

established in
2016

MAS JOURNAL of Applied Sciences

ISSN 2757-5675

DOI: <http://dx.doi.org/10.52520/masjaps.93>

Araştırma Makalesi

İnşaat Mühendisliğinde Zayıf Zeminler ve Zemin İyileştirme Yöntemleri

Hakan Murat SOYSAL^{1*}, Kaveh DEGHANIAN¹¹Istanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

*Sorumlu yazar: hmuratsoysal@stu.aydin.edu.tr

Geliş Tarihi: 19.03.2021

Kabul Tarihi: 25.04.2021

Özet

Bu makalede inşaat mühendisliğinde zayıf zeminler ve zemin iyileştirmeleri konusu üzerinde durulmuştur. Bu amaçla geçmişte yapılan tüm akademik çalışmalar taranmış, ilgili olanlar derlenmiş, iyileştirmede en uygun ve en verimli yöntemin nasıl belirlendiği hususu anlaşılmaya çalışılmıştır. Zeminlerin en zayıf özelliği kendisini taşıma gücünde göstermektedir. Taşıma gücü zayıf bu tür zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi özellikle geoteknik mühendisliği disiplininin güncel araştırma konularından olmuştur. Problemlili olan bu zeminlere laboratuvar koşullarında farklı katkı malzemeleri katıldığı ve bu zeminlerin geoteknik parametrelerinin iyileştirilmesi konusunda bir arayış olduğu son yıllarda yayımlanan akademik çalışmaların artışından anlaşılmaktadır. Zayıf ve killi bir zeminde uçucu kül ilavesinin ve bu zeminin uygun kür süresinde bekletilmesinin zayıf zeminin taşıma gücünü artırdığından dolayı zemin iyileştirmede etkili bir yöntem olduğu, bu katkı malzemesinin en uygun kür süresinde bekletilmesi ile en yüksek dayanımı verebildiği anlaşılmıştır. Ayrıca kumlu veya siltli zayıf bir zemine uygun oranlarda farklı katkı malzemelerinin (çimento, polimer, çöp suyu) ilavesinin zeminin mukavemetinin ve akıcılığa karşı direncinin arttığı deneysel çalışmalarla ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde zayıf bir zemini optimum su muhtevasında kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırarak konsolidasyona tabi tutmak, bu zeminde boşluk oranının düşmesine, ve doğal olarak taşıma gücünün artmasına neden olacaktır. Tüm bu deneysel uygulamalar sonucu elde edilen sonuçlar, zemin iyileştirme yöntemleri arasında değerlendirilmelidir. Bu nedenle tüm bu çalışmalarda zemin iyileştirme yöntemlerinden yola çıkarak bu makale başlığı altında kayda değer ve uygulanabilir ortak bir hareket noktası belirlenmeye çalışılmış ve literatür çalışmalarındaki yöntemler ile bu makaleden çıkan öneri ilişkilendirilmiştir. Bu ilişkilendirilmede, konu hakkında gerek araştırmacılar için gerekse de inşaat sektörü temsilcileri için bir farkındalık oluşturulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kil, zemin iyileştirme, stabilizasyon, literatür, araştırma

Weak Soils in Civil Engineering and Soil Improvement Methods

Abstract

In this article, focuses on weak soils and soil all previous studies on weak soils and soil improvements in civil engineering. For this purpose all academic studies conducted in the past were scanned, relevant ones were compiled and it was tried to understand how to determine the most appropriate and most efficient method in improvement. The weakest feature of the soils reveals itself in its bearing capacity. It is understood from the increase of academic studies published in resent years that different additives are added to these weak soils under laboratory conditions and there is a search improving the geotechnical parameters of this soils. It has been understood that the addition of fly ash to a weak and clayey ground and keeping this ground in the appropriate curing time is an effective method for soil improvement since it increases the bearing capacity of the weak ground, and this additive material can give the highest strength by keeping it for the most appropriate curing time. In addition, it has been revealed by experimental studies that the addition of different additives (cement, polymer, garbage water) in appropriate proportions on a sandy or silty weak ground increases the strength of the soil and its resistance to fluidity. Likewise, subjecting a weak ground to consolidation by compressing it with the optimum water content by the compaction method will result in a decrease in the void ratio and naturally increase in the bearing power. The results obtained as a result of all these experimental applications should be evaluated among the soil improvement methods. For this reason based on the soil improvement methods in all this studies, a remarkable and aplicable comon starting point was tried to be determined under the title of this article and the methods in the literature studies were associated with the suggestion from this article.

Keywords: Clays, soil improvement, stabilization, literatures, researches

GİRİŞ

İnşaat Mühendisliğinde yapıların oturduğu zayıf zeminler önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu problemlerin azaltılmasına yönelik çok çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde geoteknik mühendisliğinde zemin problemlerinin çözümünde geliştirilen yeni çözümler sayesinde zemin iyileştirme yöntemleri kendine önemli bir yer edinmiştir. Özellikle temin edilmesi kolay ve maliyeti açısından tercih edilebilir ve kullanışlı bazı yapı malzemeleri her zaman tercih edilmiştir.

Kum, uçucu kül, çimento, polimer, atık sıvılar (çöp suyu) vb malzemeler zayıf zeminler (killi, siltli kohezyonlu) içine laboratuvar koşullarında karıştırılarak performansları deneysel olarak test edilmiş ve her bir malzeme kendine özgü bir davranış sergileyerek geoteknik açıdan olumlu veya olumsuz yönleri irdelenmiştir. Bu makale çalışmasında konu hakkında geçmişte yapılan tüm çalışmalar derlenmiş, en uygun ve en verimli yöntemin nasıl belirlendiği anlaşılmasına çalışılmıştır. Bu amaçla geçmişte yapılan makale, tez, bildiri, vaka analizi vb tüm akademik yayınlar araştırılmış ve verilerin seçilen konu ile ilgili yönleri ilişkilendirilmiştir.

Akademik araştırmalar, daha önce yapılan bilimsel çalışmalarla elde edilen bulgular, önerilen yeni fikirler ve ele alınan yaklaşımlar üzerine kurulur. Birbirinin devamı niteliğinde yürütülen akademik araştırmalarda araştırma konusu ile ilgili olarak daha önce yapılan çalışmaların taranması ihtiyacını doğurmaktadır.

Akademik araştırmalarda literatür taraması olarak adlandırılan bu süreç araştırma konusu ile ilgili daha önce yayınlanan bu eserlerin araştırılması, bulunması, etüd edilmesi, okunması, açıklanması, özetlenmesi ve bir disiplin içinde sentez

edilmesi gibi çalışmalarını kapsamaktadır. Literatür taramasının ve analizinin asıl amacı, daha önceki literatürün araştırılan konu hakkında geldiği son durumu tespit etmek, literatürdeki boşluk ve gözden kaçan noktaları ortaya koymak ve kendi çalışmamızın önceki literatür içerisinde nerede durması gerektiğini tespit etmektir. Literatür taraması akademik araştırmalar için zorunlu ve gerekli bir arşiv taramasıdır.

Yukarıda bahsettiğimiz bu yaklaşımdan yola çıkarak, kapsamında birçok bilinmezlik barındıran İnşaat Mühendisliğinde zayıf zeminler ve bu zeminlerin iyileştirilmesinde geçmişten günümüze araştırılan ve uygulanan çözüm yöntemleri araştırılarak bir veri tabanı oluşturulmaya çalışılmıştır. Kaynak olarak adlandırdığımız bu verilerin seçtiğimiz konu ile ilgili yönleri ilişkilendirilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Makale konusu çalışmalarının tamamı laboratuvar ortamında deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmalara bakıldığında, materyal olarak zayıf zemin örnekleri seçilmiş olup, bu örnekler doğada kolay bulunan killi ve siltli zeminlerdir. Zayıf zeminler taşıma gücü yetersizliği, oturma ve şişme potansiyelinin yüksek olması ve geçirimsizlik gibi sorunların bir veya birkaçının bulunduğu zeminlerdir. Zemin iyileştirmede metodoloji olarak, zeminin yukarıda anılan yetersiz özelliklerinin katkı ilavesi, sıkıştırma gibi metodlar uygulanarak deneysel sonuçları incelenerek iyileştirilmesi amaçlanır. Öncelikle Zayıf Zemin nedir? Hangi tür zeminlere zayıf Zemin denilmektedir? Bu sorulara cevap vermek gerekirse, İnşaat mühendisliğinde zeminler bazı durumlarda istenen özellik ve kalitede değildir. Zayıf zeminler; mukavemeti ve taşıma gücü düşük, boşluklu ve

şışabilen, ileri derecede sıkışabilir, düşük plastisiteli ve yüksek derecede geçirimli olan zeminlere denilmektedir. Ağırlıklı olarak gevşek tutturulmuş kil, silt ve kumlu zeminler zayıf zeminlerdir.

A. Zemin İyileştirme

Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki şekildedir.

-Yüzeysel iyileştirme

Katkısız iyileştirme

- Kompaksiyon ✓

Katkılı iyileştirme

- Mekanik iyileştirme (✓) (Uçucu Kül)
- Çimento ile iyileştirme (✓) (çimento)
- Katı Atık ile iyileştirme(✓) (Uçucu Kül)
- Kum İle iyileştirme (✓) (Kum)
- Polimer ile iyileştirme (✓) (VHP Polimer)

-Derin iyileştirme (Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler)

- Dinamik kompaksiyon
- Vibro-flotasyon
- Kompaksiyon kazıkları
- Patlayıcılar
- Enjeksiyon
- Geosentetikler vb.
- Kohezyonlu zeminler
- Ön yükleme yöntemi
- Kum drenleri yöntemi
- Elektro-osmoz yöntemi
- Isı ile iyileştirme

Yukarıda sunulan iyileştirme yöntemleri içerisinde, bu makale çalışmasında ✓ işaretli olan katkı ilaveli iyileştirme ve mekanik iyileştirme yöntemleri incelenmiş ve analiz edilmiştir. Derin iyileştirme yöntemlerine değinilmemiştir.

B. Araştırmanın Evreni

Araştırmanın evreni; inşaat mühendisliğinde sıklıkla yaşanan problem olarak karşımıza çıkan “zayıf zeminler” olarak ifade edebiliriz. Zayıf zeminler jeolojik oluşumlarına göre kendiliğinden doğada mevcut olabileceği gibi, sonradan doğal

olaylarla (deprem, heyelan, kayma vs) da olabilir. Ayrıca ilave olarak insan eli ile yapılan çeşitli kazı dolgu çalışmaları sonucu da ortaya çıkabilir. Bu açıdan bakıldığında, bu araştırmanın evreni olarak inşaat mühendisliğinde “zayıf zeminler” olarak düşünülmüştür.

C. Araştırmanın Örnekleme

Makale konusu zayıf zeminlerin zayıflık özelliklerini iyileştirmeyi hedeflerken hangi tür zeminleri bu kapsamda ele alıp iyileştirebileceğimizi belirlememiz gerekir. Bu kapsamda makale konusuna yönelik olarak ağırlıklı olarak kumlu, killi ve siltli zeminler iyileştirme yöntemlerinde seçilmiştir.

D. Veri Analiz Yöntemi

Araştırma sürecinin raporlama öncesi son adımı, bir araya getirilmiş verilerin analiz sürecine hazırlanması ve analiz edilmesidir. Bu çalışmanın veri analizinde her bir zemin türünün kendi içindeki davranış değerleri ve test sonuçları ele alınarak çıkarımsal sonuç elde edilmeye çalışılmış ve bu sonuçlar kendi konu başlığı altında çizelge olarak sunulmuş ve çizelgedeki veriler Zemin iyileştirme yöntemlerine sunduğu katkılar açısından yorumlanmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik olmasından dolayı çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kapsamda yapılan her bir çalışma kendi içerisinde bir sonuç ve önerme sunmaktadır. Bu önermeler, seçilen makale konumuz üzerinde destekleyici bir kanaatin (bulgu) oluşmasına sebep olmuştur. Örneğin zemin iyileştirmesinde kullanılan katkıların atık malzeme olarak tanımlanan malzemelerden oluşması durumunda, bunların depolama masraflarının azalmasını ve daha ucuz malzemelerin kullanılmasını sağlamaktadır. Bulgu açısından başka bir

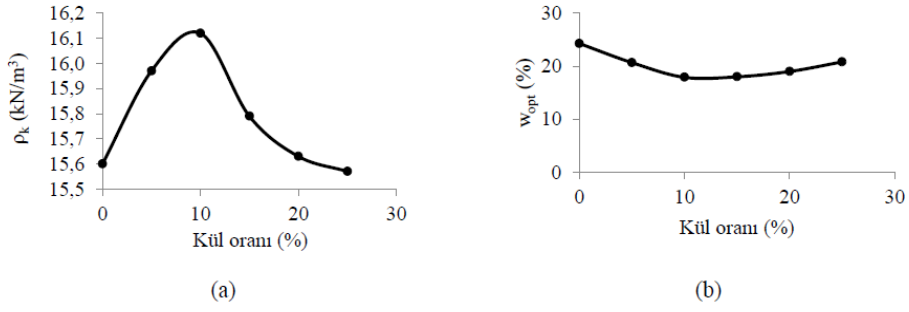
örnek vermek gerekir ise, atık malzemelerin sadece zemin iyileştirme amacıyla değil, özellikleri inşaat amaçlı dolguda kullanılmaya uygun olabileceği gibi bir başka değerlendirme aracı olduğunu söyleyebiliriz. İnşaat mühendisliği uygulamalarında proje sahalarındaki zeminler bazı durumlarda istenen özellik ve kalitede değildir. Proje sahasındaki zeminler taşıma gücü düşük, düşük plastisiteli, boşluklu ve zayıf, şişebilen, ileri derecede sıkışabilir ve yüksek derecede geçirimli olabilirler. Bu tür problemlili zeminler geoteknik mühendisliğinde önemli konulardan birisidir. Zemin stabilizasyon yöntemleri inşaat mühendisliğinde zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılır, böylece kullanıma uygun istenen özelliklere sahip zeminler elde edilir. Problemlili zeminlerin iyileştirilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır.

A. Katı Atık (Uçucu kül) ile Zemin İyileştirme Yöntemleri

Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi

Zayıf zeminler olarak değerlendirilen kil türü zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılacak optimum uçucu külün killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda ilk olarak, killi zeminlere farklı oranlarda uçucu kül katılarak elde edilen karışımların kıvam limitlerindeki değişimler incelenmiştir. Sonrasında, artan kül oranına bağlı olarak elde edilen karışımların Standart Proktor deneyi ile optimum su muhtevası ve maksimum kuru bicim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler kür edildikten sonra serbest basınç dayanımının hangi oranlarda iyileştiği

deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan Standart Proktor deneyi sonucunda kil zemin örneğine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası sırasıyla 15.6 kN/m^3 ve %24.3 olarak belirlenmiştir. (Totiç 2019). Burada (Şekil 1a, b) killi zeminlere katılan tüm uçucu kül miktarları için optimum su muhtevası katkısız kil numunelerine göre düşmüştür. Bununla birlikte, %10'dan fazla miktarlardaki uçucu kül katkısına bağlı olarak elde edilen maksimum kuru birim ağırlıklar sürekli azaldığı ve daha yüksek uçucu kül oranlarında karışımın mekanik özelliklerinde bir iyileşme olmayacağı değerlendirilmiştir. (Totiç, 2019). Şekil 1'de kullanılan numunelerin uçucu kül oranına bağlı maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası değişimi görülmektedir. Fotoğraf-1'de görüldüğü gibi, kürde bekletilen her karışım oranındaki numunelere tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan serbest basınç deneyi esnasında genel olarak rijit yenilmeler gerçekleşmiştir. En yüksek dayanımın 32. gün kür süresinde elde edildiği Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'deki grafik incelendiğinde, artan kür süresi ile numunelerin tek eksenli basınç dayanımının giderek arttığı ve katkısız kil numunelerine kıyasla karışımların daha yüksek tek eksenli basınç dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Farklı oranlardaki uçucu kül miktarında hesaplanan tek eksenli basınç dayanımı tüm kür süreleri için %0'dan %10'a kadar artmakta olup %10'dan sonraki katkılarda bu değer düşüş göstermektedir. Karışımlara ait serbest basınç dayanım deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde en iyi performans %10 uçucu kül katkısı ve 32 gün kür edilmiş numuneler için elde edilmiştir (Totiç, 2019).



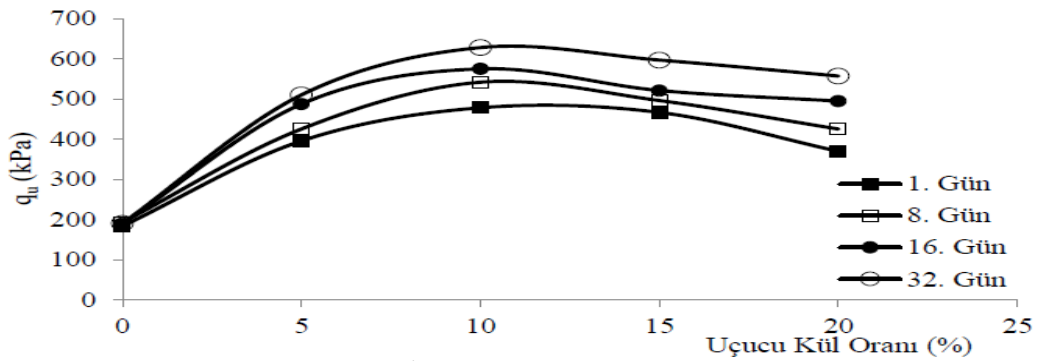
Şekil 1. Maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası değişimi Totiç ve ark. (2019)



Fotoğraf 1. Optimum su muhtevalarında serbest basınç deneyi için numune hazırlanması, kür edilmesi Totiç ve ark. (2019)

Uçucu kül ilavesinin %10 oranına kadar zeminde serbest basınç dayanımını artırdığı Şekil-2'den görülmektedir. Ancak bu orandan sonraki kullanımı zeminlerin mekanik özelliklerindeki iyileşme performansını düşürmektedir.

Uçucu kül ilavesinin kontrollü kullanımı ile elde edilen dayanım artışı arasındaki doğrusal ilişki zemin taşıma gücünün artırması açısından Zemin iyileştirme yöntemi olarak uygulanabilir.



Şekil 2. Serbest Basınç Deneyi İle Gözlemlenen rijit yenilmeler Totiç ve ark. (2019)

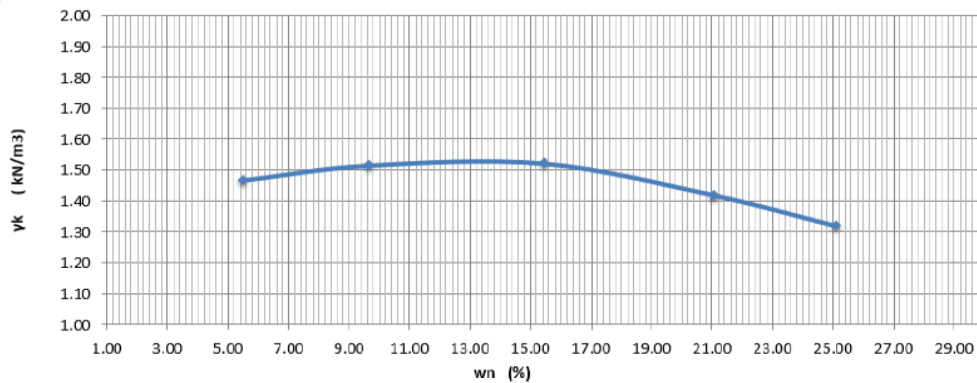
Uçucu kül ve siltli zemin karışımı ile kürleme süresine bağlı olarak zemin iyileştirmesi

Bu başlık altında sunulan çalışmada uçucu kül ve siltli zemin karışımının kürleme süresine etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan numune, İstanbul Şile'de bulunan bir kil ocağından alınmış olup, toprağın sınıflandırmasına göre yüksek plastik silt (MH) olarak belirlenmiştir. Uçucu kül ve kürleme süresi, siltli zemin – uçucu kül karışımı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Çalışmada TS 1900-1 ve TS 1900-2 standardına uygun olarak Atterberg limit, standart proctor testi, su içeriğinin belirlenmesi, üç eksenli basınç dayanımı laboratuvar testleri yapılmıştır. Bu çalışmada farklı oranlarda uçucu kül

eklenmesi farklı sonuçlar göstermiştir. (Ayar, 2020). Numuneler üzerinde sırasıyla %3, %5, %7 ve %10 uçucu kül eklenerek ve (1, 7, 14) günlük kürleme süresi verildiği Çizelge-3'den görülmektedir. Üç eksenli basınç dayanımı deneyinde %3 uçucu kül eklenerek ve 7 günlük kürleme süresi ile iç sürtünme açısı ve kayma mukavemeti maksimum değerlerini bulunmuştur. Çizelge 1 incelendiğinde optimum su içeriği değeri nin %15 olduğu görülmektedir. Çizelge 2 de ise optimum su içeriğine karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1.53 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Şekil 3 de 1.53 kN/m³ değeri grafiğin en tepe noktasında görülmektedir.

Çizelge 1. Silt zeminin optimum su içeriğinin belirlenmesi Ayar (2020)

Su Yüzdeliği	%5	%10	%15	%20	%25
Kap No	1	2	3	4	5
Yaş Numune + Kap (g)	148	143	144	147	166
Kuru Numune + Kap (g)	143.10	135.70	131.87	131.45	143.58
Su Ağırlığı (g)	4.90	7.30	12.13	15.55	22.42
Kap Ağırlığı (g)	53.94	60	53.31	57.64	54.2
Su Muhtevası (%)	5.50	9.64	15.6	21.07	25.08



Şekil 3. Siltli zeminin optimum su muhtevasının belirlenmesi Ayar (2020)

Çizelge-2 de ise optimum su içeriğine karşılık gelen maksimum kuru birim

hacim ağırlık değeri 1.53 kN/m^3 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2. Silt zeminin maksimum birim hacim ağırlığının belirlenmesi Ayar (2020)

Su Yüzdesi (%)	5	10	15	20	25
Kuru Birim Hacim Ağırlık	1,47	1,52	1,53	1,42	1,32

Hazırlanan numelere yapılan üç eksenli basınç deneyi sonucu kür süresine bağlı

içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 3 de verilmiştir. (Ayar, 2020).

Çizelge 3. Silt-Kül zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısı Ayar (2020)

Kül-silt oranı	1 gün	7 gün	14 gün
%0 Uçucu kül	$\phi=26.17$	$\phi=26.17$	$\phi=26.17$
%100 silt	$C=22.83$	$C=22.83$	$C=22.83$
%3 Uçucu kül	$\phi=24.33$	$\phi=30.85$	$\phi=15.36$
%97 silt	$C=67.9$	$C=49.2$	$C=87.93$
%5 Uçucu kül	$\phi=17.1$	$\phi=19.9$	$\phi=12.9$
%95 silt	$C=10.12$	$C=20.46$	$C=48.2$
%7 Uçucu kül	$\phi=14.3$	$\phi=15.63$	
%93 silt	$C=29.45$	$C=49$	
%10 Uçucu kül	$\phi=11.5$	$\phi=15.13$	
%90 silt	$C=28.75$	$C=31.8$	

Çizelge 3’de, iç sürtünme açısı 7. günde %3 uçucu kül ekleyerek maksimuma ulaşmıştır, ancak kohezyon (c) sabit değildir. Daha fazla açıklama ve daha fazla güvence için Mohr coulomb formülü $\zeta = \sigma \tan (\phi) + c$ kullanarak kesin artışı bulmak için kesme mukavemetini (ζ) hesaplanmıştır. Çizelge 4’te 7 gün içinde %3 uçucu kül eklenerek maksimum kesme mukavemeti (ζ) bulunmuştur ve 14 günün %7 ve %10 için kesme

mukavemetinin hesaplanmasına gerek yoktur. Üç eksenli (UU) testinde içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kesme mukavemeti (ζ) artırıldı ve bu artış siltli zemine %3 uçucu kül eklenerek 7 günde maksimum değeri bulmuştur (Ayar, 2020). Kesme mukavemetini hesapladıktan sonra, karışıma %3 uçucu kül ekleyerek ve 7 günlük kürleme süresi ile kesme mukavemetinin (ζ) maksimum noktasına ulaştığı Çizelge 4 de görülmektedir.

Çizelge 4. Silt zeminin kayma mukavemetinin belirlenmesi Ayar (2020)

Kül-silt oranı	1 gün	7 gün	14 gün
%0 Uçucu kül %100 silt	$\tau=195.06$	$\tau=195.06$	$\tau=195.06$
%3 Uçucu kül %97 silt	$\tau=264.93$	$\tau=337.415$	$\tau=196.82$
%5 Uçucu kül %95 silt	$\tau=75.485$	$\tau=158.24$	$\tau=120.11$
%7 Uçucu kül %93 silt	$\tau=75.24$	$\tau=143.66$	
%10 Uçucu kül %90 silt	$\tau=73.77$	$\tau=101.21$	

Sonuç olarak;

Sürtünme açısının kül ekleyerek maksimuma ulaştığını görüyoruz. İçsel sürtünme açısı ile kesme dayanımı arasındaki doğrusal ilişki, zemin iyileştirme yöntemlerinde %3 katkılı 7 gün kürlü numune kullanıldığı sürece zayıf zeminlerde dayanım problemlerin ortadan kalkmasına katkı sağlayacaktır.

B. Polimer Katkı ile Zemin İyileştirilmesi

1. Polimer (VHP) kum karışımı ile zemin iyileştirilmesi

G gerçekleştirilen çalışma kapsamında, polimer kum karışımının zemin iyileştirmesine etkileri incelenmiştir. Çizelge 5'te de görüldüğü gibi değişik rölatif sıklıklardaki sade kum numunelerinin ve bu kum numunelerin farklı oranlarda polimerler katılmış durumdaki kayma mukavemeti değerlerini hesaplamak için laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Bunun için zemine istenilen rölatif sıklıklarda ağırlıklarının yüzde oranlarına göre katkı malzemeleri ilave edilmiştir. Elde edilen sade ve katkılı farklı rölatif sıklıklardaki numunelerin kayma mukavemeti değerlerini hesaplamak için laboratuvar da direk kesme deneyi yapılmış ve numunelerin içsel sürtünme

açıları hesaplanarak aralarındaki fark gözlemlenmiştir. (Uysal, 2014).

İstanbul Silivri bölgesinden alınan sarı kumun kayma mukavemetinin belirlenmesine yönelik, virgin homopolymer (VHP) katkısıyla içsel sürtünme açısının artırılması için bir deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmada kum ve katkı olarak Polimer malzeme (VHP) kullanılmıştır. (Uysal, 2014). Kum-Polimer Karışımı: Çizelge 5'te görüldüğü üzere, rölatif sıklık değerleri %20, %30 ve %40 olan katkısız zemin numunelerine ek olarak, kuru zemin ağırlığının %0.50, %1.00 ve %1.50'si oranlarında kum-VHP karışımları hazırlanmıştır. Böylece hazırlanan numunelere kesme kutusu deneyi yapılmış, rölatif sıklıkların ve katkı malzemelerinin kayma mukavemeti üzerine etkisi gözlemlenmiştir (Uysal, 2014).

Çizelge 5'e bakıldığında rölatif sıklığın arttıkça kayma mukavemeti açısı değerlerinin de arttığı ve bu durumda en düşük kayma mukavemeti açısının rölatif sıklık %20 olduğunda; en yüksek kayma mukavemeti açısının da rölatif sıklık %40 olduğunda elde edildiği görülmektedir (Uysal, 2014).

Çizelge 5. Yalın kumun kayma mukavemeti açısı değerleri. Uysal (2014)

Rölatif Sıklık	Kayma Mukavemeti Açısı
20	28
30	31
40	33

a. Rölatif sıklık %20 olması durumunda kum – vhp polimer karışımları

Yalın kumun kütlesi rölatif sıklığı %20 olacak şekilde hesaplandıktan sonra, toplam kütlein %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında VHP katkı malzemesi katılmıştır. Böylece rölatif sıklık %20 iken VHP katkı malzemesinin kumun kayma mukavemetini nasıl değiştirdiği görülmüştür. Çizelge 4.6'ya bakıldığında, Rölatif sıklık %20 iken VHP katkı malzemesi eklenme oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı görülmektedir (Uysal, 2014).

b. Rölatif sıklık %30 olması durumunda kum – vhp polimer karışımları

Rölatif sıklık %30 olacak şekilde sabit hacimli kesme kutusuna kaç gram numune konulacağı hesaplanmış ve yalın kuma yine %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında polimer katkı malzemesi eklenmiştir. Katkı malzemesi oranları sabit tutulup rölatif sıklık değeri %20'den %30'a arttırıldığında artan polimer katkı malzemesi oranları ile katkı malzemeli kumun kayma mukavemetinin arttığı çizelge-6'da görülmektedir (Uysal, 2014).

c. Rölatif sıklık %40 olması durumunda kum–vhp polimer karışımları

Çizelge 6'da rölatif sıklığın %40 olduğu durumda polimer fiberin kütlece %0.5,

%1 ve %1.5 oranlarında olduğu durumda kayma mukavemeti açısına etkileri görülmektedir. Zeminin rölatif sıklığı %20 ve %30'dan sonra %40'a arttırıldığında yine polimer fiber katkı malzemesi oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı gözlemlenmiştir. Bir önceki durumda rölatif sıklık %20'den %30'a arttırıldığında rölatif sıklığa da bağlı olarak polimer kayma mukavemeti açısının artışından sonra rölatif sıklığın %30'dan %40'a arttırılmasının da aynı etkiyi yaparak kayma mukavemeti açılarını yükselttiği Çizelge 6'da görülmüştür. Zemin numunesinin rölatif sıklığının arttırılmasının zeminin kayma mukavemetini arttırdığı Çizelge 5'te gözlemlenmiştir. Numunelerin yalın hallerine virgin homopolimer fiber katkı malzemelerinin katılmasının zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan set deneyde en düşük kayma mukavemeti açısı kum numunenin %20 rölatif sıklıktaki katkı malzemesi katılmamış, yalın halinde 28° içsel sürtünme açısına sahip olduğu durumdur (Uysal, 2014). En yüksek kayma mukavemeti açısı ise numunenin %40 rölatif sıklıktaki durumunun kütlece %1.5 virgin homopolymer (VHP) fiber içerdiği 39° içsel sürtünme açısına sahip olduğu durumdur (Uysal, 2014).

Çizelge 6. Kum ve polimer kayma mukavemeti açısı değerleri Uysal (2014)

Polimer (VHP)	Kayma Muk. Açısı Rölatif Sıklık%20	Kayma Muk. Açısı Rölatif Sıklık%30	Kayma Muk. Açısı Rölatif Sıklık%40
0,5	31	33	36
1	33	34	38
1,5	34	36	39

Artan kayma mukavemet açısı değeri, katkı malzemelerinin, zeminin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, zemin içerisine katılan malzeme oranlarının şeklinin ve boyutlarının, karışımın kayma mukavemeti açısını ise belirli derecede olumlu etkilediği görülmektedir. Fiberlerin düşük maliyeti ve fazla hacim kaplamaları nedeniyle kumlu zemin stabilizasyonu çalışmalarında alternatif yöntem olarak kullanılabilirliği gözlemlenmiştir (Uysal, 2014). Zemin numunesinin rölatif sıklığının artırılmasının zeminin kayma mukavemetini artırdığı gözlemlenmiştir. Rölatif sıklık ile Kayma mukavemeti açısı arasındaki doğrusal ilişki polimer katkılı zemin iyileştirme yöntemi içinde uygulanan yöntemlerde kullanıldığı sürece zeminlerdeki bu tür problemler azaltılmış olacaktır (Uysal, 2014).

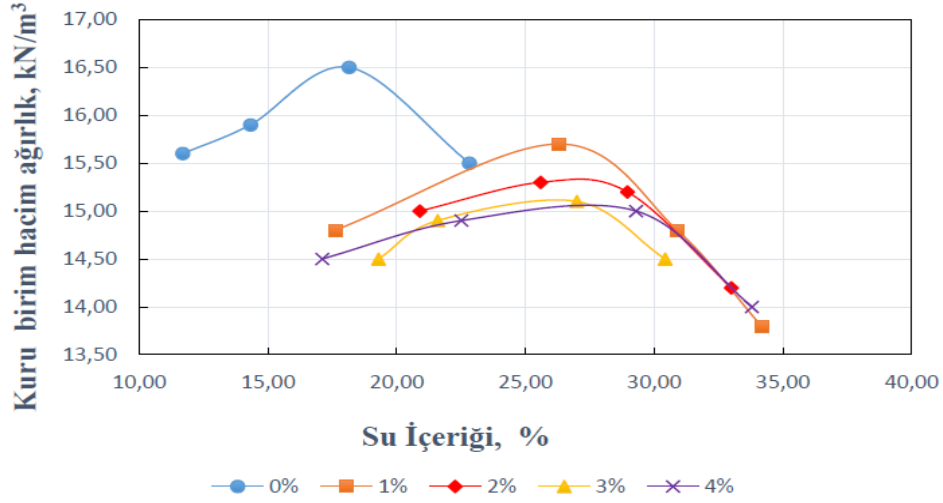
Zayıf kil zeminlerin polimer malzemesi ile iyileştirilmesi

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik olmasından dolayı çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Çalışma tez kapsamında, katkı olarak ağırlıkça %1,

%2, %3 ve %4 oranlarında bir kopolimer ilave edilmiş, kompaksiyon, serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Tamğaç, 2020). Doğal kil ve doğal kile kuru ağırlığının %1, %2, %3 ve %4 oranlarında polimer ilave edilmiş ve kıvam (likit ve plastik limit) deneyleri yapılmıştır. Doğal ve katkılı kil zemin üzerinde Standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Standart Proktor deneyleri sonucunda katkısız ve her bir katkı yüzdesine ait optimum su içerikleri belirlenmiştir. Belirlenen optimum su içeriklerinde kompaksiyon kalıbından hazırlanan numunelerden örnekler alınarak 0, 3, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. (çizelge-8) Katkısız ve katkılı numuneler hazırlandıktan sonra hava almayacak şekilde desikatörde 3, 7 ve 28 gün bekletilerek küre tabi tutulmuştur (Tamğaç, 2020)

a.Standart proktor deneyi sonuçları

Katkısız ve %1, %2, %3 ve %4 polimer katkılı numuneler üzerinde standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Katkısız ve polimer katkılı killere ait standart kompaksiyon eğrileri Şekil 4’te, optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 7’de verilmiştir.



Şekil 4. Standart kompaksiyon eğrileri Tamğaç (2020)

Çizelge 7. MKBHA-Optimum su içerikleri Tamğaç (2020)

Polimer Yüzdesi (%)	Maksimum Kuru Birim Ağırlık kN/m^3	Optimum Su İçeriği (%)
0	16,5	18
1	15,7	27
2	15,3	28
3	15,1	27
4	15,1	28

Karışım optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 7’de verilmiştir. Yukarıdaki Şekil 4 ve Çizelge 7 incelendiğinde, en yüksek maksimum kuru birim ağırlık değerleri katkısız numunelerden elde edilmiştir. Polimer yüzdesi arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Katkısız numuneye ait maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri $16,5 \text{ kN/m}^3$ iken, %4 polimer yüzdesinde maksimum kuru birim hacim ağırlık $15,1 \text{ kN/m}^3$ olmuştur. %4 polimer yüzdesine sahip numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı katkısıza göre yaklaşık %8 azalmıştır. Optimum su içeriklerinde ise, katkılı numunelerin optimum su içerikleri katkısız numuneye göre

artmıştır. Katkısız numuneye ait optimum su içeriği %18 iken, %4 polimer yüzdesine sahip numunelerde %28 olmuştur. Katkısız numuneye karşılaştırdığımızda %4 polimer yüzdesine sahip numunelerde optimum su içeriği %55 artmıştır (Tamğaç,2020).

b.Serbest basınç deneyi sonuçları

Katkısız ve %1, %2, %3 ve %4 polimer katkılı numuneler üzerinde Standart Kompaksiyon deneyi yapılarak maksimum kuru birim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir. Kompaksiyon kalıbında optimum su içeriklerinde sıkıştırılan kil zeminlerden örselenmemiş örnekler alınarak 7, 14 ve 28 gün kür edilerek serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Katkısız numunenin serbest basınç mukavemeti

250 kPa olarak bulunmuştur. Polimer yüzdesi ve kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemetleri ve katkısız

numuneye göre yüzde artışları Çizelge-8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Serbest basınç mukavemetlerindeki yüzde değişimler Tamğaç (2020)

Polimer Yüzdesi (%)	Kür Süresi (Gün)	Ortalama Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)	Katkısız Zemine Göre Ortalama Yüzde Artış (%)
0	0	250	0
1	3	365	46,0
	7	378	51,2
	28	502	100,8
2	3	380	52,0
	7	436	74,4
	28	542	116,8
3	3	348	39,2
	7	415	66,0
	28	520	108,0
4	3	312	24,8
	7	395	58,0
	28	482	92,8

Yukarıdaki Çizelge 8 incelendiğinde tüm polimer yüzdesinde kür süresinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin de arttığı görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti %2 polimer katkılı ve 28 gün kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir (542 kPa). %2 polimer katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkısız numunenin serbest basınç mukavemetiyle karşılaştırıldığında, 3 günlük kür süresi sonunda %52, 7 günlük kür süresi sonunda %74,4 ve 28 günlük kür süresi sonunda %116,8 artmıştır. Diğer polimer katkılı numuneleri katkısız numuneler ile kıyaslandığında benzer durum geçerlidir. Serbest basınç mukavemeti açısından optimum polimer yüzdesinin %2 olduğu yapılan deneylerde görülmüştür (Tamğaç,2020). Sonuç olarak; Katkılı ve katkısız numuneler üzerinde yapılan standart Proktor deneyleri sonucunda, kopolimer yüzdesi arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri %1 oranında bir miktar artmış, daha sonra düşüş gerçekleştiği

Çizelge 7’den görülmektedir. Optimum su içeriklerinde ise, polimer yüzdesine bağlı olarak artış görülmüştür. Polimer yüzdesi arttıkça katkısız numunelere göre serbest basınç mukavemetleri de artmıştır (Tamğaç, 2020). %1, %2, %3 ve %4 polimer katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkısız numunelerle kıyaslandığında, 3 günlük kür süresi sonunda mukavemet artışı olmuştur. En yüksek serbest basınç mukavemeti %2 polimer katkılı ve 28 gün kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir (Tamğaç,2020). Polimer yüzdesi ile serbest basınç dayanımı arasındaki doğrusal ilişki zemin iyileştirme yöntemi içinde uygulanan yöntemlerde kullanıldığı sürece zeminlerdeki bu tür dayanım problemlerini azaltılmış olacaktır.

C. Kompaksiyon Yöntemi ile Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi

Geoteknik yapılarının tasarımı esnasında en önemli parametrelerden biri zeminlerin kayma mukavemeti değeridir. Bu değeri belirlemek için laboratuvarda en yaygın kullanılan

deney serbest basınç deneyidir. Laboratuvarında numuneler hazırlanırken ve arazide iyileştirme çalışması olarak zeminlere iş makineleri ile kompaksiyon uygulanmaktadır ve uygulanan kompaksiyon yöntemini zeminlerin kayma mukavemetini etkilemektedir. Bu

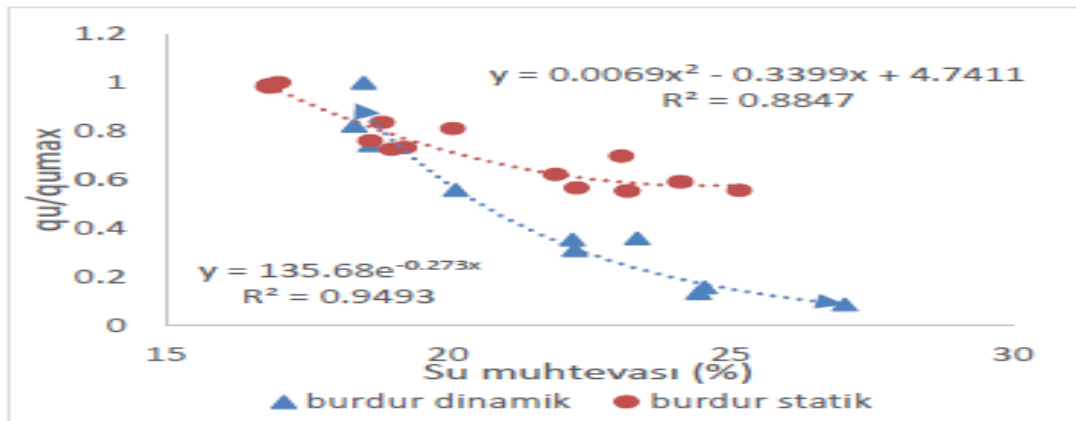
çalışmada dinamik enerji uygulanarak hazırlanan kil numunelerinin serbest basınç dayanımları incelenmiştir (Akan, 2018). Tüm bu deneyler sonucunda çalışmada kullanılan zeminlerin sahip oldukları bazı özellikler ve zemin sınıfları Çizelge 9 'da özetlenmiştir.

Çizelge 9. Zeminlerin özellikleri ve zemin sınıfları Akan (2018)

Zemin Adı	Dane b.h.a (kN/m ³)	Optimum Su Muhtevası (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Zemin Sınıfı
Aliğa Kili	26,2	33	34	62,2	CH
Eşen Kili	27,2	34	30	74,30	CH
Mavi Kil	27,6	21	21	35,6	CH
Burdur Kili	27,3	24	19,5	27,2	CL
İstanbul Kili	28,4	32	24	60	CH

Zeminlerin hazırlanması esnasında kullanılan yöntemin etkisi plastik limit değeri etrafında çok azalmakta ve bu su muhtevasında her iki yöntemle hazırlanan numuneler de yakın serbest basınç mukavemetlerine sahip olmaktadır. Ancak plastik limitin altına

ve üstüne geçildiğinde bu su muhtevalarında statik ve dinamik yöntemle hazırlanmış numunelerin serbest basınç mukavemetleri arasında farklar olduğu Şekil-5 'de görülmektedir (Akan,2018).



Şekil 5. Zemin su muhtevası - serbest basınç dayanımı ilişkisi Akan (2018)

Sonuç olarak; Plastik limit su muhtevasında sıkıştırılan numuneler birbirine yakın serbest basınç dayanımlarına sahiptirler ancak su

muhtevası plastik limit değerinden ıslak ya da kuru tarafa ilerledikçe sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri birbirlerinden uzaklaşmaktadır. Ancak

optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin yüksek serbest basınç dayanımları sağlayacağı, bu nedenle optimum su muhtevasında sıkıştırılarak kullanılan zemin numunelerinin daha yüksek dayanım vermesi, dayanım düşüklüğü probleminin azaltılmasına katkı sağlamış olacaktır (Taşköy, 2006).

D. Düşük Plastisiteli Zayıf Zeminlerin Çöp Suyu İlavesi İyileştirilmesi

Bu çalışmada, düzenli katı atık depo tesisinde sızdırmazlık amacı ile kullanılan kilin değişik oranlarda çöp suyuna maruz kalması ve çöp suyu ile etkileşim süresinin zeminin mühendislik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla zemine farklı oranlarda çöp sızıntı suyu karıştırılıp beklemeden ya da belirlenen kür süresi sonunda deneyler yapılmıştır. Hazırlanan zemin numunelerinin statik yükler etkisi altında davranış değişimlerini belirlemek amacı ile Atterberg limitleri, deney yöntemlerinden yararlanılmıştır. Kıvam limitleri deneylerinde zemine çöp sızıntı

suyu katılarak kür oranının kıvam limitleri üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca aynı kür oranlarında hazırlanmış numuneler 1, 7, 30 ve 90 gün küre bırakılarak kür süresi ile kıvam limitlerindeki değişimler incelenmiştir. Çizelge-10'da sunulan Kıvam limitleri deney sonuçlarında görülmüştür ki, yeni çöp sızıntı suyu ile karıştırılan ML(1), CL(1), ML(1) ve ML(2) numunelerinde çöp sızıntı suyu oranı ve kür süresi arttıkça likit limit, plastik limit ve plastisite indisi artmıştır. Endeks özellikleri farklı iki CL numunesinin % 100 yeni çöp sızıntı suyu ile karıştırılmasından ve 30 gün kür süresinde bekletilmesinden sonra likit limiti daha büyük olan numunede likit limit değerinin daha çok arttığı gözlenmiştir (Taşköy,2006).

1. Deneylerde Kullanılan Zeminler ve Endeks Özellikleri

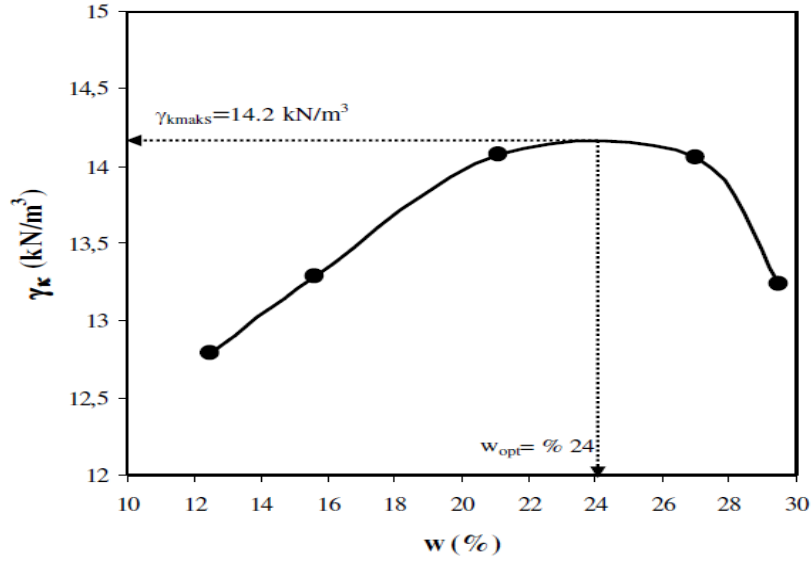
Deneylerde Kemerburgaz Katı Atık Depo Tesis Alanından temin edilmiş olan düşük plastisiteli (PI<50) siltli ve killi zeminler kullanılmıştır.

Çizelge 10. Kil zeminin bazı endeks özellikleri Taşköy (2006)

Zemin No	Zemin Sınıfı	LL (%)	PL (%)	PI (%)	γ_s (kN/m ³)	KUM	SİLT	KİL
1	ML	48	28	20	26,9	9	57	34
1	CL	47	27	20	26,9	6	43	51
2	ML	44	29	15	26,9	3	57	40
2	CL	34	19	15	26,9	48	43	9

Deney sonunda Şekil-6'da görüldüğü üzere $w_{opt} = (\%) 24$ ve $w_{maks} = 14.2$

kN/m³ olarak belirlenmiştir. (Taşköy, 2006)



Şekil 6. Zeminin maksimum birim hacim ağırlığının belirlenmesi Taşköy (2006)

Standart Proktor deney verileri elde edildikten sonra içerisinde belli oranlarda çöp sızıntı suyu karışmış zemin numunelerinin hazırlanmasına geçilmiştir. Önce zemin 105 °C etüvde 24 saat kurularak lastik tokmak yardımı ile ufalanmıştır ve 4 no' lu elekten elenmiştir. Elekten geçen malzemeden bir numune için 1400 gr alınarak optimum su muhtevasının % 0, 5, 20, 50 ve % 100' ü çöp sızıntı suyu olacak şekilde zemine su katılarak optimum su muhtevasında numune hazırlanmıştır. Standart Proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi kalıp içinde üç tabaka halinde ve Standart Proktor tokmagının 30.5 cm yükseklikten her tabaka için 25 kez düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler kalıptan çıkarılıp 0, 1, 7, 30 ve 90 günlük kür sürelerine bırakılmıştır. Kür süresi 0 gün olan numuneler hemen deneye tabi tutulmuştur. Kür süresi 1, 7, 30 ve 90 gün olan numuneler ise su muhtevalarını kaybetmeyecek şekilde sarılarak nem odasında muhafaza edilmiştir (Taşköy, 2006).

Atterberg Limitleri (Kıvam Limitleri)

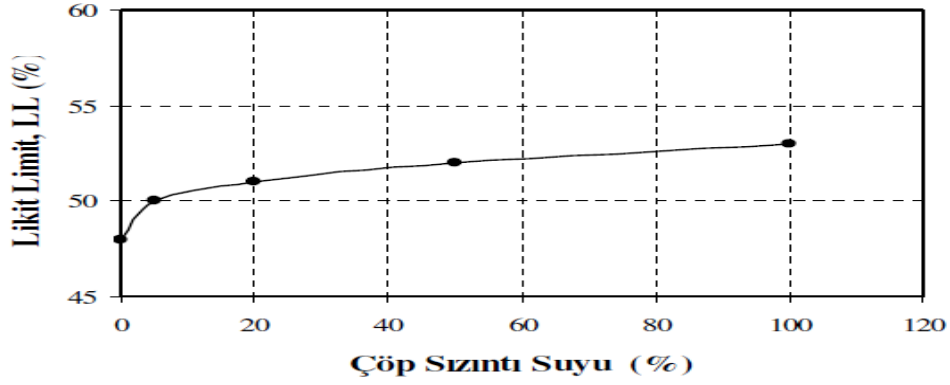
Bu çalışmada sızıntı suyu miktarının ve sızıntı suyu ile zeminin etkileşim süresinin zeminin likit limit ve plastik limiti üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla zemin numunesi çöp sızıntı suyu içeriği %5, 20, 50 ve 100 olacak şekilde çöp sızıntı suyu ile karıştırılarak 1, 7, 30 ve 90 gün süre ile küre bırakılmıştır. Kür süresinin bitiminde likit ve plastik limit deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca küre bırakılmadan aynı çöp sızıntı suyu içeriğine sahip su karışımı ile zemin karıştırılarak likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır (Taşköy, 2006).

a. Kür oranının zeminin kıvam limitleri üzerine etkisi

Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da görüldüğü gibi zemine farklı oranlarda çöp sızıntı suyu katılarak zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin çöp sızıntı suyu oranına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Buna göre zeminin temiz (çöp sızıntı suyu: % 0) olması durumunda likit limit % 48 olarak belirlenmiştir. Zemine % 5 oranında çöp

sızıntı suyu katılması ile LL= % 50 değerine yükselir. Çöp sızıntı suyu oranı % 20' ye çıkarıldığında LL= % 51' e yükselmistir. % 50 çöp sızıntı suyu oranında likit limit % 52, % 100 çöp

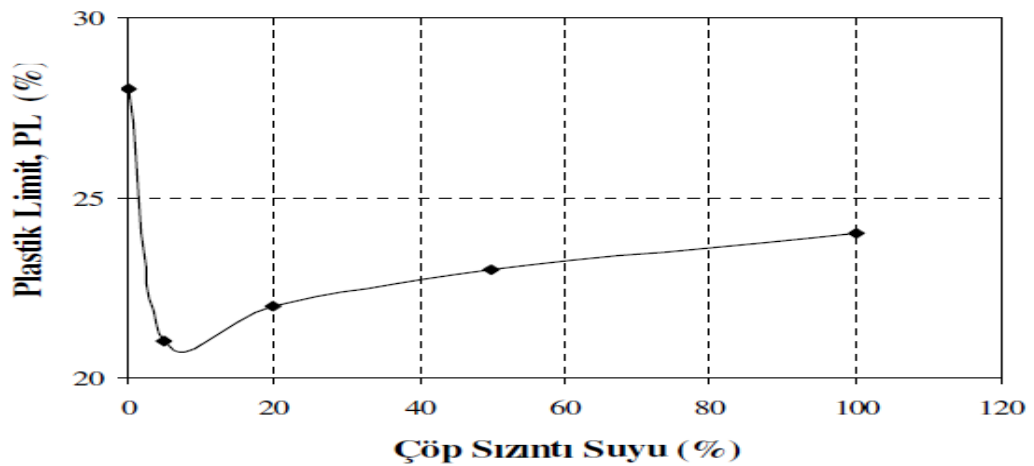
sızıntı suyu oranında % 53 değerine ulaşmıştır. Şekil-7' de görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu oranı arttıkça likit limit değeri artmaktadır. (Taşkøy,2006).



Şekil 7. Çöp sızıntı suyu oranının likit limit üzerine etkisi Taşkøy (2006)

Sekil 8' de görüldüğü gibi plastik limit (PL) değeri çöp sızıntı suyu katılmamış zemin için (PL= % 28) maksimumdur. %5 çöp sızıntı suyu oranında ise plastik limit (PL= % 21) minimumdur. % 20 çöp sızıntı suyu oranında plastik limit % 5 çöp sızıntı suyu oranına göre artarak % 22 değerine ulaşmıştır. Bu artış % 50 çöp sızıntı suyu oranında da devam ederek plastik limit % 23 olmuştur. % 100 çöp sızıntı suyu

oranında da plastik limit değeri artarak % 24 değerine ulaşmıştır. Çöp sızıntı suyu katkılı zemin numunelerinin plastik limit değeri temiz zemin numunesine göre daha düşüktür. Fakat çöp sızıntı suyu katılmış numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde çöp sızıntı suyu oranı arttıkça plastik limit değerinin bir miktar artış gösterdiği görülür (Taşkøy, 2006).



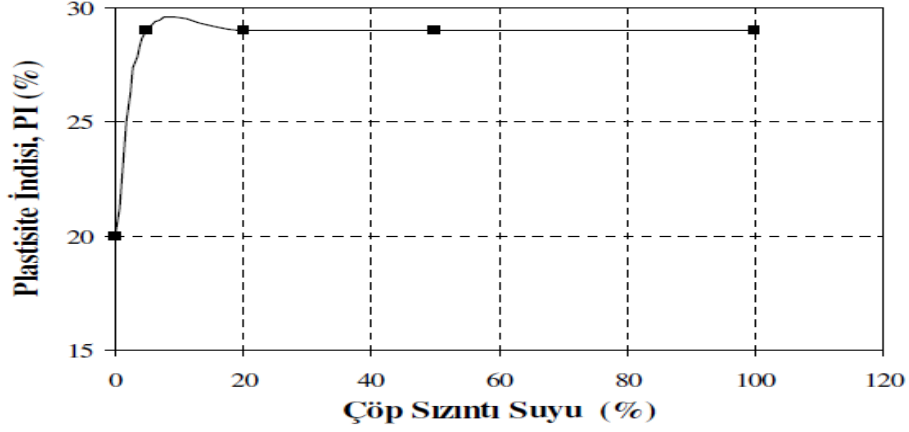
Şekil 8. Çöp sızıntı suyu oranının plastik limit üzerine etkisi Taşkøy (2006)

Plastisite indisi (PI) ise Sekil 9' da görüldüğü gibi çöp sızıntı suyu

miktarındaki artışla artma eğilimi göstermiştir. Temiz zeminin plastisite

indisi (PI= % 20) çöp sızıntı suyu katılmış numunelere göre daha küçüktür. % 5, % 20, % 50 ve % 100 çöp sızıntı suyu oranlarında plastisite indisi (PI= % 29) maksimum degerine ulaşır. Bilindiği gibi organik maddeler zeminin Atterberg

limitlerini arttırmaktadır. Bunun neticesinde organik içerikli çöp sızıntı suyu oranı arttıkça zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi artar. (Taşköy,2006).



Şekil 9. Çöp sızıntı suyu oranının plastisite indisi üzerine etkisi Taşköy (2006)

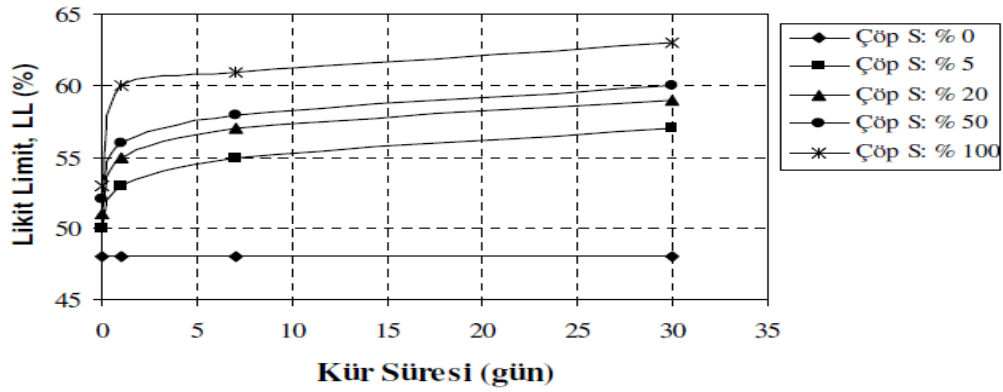
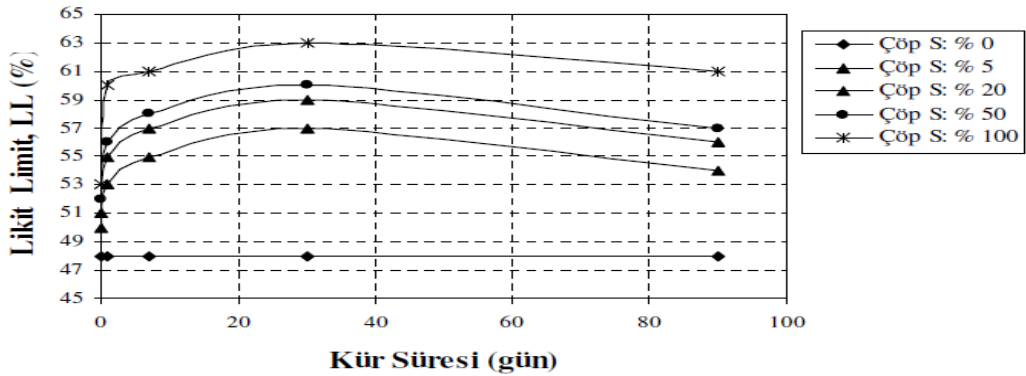
b.Kür süresinin zeminin kıvam limitleri üzerine etkisi

Çöp sızıntı suyu oranı %5, 20, 50 ve %100 numuneler 0, 1, 7, 30 ve 90 gün küre bırakılarak kıvam limitleri deneylerine tabi tutulmuştur (çizelge-11). Bu sonuçların incelenmesi sırasında ilk olarak likit limitteki (LL) değişimi ele alınmıştır. Daha sonra sırası ile plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) incelenmiştir (Taşköy, 2006). Şekil 10 da görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında likit limit degeri kür süresi

artıkça, artarak 30 günlük kür sonunda maksimum degere ulaşmıştır. Bu kür süresinden sonra ise likit limit degeri Şekil 10 a'da görüldüğü gibi düşmeye başlamıştır. 90 gün kür süresinde bu azalmaya rağmen çöp sızıntı suyu katılmış numunelerin likit limit degerleri temiz zemin numunelerinden daha yüksektir. Ayrıca çöp sızıntı suyu oranındaki artışla birlikte likit limit degeri artarak %100 çöp sızıntı suyu oranında maksimum degere ulaşmıştır (Taşköy, 2006).

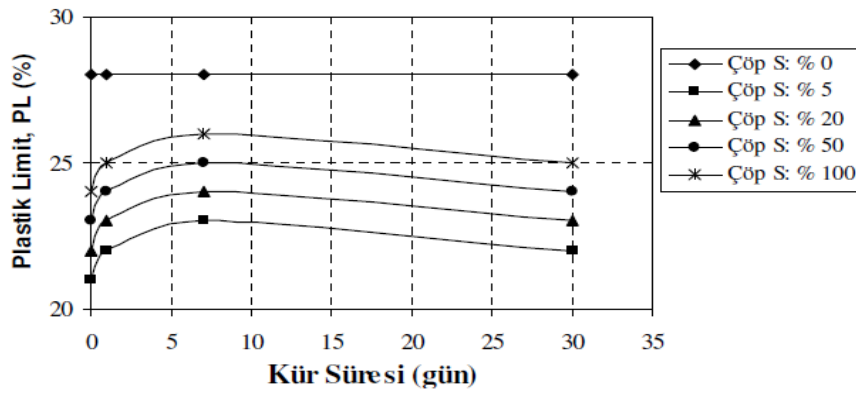
Çizelge 11. Kür oranı ve kür süresinin kıvam limitleri üzerine etkisi Taşköy (2006)

Çöp Suyu Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, PI (%)
5	0	50	21	29
	1	53	22	31
	7	55	23	32
	30	57	22	35
	90	54	24	30
20	0	51	22	29
	1	55	23	32
	7	57	24	33
	30	59	23	36
	90	56	25	31
50	0	52	23	29
	1	56	24	32
	7	58	25	33
	30	60	24	36
	90	57	26	31
100	0	53	24	29
	1	60	25	35
	7	61	26	35
	30	63	25	38
	90	61	27	34

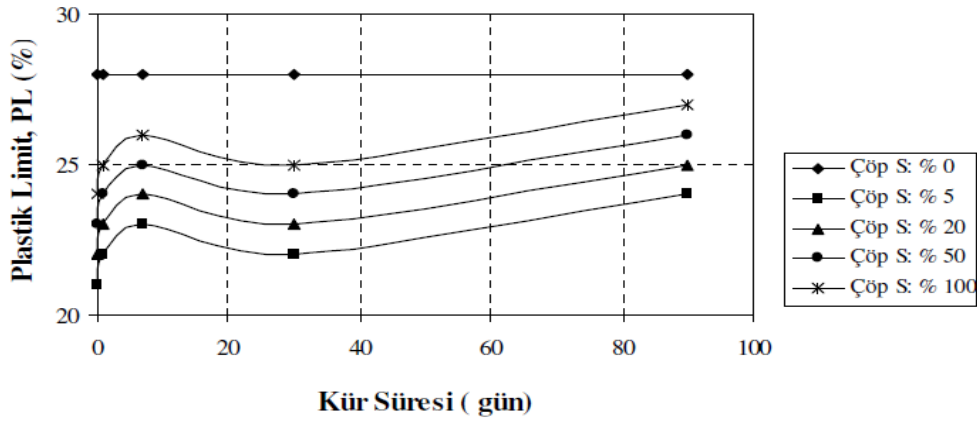
**a)0-30 gün****b) 0-90 gün arası****Şekil-10** :a ve b Kür Süresinin Likit Limit Üzerine Etkisi Taşköy (2006)

Sekil 11’de görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastik limit benzer davranış göstermektedir. Çöp sızıntı suyu katılmış zemin numunelerinin plastik limit değerleri temiz zemine göre daha düşüktür. Aynı şekil incelendiğinde çöp sızıntı suyu oranı arttıkça plastik limit değeri arttığı görülmektedir. %100 çöp sızıntı suyu içeren numunelerin plastik limit değerleri diğer numunelerden daha yüksektir.

Sekil 11.a’ da görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında plastik limit değeri 7 gün de dahil olmak üzere kür süresi arttıkça artmıştır. 30 günlük kür sonunda ise plastik limit değeri 7 güne göre azalmıştır. Bu kür süresinden sonra Sekil-11.b’ de görüldüğü gibi tüm çöp sızıntı suyu oranlarında tekrar plastik limit artarak 90 günlük kür sonunda en yüksek değere ulaşmıştır (Taşkøy, 2006).



a) t = 0–30 gün



b) t = 0–90 gün

Şekil-11: Kür Süresinin Plastik Limit Üzerine Etkisi Taşkøy A., (2006)

Sonuç olarak; Çizelge 11’de sunulan kıvam limitleri deney sonuçlarında görülmüştür ki yeni çöp sızıntı suyu ile karıştırılan numunelerde çöp sızıntı suyu

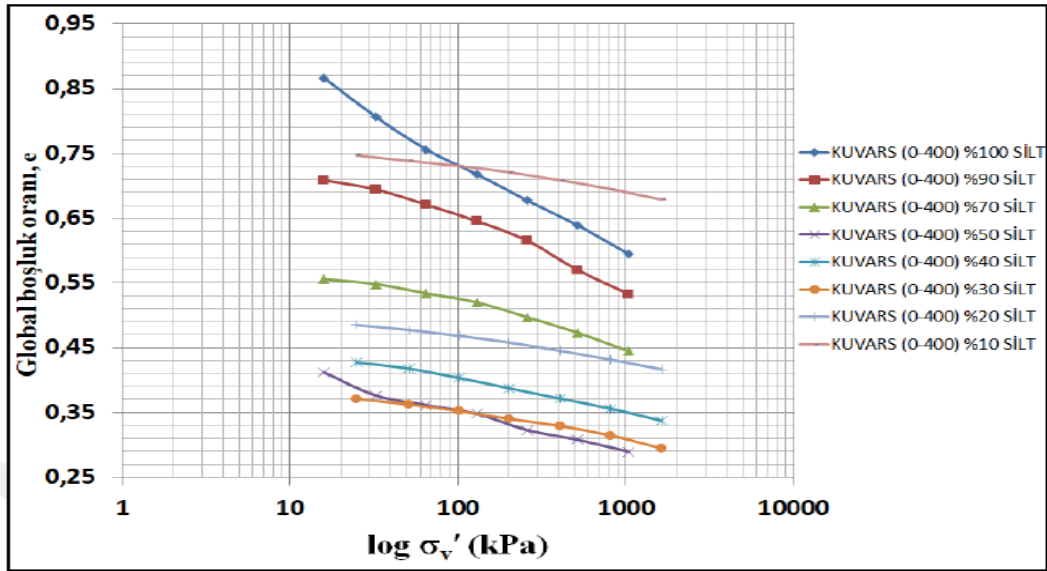
oranı ve kür süresi arttıkça likit limit, plastik limit ve plastisite indisi artmıştır. Likit limitin normal değerinin çöp suyu ilavesi ile artış göstermesi durumu,

zeminlerin su etkisine karşı gösterdiği akıcılık direncini artırır. Bu durum düşük plastisiteli zayıf zeminlerin iyileştirme yöntemleri açısından istenilen bir durumdur. Bu nedenle çalışmada belirtilen % oranlarda çöp suyunun düşük plastisiteli zeminlerin plastisite değerlerini artırarak zemin problemlerinin azaltılmasında bir katkı sağlayacaktır. (Taşköy, 2006).

E. Kum Silt Karışımının Zayıf Zeminlerdeki Konsolidasyona Etkisi

Bu çalışmada, kum silt karışımının zayıf zeminlerdeki konsolidasyona etkisi

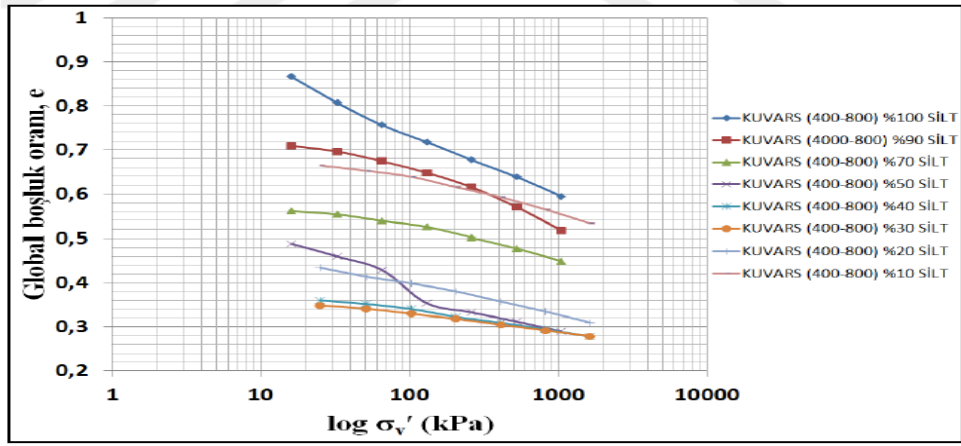
incelenmiştir. Kuvars ve silis kumlarına belirli oranlarda silt eklenerek elde edilen karışımlarla yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda yüklemeye bağlı boşluk oranı değerleri elde edilmiştir. 0-400 Kuvars kumu ve farklı oranlardaki silt eklenmesi ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil-12 de verilmiştir. En düşük boşluk oranına sahip karışımın %30 silt karışıma ait olduğu görülmektedir. (Artun,2019).



Şekil-12: Kuvars (0-400)+Silt karışım örneklerinin efektif konsolidasyon basıncı(log)-global boşluk oranı ilişkileri Artun (2019)

400-800 Kuvars kumu ve farklı oranlardaki silt eklenmesi ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil-13

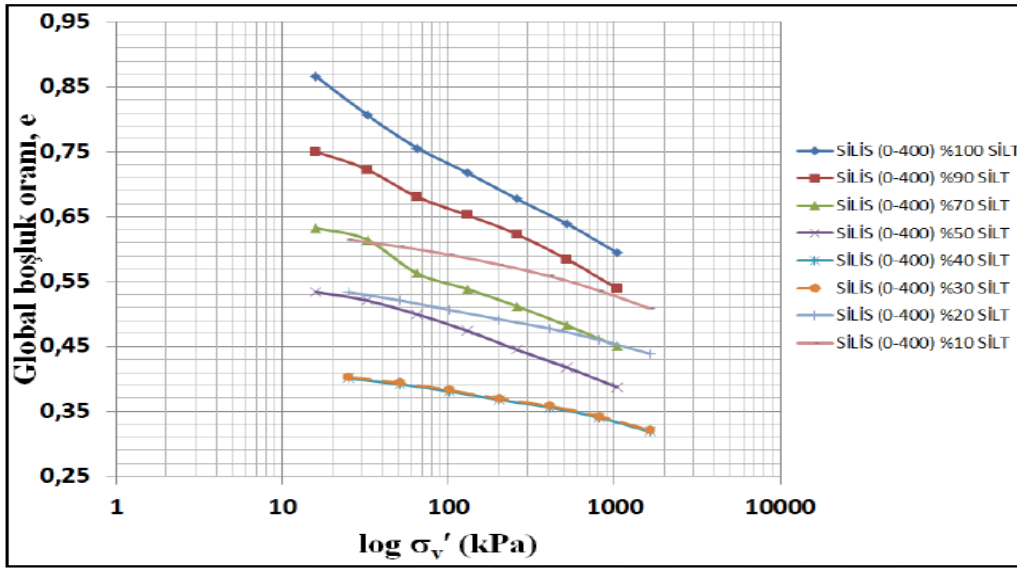
de verilmiştir. En düşük boşluk oranına sahip karışımın %30 silt karışıma ait olduğu görülmektedir.



Şekil-13: Kuvars(400-800) + Silt karışım örneklerinin efektif konsolidasyon basıncı(log) – global boşluk oranı ilişkileri Artun (2019)

0-400 Silis kumu ve farklı oranlardaki silt eklenmesi ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil-14 de verilmiştir. En düşük boşluk oranına sahip karışımın

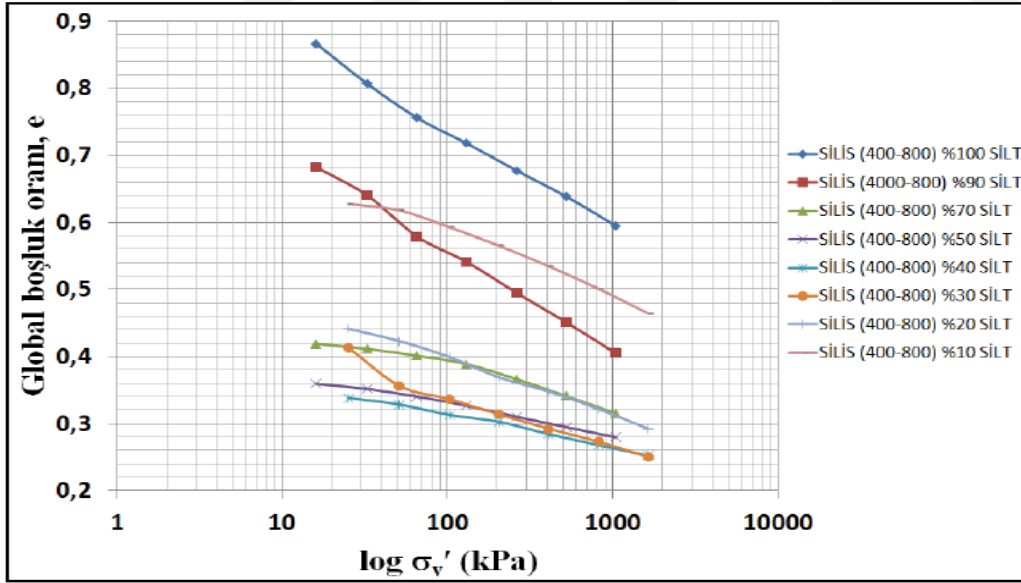
%40 silt ve %30 silt karışımına ait numunelerin olduğu görülmektedir. (Artun,2019).



Şekil-14: Silis (0-400) + Silt karışım örneklerinin efektif konsolidasyon basıncı(log) – global boşluk oranı ilişkileri Artun (2019)

400-800 Silis kumu ve farklı oranlardaki silt eklenmesi ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil-15 de verilmiştir.

En düşük boşluk oranına sahip karışımın %20 silt karışımına ait olduğu görülmektedir. (Artun,2019).



Şekil-15: Silis (400-8+00) + Silt karışımlarının efektif konsolidasyon basıncı(log) – global boşluk oranı ilişkileri Artun (2019)

Sonuç olarak; Silis (0-400)+silt, silis (400-800)+silt, kuvars (0-400)+silt ve kuvars (400-800)+silt karışımlarına yönelik, kuru ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 ince dane yüzdesindeki numunelere başlangıç global boşluk oranının ve her efektif konsolidasyon basıncı kademesi sonundaki global boşluk oranlarında %30 ince dane içeriğine kadar azalmanın olduğu görülmüştür. Kumların boşluk oranının mantıklı değerler kazandığı aralıkları belirlemek için efektif gerilme minimum boşluk oranı her zaman temel parametre olmuştur. Bilindiği üzere, efektif gerilme minimum boşluk oranı, daneler arası kuvvet aktarımının ve etkileşiminin minimum düzeyde olduğu boşluk oranıdır. (Artun,2019). Bir zemin içindeki en düşük boşluk oranı değeri ile dayanım arasındaki ters orantılı ilişki zemin iyileştirme olarak (kompaksiyon yöntemi) uygulanan yöntemlerde kullanıldığı sürece zeminlerdeki bu tür dayanım problemlerini azaltılmış olacaktır.

F. Çimento- Kumlu Kil (kaolen) Karışım Oranlarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Zemin iyileştirme yöntemleri arasında çimento malzemesi en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Çimento, ülkemizde temini kolay ve ekonomik bir yapı malzemesidir. Çimento vb. karışımlar, zeminin taşıma gücünü artırmak, permeabilitesini (geçirimsizlik) azaltmak ve deformasyon (oturma ve şişme) tepkilerini düşürmek gibi iyileştirmelerde kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmada, %30'u kum ve %70 kil olan karışıma farklı yüzdelerde çimento eklenerek karışım oranlarının mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada konsolidasyonsuz - drenajsız üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Ardından %70 koalin kil ve %30 kum oranlarından eşit miktarda düşürülerek %5, %10, %15 ve %20 oranlarında portland çimentosu eklenerek hazırlanan numunelere konsolidasyonsuz- drenajsız üç eksenli basınç (UU) deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar Çizelge 12’de verilmiştir. (İnan, 2019). Çalışmada %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento eklenerek gerçekleştirilmiştir. Bunlar aynı gün, ve 7 gün bekletildikten sonra teste tabi tutulmuştur. Numunenin hazırlandığı

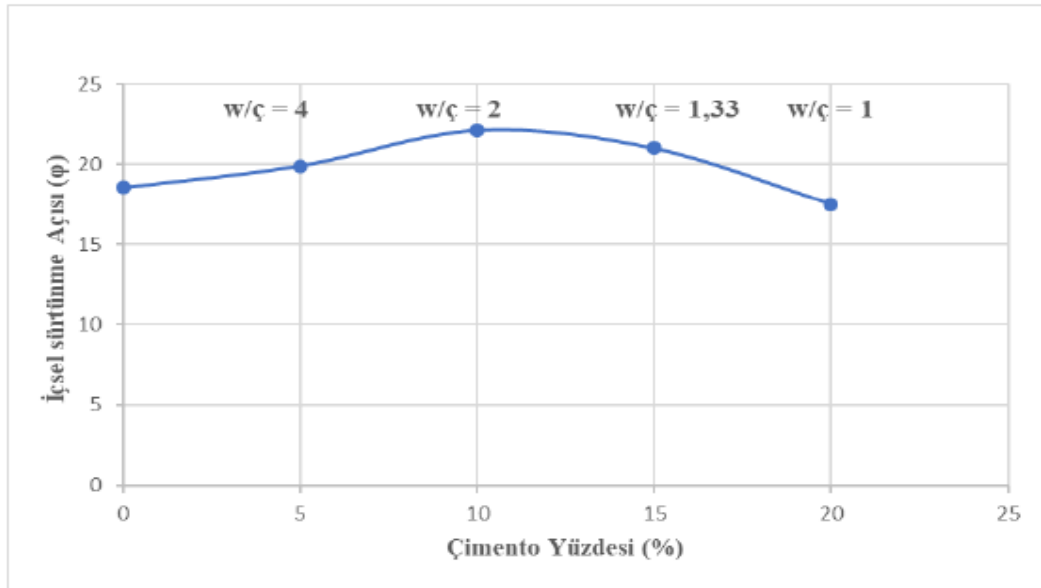
gün (Aynı Gün) ve 7 günlük Kumlu Kil Karışımının Farklı Çimento Oranlarında İçsel Sürtünme Açısı Değerleri Çizelge-12 ve Çizelge 13’de verilmiştir. (İnan, 2019).

Çizelge 12: Aynı gün kumlu kil karışımının farklı çimento oranlarında içsel sürtünme açısı değerleri İnan (2019)

Çimento Yüzdesi	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)
0	18,53
5	19,9
10	22,13
15	21,0
20	17,5

İçsel sürtünme açısı değerinin aynı gün ve 7 gün test yapılan numunelerde %15’e kadarki çimento katkısında arttığı görülürken, %15’den sonraki çimento katkısı oranında azaldığı görülmüştür (İnan, 2019). Aynı gün (numunenin

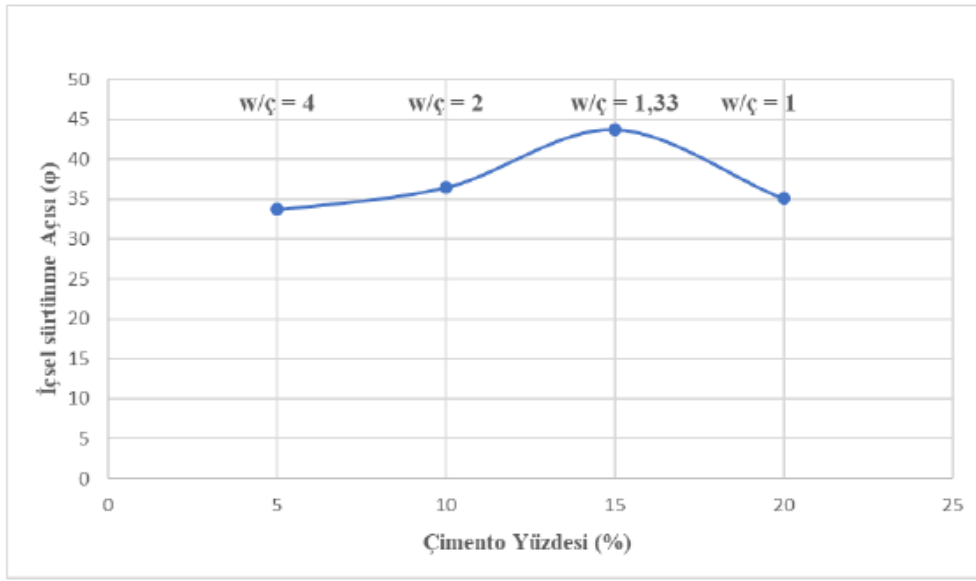
hazırlandığı gün) test edilen kumlu kil karışımının İçsel Sürtünme açısının % değişimi Şekil-16’da verilmiştir. İnan (2019). 7.gün test edilen kumlu kil karışımının İçsel Sürtünme açısının % değişimi Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 16. Aynı gün test edilen kumlu kil karışımının içsel sürtünme açısının % değişimi İnan (2019)

Çizelge 13. 7 Günlük kumlu kil karışımının farklı çimento oranlarında içsel sürtünme açısı değerleri İnan (2019)

Çimento Yüzdesi	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)
5	33,70
10	36,45
15	43,70
20	35,05

**Şekil 17.** 7.Gün test edilen kumlu kil karışımının içsel sürtünme açısının % değişimi İnan (2019)

Aynı Gün ve 7 günlük Kumlu Kil Karışımının Farklı Çimento Oranlarında Hesaplanan Kayma Mukavemeti

Değerleri Çizelge-14 ve Çizelge-15 de verilmiştir.

Çizelge 14. Aynı gün kumlu kil karışımının farklı çimento oranlarında kayma mukavemeti değerleri İnan (2019)

Çimento Yüzdesi (%)	Kayma Mukavemeti Değerleri (kN/ m ²)
5	355,8
10	172,2
15	125,5
20	69,7

Kayma Mukavemeti Değerleri yönünden aynı gün ve 7 gün test yapılan numunelerde %10'e kadarki çimento

katkısında arttığı görülürken, %10'den sonraki çimento katkısı oranında azaldığı görülmüştür. (İnan,2019).

Çizelge 15. 7 Günlük kumlu kil karışımının farklı çimento oranlarında kayma mukavemeti değerleri İnan (2019)

Çimento Yüzdesi (%)	Kayma Mukavemeti Değerleri (kN/ m ²)
5	324,1
10	789,5
15	664,6
20	690,3

Zemin numunesinin çimento oranının belirli orana kadar arttırılmasının zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Kayma mukavemeti ile içsel sürtünme açısı arasındaki doğrusal ilişki çimento katkılı zemin iyileştirme yöntemi içinde uygulanan yöntemlerde belirli oranlara kadar ve belirli kür süresinde kullanıldığı sürece zeminlerdeki bu tür problemler azaltılmış olacaktır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bu makale çalışmasında inşaat mühendisliğinde zayıf zeminler ve zemin iyileştirmeleri konusu hakkında bir derleme türü makale hazırlanarak zemin iyileştirmesinde en uygun ve en verimli yöntemlerin nasıl belirlendiği hususu anlaşılmasına çalışılmıştır.
- Zemin iyileştirme yöntemi olarak Yüzeysel İyileştirmenin “Katkılı İyileştirme” yöntemleri uygulanmış olup, deneysel çalışmalarda ise zayıf zemin özellikleri taşıyan kum, kil ve siltli zeminlerin kullanıldığı görülmüştür.
- Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklere etkisi yönünden incelenmiş olup, %10 oranına kadar uçucu kül kullanımının zeminde serbest basınç dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Ancak %10’dan sonraki kullanımı zeminlerin mekanik özelliklerindeki iyileşme performansını düşürmektedir.

- Polimer kum karışımının zeminin kayma mukavemeti açısını ise belirli derecede olumlu etkilediği görülmektedir.
- Kompaksiyon yöntemi ile zayıf zeminlerin iyileştirilmesi açısından yapılan çalışmalar göstermiştir ki plastik limit su muhtevasında sıkıştırılan numuneler birbirine yakın serbest basınç dayanımlarına sahiptirler. optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin ise daha yüksek serbest basınç dayanımları sağlayacağı, bu nedenle optimum su muhtevasında sıkıştırılarak kullanılan zemin numunelerinin zemin iyileştirme yöntemlerinde yararlı olacağı görülmüştür.
- Uçucu kül ve siltli zemin karışımı ile zemin iyileştirme çalışmaları göstermiştir ki: Sürtünme açısının kül ekleyerek maksimuma ulaştığı, sürtünme açısı ile kesme dayanımı arasındaki doğrusal ilişki olduğu, Zemin iyileştirme yöntemlerinde %3 katkılı 7 gün kürlü numune kullanıldığı sürece zayıf zeminlerde dayanım problemlerin ortadan kalkmasına katkı sağlayacağı anlaşılmıştır.
- Düşük plastisiteli zeminlerde çöp suyu kullanımının etkileri yönünden yapılan çalışmalar göstermiştir ki; çöp sızıntı suyu ile ilaveli numunelerde, çöp sızıntı suyu oranı ve kür süresi arttıkça likit limit, plastik limit ve plastisite indisi

artmıştır. Likit limitin normal değerinin çöp suyu ilavesi ile artış göstermesi durumu, zeminlerin su etkisine karşı gösterdiği akıcılık direncini artırır. Bu durum düşük plastisiteli zayıf zeminlerin iyileştirme yöntemleri açısından istenilen bir durumdur. Bu nedenle çalışmada belirtilen % oranlarda çöp suyunun düşük plastisiteli zeminlerin plastisite değerlerini artırarak zemin problemlerinin azaltılmasında bir katkı sağlayacaktır.

- Polimer katkı malzemesi kullanılarak zayıf kil zeminin iyileştirilmesi yönünden yapılan çalışmalar göstermiştir ki; Polimer yüzdesi ile serbest basınç dayanımı arasındaki doğrusal ilişki zemin iyileştirme yöntemi içinde uygulanan yöntemlerde kullanıldığı sürece zayıf Zemin problemlerini azaltılmaya katkısı olacaktır.

- Kum silt karışımının zayıf zeminlerin konsolidasyon özelliklerine (boşluk oranı) etkisi yönünden yapılan çalışmalar göstermiştir ki, Bir zemin içindeki en düşük boşluk oranı değeri ile dayanım arasındaki ters orantılı ilişki zemin iyileştirme yöntemi içinde uygulanan yöntemlerde kullanıldığı sürece zeminlerdeki bu tür dayanım problemlerini azaltılmış olacaktır.

- Çimento oranı %0 ve %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento ilaveli kumlu kil numunelerine üç eksenli basınç deneyleri (UU) yapılmıştır. UU deneylerinde artan çimento miktarına bağlı olarak dayanım değerinde belirli bir çimento yüzdesine kadar artma olduğu, sonrasında da düşüş olduğu görülmüştür.

- Bu makalede açıklanan tüm zemin iyileştirme çalışmalarında “yüzeysel iyileştirme yöntemi” kullanılarak çalışma başlığında tanımlanan problemin çözümüne katkı sunup sunmadığı deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Tüm bu çalışmalarda ortaya

konulan problemler ise hali hazırda sektör içinde inşaatın her aşamasında yaşanmakta olup, bu problemler iş kaybı, zaman kaybı, ve maddi kayıplara neden olmaya devam etmektedir. Ve ayrıca ne yazık ki sektör içinde iş dünyasının bu bu metodların varlığından tam anlamı ile yeterli ölçüde bilgisi bulunmamaktadır. Örneğin uçucu kül maddesi ülkemizde termik santrallerin bulunduğu bütün şehirlerde kolaylıkla temin edilebilen bir atık maddesidir. Çimento malzemesi de çok yaygın olarak ülkemizde yaygın olarak üretilmektedir. Bu maddelerin bulunduğu şehirlerdeki kamu otoritelerinin sektör yetkilileri ile bir araya gelerek zemin problemlerinin çözümüne yönelik yöntemler hakkında bilgilendirme yapılması, eğitimler düzenlenmesi yararlı olacaktır. Özellikle uçucu kül maddesi ile zemin iyileştirme çalışmalarının yaygınlaşması inşaat sektöründe maddi kazanç sağlayacaktır. Çünkü uçucu kül maddesi, çimento kadar değerli ve çimento kadar dayanım veren ve ayrıca beton içinde bile kullanılabilen bir malzeme olup ülkemizde kömür ile çalışan tüm santrallerde atık olarak depolanmaktadır. Bahsetmiş olduğumuz aynı avantajlı durum çimento maddesi için de geçerli olup, çimento maddesi kullanımının, zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde akademik camialardan görüş alınarak yararlanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akan, R., Keskin, S.N. 2018. Kompaksiyon Yönteminin Kohezyonlu Zeminlerin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 6(2): 250-257.
- Artun, Z. 2019. Kum Silt- Karışımının Konsolidasyon Davranışlarının İncelenmesi.Ege Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İzmir

- Ayar, N. 2020. Uçucu Kül ve Siltli Zemin Karışımının Özellikleri ve Kürleme Süresinin Etkileri, İstanbul Aydın Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- İnan, H. 2019. Çimento- Kil Karışım Oranlarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, İstanbul Aydın Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Tamğaç, G.K. 2020. Sıvı Stabilizasyon Malzemesi İle İyileştirilmiş Kil Bir Zeminin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması Atatürk Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Erzurum
- Taşköy, A. 2006. Düşük Plastisiteli Zeminlerin Davranışları Üzerine Çöp Suyunun Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Totiç, E., Göktepe, F., Yaşar, M. 2019. Uçucu Kül Katkısının Killi Zeminlerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Araştırma Makalesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 10(2): 769-778.
- Uysal, N. 2014. Polimerler İle Stabilize Edilmiş Kumların Kayma Mukavemetinin Laboratuvar Deneyleri İle Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul