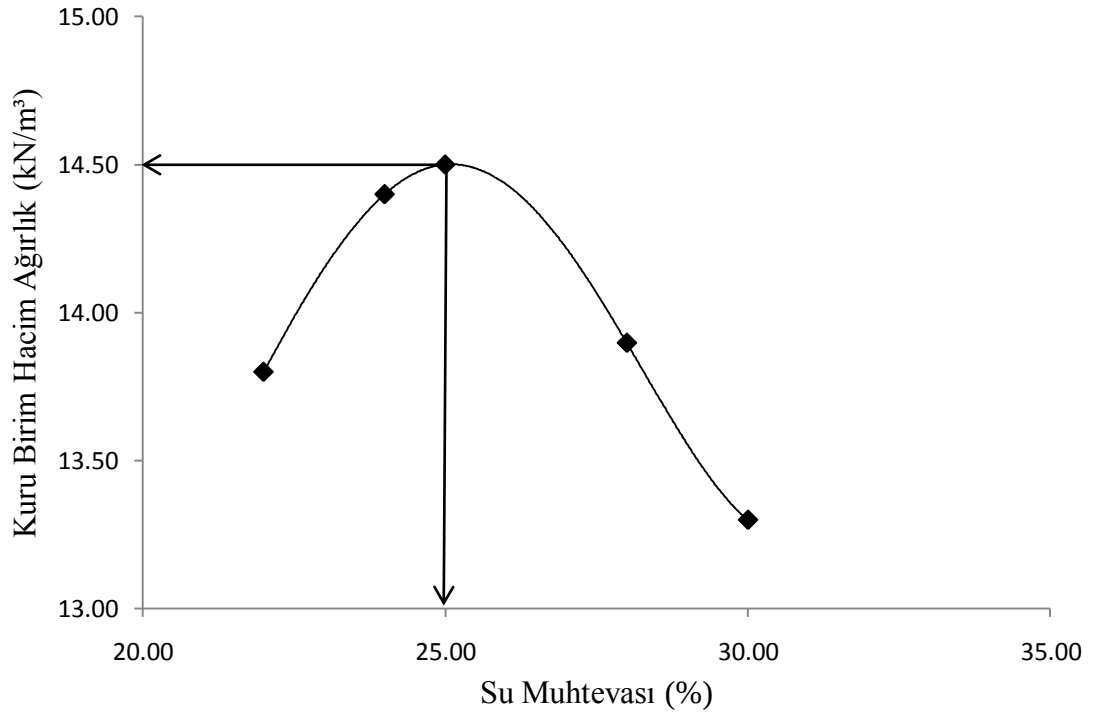
Şekil A.6 CH + % 10 U.K., 13.01.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 15.60 kN/m^3



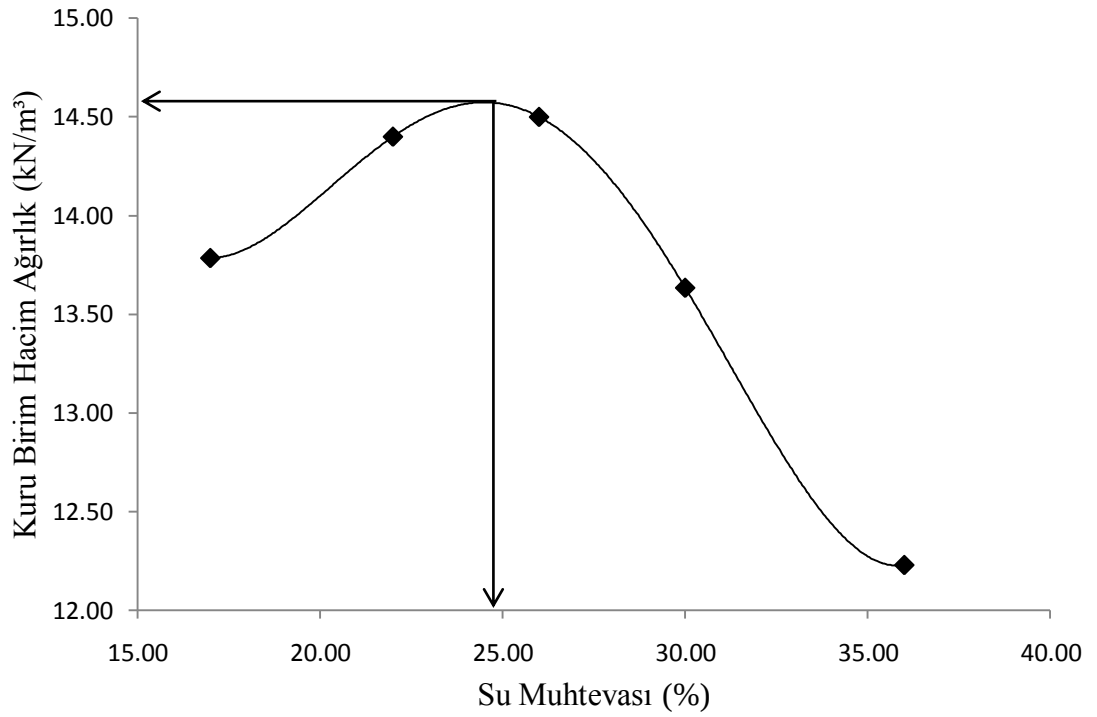
Şekil A.7 CH + % 15 U.K., 14.01.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.50 kN/m^3



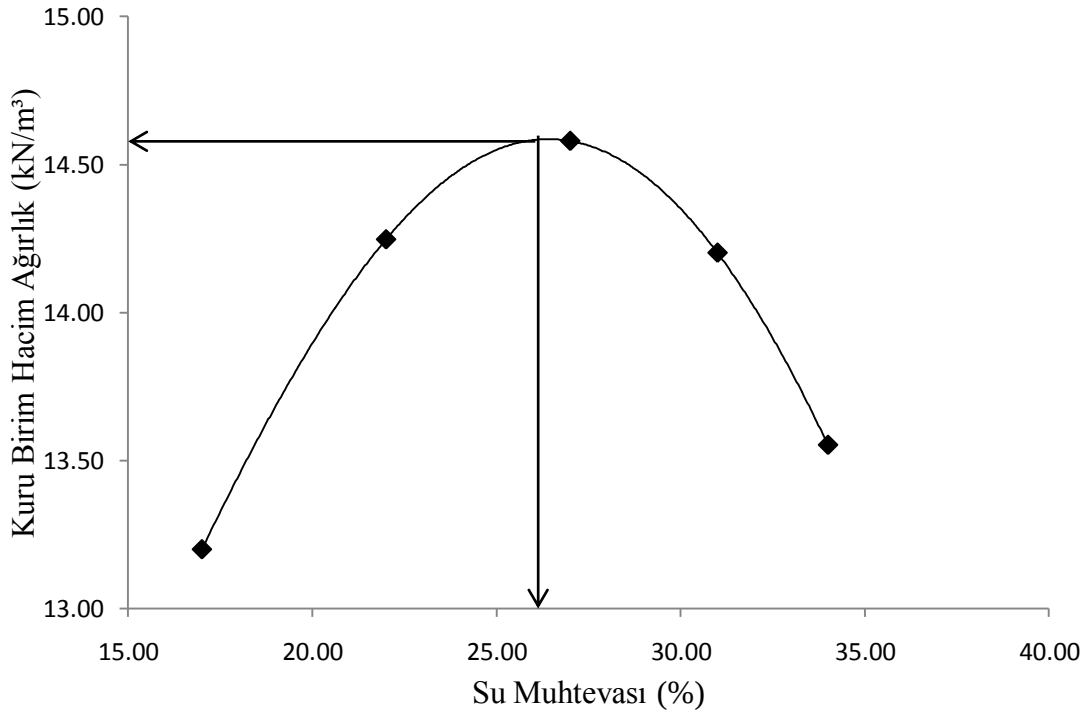
Şekil A.8 CH + % 0.25 P.P., 03.03.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 14.60 kN/m^3



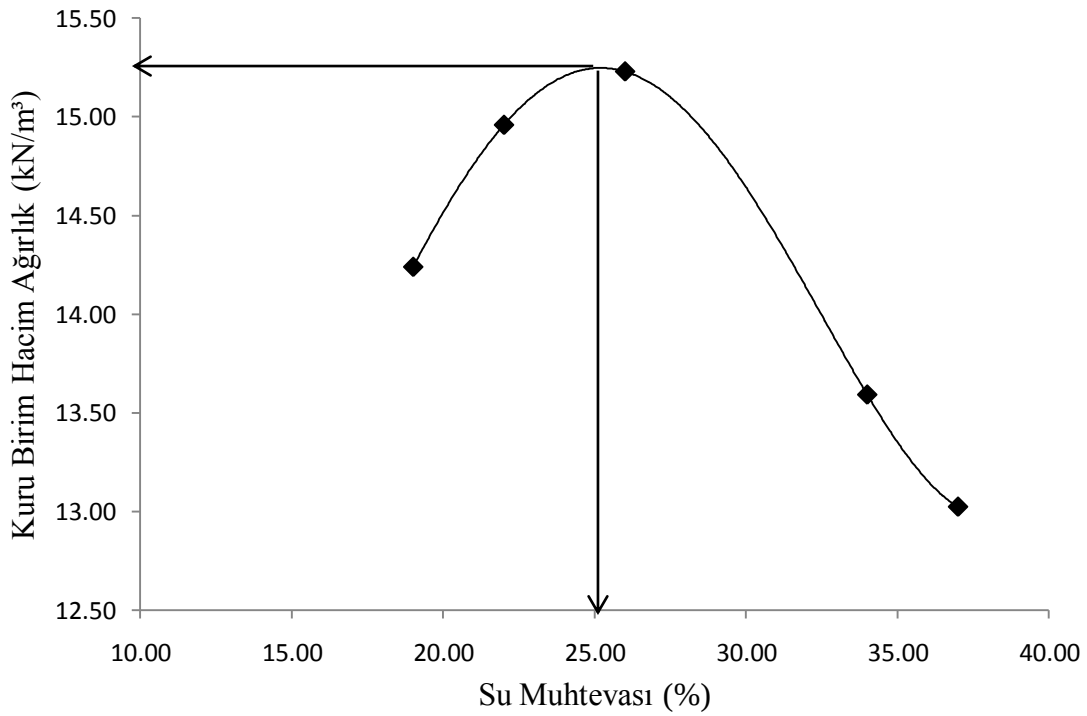
Şekil A.9 CH + % 0.50 P.P., 03.03.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.50 kN/m^3



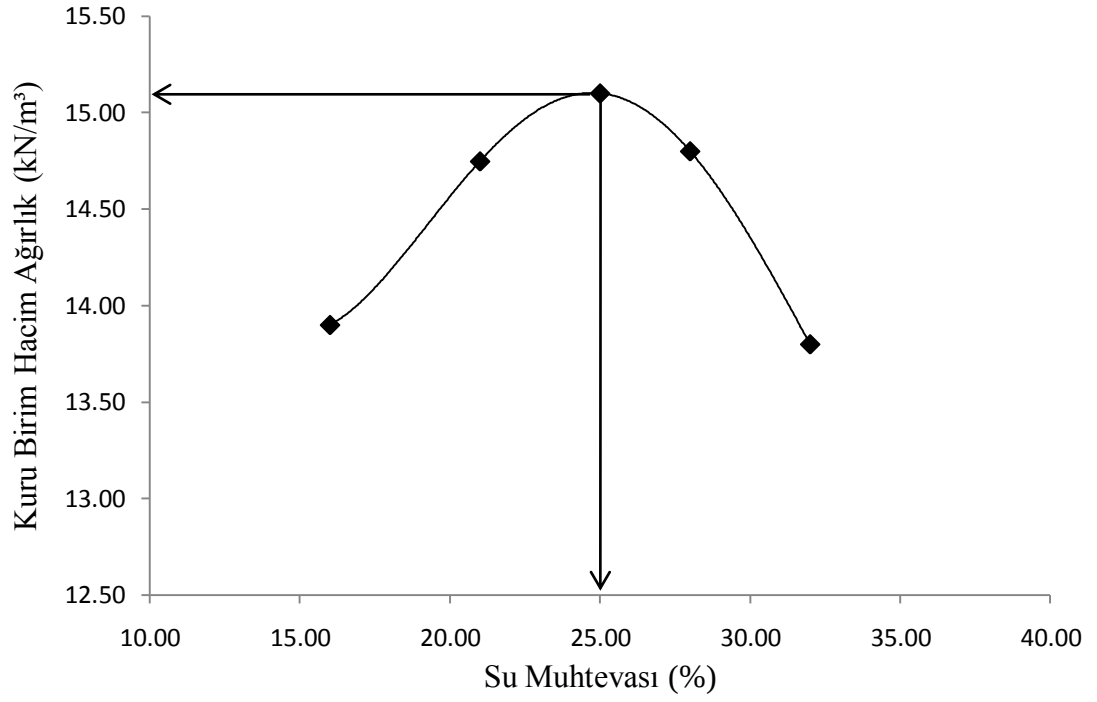
Şekil A.10 CH + % 0.75 P.P., 03.03.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.50 kN/m^3



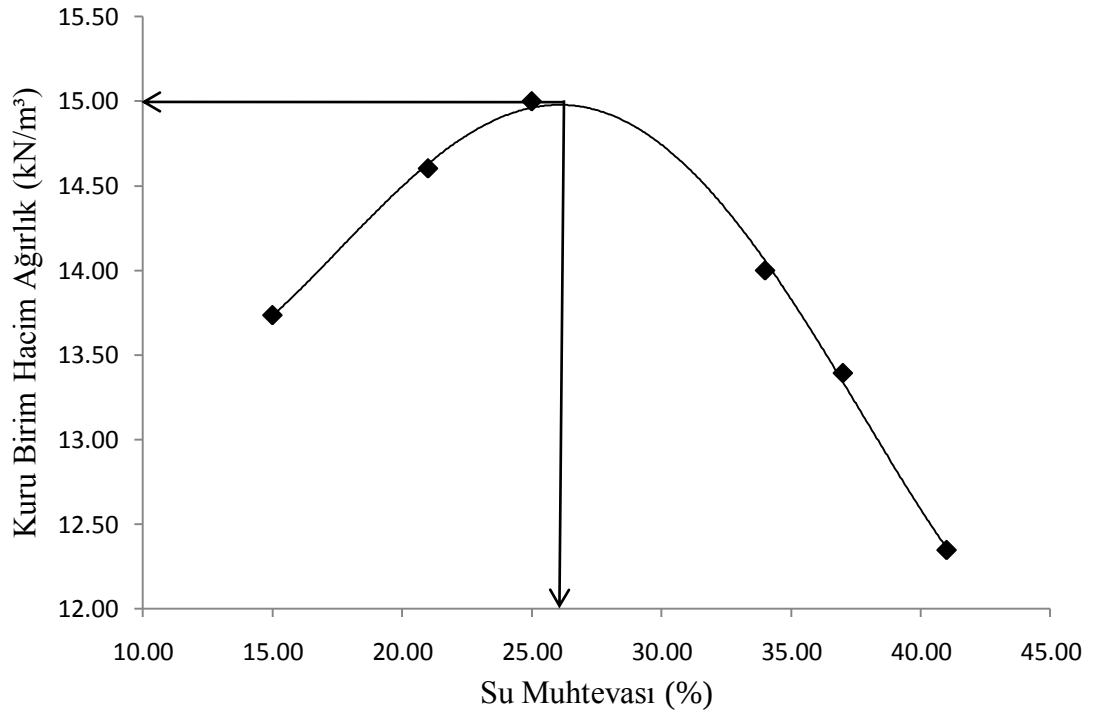
Şekil A.11 CH + % 1.00 P.P., 07.03.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 14.60 kN/m^3



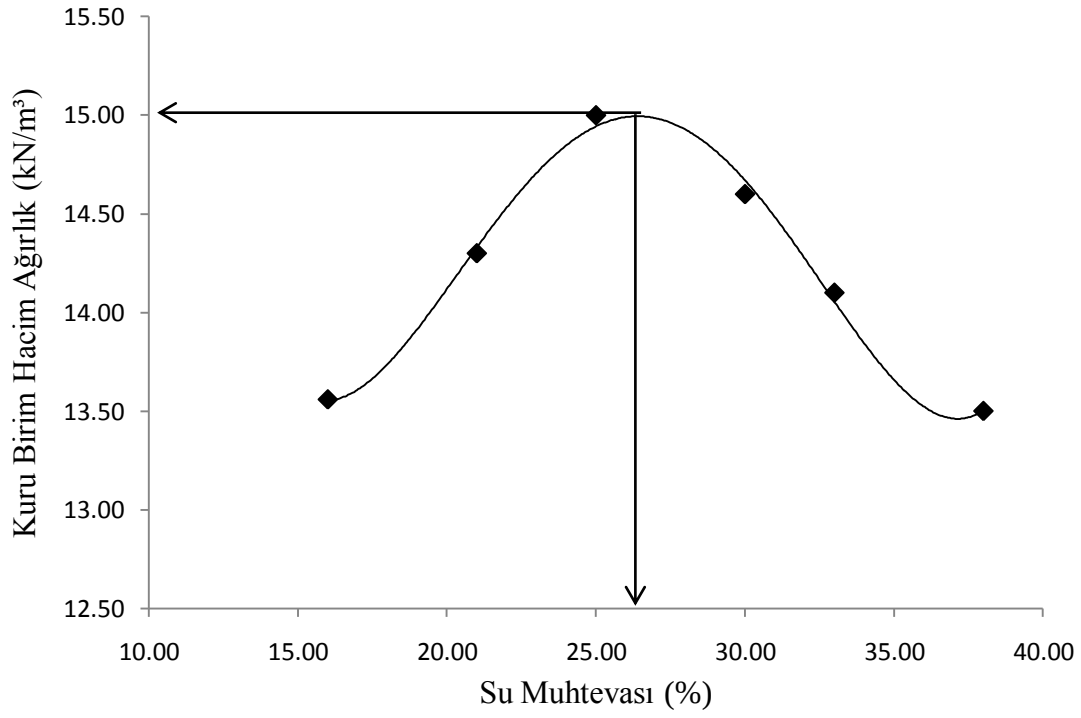
Şekil A.12 CH + % 0.50K.P., 03.01.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 15.20 kN/m^3



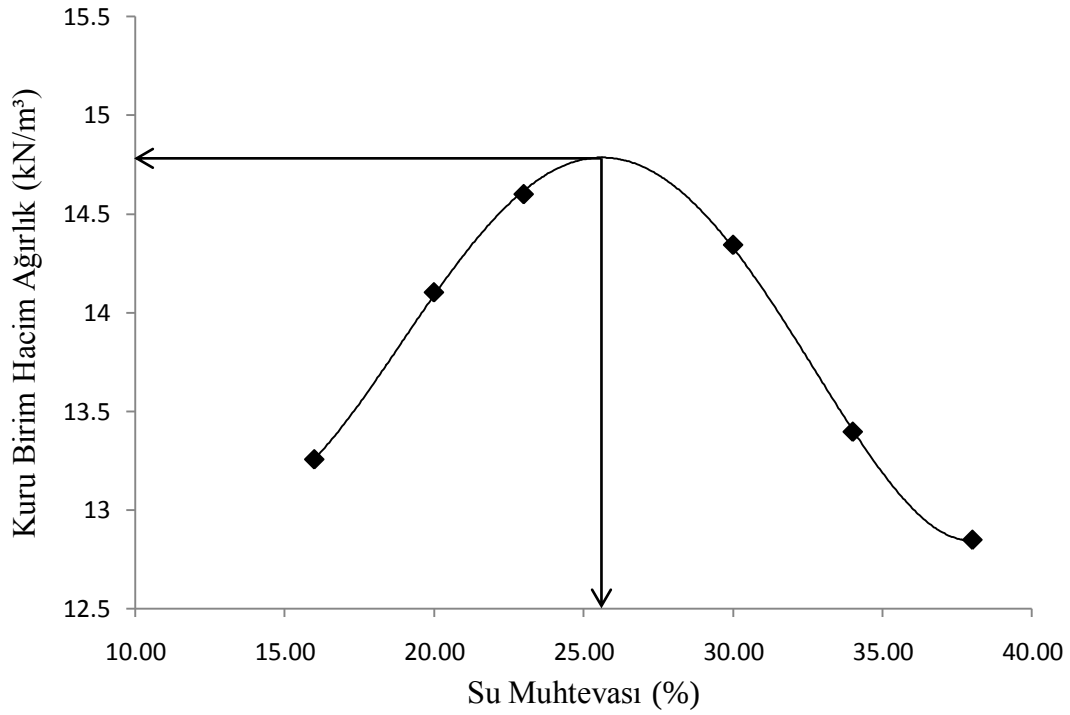
Şekil A.13 CH + % 0.75K.P., 22.02.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



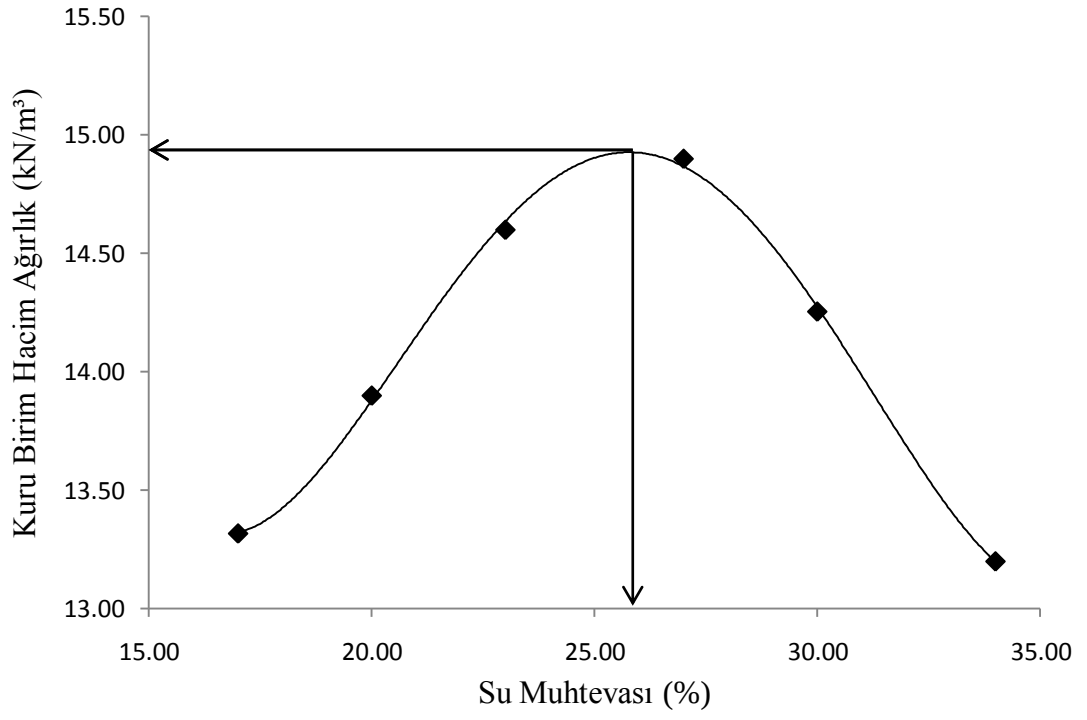
Şekil A.14 CH + % 1.00K.P., 03.01.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 15.00 kN/m^3



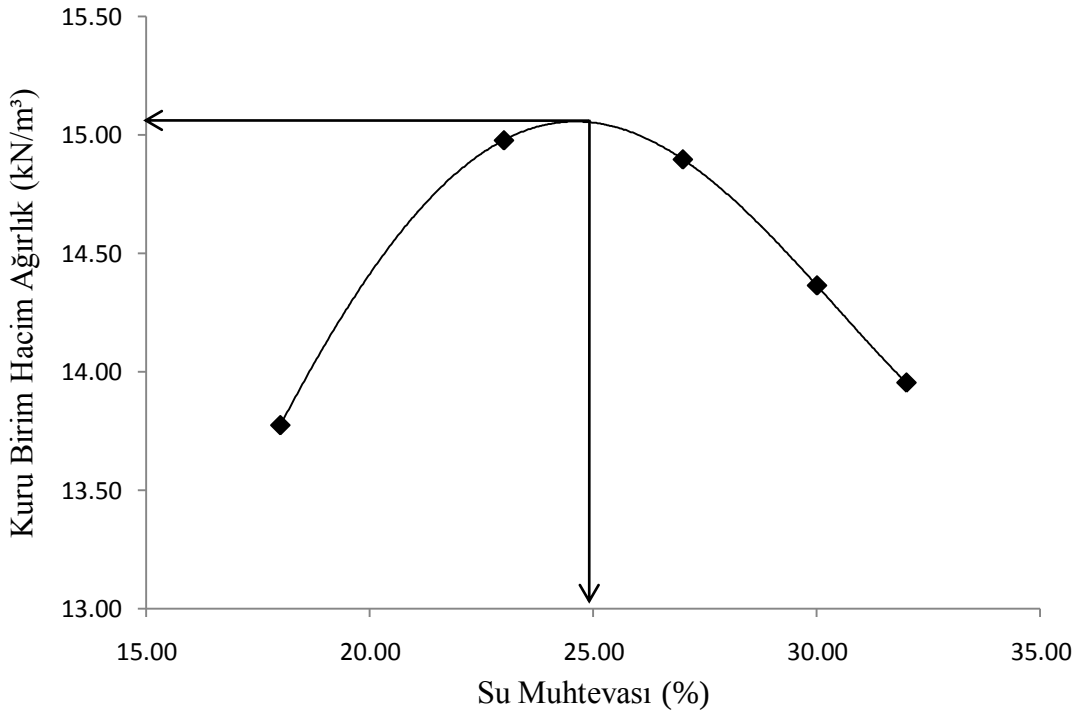
Şekil A.15 CH + % 1.25K.P., 22.02.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 15.00 kN/m^3



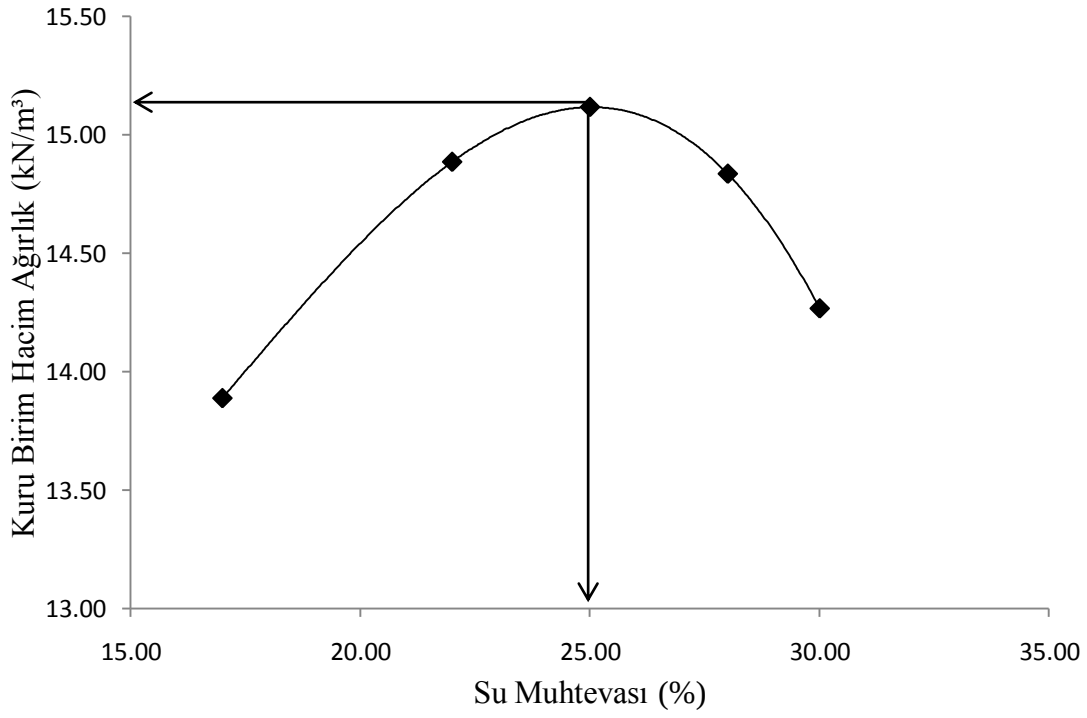
Şekil A.16 CH + % 1.50K.P., 05.01.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 14.80 kN/m^3



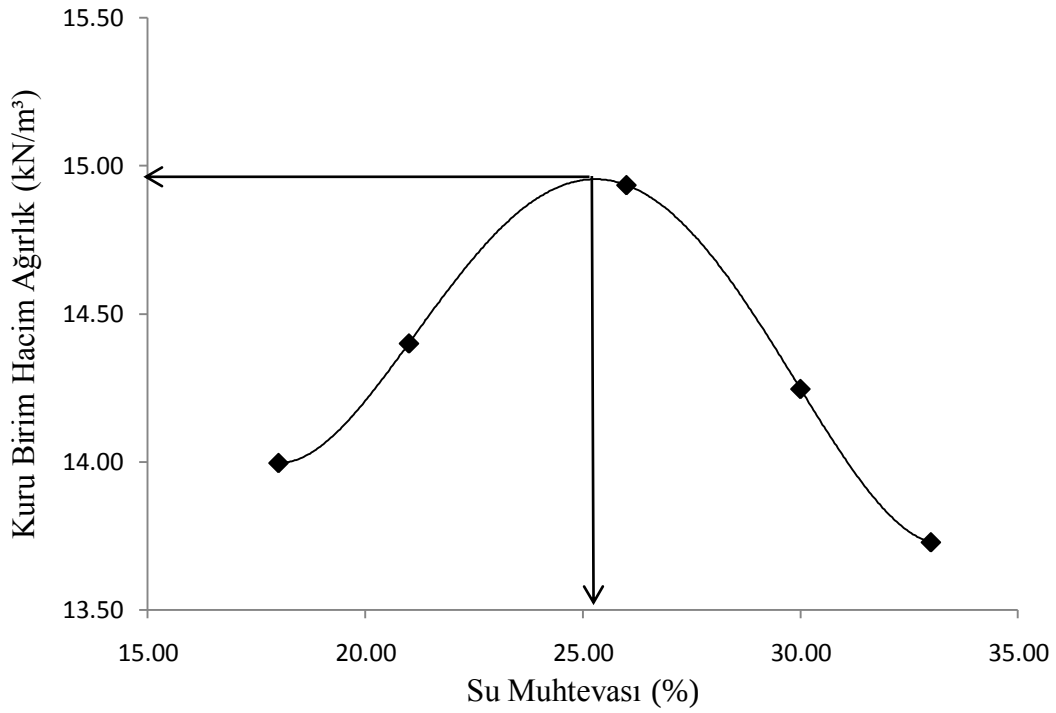
Şekil A.17 CH + %5 U.K. % 0.25P.P., 08.04.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 14.90 kN/m^3



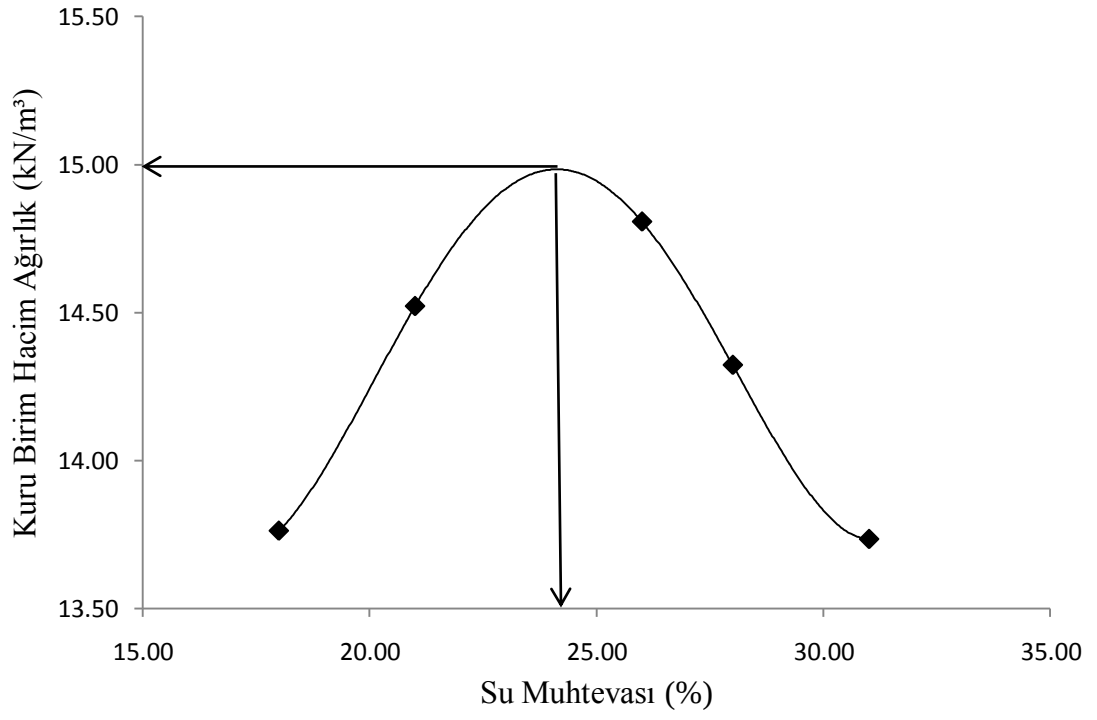
Şekil A.18 CH + %10 U.K. % 0.25P.P., 08.04.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



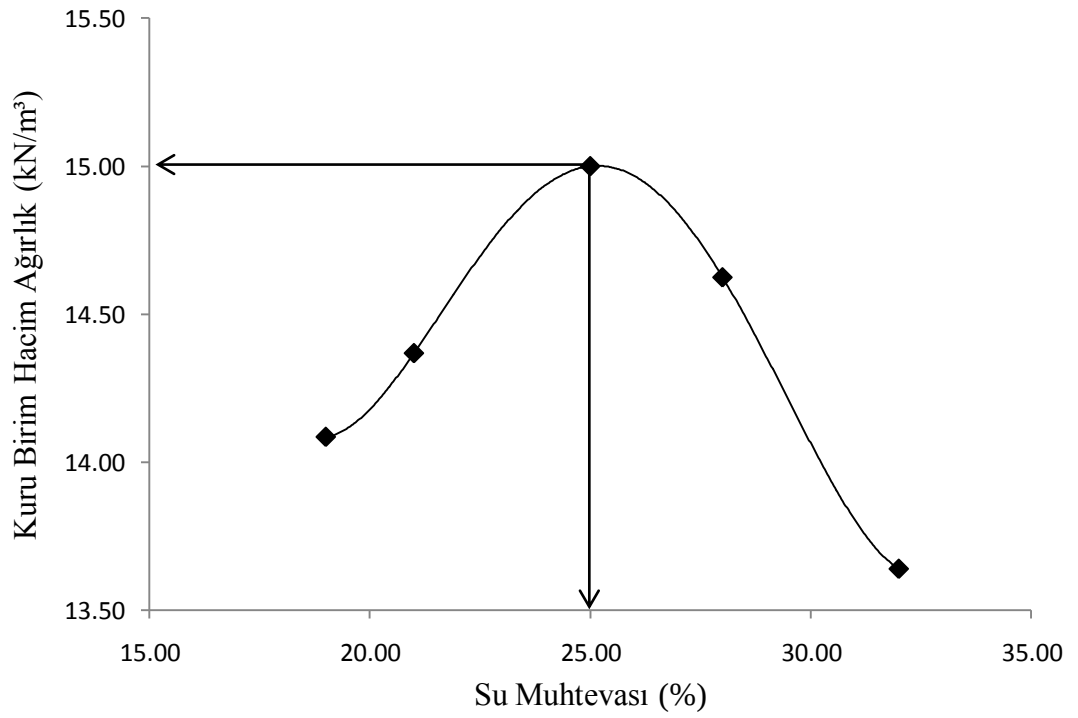
Şekil A.19 CH + %15 U.K. % 0.25P.P., 08.04.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



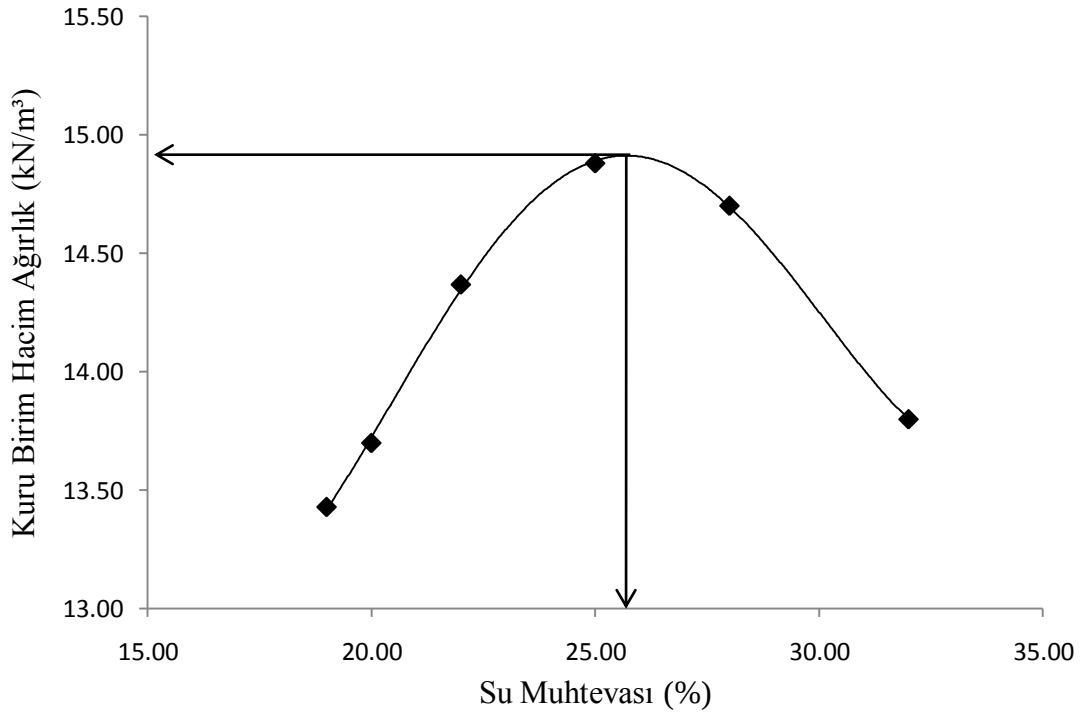
Şekil A.20 CH + %5 U.K. % 0.50P.P., 05.04.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



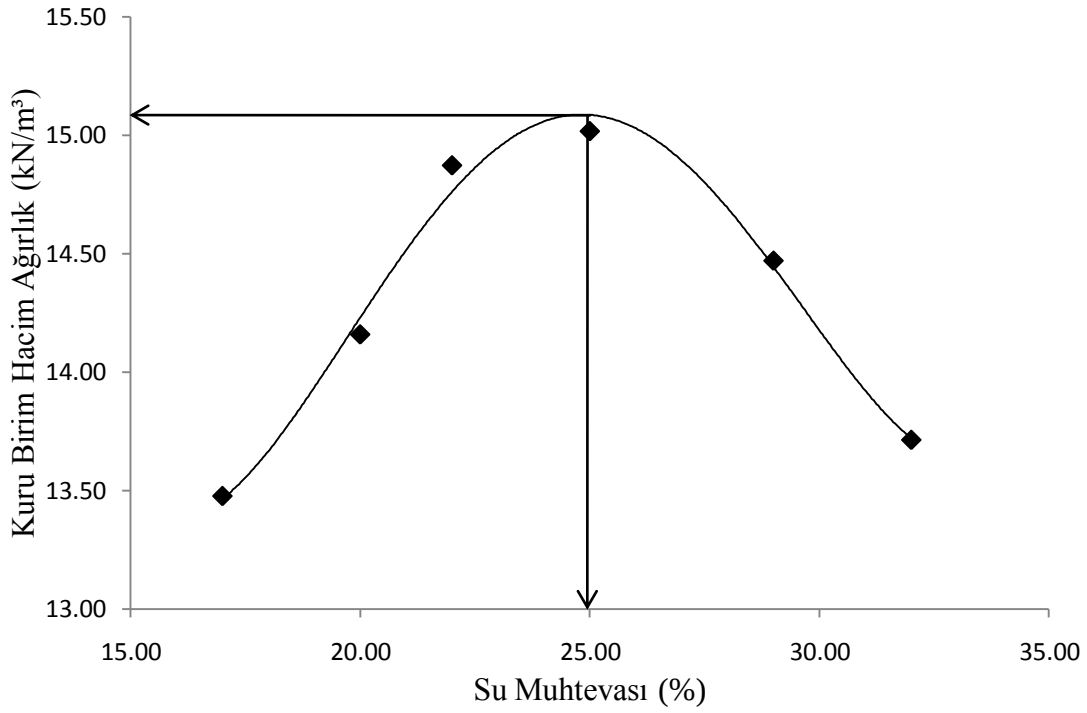
Şekil A.21 CH + %10 U.K. % 0.50P.P., 05.04.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 15.00 kN/m³



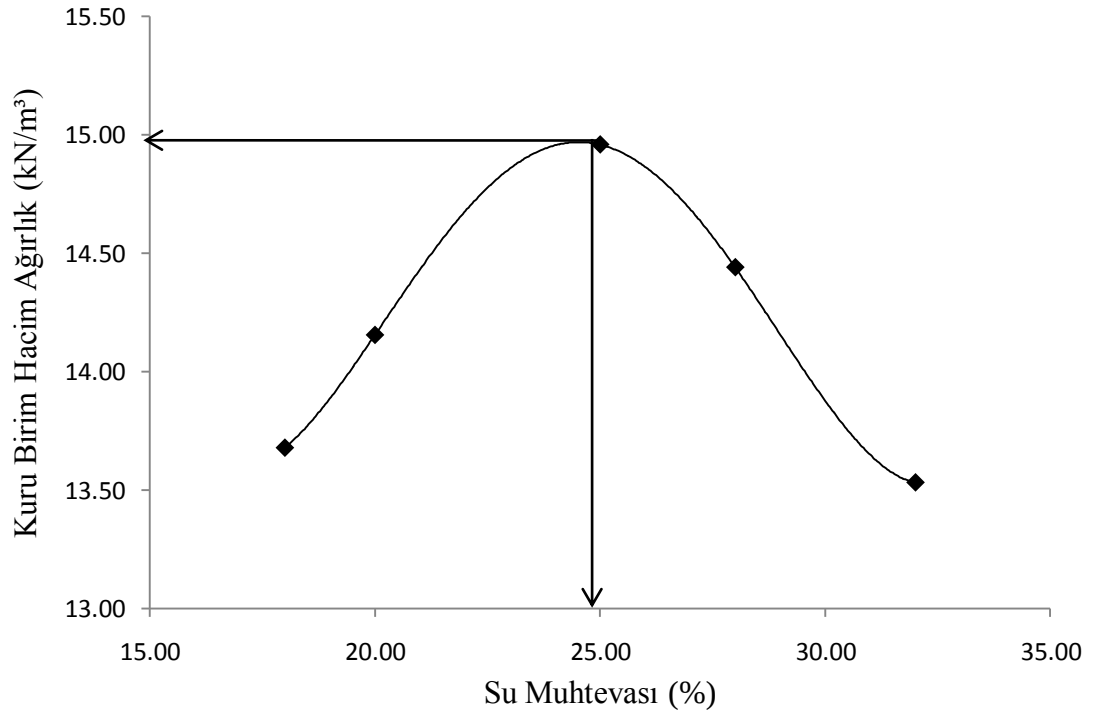
Şekil A.22 CH + %15 U.K. % 0.50P.P., 07.04.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.00 kN/m³



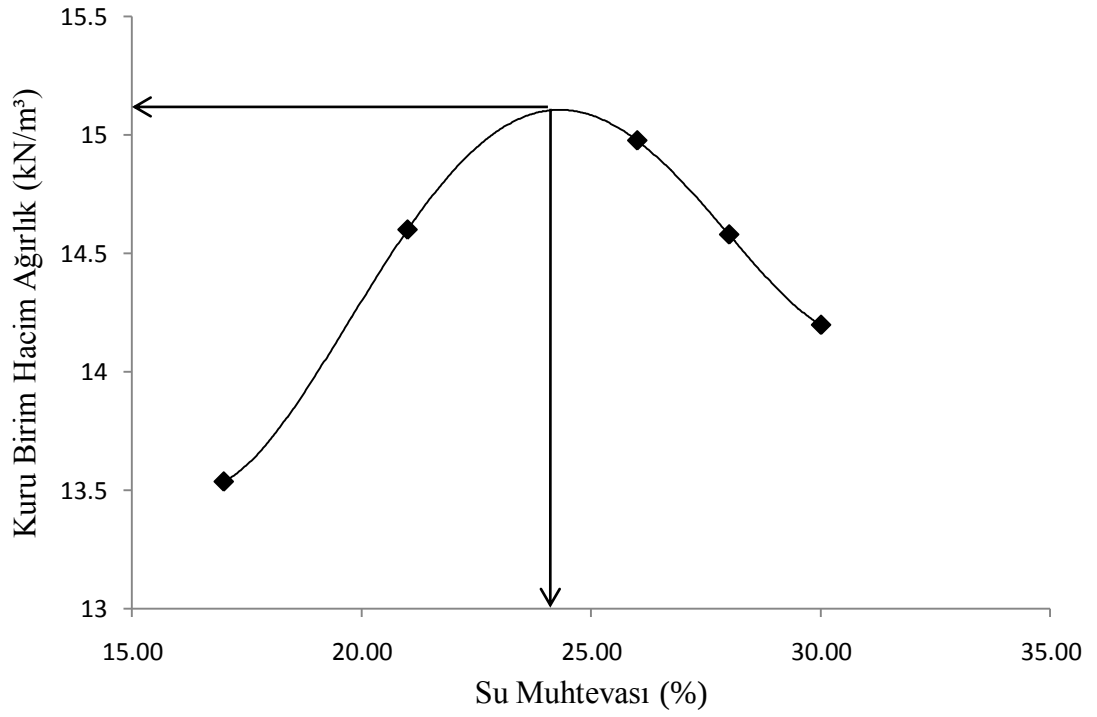
Şekil A.23 CH + %5 U.K. % 0.75P.P., 07.04.2011; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



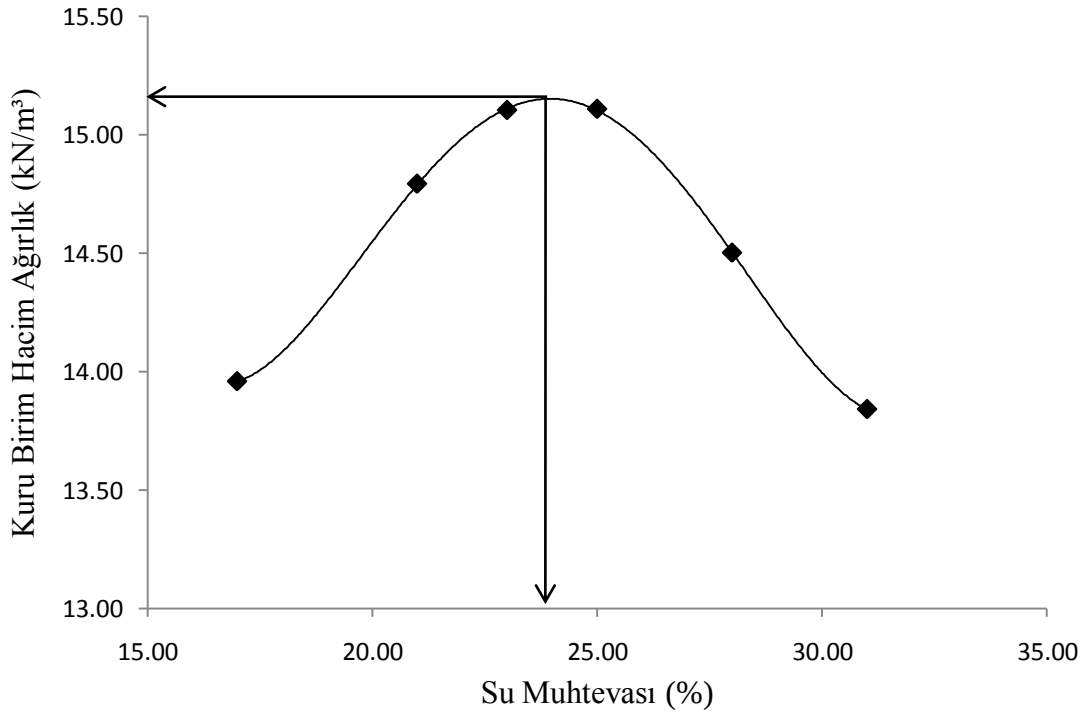
Şekil A.24 CH + %10 U.K. % 0.75P.P., 08.04.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



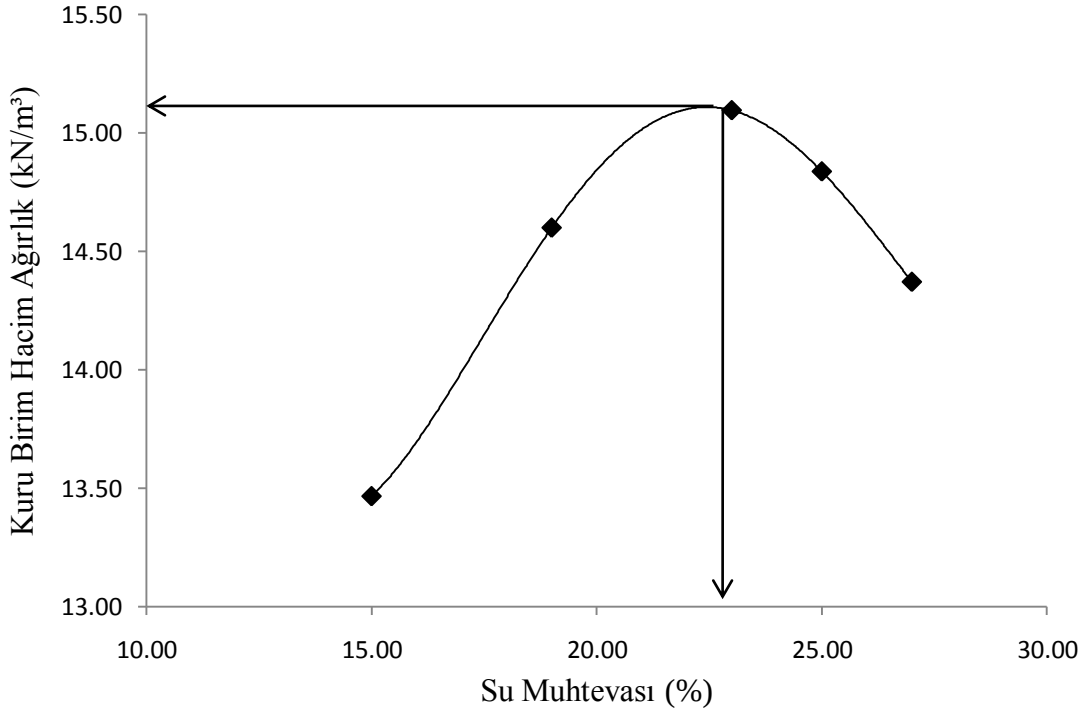
Şekil A.25 CH + %15 U.K. % 0.75P.P., 08.04.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmax} : 15.00 kN/m^3



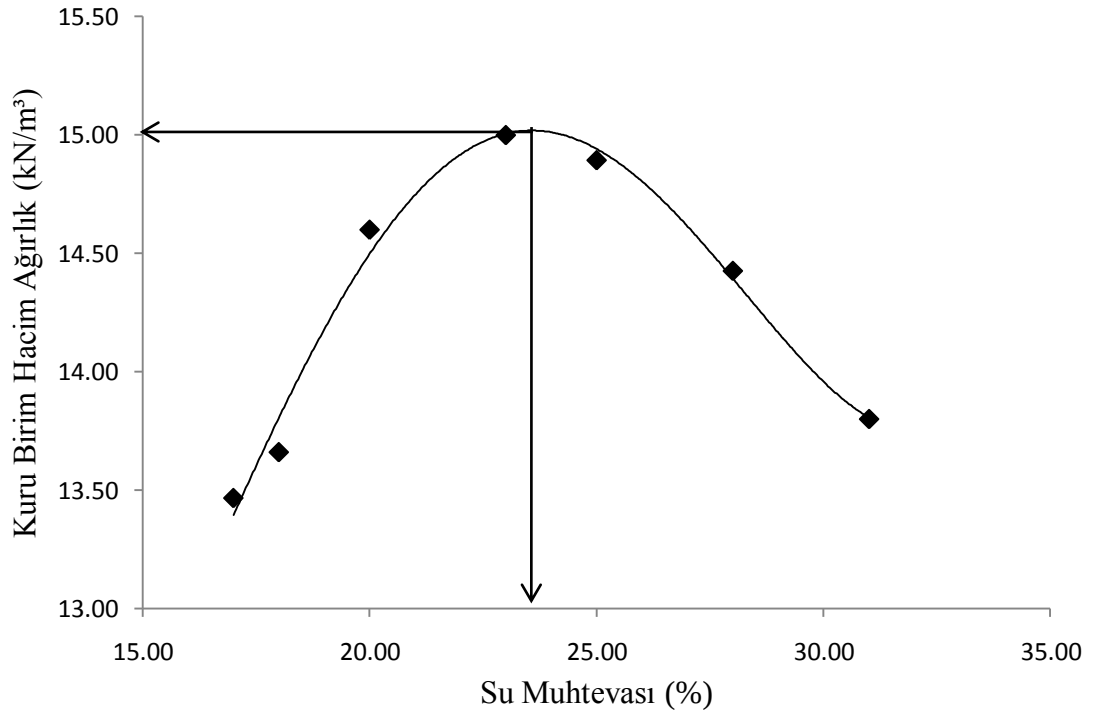
Şekil A.26 CH + %5 U.K. % 0.75K.P., 07,03.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmax} : 15.10 kN/m^3



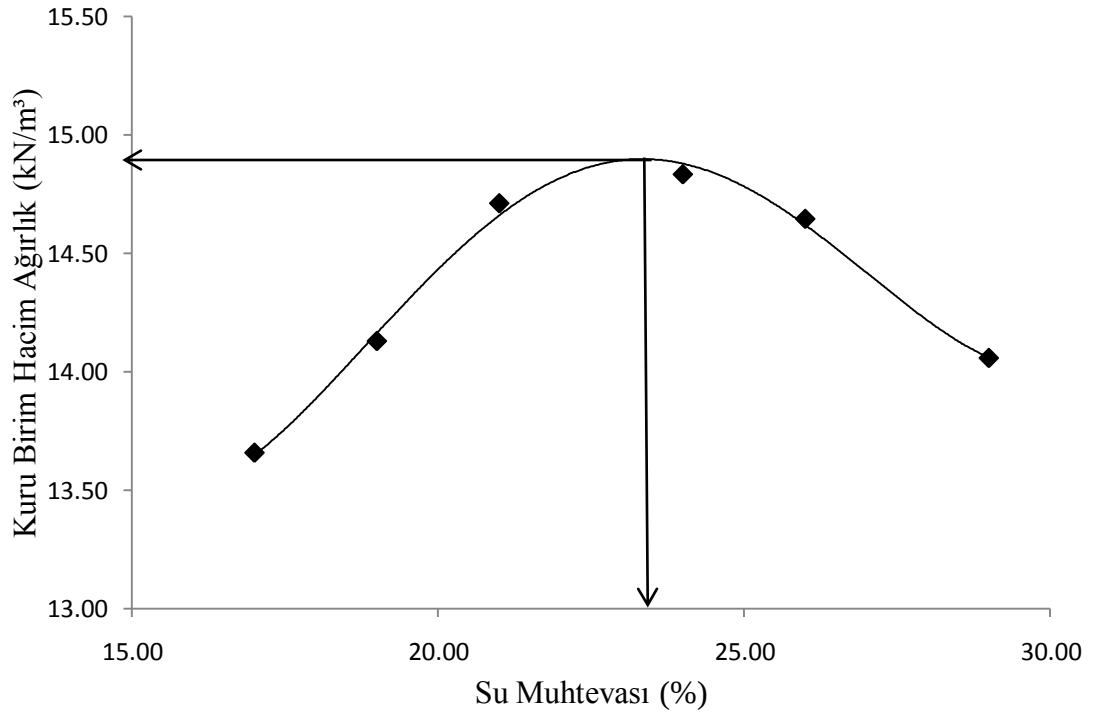
Şekil A.27 CH + %10 U.K. % 0.75K.P., 08.03.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 15.20 kN/m^3



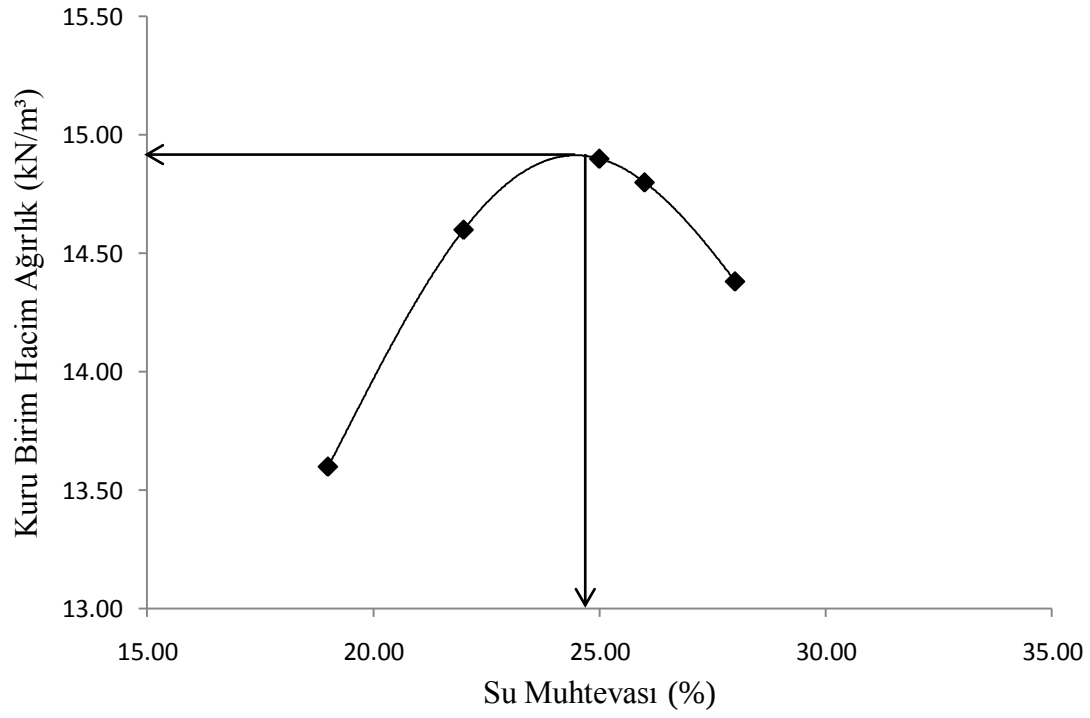
Şekil A.28 CH + %15 U.K. % 0.75K.P., 08.03.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



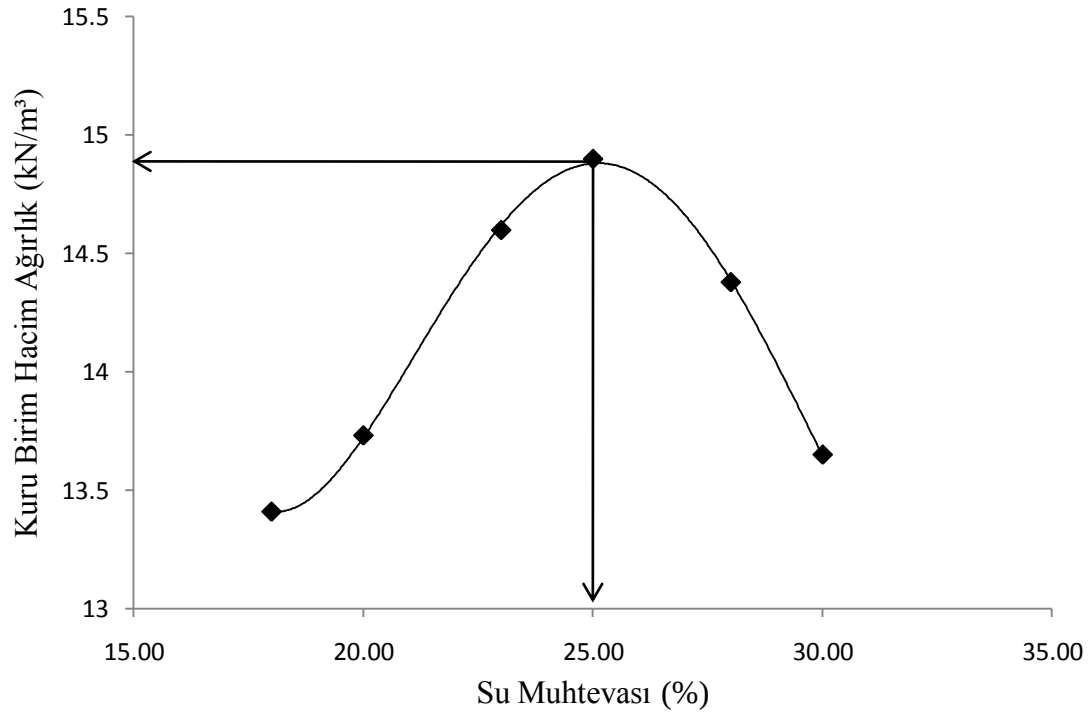
Şekil A.29 CH + %5 U.K. % 1.00K.P., 09.03.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 15.00 kN/m^3



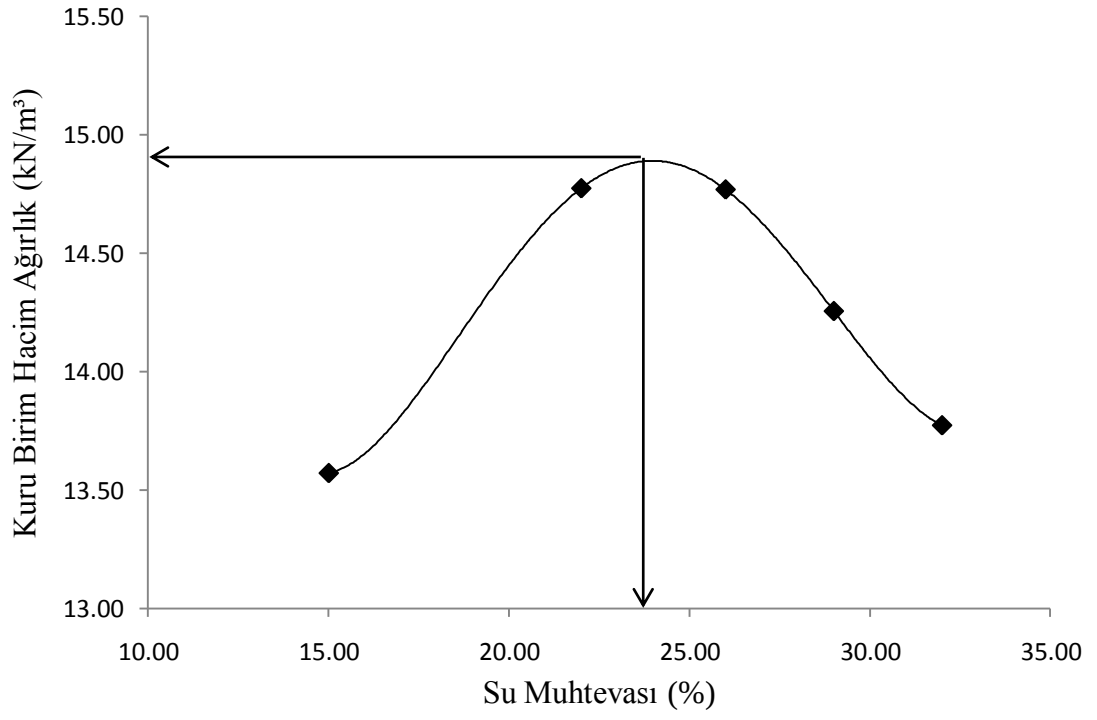
Şekil A.30 CH + %10 U.K. % 1.00K.P., 09.03.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.90 kN/m^3



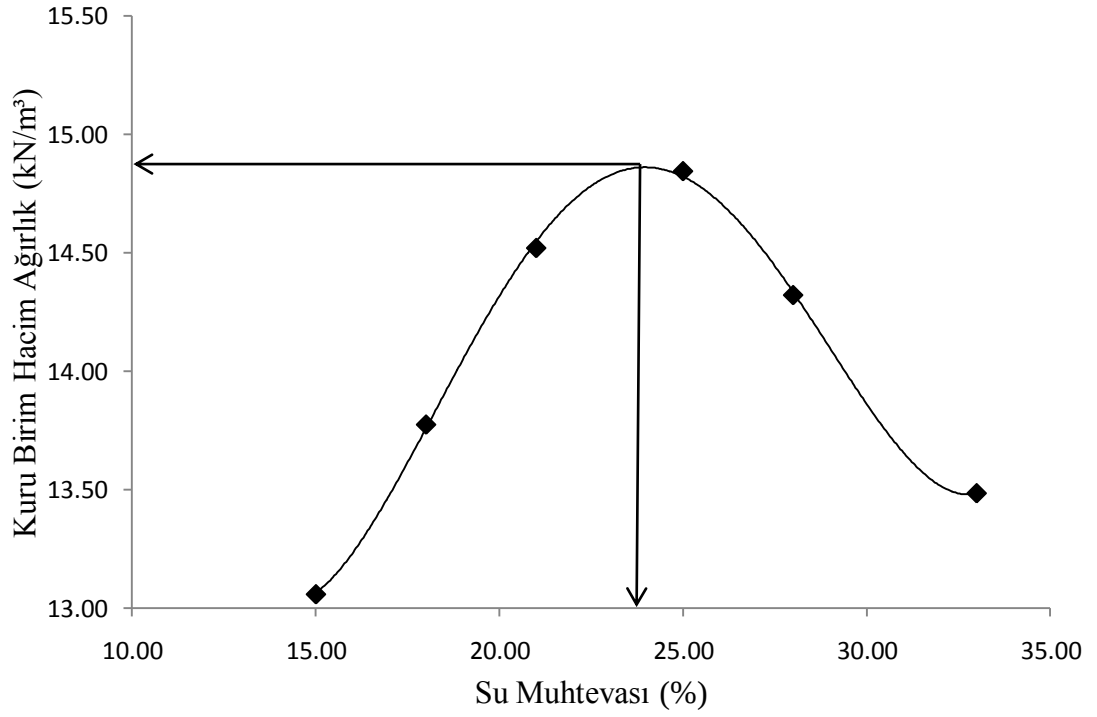
Şekil A.31 CH + %15 U.K. % 1.00K.P., 22.03.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.90 kN/m³



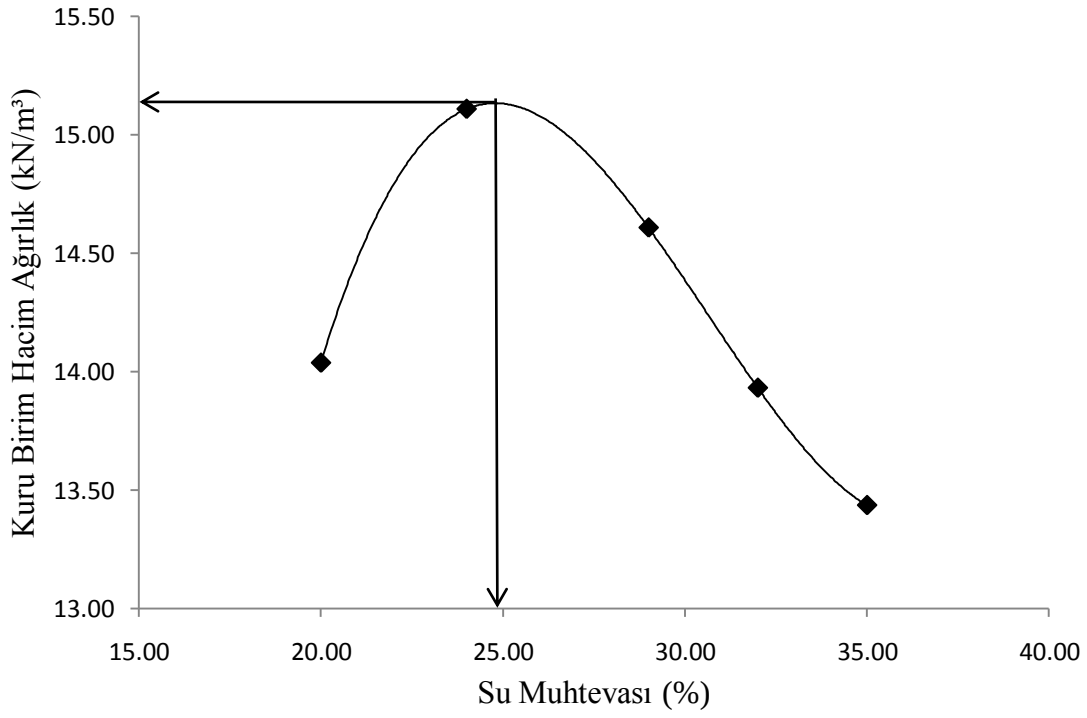
Şekil A.32 CH + %5 U.K. % 1.25K.P., 22.03.2011; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.90 kN/m³



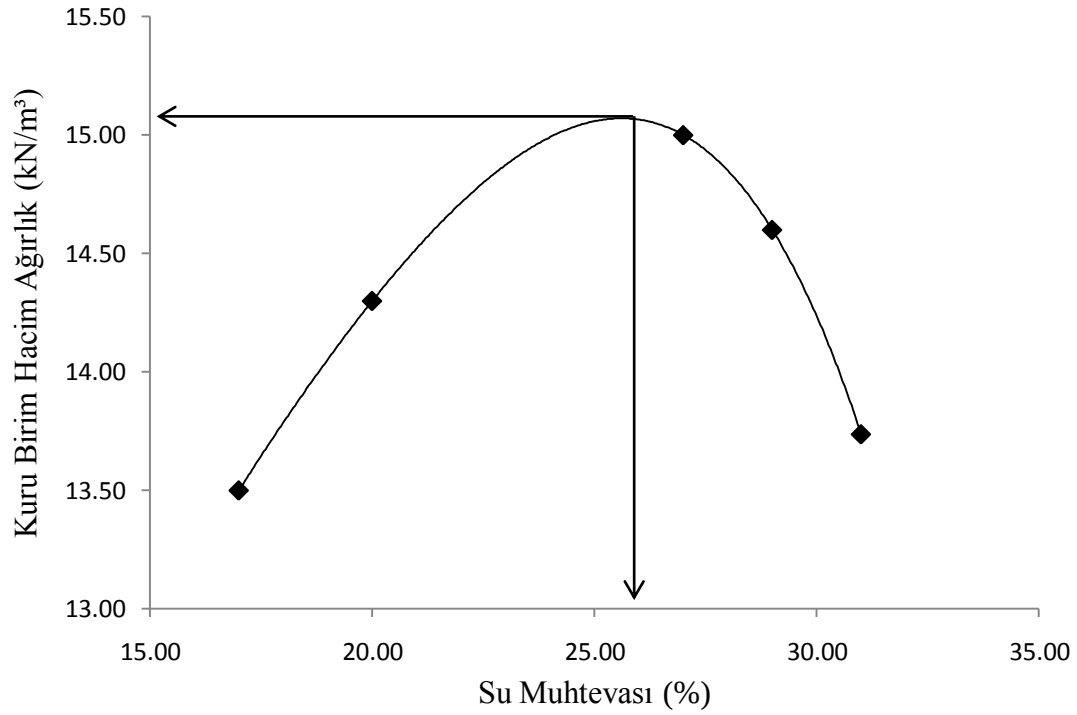
Şekil A.33 CH + %10 U.K. % 1.25K.P., 25.03.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 14.90 kN/m³



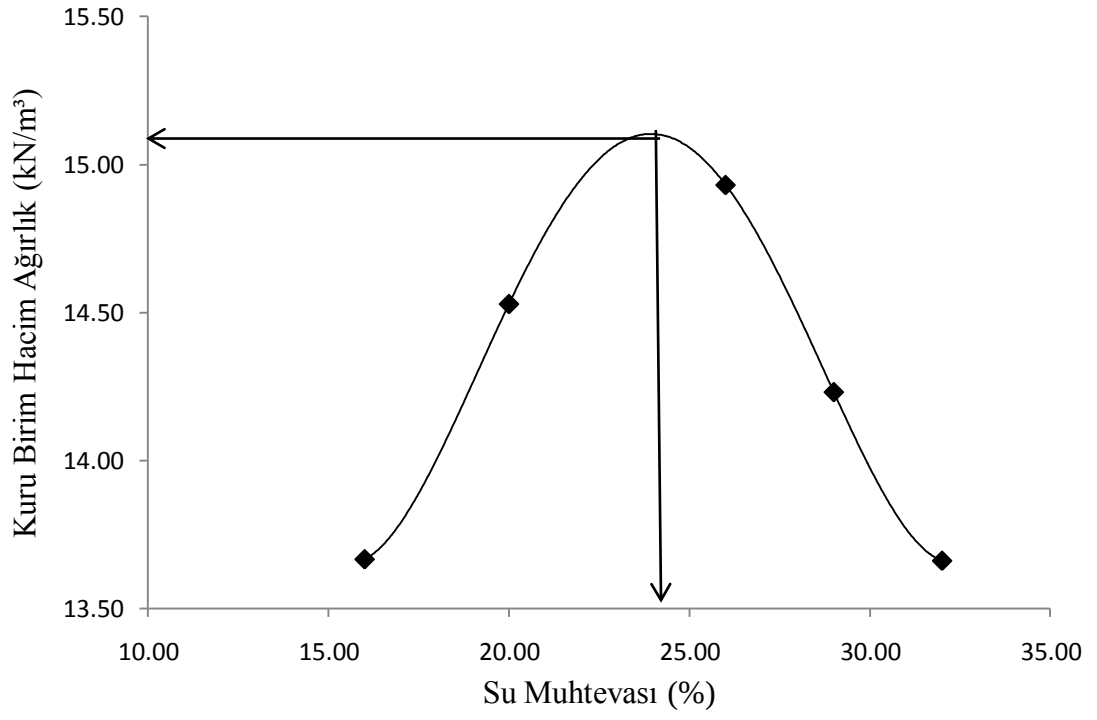
Şekil A.34 CH + %15 U.K. % 1.25K.P., 25.03.2011; w_{opt} : % 24, γ_{kmak} : 14.90 kN/m³



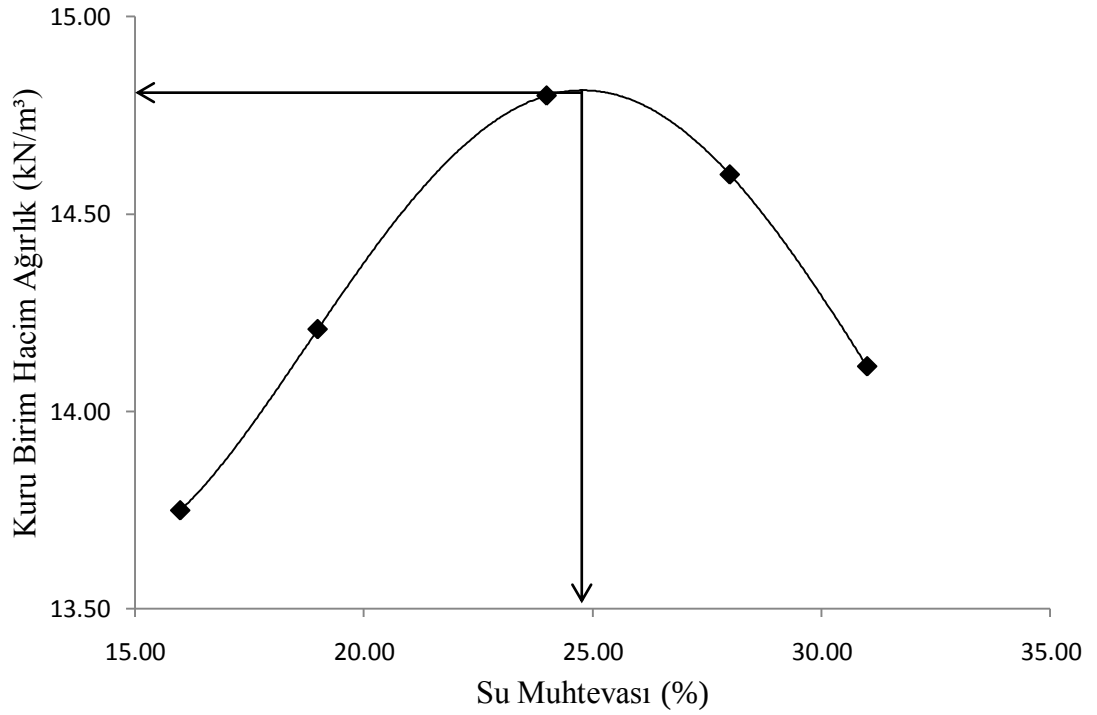
Şekil A.35 CH + %0.25 P:P. %0.50K.P., 12.04.11; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



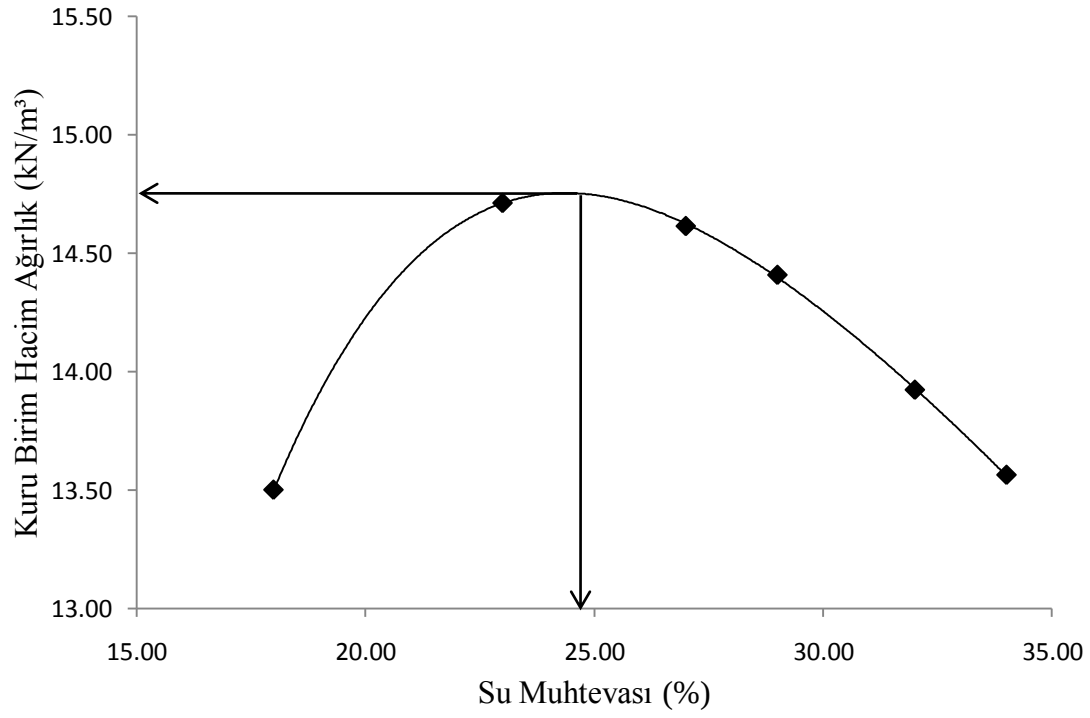
Şekil A.36 CH + %0.25 P:P. %0.75K.P., 12.04.11; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 15.10 kN/m^3



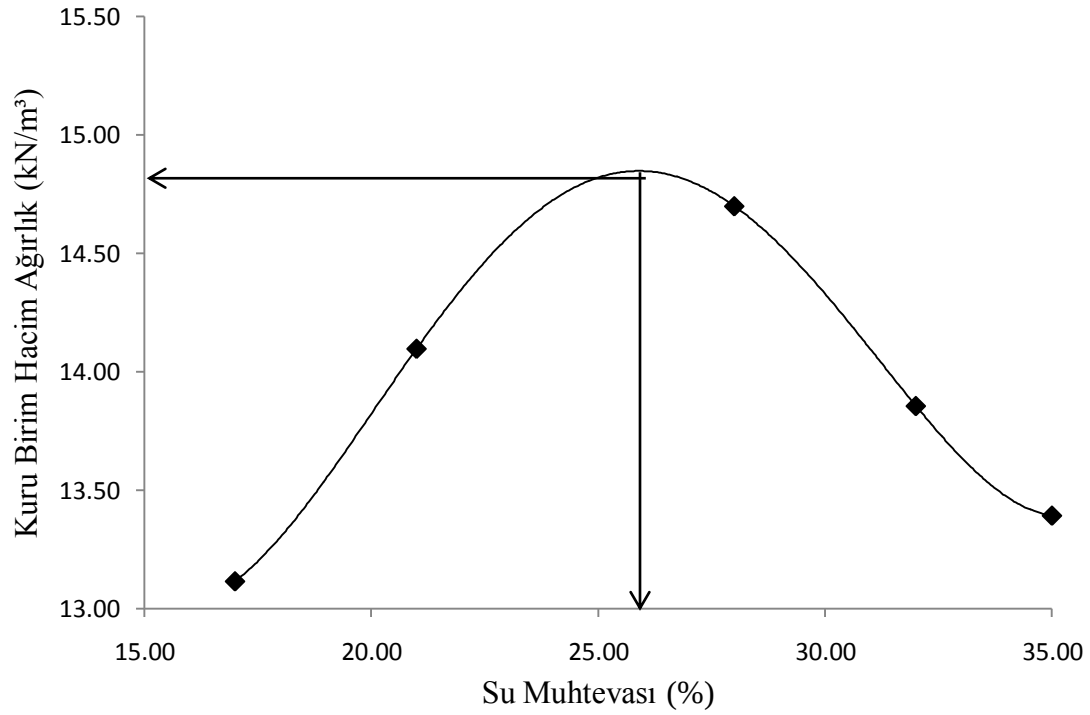
Şekil A.37 CH + %0.25 P:P. %1.00K.P., 13.04.11; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 15.10 kN/m³



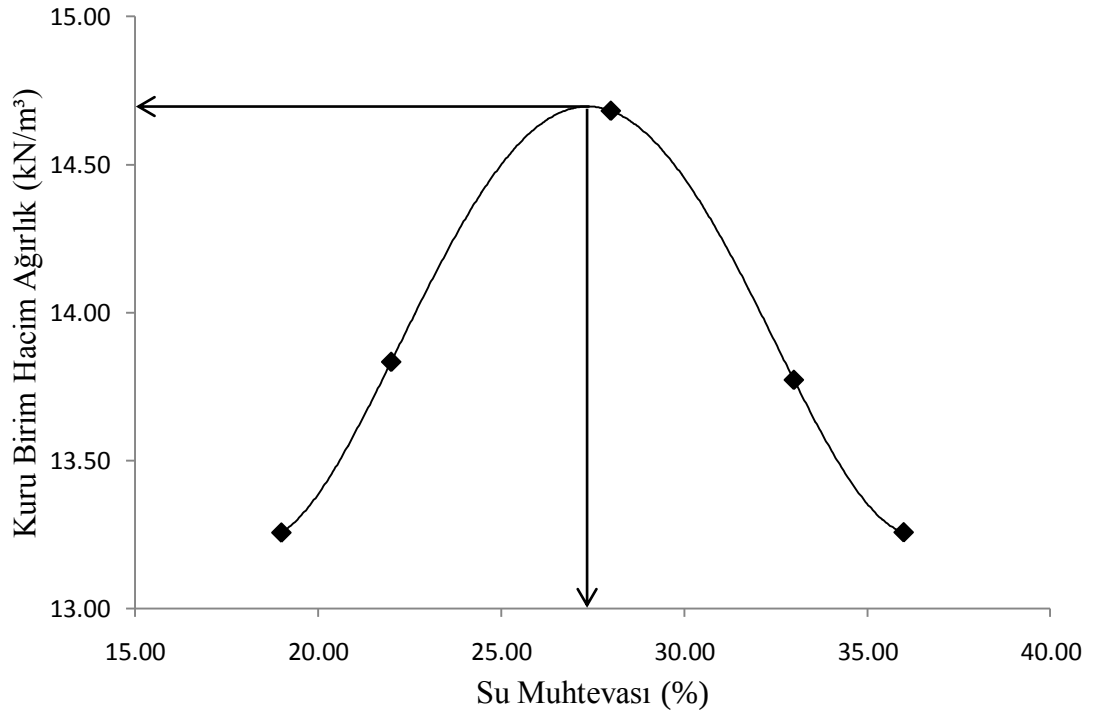
Şekil A.38 CH + %0.50 P:P. %0.50K.P., 13.04.11; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.80 kN/m³



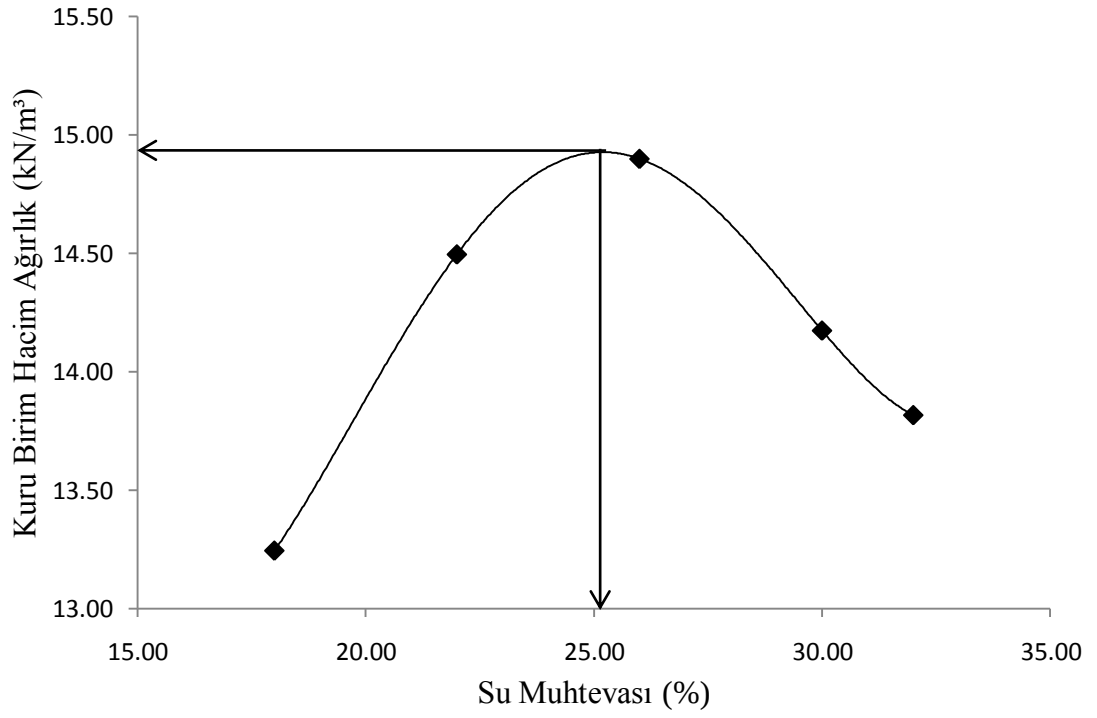
Şekil A.39 CH + %0.50 P:P. %0.75K.P., 13.04.11; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.80 kN/m^3



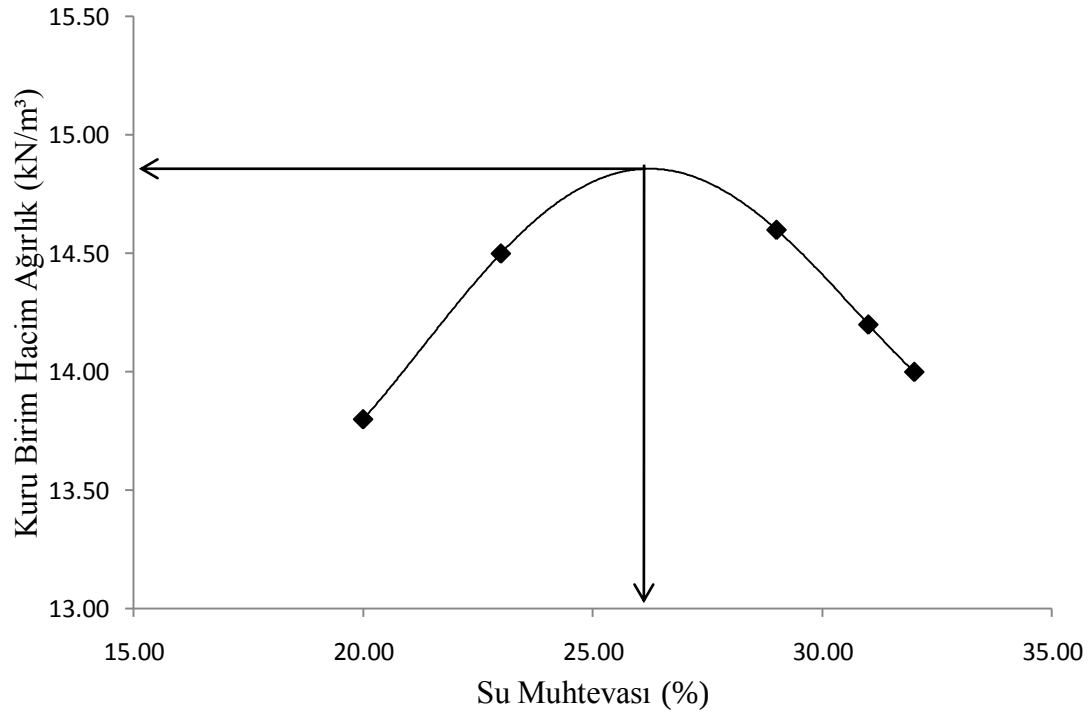
Şekil A.40 CH + %0.50 P:P. %1.00K.P., 14.04.11; w_{opt} : % 25, γ_{kmak} : 14.80 kN/m^3



Şekil A.41 CH + %0.75 P:P. %0.50K.P., 14.04.11; w_{opt} : % 27, γ_{mak} : 14.70 kN/m^3



Şekil A.42 CH + %0.75 P:P. %0.75K.P., 15.04.11; w_{opt} : % 25, γ_{mak} : 14.80 kN/m^3



Şekil A.43 CH + %0.75 P:P. %0.75K.P., 15.04.11; w_{opt} : % 26, γ_{kmak} : 14.70 kN/m³

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Adnan Yetkin ÇETİN

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir / 09.Ağustos.1986

Adres: Tarabya Sanatçılar Sitesi, 44M Blok, Daire.2,
Sarıyer / İST

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği