T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SODYUM SİLİKAT İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl ACAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

OCAK 2024

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SODYUM SİLİKAT İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl ACAR
(20262821108)
ORCID: 0009-0004-5937-5082

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eyübhan AVCI
ORCID: 0000-0001-7206-0158

OCAK 2024

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 20262821108 numaralı Yüksek Lisans / Öğrencisi Anıl ACAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "SODYUM SİLİKAT İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmustur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Eyübhan AVCI** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Eray YILDIRIM** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN .....
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Teslim Tarihi **: 15 Şubat 2024**
Savunma Tarihi **: 29 Ocak 2024**

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Anıl ACAR

İmzası :

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışma süresince şahsıma ve arkadaşlarıma her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, ülkemiz adına yetişmiş son derece başarılı saygıdeğer hocam Doç. Dr. Eyübhan AVCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Uzun ve zorlu süreçte yanımda olan Arş. Gör. Emre DEVECİ ve Arş. Gör. Melih UYSAL'a, yeni bilgiler öğrenme konusunda bana hep destek veren Sayın Mudanya Belediye Başkanı Hayri Türkyılmaz'a, Sayın Mudanya Belediyesi Başkan Yardımcısı Yüksek İnşaat Mühendisi Nisa KARTALTEPE'ye ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca en büyük yaşam kaynağım olan ve bana sevgi, saygı dolu bir hayat yaşatan eşim Büşra ACAR'a ve küçük oğlum Beyazıt ACAR'a en derin, en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2024

Anıl ACAR
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... **x**
KISALTMALAR ..... **xii**
SEMBOLLER ..... **xiv**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Tezin Amacı 2
2. KİL ZEMİNLER **3**
3. STABİLİZASYON **6**
3.1. Zemin Stabilizasyonu 6
3.2. Zeminlerde Stabilizasyon İhtiyacı 7
3.3. Stabilizasyon Türleri 8
3.3.1. Mekanik stabilizasyon 10
3.3.2. Kimyasal stabilizasyon 10
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **13**
4.1. Stabilizasyon Deneylerinde Kullanılan Killi Zeminin Özellikleri 14
4.2. Stabilizasyon Deneylerinde Kullanılan Sodyum Silikatın Özellikleri 15
4.3. Doğal Su Muhtevasının Tayini 16
4.4. Özgül Ağırlık Deneyi 16
4.5. Dane Boyu Analizi 17
4.6. Atterberg Limitleri Tayini 18
4.7. Kompaksiyon(Proctor) Deneyi 21
4.8. Serbest Basınç Deneyi 25
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **41**
KAYNAKLAR **43**
ÖZGEÇMİŞ **46**

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Deneylerde kullanılan sodyum silikata ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler **15**
Çizelge 4.2: Özgül ağırlık deneyi yapım aşaması ve (G_s) sonucu **17**
Çizelge 4.3: Tane boyu dağılım eğrisi **18**
Çizelge 4.4: Likit Limit Deney Sonuçları (Likit Limit) **19**
Çizelge 4.5: Plastik Limit Deney Sonuçları (Plastik Limit) **20**
Çizelge 4.6: Yapılan Kompaksiyon Çalışmasının Değerleri **23**
Çizelge 4.7: Serbest Basınç Deneyi Yapılacak Olan Numunelerin Haz **25**
Çizelge 4.8: Serbest Basınç Deneyi Yapılacak Olan Numunelerin Hazırlanma Son Değerleri **27**

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kil Yapısı **3**
Şekil 2.2: Kil Yapısı **4**
Şekil 2.3: Plastisite İndis Grafiği **5**
Şekil 4.1: Numune alma alanına ait yer bulduru ada parsel bilgileri (https://parselsorgu.tkgm.gov.tr) **14**
Şekil 4.2: Numune alma alının konumu ve çevresi (https://www.google.com/maps) **15**
Şekil 4.3: Numunenin hazırlanması **18**
Şekil 4.4:(a)Numunenin hazırlanması, (b) Casagrande cihazındaki numune **19**
Şekil 4.5:(a)Numunenin hazırlanması, (b) Numunelerin 3 mm indirme çalışması ... **20**
Şekil 4.6: Zemin Sınıflandırılması Grafiği **21**
Şekil 4.7: (a) Numunenin hazırlanışı, (b) Numunenin hazırlığında kullanılan ağırlık, (c) numunenin kalıptan çıkarılışı, (d) çıkarılmış numune kabı **22**
Şekil 4.8: Yapılan Kompaksiyon Sonuçlarının Grafikte İşaretlenmesi **23**
Şekil 4.9: Yapılan 4 Farklı Kompaksiyon Sonuçlarının Grafikte İşaretlenmesi **24**
Şekil 4.10:%30, %50 ve %70 Oranında Solisyon İle Yapılmış Proctor Grafikleri ... **24**
Şekil 4.11:(a) Dağılan numuneler, (b) Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Mold **26**
Şekil 4.12:(a) Dağılan numuneler, (b) Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Mold **27**
Şekil 4.13: Bekletilen numuneler **28**
Şekil 4.14:(a),(b) 70K5-7-S1 Numunesi-(c),(d) 50K5-3-S2 Numunesi **28**
Şekil 4.15:Yüksek plastisiteli kil ile sadece su kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **29**
Şekil 4.16:Yüksek plastisiteli kil ile %70 su-%30 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **30**
Şekil 4.17:Yüksek plastisiteli kil ile %50 su-%50 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **31**
Şekil 4.18:Yüksek plastisiteli kil ile %30 su-%70 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **32**
Şekil 4.19:Yüksek plastisiteli kil ile sadece su kullanılarak yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi .. **33**
Şekil 4.20:Yüksek plastisiteli kil ile %70 su-%30 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **34**
Şekil 4.21:Yüksek plastisiteli kil ile %50 su-%50 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **35**
Şekil 4.22:Yüksek plastisiteli kil ile %30 su-%70sodyum silikat kullanılarak

yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **36**
Şekil 4.23: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve açık ortamda bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **37**
Şekil 4.24: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve strece sarılı halde bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **37**
Şekil 4.25: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkt+5 değerinde yapılan ve açık ortamda bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **38**
Şekil 4.26: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılık+5 yapılan ve strece sarılı halde bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **38**
Şekil 4.27: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **39**
Şekil 4.28: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **39**
Şekil 4.29: Yüksek plastisiteli kil ile Wopt+5 değerinde yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **40**
Şekil 4.30: Yüksek plastisiteli kil ile Wopt+5 değerinde yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi **40**

KISALTMALAR

a : Düşey borunun yüzey alanı, cm^2

A : Zemin numunesi enkesit alanı, mm^2

AASHTO : American Association of State Higway Officials

ACI : American Concrete Institute

A_o : Zemin numunesinin düşey alanı, cm^2

ASTM : American Society for Testing Materials

C : Koheyzon, kN/m^2

CAH : Kalsiyum alüminat hidrat

CH : Yüksek Plastisiteli Kil

C_m : Menisküs düzeltmesi

G_S : Zemin özgül ağırlığı

H_1 : Numunenin şişme sonrası yüksekliği, cm

h_2 : Deney sonunda hidrolik basınç yüksekliği, cm

H_o : Numunenin deney öncesi yüksekliği, cm

H_r : Hidrometre kalibrasyon eğrisinden alınan değer

K : Numunenin yüksekliği, cm

k : Permeabilite, cm/s

LL : Likit limit, %

M_1 : Boş kabın ağırlığı, g

M_2 : Kap ve yaş numunenin toplam kütlesi, g

M_3 : Kap ve kuru numunenin toplam kütlesi, g

M_a : Açıkta kurutulan zemin kütlesi, g

M_b : Deney sonu zemin kütlesi, g

M_k : Kalıp ve kalıp tabanının kütlesi, g

M_{ks} : Kalıp, kalıp tabanı ve sıkıştırılmış zeminin kütlesi, g

M_S : Kuru numune ağırlığı, g

M_t : Sıcaklık düzeltmesi

$M\rho_{w,t}$: Piknometre ve saf su toplam ağırlığı, g

$M\rho_{ws,t}$: Piknometre, kuru numune ve saf su toplam ağırlığı, g

Na_2SiO_3 **:** Sodyum Silikat

SBD **:** Serbest Basınç Deneyi

UD **:** Örselenmiş Numune

SEMBOLLER

μ	**:** Suyun viskozitesi, g/(cm·s)
Ɛ	**:** Eksenel birim Şekil değiştirme, %
Ø	**:** İçsel sürtünme açısı, derece
OWC	**:** Optimum su muhtevası, %
P	**:** Kütle kaybı yüzdesi, %
P_a	**:** Numuneye uygulanan eksenel yük
pH	**:** Hidrojenin Potansiyeli
PI	**:** Plastisite indeksi, %
PL	**:** Plastik limit, %
R_h1	**:** Menisküsün üst sınırında hidrometre okuması
S	**:** Serbest şişme yüzdesi, %
t	**:** Zaman, s
V_a	**:** Hava boşluğu yüzdesi, %
w	**:** Su muhtevası, %
X	**:** Dağıtma düzeltmesi
ΔH	**:** Numunede ölçülen eksenel Şekil değiştirme, mm
ρ	**:** yoğunluk
ρ_k	**:** Zemin numunesinin kuru yoğunluğu, g/cm^3
ρ_n	**:** Zemin numunesinin yaş yoğunluğu, g/cm^3
ρ_s	**:** Zemin numunesinin yoğunluğu, g/cm^3
$\rho_{w,t}$	**:** Saf suyun yoğunluğu, g/cm^3
σ	**:** Basınç, kPa
τ	**:** Kayma gerilmesi, kN/m^2

SODYUM SİLİKAT İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Konaklama zorunluluğu, insanlığın ortaya çıkmasından hemen sonra en önemli gereksinimlerinden birisi olmuştur. Bu zorunluluğun kaçınılmaz olması bazı meslek gruplarının zamanla gelişmesini sağlamıştır. İlerleyen zamanlarda gelişen teknolojik faaliyetler ile beraber insanoğlu inşaat sektörünün hızla gelişmesini ve yeni özelliklerin eklenmesini sağlamıştır.

İnşaat sektörü içerisinde birçok mühendislik hizmeti bulunmaktadır. Bunlardan bazıları jeofizik mühendisliği, inşaat mühendisliği ve geoteknik mühendisliğidir. Gelişen teknolojik olaylar ile beraber tüm mühendislik hizmetlerinde yenilikler ortaya çıkmış olup çıkmaya da devam etmektedir. Geoteknik mühendisliğindeki yenilikler göstermektedir ki zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde farklı yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Zeminin nasıl özellikte olduğunun araştırılması ve araştırılan zeminde karşımıza çıkan problemlerin nasıl çözülmesi gerektiği son derece önem arz etmektedir. Zeminin kötü mühendislik özellik taşıması ve bu kötü özelliklerin nasıl iyileştirilmesi gerektiğinin araştırılması, inşaat faaliyetlerinin farklı yere yapılmasını engellemeye çalışmıştır.

Zemin türlerinden birisi olan kil, dünyanın hemen hemen her alanında bulunabilmektedir. Yüksek şişme/büzülme potansiyeli ve diğer önemli sorun yaşanılabilecek durumlar göz önüne alınır ise killi zeminlerin iyileştirilmesine ek olarak bu alanda yapılacak çalışmaların önemi artmıştır. İnşaat faaliyetlerinde, killi zeminlerin şişme/büzülme gibi problemlerini ortadan kaldırmak için zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Killi zeminlerde yapılmış birçok çalışma mevcut olup bunların büyük çoğunluğu stabilizasyon ile ilgilidir. Killerin stabilizasyonu da bir zemin iyileştirme tekniğidir. Stabilizasyon genel olarak 2 gruba ayrılmıştır. Bunlar kimyasal ve mekanik stabilizasyondur.

Zemin üzerinde yapılan hidrometre, elek analizi ve atterberg limit belirleme deneyleri bu çalışmanın başlangıcında yapılmış olan deneylerdir. Bu deneylerden ortaya çıkan sonuç ile karşımıza numunelerin yüksek plastisiteye sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu sonucun ardından numunelerin içine sodyum silikat katılarak proctor testleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında ve optimumdan ıslak halde hazırlanmış yüksek plastisiteli kil ve sodyum silikat karışımı olan numuneler ile serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Optimumumda ve optimumdan ıslak halde yapılan numuneler üç farklı kür (açık ortam, strece sarılı halde ve kür ortamında) koşulunda bekletilmiştir. Kil zeminin sodyum silikat ile zeminin dayanım değerlerini azaltmıştır. Stabilizasyon sonrası zemindeki kohezyonunun azaldığı ve zeminin granüler zemin davranışına sahip olduğu görülmüştür. Serbest basınç dayanım değerindeki azalma bu durum ile açıklanabilir.

Anahtar kelimeler: Yüksek plastisite, Kil, Sodyum silikat.

DETERMINATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF HIGH PLASTICITY CLAYS STABILIZED WITH SODIUM SILICATE

SUMMARY

The necessity of accommodation has been one of the most important requirements of humanity immediately after its emergence. The inevitability of this necessity has enabled some professional groups to develop over time. With the technological activities that have developed in the following times, human beings have enabled the rapid development of the construction sector and the addition of new features.

There are many engineering services in the construction sector. Some of them are geophysical engineering, civil engineering and geotechnical engineering. Along with the developing technological events, innovations have emerged in all engineering services and continue to emerge. Innovations in geotechnical engineering show that different methods have been used to improve the soil properties. It is extremely important to investigate how the soil is characterized and how the problems we encounter on the investigated ground should be solved. Investigating the fact that the soil has bad properties and how these bad properties should be improved, has tried to prevent construction activities from being carried out in different places.

Clay, one of the floor types, can be found in almost every area of the world. If high swelling/shrinkage potantial and other important problems are taken into consideration, the importance of the studies to be carried out in this area in addition to improving clay soils has increased. In construction activities, soil improvement methods are used to eliminate problems such as swelling/shrinkage of clay soils. There are many studies conducted on clay soils, and the vast majority of them are related to stabilization. Stabilization of clays is also a soil improvement technique. Stabilization is generally divided into 3 groups. These are chemical, mechanical and injection.

Hydrometer, sieve analysis and atterberg limit determination experiments performed on the ground are the experiments that were performed at the beginning of this study. With the result obtained from these experiments, it has been understood that the samples have high plasticity. After this result, proctor tests were performed by adding sodium silicate into the samples. Free pressure experiments were carried out with samples with a high plasticity clay and sodium silicate mixture prepared in an optimal water content and in an optimal wet content. The samples made in optimum and optimum wet condition were kept under two different curing conditions (open environment, wrapped in stretch). It has reduced the strength values of the clay soil with sodium silicate. Since the strength values of the sample decreased with the increase in the sodium silicate ratio, it has been found that there is an inverse ratio between the two. Studies have shown that sodium silicate is not an effective stabilizer for the improvement of high-plasticity clay floors.

Keywords: High plasticity, Clay, Sodium silicate.

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, insanoğlunun var oluşundan bu yana her gün gelişmek mecburiyetinde olan bir sektördür. Günümüz koşullarına baktığımızda inşaat sektörü gelişmesini teknoloji ile beraber hızlandırmıştır. Alt yapı ve üst yapı olarak genel anlamda ikiye ayrılan inşaat sektöründe alt yapının en önemli inşaat malzemelerinden biri olan zemin, farklı tipleri ile karşımıza çıkmaktadır. Farklı zemin tiplerinin incelenmesi ve gelişen teknoloji ile adapte olması karşımıza çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerini çıkartmaktadır.

Zemin iyileştirme; zeminin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi işlemidir. Bu işlem, zeminin taşıma kapasitesini artırır ve yapıların daha sağlam temeller üzerine inşa edilmesini sağlar. Zemin iyileştirme yöntemleri ise zeminin kalitesini artırmak veya zeminin dayanıklılığını arttırmak için kullanılan tekniklerdir. Bu yöntemler, zemin yapısına, zeminin özelliklerine ve kullanım amaçlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Zemin iyileştirme yöntemleri arasında yer alan stabilizasyon ise, zayıf zeminlerin mukavemetini artırmak için yapılan bir işlemdir. Bu işlemde, zemine uygun katkı malzemeleri eklenerek, zeminin dayanıklılığı artırılır.

Zeminlerin iyileştirmesinde kullanılan katkılar, mekanik olarak zeminlerin doğayla uyumlu, ekonomik ve güvenli bir değişikliğe uğramasını amaçlamaktadır [1]. Birçok inşaat alanında yapılan zemin iyileştirme işlemlerinde kullanılan katkı maddelerinden bazıları çimento, kireç ve uçucu küldür [2].Bunlara ek olarak bu çalışmada sodyum silikat ile stabilizasyon çalışması yapılması hedeflenmektedir. Katkı maddelerinin uygun olarak eklenmesinden sonra elde edilen veriler genel olarak karşımıza dayanımın artması şeklinde görülmektedir. Bu dayanım artışlarındaki ana sebep genellikle plastisite indisinin düşmesi ve içsel sürtünme açısının artmasıdır. Kireç ile stabilizasyonlar; likit limit değerinde artış veya azalma etkisi yapmakta; olup uçucu kül ise zemin iyileştirme işlemlerinde plastisite indisinin düşmesine sebep olmaktadır [1,3].

Dünyanın hemen hemen her kıtasında yer alan yüksek plastisiteli killerin şişme ve

büzülme durumu ve dayanımının az olması en önemli özellikleri olarak kabul edilir. Bu tarz zemine sahip olan inşaat alanlarında taşıma gücü sorunları karşımıza çıkmaktadır.[7]

Yüksek şişme ve büzülme durumuna sahip olan zeminlerin milyarlarca dolar değerinde dünyaya yıllık maliyeti bulunmaktadır.[8]

Daha çok çimento ile yapılmış olan stabilizasyon araştırmalarında zeminin türü ve yapılan deneylerin metotları ve kürün durumu araştırma sonuçlarını en çok etkilen faktörlerden bazılarıdır.[9]

Çimento, kireç ve uçucu küllerin genellikle kurutulan bir zemine eklenerek stabilizasyon işlemi gerçekleştirilir. Ancak tüm stabilizasyon işlemlerinin araştırılmasında şu ana kadar herhangi bir çalışma, sodyum silikat kimyasalının yüksek plastisiteli killerdeki stabilizasyon etkisini araştırmamıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada sodyum silikat ile stabilize edilmiş yüksek plasitisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Farklı katkı oranları ile stabilize edilmiş olan yüksek plastisiteli kil zemin farklı kür koşullarında ve kür sürelerinde dayanım değerleri belirlenmiştir.

Bu çalışma beş bölümden olumaktadır. İlk bölümde tezin amaç ve kapsamı içeriğine değinilmiştir. İkinci bölümde daha önce killi zeminler hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmiş olup üçüncü bölümde kullanılan malzemenin tanımı, bu malzeme ile yapılacak deney ve deney düzenekleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde yapılmış olan deneylerden elde edilen bulgulara değinilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise yapılan deneyin sonuçları özetlenmiştir.

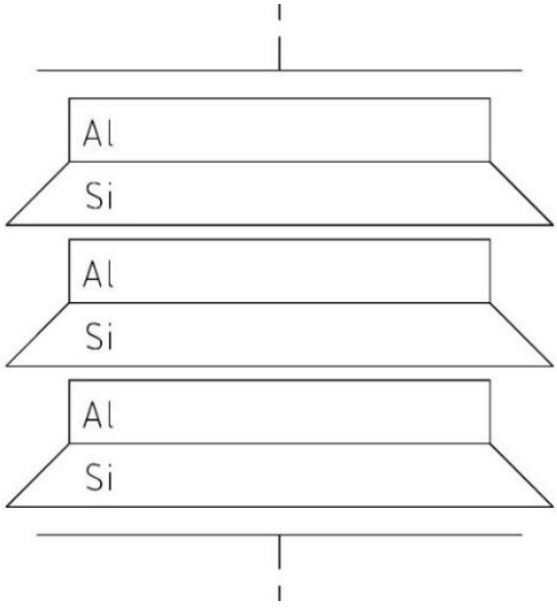
2. KİL ZEMİNLER

Laboratuvar ölçümlerine göre killer 2 mikrondan küçüktür. Killer normal koşullarda su ile karşılaştığında hacimlerinde artış söz konusu iken, kurutulduğunda veya kuruduğunda hacimleri azalır ve bu azalışla beraber çatlaklar oluşur. Pişirilme süresince killerin dayanımında artış gözlenmektedir[27].

Kil dünyanın pek çok yerinde gözlemlendiğinden birkaç mineral haricinde birleşik olduğunda kohezyonu yüksek ve plastisiteli olarak tanımlanmaktadır. Kil ortamdaki su varlığından oldukça etkilenir. Kil oranı bir zemin kapasitesinin yarısından fazla ise, diğer zemin çeşitlerinin etkisi mühendislik açısından killi zeminlere kıyasla daha azdır[27].

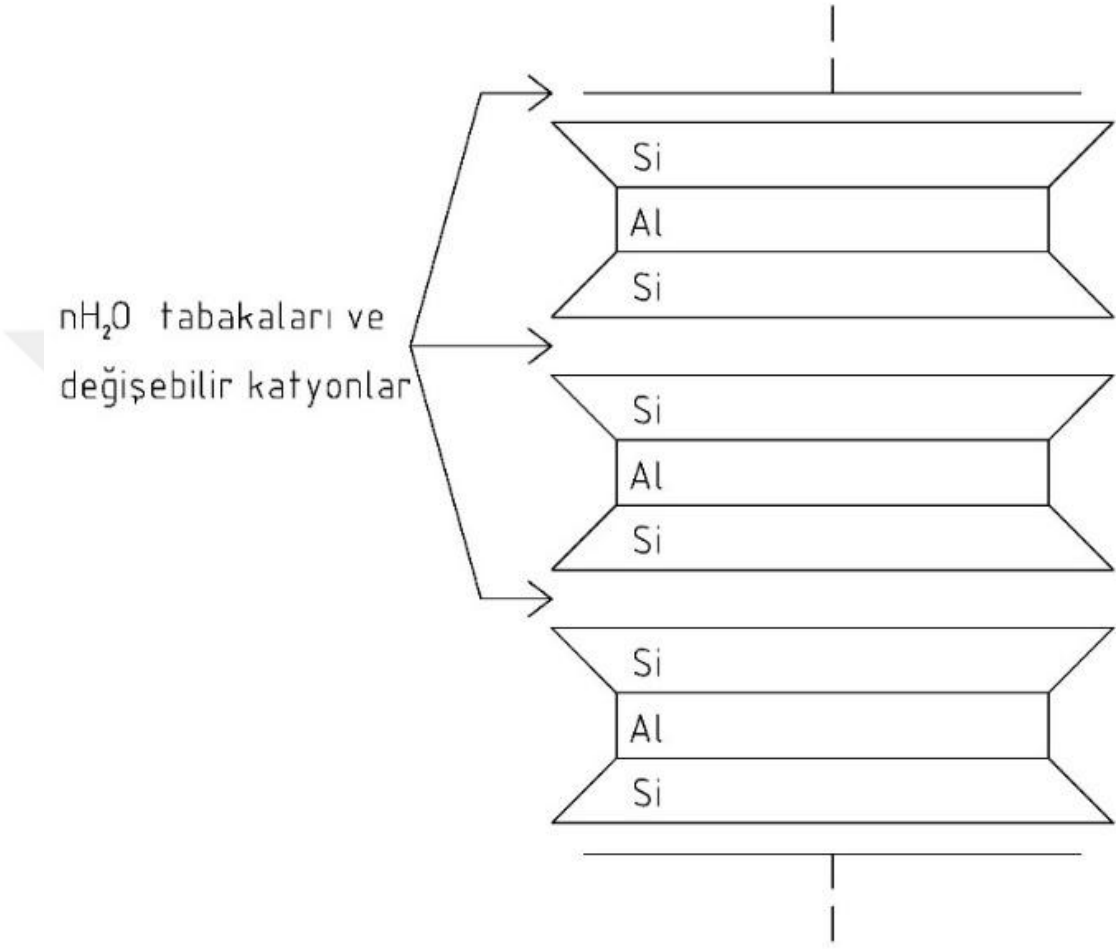
4 veya 8 yüzlü levhadan oluşan, ortalama boyutu 1-1000 nm arasında kil sadece elektron mikroskoplar ile görülebilmektedir. 4 yüzlü olan killer silika levhasından 8 yüzlü oluşan killer ise oksijen atomunun farklı metalik atomları ile çevrelenmesinden sonra oluşur[27].

Kaolinit ve halloysit 1:1 kil minerallerinin en önemlileridir. Bu minerallerin arasında oluşan hidrojen bağları çok kuvetli olup hidratayon oluşumu minimize edilibilmektedir ve da büyük yapıların oluşabilmesinin önü açılmaktadır.



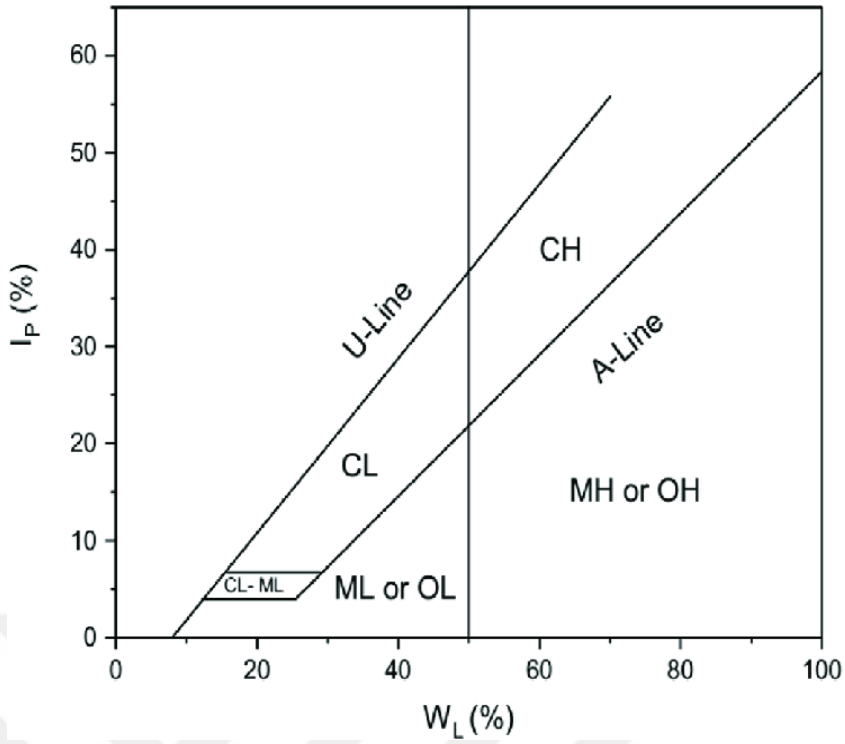
Şekil 2.1: Kil Yapısı

2:1 kil mineralinin en çok karşımıza çıkanı ise montmorillonittir. 2 yüzlü silika levhası ile 8 yüzlü bir alümina levhası birleştiğinde oluşan bu yapıların arasındaki bağlar zayıftır. Bu mineralin içerisindeki su ve değişebilir iyonlar levhaları ayırabilmekte olup bu fazdaki kilin şişmesini doğrudan etkilemektedir [27].



Şekil 2.2: Kil Yapısı

Prof. Casagrande tarafından geliştirilen ve sistematik olarak kolay bir şekilde killerin tanımlanmasını sağlayan çalışmalar geliştirilmiştir. Kil numunesinine ait Atterberg limit değerleri, Prof. Casagrande tarafından hazırlanmış olan plastisite indisi grafiğinde işaretlendiğinde ne tür bir kil yapısına sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.3: Plastisite İndis Grafiği

İri daneli yüzeylerde özgül yüzeyler, ince daneli yüzeylere bakış daha azdır ve bu birçok difüzyon olayında son derece etkilidir[27].

3. STABİLİZASYON

3.1. Zemin Stabilizasyonu

Genel olarak fiziksel ve mekanik teknikler ile karşımıza çıkan stabilizasyon işleminde zemin ile stabilizör arasında kimyasal etkileşimde görülmektedir [1]. Genel olarak kimyasal etkiler tek yönlüdür bu sebeple stabilizasyon işlemine tabii tutulan zemin reaksiyon işlemi bittikten sonra özelliklerini korur [3,4].

İyileşmenin karakteristik değişiklikleri arasında plastisite indeksinde bir azalma, geçirgenlikte bir azalma, iç sürtünme açısındaki artışa bağlı olarak mukavemette bir artış yer alır. Zemin danelerinin arasındaki bağları güçlendirdiğine şeklinde açıklanan plastik limit genel olarak yükselir [5].

Likit limit değerleri ise karşımıza hem artış hem azalış olarak, kireç ile stabilite işlemlerinde karşımıza çıkmaktadır.[1]

Zeminin özellikleri ve atomik yapısında bulunan bazı kapasiteler belirleyici olarak görülmüştür. Uçucu kül ise zeminde işlenebilirliği kolaylaştırmaktadır. Burada kolaylığı sağlanmış olması plastisite indisinin düşmesi ile açıklanmaktadır.[6]

Katkı maddeleri kullanarak stabilizasyon sağlanır, bu sayede stabilizasyonun etkinliği artar ve aynı zamanda kolayca sağlanır. Uygulanabilirlik, bulunabilirlik, arazi uygulama kolaylığı ve ekonomik üretim gibi pek çok faktörün birleşmesiyle oluşan zorlukların üstesinden gelinmesi katkı malzemeleri ile stabilizasyonun önemini arttırmaktadır.

Killer, insanlar tarafından bir inşaat malzemesi olarak kullanılabilmektedir ve bu durum birçok önemli kuruluşun dikkatini çekmiştir.[10]

Çevre şartları bazı killer üzerinde son derece etkilidir. Bu sebeple killerin stabilizasyonunun inşai faaliyetlerden önce yapılması son derece önemlidir.[11]

İnşaat sektöründe problemli zemin olan killerin stabilizasyonunda kimyasal katkı maddeleri son derece önem arz etmektedir. Katkı maddeleri ile stabilizasyonu sağlanan killer iyileştirilerek kullanıma uygun hale gelirler. Yolların iyileştirilmesinde de uzun zamandır kullanılan katkı maddeleri, yeni projelerde yerini

günümüzde almaktadır [12].

Katkı malzemeleri ile zemin stabilizasyonu çoğu yerde maliyeti azalttığından ergonomik olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok uygulama yöntemi ile ekonomik sonuçlar ortaya çıkabildiği gibi, zemin iyileştirmesin de gerçekleşmesi sağlanabilir.

Killi zeminlerin stabilizasyonu tarihte en eski malzemelerden biri olan kireç ile yapılabilir. Kil ile kirecin içindeki reaksiyon sonucunda, kil danelerinin içindeki boşluklar dolar ve stabilizasyon işlemi gerçekleşmiş olur. Kirecin stabilizasyonda kullanımı sonrasında, yüksek plastisiteli killerin geçirimliliği azalmıştır [14].

Şişen zeminler üzerinde yapılan katkı malzemeleri (kireç ve çimento) ile çalışmalar plastisite ve şişme karakteristiklerini üzerinde ciddi etkileri olduğu gözlemlenmiştir[15].

Tarihte kireç uzun yıllardan beri, zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılmaktır. Bununla beraber günümüzde zeminlerin stabilizasyonunda portland çimentosu kullanılarak son derece etkili sonuçlar elde edilmiştir. Killi zeminlerin çimento ile etkileşimi sonucu farklı reaksiyonlar ortaya çıkmıştır. Sırası ile bunlardan bazıları; hidratasyon, flokülasyon ve puzoloniktir[16].

Zemin ile çimento birleştiğinde zaman içerisinde beklenen reaksiyonlar gerçekleşir. Birçok reaksiyona giren zemin ile çimento birleştiğinde sonucun ortaya çıkması zamanla gerçekleşmektedir. Bunun sebebi ise reaksiyonların aylarca sürebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple killi zeminlerin dayanımının belli bir noktada kalmaması ve zaman içerisinde artış göstermesi beklenmektedir [17].

Killi zeminlerin, çimento ile stabilizasyon çalışmaları bazı zemin özelliklerini azalttığını ortaya çıkarmıştır. Stabilizasyon sonrası azalan zemin özellikleri sıkışabilirlik ve zeminin şişme potansiyelidir [18].

Düşük plastiseli killer üzerinde yapılan bir araştırmada yüksek fırın cüruflu ile stabilizasyonda kuru birim ağırlık değeri ve optimum su muhtevası değeri artış göstermektedir [19].

3.2. Zeminlerde Stabilizasyon İhtiyacı

Zeminin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan stabilizasyon ile hacimsel iyileşme, dayanım, permabilite ve sıkışabiklirlik özellikleri iyileştirilir. Zemininin su muhtevasındaki artış ve azalışlar, zeminde hacimsel değişiklere yol açmaktadır. Bu

sebeple zeminin içerisindeki su muhtevasını korumak için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden aynı zamanda geniş kullanım alanına sahip olup en çok bilinenlerden bir tanesi drenaj yapılması işlemidir. Zeminin dayanımı artırmak için kullanılan yöntem ise genellikle çimento ve kireç gibi katkı malzemeleri ile yapılan stabilizasyon işlemleridir. Yine katkı malzemeleri kullanılarak yapılan stabilizasyon işlemleri zeminin permeabilitesi, sıkıştırma işlemleri ile beraber kullanıldığında azaldığı görülmüştür[20].

Zemin stabilizasyon işlemleri dünyanın hemen hemen her yerinde zayıf zeminlerin etkilediği alanların azaltılmasında yardımcı olmuştur. Zayıf zeminlerin iyileştirilmeden kullanılması insanlar için maddi ve manevi olarak sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Katkı malzemelerin yardımı ile insan yaşamı pozitif yönde, basit ve uygulama kolaylığıyla beraber kullanılabilir ve insanların yaşam kalitesini arttırabilir.

Katkı maddeleri kullanılarak zeminlerde aşağıdaki özellikler değiştirilebilir;

1. Dayanım arttırabilir,
2. Şişme ve büzülme kontrol altına alınabilir,
3. Sıkıştırma ve oturmalar kontrol altına alınabilir,
4. Permabilite kontrol altına alınabilir,

Bu nedenle, stabilizasyon, zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirme, temel altı dolgu kalınlığı azaltılması, şev stabilizasyonu arttırma, geçirimsizliğin azaltılması, kazı desteği, sıvılaşmanın azaltılması, yer altı suyunun kontrolü ve çevre ıslahı gibi durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Stabilizasyon için gerekli projeler neredeyse her zaman sahaya özgüdür ve kapsamlı çözümler için standart test yöntemlerinin yanı sıra tasarım analizlerini ve temel analizlerin dikkatli bir şekilde yapılmasını gerektirir [21].

Kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunun amacı mühendislik özelliklerini belirli bir seviyeye kadar arttırmaktır. Stabilizasyon sonrası zeminin plastisitesi azalır ve dayanımı artar [22].

3.3. Stabilizasyon Türleri

İyileştirme amacıyla zemin eklenebilecek seçenekler farklı özelliklere, biçim ve niteliklere sahiptir. Kullanılan katkı maddesinin türüne, yapım amacına, beklenen

zemin performansına, mühendislik performansı için minimum gerekliliklere, malzemelerin bulunabilirliğine, maliyete ve kaygılara bağlıdır[21].

İlgili yönetmeliklere uygun olarak zemin sınıflandırılması yapılmış zeminlere uygun katkının belirlenmesi ile beraber iyileştirme işlemine başlanabilir[22]. Kireç yüksek plastiseteli killerde plastisiteyi ve şişme potansiyellerini azaltmaktadır. Bu sebeple katkı malzemelerinin kullanımından önce zeminin özelliklerini belirlemek çok önemlidir. Bunlara ek olarak, zayıf zemin olarak tabir edilen bölgeler için birçok yeni kimyasal katkıda (sodyum silikat) bulunmaktadır.

Uygun katkının seçimine detaylı olarak hazırlanmış, zemin sınıflandırması ve plastisitesini esas alan genel yönetmelikler takip edilerek başlanabilir [66-67]. Örneğin, çimento çeşitli zemin türleriyle kullanılabilmesine karşın tane boyutu 0.074 mm'den küçük olan kil zemin ile homojen bir şekilde karışması güçtür. Bu nedenle, çimento ile karışım zor olabileceğinden fazla plastik malzemelerin kullanımından genel olarak kaçınılmalıdır. Öte yandan kireç, orta- yüksek plastisiteli zeminlere etki etmekte, dolayısıyla onların plastisitesini azaltmakta ve dayanımlarını artırıp şişme potansiyellerini azaltırken daha kolay karıştırılabilir hale getirmesini sağlamaktadır. Katkı maddelerin seçilerek veya harmanlanarak kullanımı, yukarıda bahsedilen değişkenliklerin birçoğuna veya tamamına bağlıdır. Geleneksel katkılara ek olarak, özellikle çevresel kaygılara odaklanmış, tasfiyesi ve uygulanması problemli olan ve karıştırılması zor zeminler için geliştirilen birçok yeni tescilli kimyasal katkılar da bulunmaktadır [21].

Zeminler tüm farklı lokasyonlarda aynı özelliklere sahip değildir. Bu sebeple maddi imkânların el verdiği doğrultuda zemin iyileştirmesi yapılması gerekmektedir. Zeminlerin üzerine yapılacak olan yapılar farklılık göstereceğinden kullanım amaçları farklılık gösterecektir. Zemin iyileştirmeleri yapılırken genellikle seçenekler aşağıdaki gibidir;

1. Zemin daneleri arasındaki bağları katkı malzemeleri ile güçlendirmek
2. Mekanik stabilizasyon yapmak(titreşim vb.)
3. Zemindeki suyun uzaklaşmasını sağlamak
4. Zeminin özelliklerini değiştirecek kadar uygun olmayan zemini uzaklaştırmak
5. Enjeksiyon yapılması
6. Konsolidasyon yapmak

Stabilizasyon metotları, başlıca aşağıdaki gibi sınıflandırılır [65]:

1. Mekanik stabilizasyon,
2. Kimyasal stabilizasyon (çimento, kireç vb.),

3.3.1. Mekanik stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon zeminin istenilen şekilde mekanik olarak karıştırılması ile sıkıştırılması ile yapılan uygulamadır. Mekanik stabilizasyon, zemin iyileştirme işleminin bir türüdür. Bu yöntem genellikle zeminin dayanımını arttırmak için kullanılır. Temel altı zeminleri ve yol alt dolguları mekanik stabilizasyonun en çok kullanıldığı alanalardır.

Mekanik stabilizasyon işlemi, stabilizasyon için uygun malzemelerin eklenmesi veya zemine özel cihazlar kullanarak zeminin yoğunluğunu arttırmasıyla gerçekleştirilir. Zeminin dayanımını ve taşıma kapasitesini arttırmaya yardımcı olan bu yöntem bununla beraber zeminin permabilitesini azaltarak çökme riskini de azaltır.

Mekanik stabilizasyonun hızlı sonuç vermesi ve diğer yöntemlere bakış daha ekonomik olması tercih edilebilir bir yöntem olmasının önünü açmıştır.

Genellikle mekanik stabilizasyonda Likit Limit ve Plastisite İndisinin azaltılması, dren özelliğinin, dayanım ve durabilitenin arttırılması amaçlanmaktadır.

3.3.2. Kimyasal stabilizasyon

Zemin içine çimento, kireç vb. kimyasal katkıları eklenerek zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesine kimyasal stabilizasyon denilmektedir.

Kimyasal reaksiyona girecek stabilizörler yeterli miktarlarda istenilen iyonlara sahip olmaları gerekmektedir. Zeminin içindeki iyonlar ile etkileşime giren bu maddeler zeminin plastisitesini azaltmaktadır [22].

Bazik olmaya yakın veya bazik olan zeminlerde oluşan puzolanik reaksiyonlarda, zemin özellikleri, karıştırılan maddelerin özellikleri ve miktarı, uygulama metotları stabilize edilen zeminin mukavemetini arttırmaktadır [22].

Kireç ve çimento, zemin iyileştirmesinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Zeminlerin iyileştirilmesi, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Kireç, su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonu gerçekleştirerek sertleşir. Bu da zemine dayanıklılığını arttırır ve su geçirimliliğini azaltır. Ayrıca kireç, çimento gibi zemine bağlanma

özelliği gösterir. Çimento da zemin iyileştirme sürecinde sıkça kullanılan bir malzemedir. Su ile karıştırıldığında sertleşir ve zemine dayanım kazandırır. Kireç ve çimentonun benzer özelliklerde zemin iyileştirme yöntemlerinde kullanılmasın altında içindeki kalsiyum reaktantının bulunmasıdır. Kesme, basınç ve çekme dayanımlarının artmasına sebep olan bu tarz maddeler uzun süreli kimyasal reaksiyonlara sebep olduğu için zemin stabilizasyonu uzun süre olarak devam etmektedir. Su moleküllerinin çekiminin azaltılmasına sebep olan bu kimyasallar aynı zamanda zeminin şişme özelliğini de azaltmaktadır[12].

Zeminlerde kullanılan stabilizasyon malzemelerinin bazıları ve açıklamaları aşağıdaki gibidir;

Kireç

Kireç, zemin iyileştirme işlemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Kirecin inşaat sektöründe çokça kullanım alanı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

Zemin Stabilizasyonu: Kireç zemine karıştırıldığında genellikle zeminin dayanımı artar. Bu sayede zemin daha fazla yük ile mücadele edebilmektedir.

Asfalt İyileştirme: Kireç, asfalt yüzeyin yıpranma direncini ve ömrünü artırmak için kullanılabilir. Kireç, asfaltın korozyona karşı daha dayanıklı hale gelmesine yardımcı olur.

Yol İyileştirme: Kireç, yolların dayanıklılığını ve stabilitesini artırmak için kullanılabilir. Yolun içinde bulunan gözle görülen veya görülemeyen boşlukları doldurarak, yolun daha düzgün ve güvenli hale gelmesini sağlar.

Yapı İnşaatı: Kireç, yukarıda bahsettiğim özelliklerden dolayı çimentoya benzer tepki verebilmesi, inşaat sahalarında harç olarak kullanılmasının önünü açmıştır.

Zemin iyileştirme alanında oldukça yaygın olarak kullanılan kireç genellikle[23]:

1. Plastisite azalmasına
2. İşlenebilirliğin artmasına
3. Dayanımın artmasına sebep olmaktadır.

Uçucu kül

Büyük daneli zeminlerde kullanılması yaygın olup, kireç ve çimento ile birlikte de kullanılmaktadır. Kireç veya çimento ile beraber kullanılmasında uygun şekilde eklenen katkı malzemeleri zeminin homojen bir duruma gelmesini

sağlamaktadır[23].

Çimento

Çimento zeminin birçok özelliğini değiştirebilen ve son derece yaygın olarak kullanılabilir stabilizatördür. Genel olarak baktığımızda zemin özelliklerini iyileştirdiği, dayanımını ve durabilitesini arttırdığı ortaya çıkmaktadır[23].

Çimento ile stabilize edilmiş zemin laboratuvar testlerinde kür uygulamasında nem kayıplarına karşı koymaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneysel çalışmada, Sodyum Silikat ile yüksek plastisiteli killi zeminin stabilizasyonu ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmadaki amaç, Sodyum Silikat ile stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killi zeminin geoteknik özelliklerini araştırmaktır.

Üç farklı aşamada yürütülen bu çalışmada; İlk önce Mudanya İlçesi, Hasköy Mahallesinden alınan az miktardaki numunelerin özellikleri incelenmiştir. Numune özellikleri istenilen özelliklerde olmasından sonra yaklaşık 500kg numune Bursa Teknik Üniversitesi PL2 Laboratuvarına getirilmiştir. Getirilen numuneler yaklaşık 60 kilogram olacak şekilde ayrılmış ve açık havada kurutulmaya başlanmıştır. Kurutulan numuneler elekten geçirilmiş ve yerine 60 kilogram numune tekrar kurutulmaya bırakılmıştır. Bu işlem yaklaşık olarak 9 hafta boyunda devam etmiştir. 9. Haftanın sonunda elekten geçen numune miktarı yaklaşık olarak 200 kilogram olarak belirlenmiştir. Geri kalan yaklaşık ağırlığı 300 kilogram olarak tahmin edilen numune haftada yaklaşık olarak 50 kilogram olacak şekilde ayrılmış ve etüvde kurutulmaya başlanmıştır. Yaklaşık olarak 6 hafta süren ikinci kurutma çalışmasında, numuneler etüvden çıkarıldıktan sonra demir çekiç yardımıyla ufalanmış ve elekten geçirilmiştir. 15. hafta sonunda çalışmaya deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Doğal killi zemin numunesi üzerinde doğal su muhtevası tayini, özgül ağırlık tayini, yıkamalı elek analizi, Atterberg limitleri tayini, kompaksiyon(Proctor) deneyi ve tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

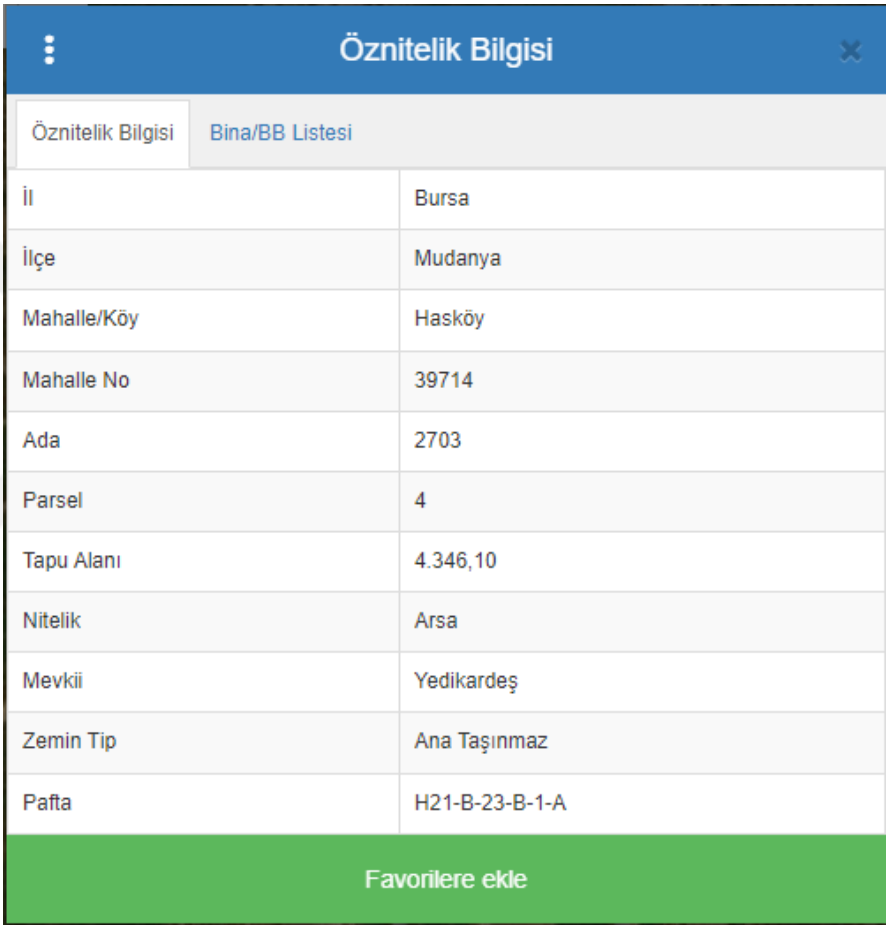
İkinci aşamada, yüksek plastisiteli killi zemin numunesi üzerinde deneylere başlamadan önce etüvde kurutulma işlemi yapılmıştır. Sonrasında ise doğal su muhtevası tayini, özgül ağırlık tayini, yıkamalı elek analizi, Atterberg limitleri tayini, kompaksiyon(Proctor) deneyi yapılmıştır.

Son aşamada ise, yüksek plastisiteli kil ile sodyum silikat karıştırılmıştır. Deneylerde sodyum silikat/çözelti oranları %0, %30, %50 ve %70 olarak alınmıştır. Çözeltide içerisinde sodyum silikat ve su yer almaktadır. Sodyum silikat içerisine eklenen su ile sodyum silikat seyreltilmektedir. Farklı Sodyum silikat/çözelti oranları

ile stabilize edilmiş numunelere 3,7,14,28,56 ve 90 günlerde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Numuneler açık ortam ve streçe sarılı olmak üzere iki farklı kür koşulunda bekletilmiştir.

4.1. Stabilizasyon Deneylerinde Kullanılan Killi Zeminin Özellikleri

Bursa'nın Mudanya İlçesinde, Mudanya Belediyesinin veya Mudanya Belediyesine sunulan zemin etüt raporlarının kontrolüyle belirlenen lokasyondan zemin numuneleri alınmıştır.



Şekil 4.1: Numune alma alanına ait yer bulduru ada parsel bilgileri (https://parselsorgu.tkgm.gov.tr)

Açılan araştırma çukurundan, yerleşim yerlerine uzaklığı da göz önünde bulundurularak zemin yüzeyinden 3,5 metre ve 4,5 metre derinlikte numuneler alınmıştır. Açılan gözlem çukurundan bir adet kepçe yardımıyla numuneler alınmıştır. Yaklaşık 500 kilogram numune çuvallanarak Bursa Teknik Üniversitesi İnşaat Bölümü PL2 laboratuvarına getirilmiştir.



Şekil 4.2: Numune alma alının konumu ve çevresi (https://www.google.com/maps)

4.2. Stabilizasyon Deneylerinde Kullanılan Sodyum Silikatın Özellikleri

Sodyum silikat seyreltik ve toz halinde bulunabilen bir kimyasaldır. Bazı deneylerde (enjeksiyon vb.), jel yapıların oluşması istenmektedir. Bu sebeple genellikle silika-alkali birleşim oranı 3/4 şeklinde kullanılmaktadır [30].

Çizelge 4.1 : Deneylerde kullanılan sodyum silikata ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Görünüş	Berrak, Sıvı
Formül	Na_2SiO_3
Be'	38-41
Yoğunluk(gr/cm^3)	1,35-1,40
Yüzdesel Na_2O	8,5-9,5
Yüzdesel SiO_2	25,5-30,5
Ph	11,8
Viskozite(cP)	75-150

4.3. Doğal Su Muhtevasının Tayini

Yüksek plastisiteli kil olması beklenen numunelerin doğal su muhtevası ASTM D2216 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. İlk olarak numunelerin tartılacağı kap tartılarak not edilir(M_1). Kabın içerisinde konulan killi malzeme ile tartılan numune kabı ve numune tartılır ve not edilir(M_2) Killi zemin numunesi etüvde minimum 16 saat bekletildikten sonra etüvden çıkartılır ve uygun koşullara ulaşıldığında tartılır(M_3). Bu işlemin sonunda aşağıdaki denklem ile zeminin su muhtevası hesaplanır(4.2):

$$W= (M_2-M_3) / (M_3-M_1)*100 \quad (4.2)$$

Burada,

M_1 Boş kap kütlesi (g)

M_2 Kap ve yaş numune kütlesi(g)

M_3 Kap ve kuru numune kütlesi(g)

Tarafımca Bursa İli Mudanya İlçesi Hasköy Mahallesi 2703 Ada 4 Parsel arasından alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deneylerde doğal kilin su muhtevası ortalama %10 bulunmuştur.

4.4. Özgül Ağırlık Deneyi

Deneylerde kullanılan kil malzeme numunelerinin özgül ağırlıkları ASTM D854'de bulunan hesaplama yöntemi kullanılarak bulunmuştur [32].

Numunelerin hazırlığında ilk önce 4 nolu elek kullanılır. 4 nolu elekten geçmiş olan numunelerin piknometre kullanılarak özgül ağırlık hesaplanır. 500 mL piknometre için yaklaşık 90 gr ile 110 gr arasında numune kullanılır. Zemin numunesi piknometreye alındıktan sonra piknometrenin geniş hacminin ortalama yarısı kadar saf su ilave edilerek vakum altında en az 2 saat çalkalanır. Bu işlem sonrasında piknometrenin dışı iyice kurulanır ve zemin numunesi su ile birlikte tartılır. Yapılan ilemler sonrasında ilgili hesaplama yöntemindeki formüllerin kullanımıyla elde edilen (G_s) değeri 2.766 olarak bulunmuştur ve aşağıdaki çizelgede, hesaplama sürecinde elde edilen veriler belirtilmiştir.

Çizelge 4.2: Özgül ağırlık deneyi yapım aşaması ve (G_s) sonucu

Piknometre Şişe No	Sıcaklık t °C	Pik. Kütlesi m0,g	Pik+Su Kütlesi m1,g	Pik.+Numune Kütlesi	Pik.+num+su kütlesi m3,g	Gs	Gs ortalama
8	20	146,93	672,88	196,34	704,37	2,76	2,766
9	20	148,74	674,77	198,09	706,33	2,77	

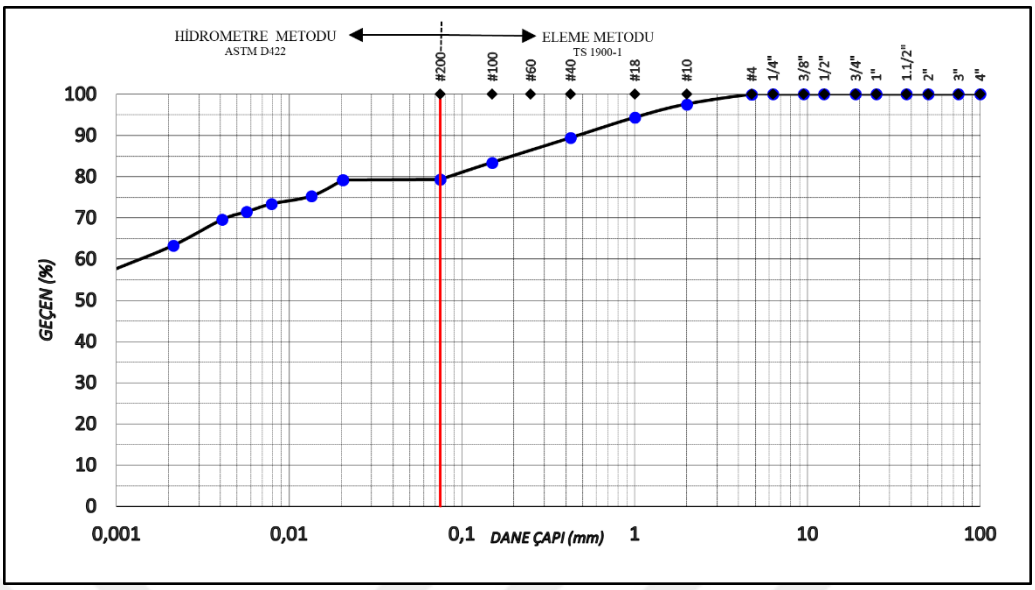
4.5. Dane Boyu Analizi

Deneylerde kullanılan ve yüksek plastisiteli olduğu düşünülen killi zemin numunelerinin dane boyu dağılımı ASTM D422'de belirtilen standartlara göre belirlenmiştir [33].

Bu deneyde yapılan aşamaları kısaca özetlersek; 200 no'lu elek üzerinde kalan numuneler eleme yöntemi ile 200' nolu elekten geçen numuneler ise hidrometre yöntemi ile deneye tabi tutulur. Hassas terazi ile ölçümleri tamamlanmış ve etüvde kurutulmuş olan numune bir tepsiye dökülür. Litre ve gram oranı 1'e 40 olarak belirlenen su ve sodyum heksametafosfat ile karıştırılır. Numuneli karışım 75 mikronluk elekten geçirilir ve bu durum su berrak hale gelene kadar devam eder. 75 mikronluk elekten geçen malzeme miktarı hesaplanır. Hesaplanan yüzdelik oranlar ile beraber elde edilen sonuçlar tane dağılımı eğrisi çizilirken kullanılır.

Yaklaşık 40-60 gram alınan numuneler hidrometre deneyi için hassas terazide tartılır. Bununla beraber numunenin üstüne 150 mililitre civarı hidrojen peroksit çözeltisi eklenir. Gerekli bekleme koşulu sağlandıktan sonra numune hafif ateşte pişirilir. 50 mililitreye düşen karışım etüve konularak yaklaşık 105 °C de kurutulur. Kurutulan ve gerekli ölçümleri yapılan numune 100 mililitre sodium heksametafosfat ile karıştırılır. Isıtılma işlemi tamamlanan karışım 75 mikronluk ekten geçirilir ve üzerine su ilave edilerek 1000 mililitreye tamamlanır. Eleğin üzerinde kalan numuneler etüvde kurutulma işlemine tabi tutulur ve 4.75 milimetre, 600 mikron, 200 ve 75 mikronluk eleklerden geçirilir. Elek üzerinde kalan malzemeler tartılır ve 30 saniye ve 1, 2 ve 4. dakikalarda hidrometre ölçümleri yapılır. 8, 15, 30, 60, 120 ve 480. dakika ölçümleride yapılan numuneler iki gün ara ile tekrar ölçülür. Her aşamadaki kütle kayıplarının, ölçümleri ve buradan elde edilen değerler gerekli işlemlere tabi tutulur. Tarafımca yapılan deneylerin gerekli işlemler sonucunda çıkan tane boyu dağılım eğrisi aşağıdaki çizelge ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.3: Tane boyu dağılım eğrisi



4.6. Atterberg Limitleri Tayini

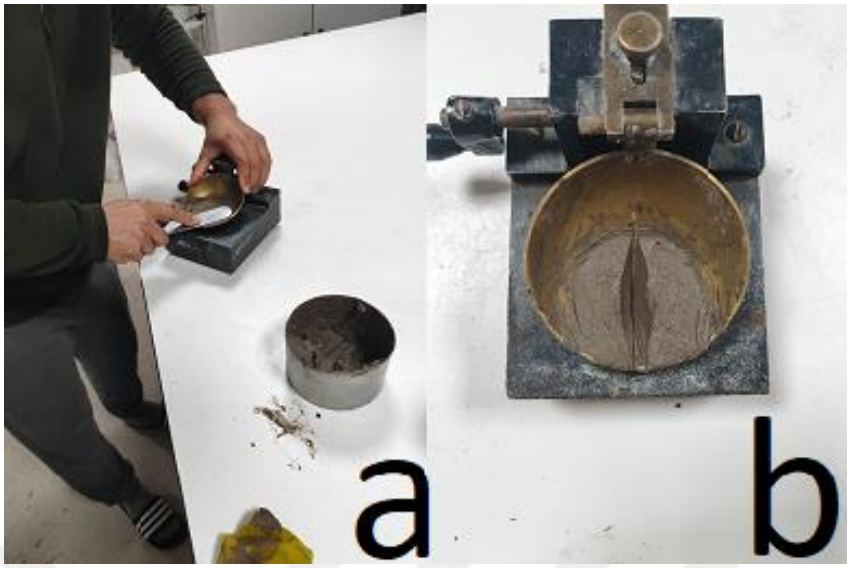
Deneylerde kullanılan ve yüksek plastisiteli olduğu düşünülen killi zemin numunelerin Atterberg Limitleri'ni belirlemek için ASTM D4318'de belirtilen standartlar kullanılmıştır [28].



Şekil 4.3: Numunenin hazırlanması

Killi numunelerden 425 mikronluk elekten geçen yaklaşık 150-200 g numune alınır ve elekten geçmiş olan yüzde belirlenir. Kap içerisine su ile beraber konulan numuneler yaklaşık 16-20 saat hava almayacak şekilde bekletilir ve suyun her yanına

dağılması sağlanır.



Şekil 4.4:(a)Numunenin hazırlanması, (b) Casagrande cihazındaki numune

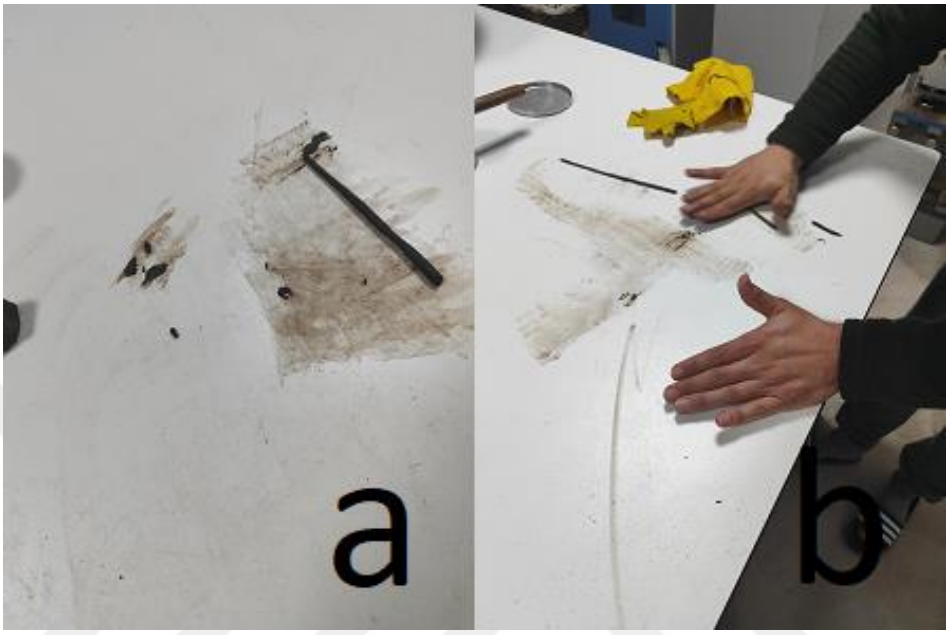
Kaptan çıkarılan numune en az 10-15 dakika karıştırılır. Likit limit cihazı olarak tabir edilen Casagrande cihazına konulan bir miktar numune, yüzeyi tabana paralel olacak şekilde makineye konulur ve oluk açma bıçağı ile 2 ye ayrılır. Krank kolu saniyede 2 devir yapılacak şekilde çevrilen bu makinenin ortasındaki numune dip kısmı birbirine değene kadar krank kolu döndürülür. Oluktaki kapanma tamamlanınca vuruş sayısı kaydedilir. Tarafımızca yapılan deneyde çıkan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.4: Likit Limit Deney Sonuçları (Likit Limit)

Tek Nokta Likit Limit		
Deney No:	1	2
Kap	B-24	B-29
Kap,g	26,17	19,58
Kap+yaş	66,25	61,03
Kap+kuru	50,67	44,94
w(%)	63,59	63,45
N	22	23
LL=		**62,71**

Plastik limit deneyi için, likit limit deneyi için hazırlanmış olan numunelerden ortalama 20 g alınır. Numune 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar düz bir zemin üzerinde yuvarlanır. Numune 3 mm den azalmaya başladığı andan

itibaren çatlaklar görülünceye kadar yuvarlama işlemi devam eder. Dağılmaların başlamasıyla beraber numuneler dağılan parçaları toplanıp daha önce ölçülen numune kaplarına numune alınır ve su muhtevası ölçme işlemine devam edilir. Tarafımızca yapılan deneyler yapılırken ki fotoğraflar ve çıkan sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.5:(a)Numunenin hazırlanması, (b) Numunelerin 3 mm indirme çalışması

Çizelge 4.5: Plastik Limit Deney Sonuçları (Plastik Limit)

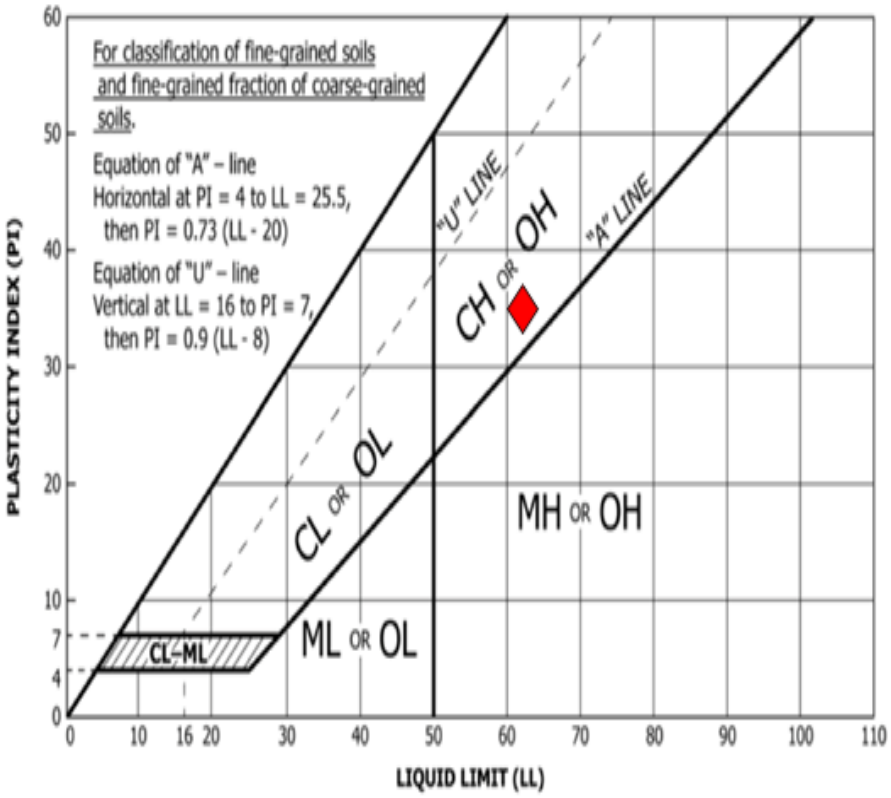
Plastik Limit			
Deney No:	1	2	3
Kap	B-15	B-38	B-14
Kap,g	24,33	23,1	20,36
Kap+yaş	29,5	30,23	27,75
Kap+kuru	28,38	28,61	26,21
w(%)	27,65	29,4	26,32
	PL=		**27,79**
	PI=		**34,92**

Likit limit ve plastik limit değerleri tarafımca belirlenmiş olan sonuçların zemin sınıflandırılması grafiği aşağıda gösterilmiştir.

Likit limit değeri %62,71 olarak bulunan yüksek plastisiteli olduğu tahmin edilen kilin plastik limit değeri %34,92 olarak bulunmuştur.

Atterberg limitleri belirlenmiş olan Bursa İli Mudanya İlçesi Hasköy Mahallesinden

alınan numunenin sonuçları USCS'ye göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 4.6: Zemin Sınıflandırılması Grafiği

4.7. Kompaksiyon (Proctor) Deneyi

Deneylerde kullanılan yüksek plastisiteli killi zemin numunelerinin Proctor deneyi ASTM D698'de belirtilen standartlara göre yapılmıştır [29].

Üç katman halinde her katmana 25 vuruş gerçekleştirilerek sıkıştırma işlemi sağlanır. Bu sıkıştırma işleminde 25 vuruş kendi içinde dıştan içe yapılıyormuş gibi dışta bir daire çizip sonrasında içe vuruşlar yapılmaktadır. Amaç sıkışmanın tüm numuneye eşit oranda yayılmasıdır.

Taban parçası ile beraber tartılan kap (M_k) olarak ölçülmüştür. Tüm deneyler aynı kap ile yapılmıştır. Ölçülen kabın ağırlığı 3521 gramdır. Numunenin koyulduğu alanın yüksekliği 116,7 milimetre, çapı ise 101,46 milimetre olarak ölçülmüştür. Düz ve sert bir zemine konulan deney kabına üç eşit tabaka halinde numuneden koyulmakta olup, 305 milimetre serbest düşüş yapan tokmakla 25 darbe uygulanır. Tüm işlemler bittikten sonra kalıp ve zemin tartılıp (M_{k+s}) ölçülmüştür ve bir numune için az 5 kez tekrarlanmıştır.

Aşağıdaki fotoğraflarda deney sırasında çekilmiş olan fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 4.7 : (a) Numunenin hazırlanışı, (b) Numunenin hazırlığında kullanılan ağırlık, (c) numunenin kalıptan çıkarılışı, (d) çıkarılmış numune kabı

Zeminin yaş birim hacim ağırlığı, aşağıdaki formülden hesaplanmıştır(4.4).

$$P_n = ((M_{k+s} - M_k)/V)*9{,}81 \quad (4.4)$$

P_n Zemin numunesinin yaş birim hacim ağırlığı (kN/m^3)

M_k Kalıp ve tabanın kütlesi, (g)

M_{k+s} Kalıp, tabanı ve sıkıştırılmış zemin kütlesi, (g)

V Kalıbın iç hacmi, (cm^3)

Zeminin kuru birim hacim ağırlığı ise, aşağıdaki formülden hesaplanmıştır (4.4.1).

$$P_k=(100*P_n)/(100+w) \quad (4.4.1)$$

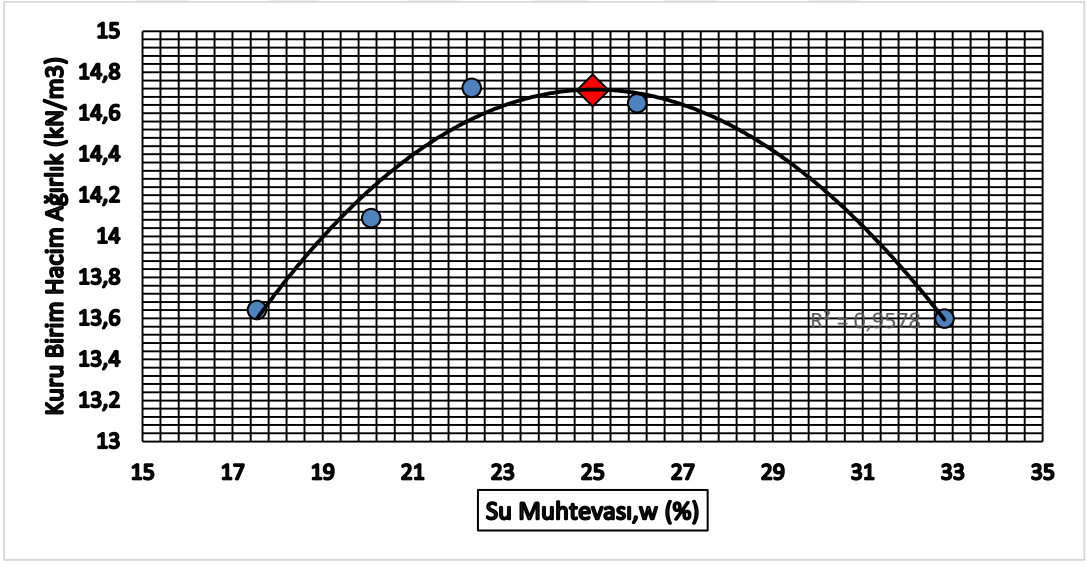
P_k zemin numunenin kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)

w zemin numunenin su muhtevası, (%)

Yapılmış olan deneyler sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve bunlara karşılık gelen su muhtevası değerleri aşağıdaki grafikte hesaplanmış olup aşağıdaki grafiğe işaretlenmiştir.

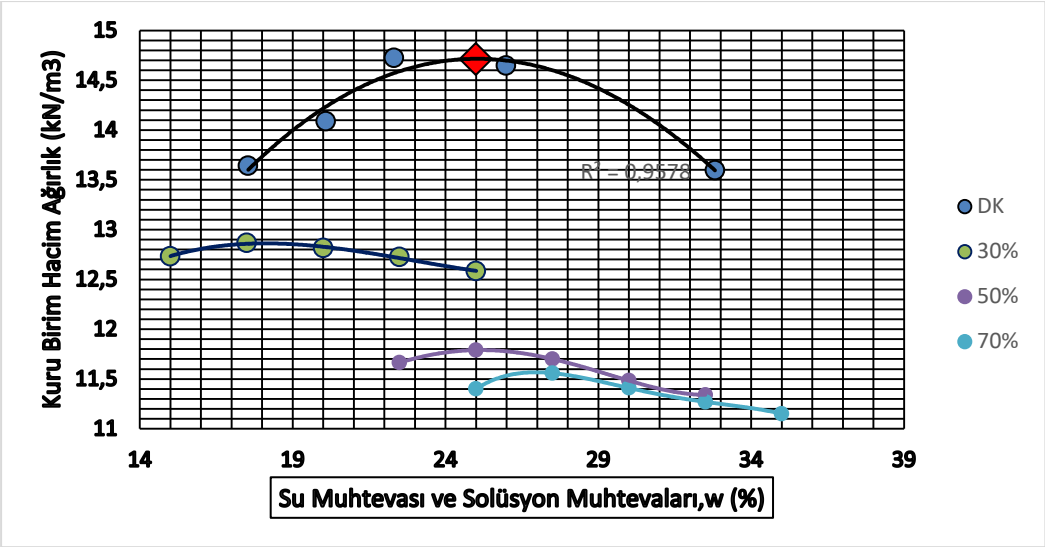
Çizelge 4.6: Yapılan Kompaksiyon Çalışmasının Değerleri

Kap No	A-42	A-19	A-44	A-40	A-7
Kap,g	63,68	64,11	67,42	65,66	66,17
Kap+Yaş Numune,g	387,56	405,72	387,11	421,17	394,15
Kap+Kuru Numune,g	339,22	348,59	328,79	347,84	313,11
Su Miktarı,g	48,34	57,13	58,32	73,33	81,04
Kuru Numune,g	275,54	284,48	261,37	282,18	246,94
Su Muhtevası, (%)	17,54	20,08	22,31	25,99	32,82



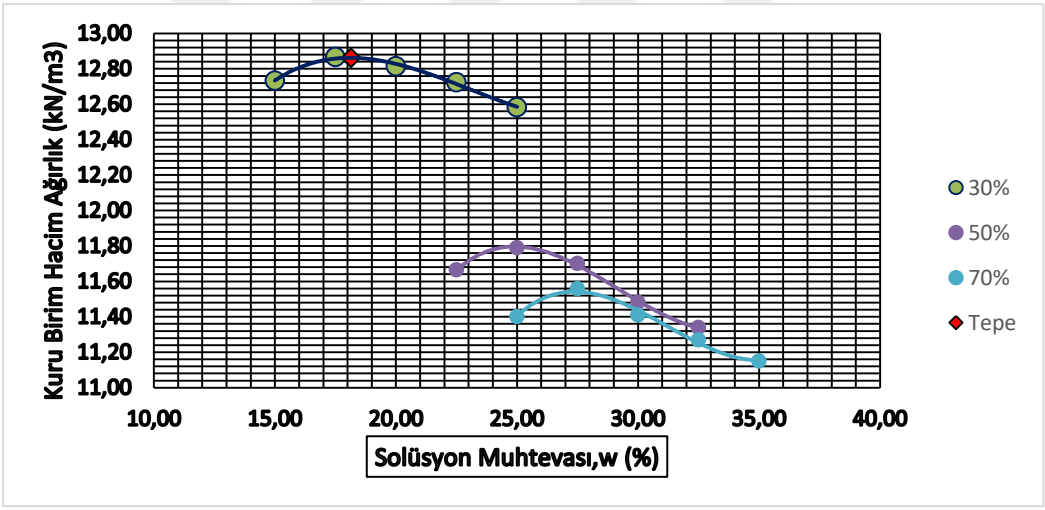
Şekil 4.8: Yapılan Kompaksiyon Sonuçlarının Grafikte İşaretlenmesi

İlk olarak doğal kil numunesi üzerinde proctor testleri yapılarak proctor eğrisi çizilmiştir (Şekil 4.8). Daha sonra sodyum silikat/çözelti oranları %30, %50 ve %70 ile kil zemin karıştırılarak proctor eğrileri çizdirilmiştir. Zemin içine sodyum silikat karışım suyu olarak eklenmiştir. Sodyum silikat ile stabilize edilmiş zeminin proctor eğrisi Şekil 4.9 da verilmiştir.



Şekil 4.9: Yapılan 4 Farklı Kompaksiyon Sonuçlarının Grafikte İşaretlenmesi

Yapılan deneyler sonuçlarında yüksek plastisiteli olduğu daha önceki çalışmalarda belirlenen numunemizin optimum su muhtevası değeri %25 maksimum kuru birim hacim ağırlığı 14,71 kN/m^3 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4.10: %30, %50 ve %70 Oranında Solisyon İle Yapılmış Proctor Grafikleri

Farklı Sodyum silikat/çözelti oranlarında hazırlanmış solüsyonlarla stabilize edilmiş zeminin proctor eğrileri Şekil 4.10 da verilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde Sodyum silikat/Çözelti oranın artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri azalırken optimum su muhtevası değerleri artmıştır.

Sodyum silikat/Çözelti oranı %30 (%70 su - %30 sodyum silikat) ile yapılan stabilizasyonda zeminin optimum su muhtevası değeri %18,15, kuru birim hacim ağırlığı ise 12,862 kg/m^3 olarak ölçülmüştür.

Sodyum silikat/Çözelti oranı %50 (%50 su - %50 sodyum silikat) ile yapılan stabilizasyonda zeminin optimum su muhtevası değeri %24,9, kuru birim hacim ağırlığı değeri ise 11,795 kg/m^3 olarak ölçülmüştür.

Sodyum silikat/Çözelti oranı %70 (%30 su - %70 sodyum silikat) ile yapılan stabilizasyonda zeminin optimum su muhtevası değeri %27,4, kuru birim hacim ağırlığı değeri ise 11,542 kg/m^3 olarak ölçülmüştür.

4.8. Serbest Basınç Deneyi

Bursa İli Mudanya İlçesi Hasköy Mahallesinden alınan numunelerin, çalışmamıza uygun kil numunesi olduğu tespit edildikten sonra w_{opt} sıkılığında ve w_{opp}+5 sıkılığında hazırlanmış numunelere 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 günlerde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Hazırlanmış numuneler açık ortam, streçe sarılı halde ve kür ortamında olmak üzere üç farklı kür koşulunda bekletilmiştir. Serbest basınç deneyleri ASTM D2166 da belirtilen standartlara göre yapılmıştır [31]. Hazırlanan numuneler ait bilgiler Çizelge 4.6 da verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Serbest Basınç Deneyi Yapılacak Olan Numunelerin Haz

Kod	wopt(%)	yk,maks (g/cm3)	Hazırlık için kuru kütle,g	Hazırlıkta eklenecek su ya da solüsyon(g)	Her aşamada tartılacak miktar,g= (3 aşamada sıkıştırılacak)
DK	25	1,50	1100	161,81	112,78
%30 Proctor	18,15	1,31	1000	128,62	97,05
%30 Proctor +5	23,15	1,29	1000	126,8	95,52
%50 Proctor	24,9	1,20	900	106,155	88,17
%50 Proctor +5	29,9	1,18	900	103,86	86,07
%70 Proctor	27,4	1,18	900	103,878	86,09
%70 Proctor +5	32,4	1,15	900	101,34	83,78

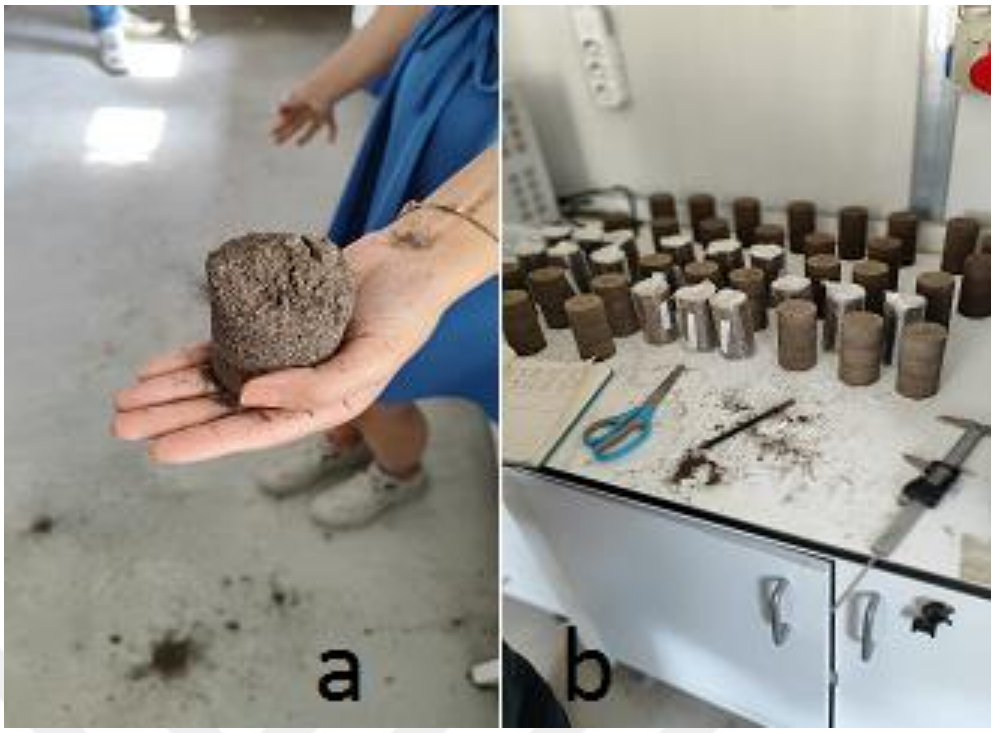
Numuneler ayrıca kür havuzunda da bekletilmiştir. Ancak ilk gün hazırlanan numunelerden kür havuzuna girmiş olanlar dağılmıştır. Şekil 4.1 de kür havuzunda bekletilen numunelerin dağılması ve numune hazırlığında kullanılan mold gösterilmiştir.



Şekil 4.11:(a) Dağılan numuneler, (b) Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Mold

Numunelerin dağılmasından sonra kür havuzunda numune bekletilmesi iptal edilmiştir. Bu sebeple hazırlanan numuneler açık ortam ve streçli halde bekletilmiştir. Doğal kil ile yapılan proctor deneyi ve deneyden elde edilen maksimum sıkılık ile yapılması planlanan numunelerin tamamlanmasının ardından Sodyum silikat/çözelti oranı %30 solüsyon ile elde edilen maksimum sıkılık değerleri ile çalışmalara devam edilmiştir.

Sodyum silikat/çözelti oranı %30 ile yapılmış olan optimum su muhtevası değerleri ile hazırlanmaya başlanan numunelerin yapım aşamasında herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Ancak optimum su muhtevasında Sodyum silikat/çözelti oranı %50 ve %70 ile yapılmış sıkılık değerleri ile yapılmış olan numuneler kriko yardımı ile molddan çıkarılırken dağılmıştır. Aşağıdaki fotoğraflarda dağılmış olan numunelerin kriko ile molddan hemen çıkarılmasının ardından çekilmiş olan fotoğraflar ile olması gereken numunelerin fotoğrafları gösterilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12:(a) Dağılan numuneler, (b) Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Mold

Deneylerin yapımında elde edilen bu iki olumsuz sorun sonucunda yapılan değerlendirmeler ile deneyimizin su muhtevası ve sıkılık değerlerinde değişikliğe gidilmiştir. Yapılan değerlendirilmeler sonucunda deneylere Çizelge 4.7 de belirtilen numune hazırlığı ile devam edilmiştir.

Çizelge 4.8 : Serbest Basınç Deneyi Yapılacak Olan Numunelerin Hazırlanma Son Değerleri

Kod	wopt(%)	yk,maks (g/cm3)	Hazırlık için kuru kütle,g	Hazırlıkta eklenecek su ya da solüsyon	Her aşamada tartılacak miktar,g= (3 aşamada sıkıştırılacak)
DK	25	1,50	1100	161,81	112,78
DK+5	30	1,45	1000	142,5	108,82

Sahadan alınan numuneler ile yapılmış olan serbest basınç deneyi numuneleri 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün sırasıyla uygun koşullarda bekletilmiştir. Bekletilen numunelerin serbest basınç deney zamanı geldiğinde tüm ölçümleri yapılmış ve deneye hazır hale getirilmiştir. Ortalama olarak hesaplanan değerlerde 3 günlük bekletilen numunelerde hacimsel olarak %2'lik kayıp yaşanmıştır. Bu kayıpların oranı sırasıyla 7, 14, 28, 56 ve 90 günlerde sırasıyla, %2,5, %2,75, %3 %3,41 ve %3,84 olarak ölçülmüştür. Bekletilen numunelerin ve deney yapılan numunelerin

bazı fotoğrafları Şekil 13 ve Şekil 14'de verilmiştir.



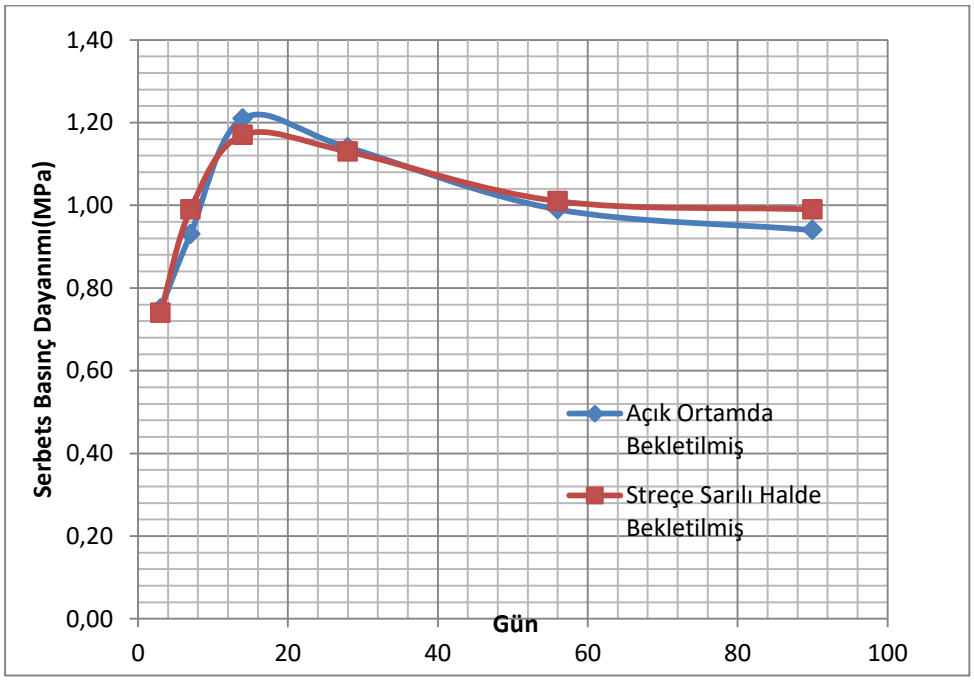
Şekil 4.13: Bekletilen numuneler



Şekil 4.14:(a),(b) 70K5-7-S1 Numunesi-(c),(d) 50K5-3-S2 Numunesi

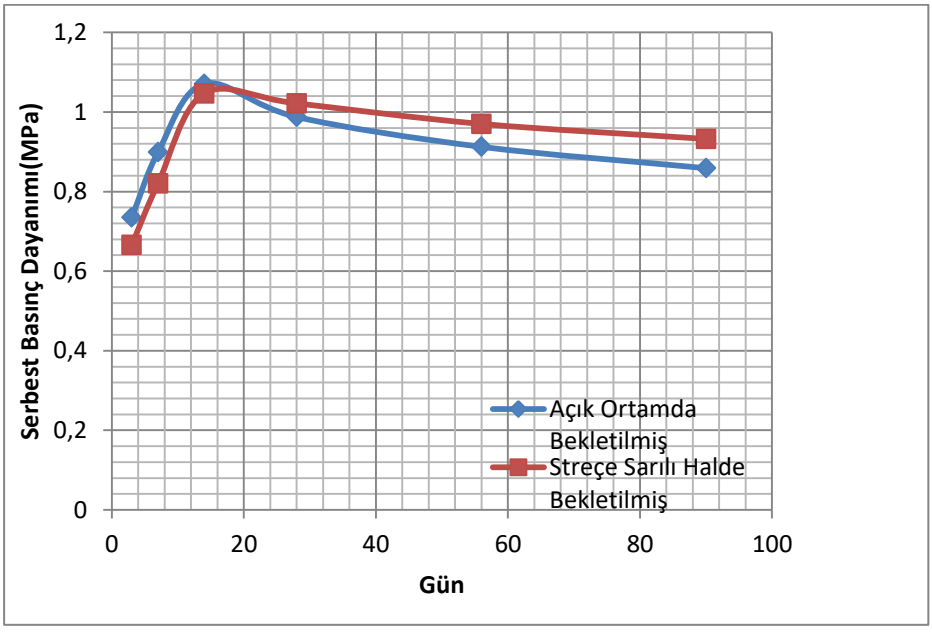
Doğal kilin ve Sodyum silikat ile stabilize edilmiş kil numunelerin serbest basınç dayanım değerleri Şekil 4.15, Şelik 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 de verilmiştir.

SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 3	0,75	0,68	0,81	0,75
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 7	0,96	0,90	0,92	0,93
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 14	1,14	1,20	1,28	1,21
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 28	1,14	1,14	1,13	1,14
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 56	0,94	1,05	0,98	0,99
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 90	0,95	0,96	0,90	0,94
Streç	1	2	3	ORT
DK 3	0,77	0,77	0,69	0,74
Streç	1	2	3	ORT
DK 7	0,94	1,03	1,00	0,99
Streç	1	2	3	ORT
DK 14	1,13	1,21	1,17	1,17
Streç	1	2	3	ORT
DK 28	1,14	1,14	1,13	1,13
Streç	1	2	3	ORT
DK 56	1,00	1,05	0,95	1,01
Streç	1	2	3	ORT
DK 90	1,05	0,94	0,99	0,99



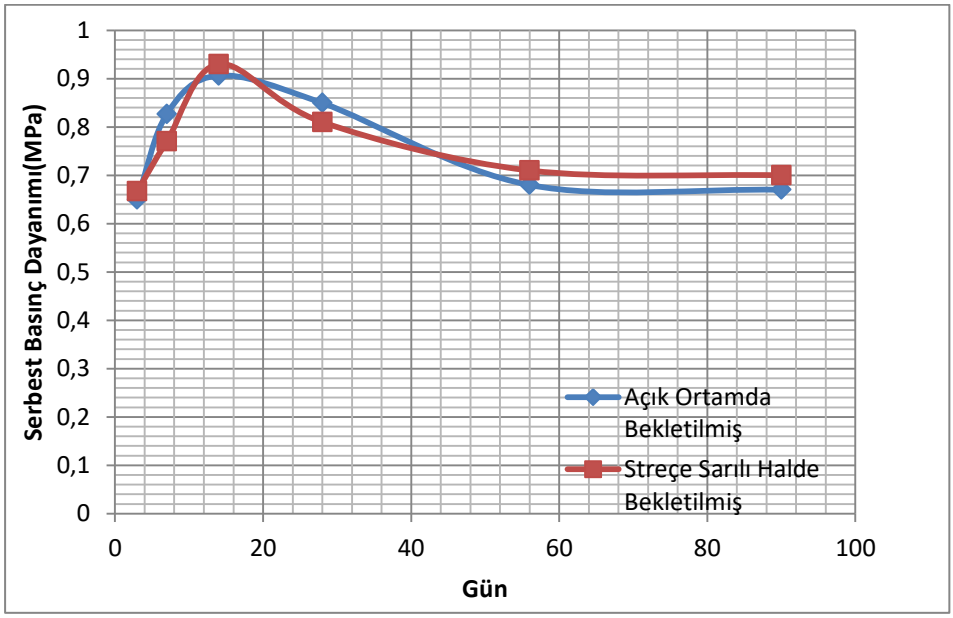
Şekil 4.15: Yüksek plastisiteli kil ile sadece su kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 3	0,70	0,74	0,74	0,73
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 7	0,94	0,91	0,86	0,90
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 14	1,00	1,06	1,15	1,07
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 28	1,00	1,05	0,93	0,99
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 56	0,90	0,90	0,93	0,91
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 90	0,88	0,88	0,82	0,86
Streç	1	2	3	ORT
DK 3	0,63	0,71	0,66	0,67
Streç	1	2	3	ORT
DK 7	0,84	0,84	0,78	0,82
Streç	1	2	3	ORT
DK 14	1,00	1,05	1,09	1,05
Streç	1	2	3	ORT
DK 28	1,02	1,04	0,99	1,02
Streç	1	2	3	ORT
DK 56	0,99	0,98	0,98	0,98
Streç	1	2	3	ORT
DK 90	0,90	0,90	0,98	0,93



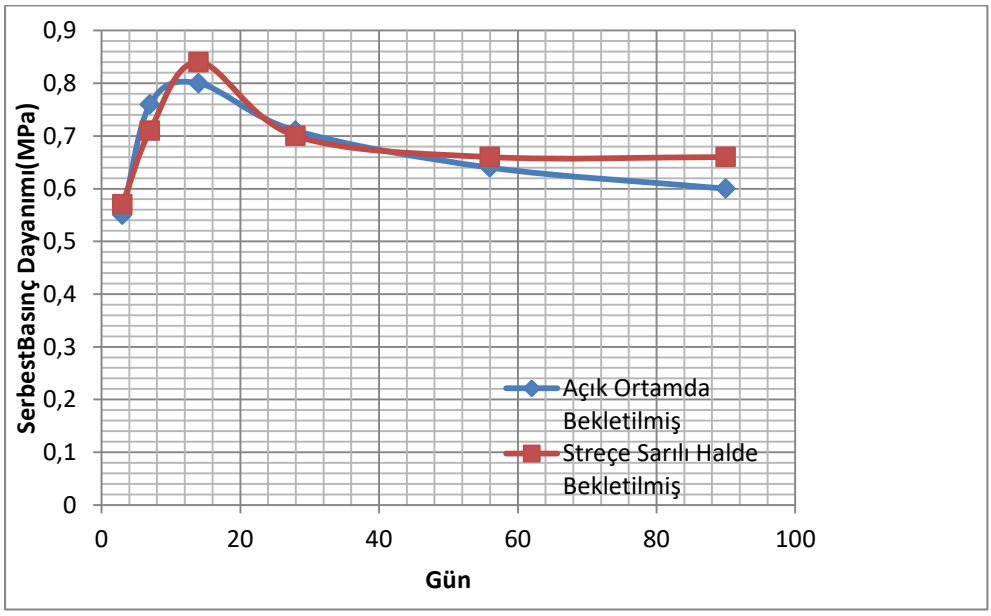
Şekil 4.16: Yüksek plastisiteli kil ile %70 su-%30 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 3	0,61	0,63	0,71	0,65
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 7	0,84	0,84	0,92	0,87
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 14	0,94	0,84	0,93	0,90
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 28	0,79	0,89	0,87	0,85
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 56	0,66	0,66	0,72	0,68
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 90	0,63	0,69	0,69	0,67
Streç	1	2	3	ORT
DK 3	0,64	0,64	0,72	0,67
Streç	1	2	3	ORT
DK 7	0,74	0,79	0,77	0,77
Streç	1	2	3	ORT
DK 14	0,91	0,99	0,89	0,93
Streç	1	2	3	ORT
DK 28	0,82	0,80	0,81	0,81
Streç	1	2	3	ORT
DK 56	0,70	0,76	0,67	0,71
Streç	1	2	3	ORT
DK 90	0,71	0,73	0,66	0,70



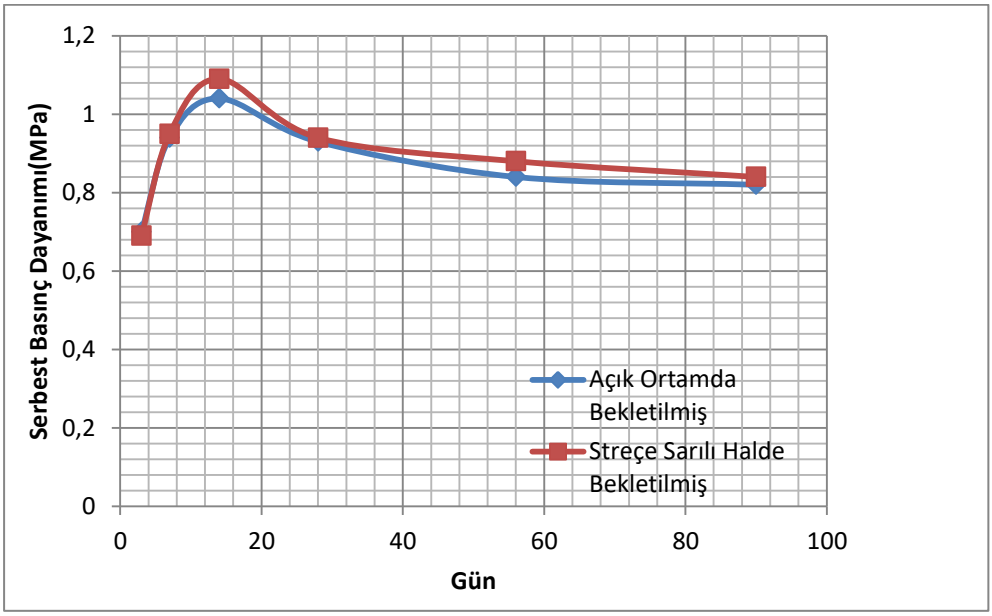
Şekil 4.17: Yüksek plastisiteli kil ile %50 su-%50 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 3	0,60	0,51	0,54	0,55
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 7	0,72	0,78	0,77	0,76
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 14	0,80	0,86	0,75	0,80
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 28	0,71	0,72	0,71	0,71
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 56	0,60	0,64	0,67	0,64
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 90	0,64	0,63	0,54	0,60
Streç	1	2	3	ORT
DK 3	0,58	0,58	0,55	0,57
Streç	1	2	3	ORT
DK 7	0,64	0,77	0,72	0,71
Streç	1	2	3	ORT
DK 14	0,84	0,85	0,84	0,84
Streç	1	2	3	ORT
DK 28	0,64	0,73	0,73	0,70
Streç	1	2	3	ORT
DK 56	0,66	0,66	0,66	0,66
Streç	1	2	3	ORT
DK 90	0,67	0,68	0,64	0,66



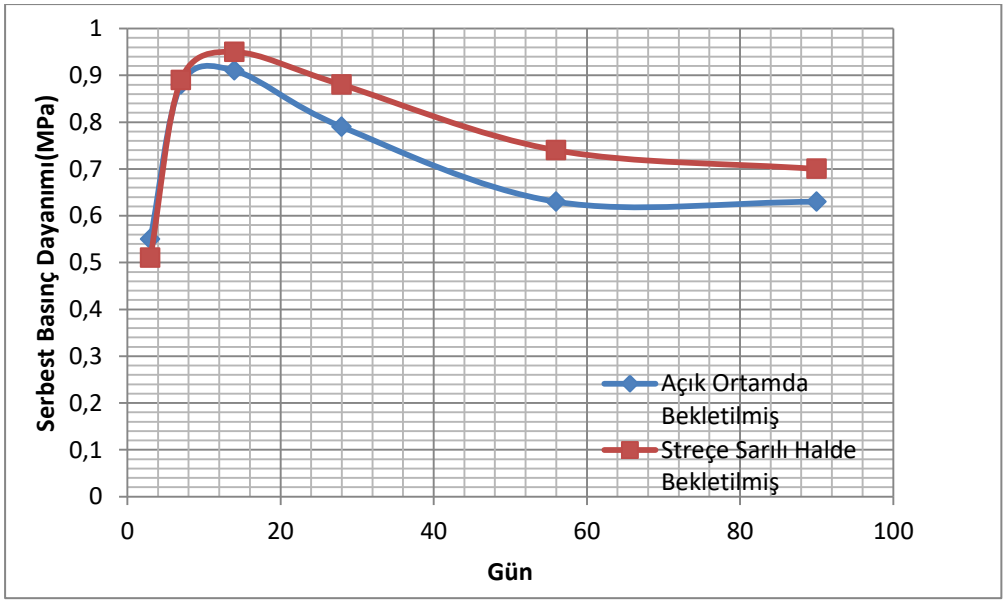
Şekil 4.18: Yüksek plastisiteli kil ile %30 su-%70 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 3	0,74	0,75	0,61	0,70
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 7	0,99	0,88	0,94	0,94
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 14	1,00	1,12	0,99	1,04
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 28	0,95	0,90	0,92	0,93
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 56	0,84	0,88	0,81	0,84
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 90	0,80	0,80	0,84	0,82
Streç	1	2	3	ORT
DK5 3	0,66	0,66	0,75	0,69
Streç	1	2	3	ORT
DK5 7	0,97	0,91	0,97	0,95
Streç	1	2	3	ORT
DK5 14	1,11	1,08	1,08	1,09
Streç	1	2	3	ORT
DK5 28	0,94	0,92	0,97	0,94
Streç	1	2	3	ORT
DK5 56	0,93	0,79	0,91	0,88
Streç	1	2	3	ORT
DK5 90	0,80	0,88	0,84	0,84



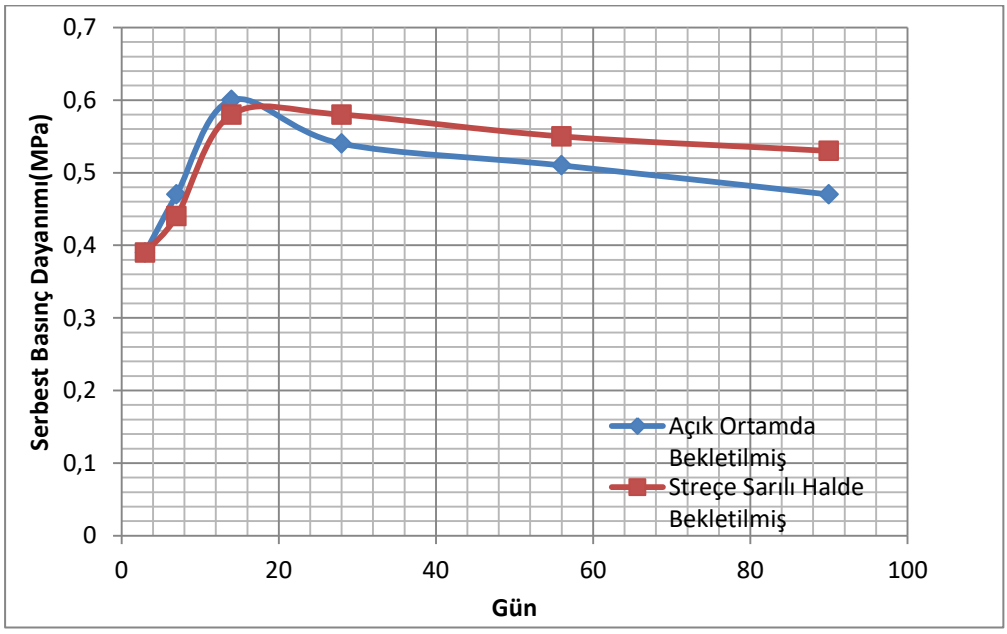
Şekil 4.19: Yüksek plastisiteli kil ile sadece su kullanılarak yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 3	0,49	0,56	0,59	0,55
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 7	0,86	0,89	0,88	0,88
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 14	0,90	0,89	0,94	0,91
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 28	0,79	0,80	0,78	0,79
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 56	0,63	0,68	0,58	0,63
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 90	0,66	0,61	0,63	0,63
Streç	1	2	3	ORT
DK5 3	0,51	0,51	0,52	0,51
Streç	1	2	3	ORT
DK5 7	0,86	0,94	0,90	0,89
Streç	1	2	3	ORT
DK5 14	0,99	0,99	0,86	0,95
Streç	1	2	3	ORT
DK5 28	0,87	0,88	0,88	0,88
Streç	1	2	3	ORT
DK5 56	0,70	0,74	0,77	0,74
Streç	1	2	3	ORT
DK5 90	0,71	0,72	0,67	0,70



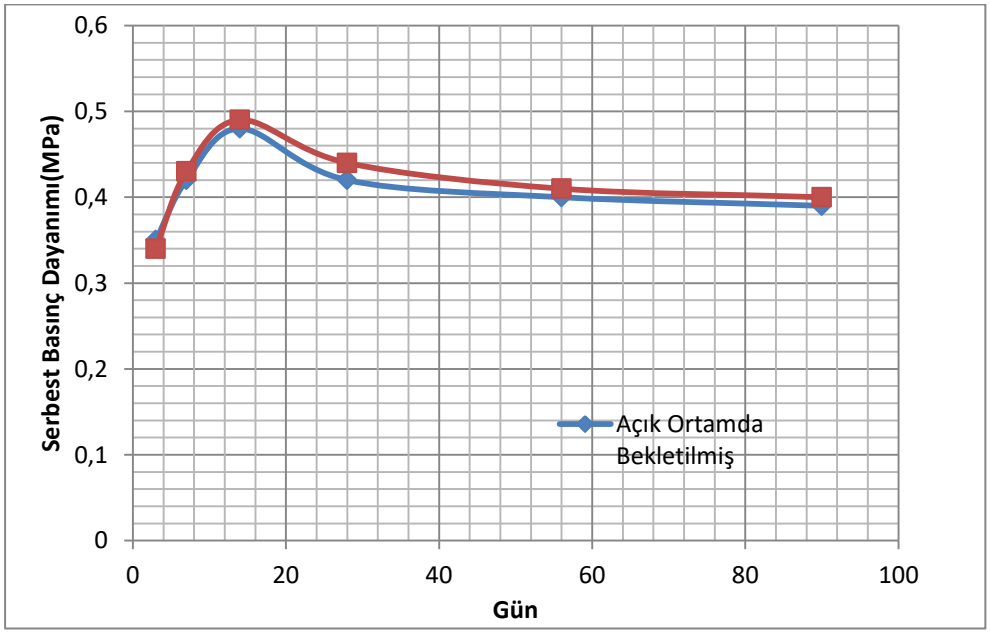
Şekil 4.20: Yüksek plastisiteli kil ile %70 su-%30 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 3	0,34	0,40	0,44	0,39
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 7	0,44	0,41	0,56	0,47
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 14	0,54	0,64	0,61	0,60
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 28	0,54	0,54	0,55	0,54
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 56	0,52	0,54	0,47	0,51
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 90	0,44	0,43	0,54	0,47
Streç	1	2	3	ORT
DK5 3	0,32	0,46	0,40	0,39
Streç	1	2	3	ORT
DK5 7	0,44	0,40	0,49	0,44
Streç	1	2	3	ORT
DK5 14	0,56	0,60	0,58	0,58
Streç	1	2	3	ORT
DK5 28	0,56	0,61	0,57	0,58
Streç	1	2	3	ORT
DK5 56	0,49	0,56	0,60	0,55
Streç	1	2	3	ORT
DK5 90	0,62	0,49	0,48	0,53

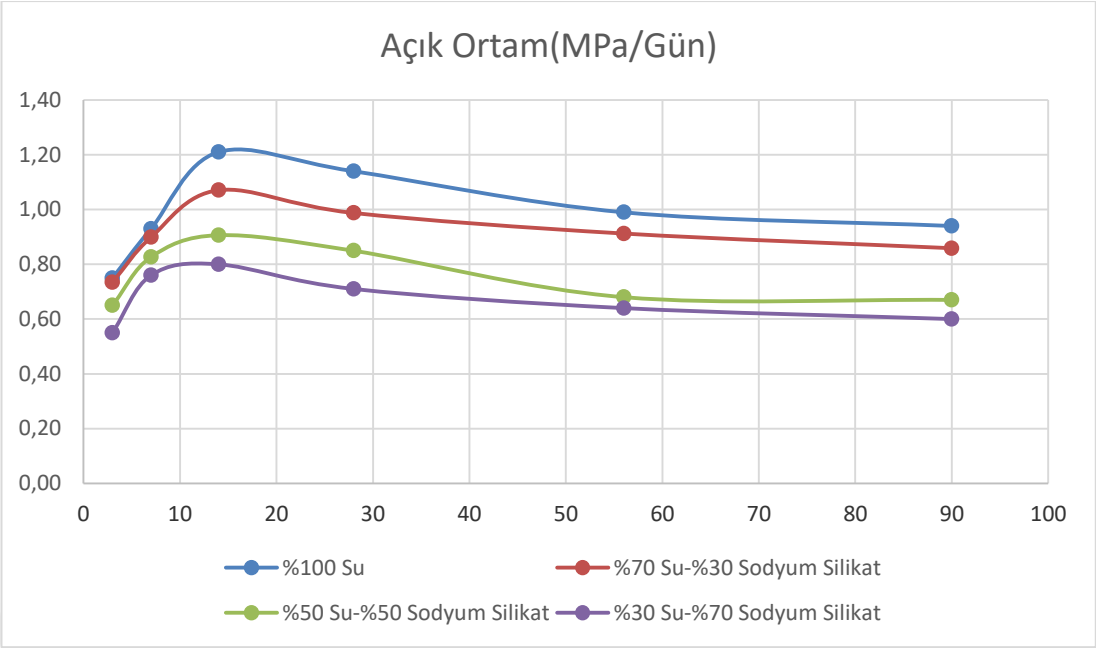


Şekil 4.21: Yüksek plastisiteli kil ile %50 su-%50 sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

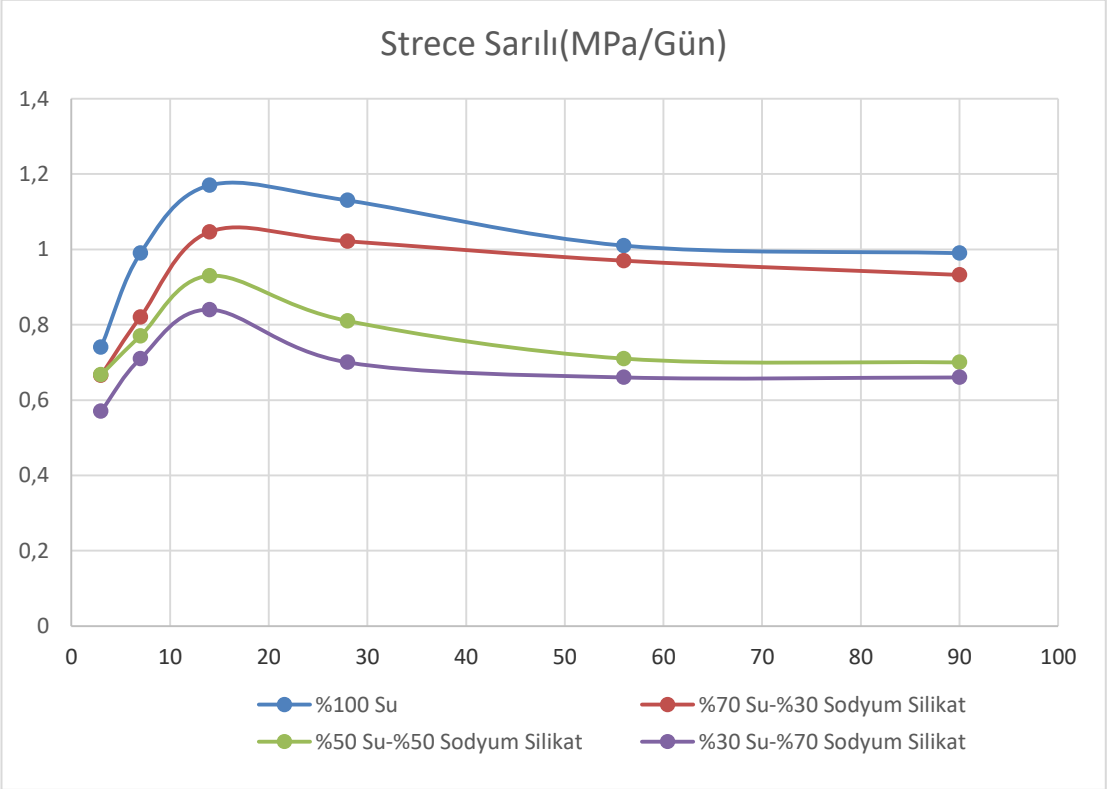
SBD DEĞERLERİ				
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 3	0,31	0,33	0,41	0,35
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 7	0,46	0,39	0,41	0,42
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 14	0,44	0,47	0,53	0,48
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK 28	0,45	0,41	0,40	0,42
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 56	0,37	0,37	0,46	0,40
Açık Ort.	1	2	3	ORT
DK5 90	0,35	0,44	0,39	0,39
Streç	1	2	3	ORT
DK5 3	0,33	0,30	0,38	0,34
Streç	1	2	3	ORT
DK5 7	0,38	0,47	0,45	0,43
Streç	1	2	3	ORT
DK5 14	0,49	0,47	0,51	0,49
Streç	1	2	3	ORT
DK5 28	0,38	0,47	0,47	0,44
Streç	1	2	3	ORT
DK5 56	0,40	0,39	0,44	0,41
Streç	1	2	3	ORT
DK5 90	0,38	0,37	0,45	0,40



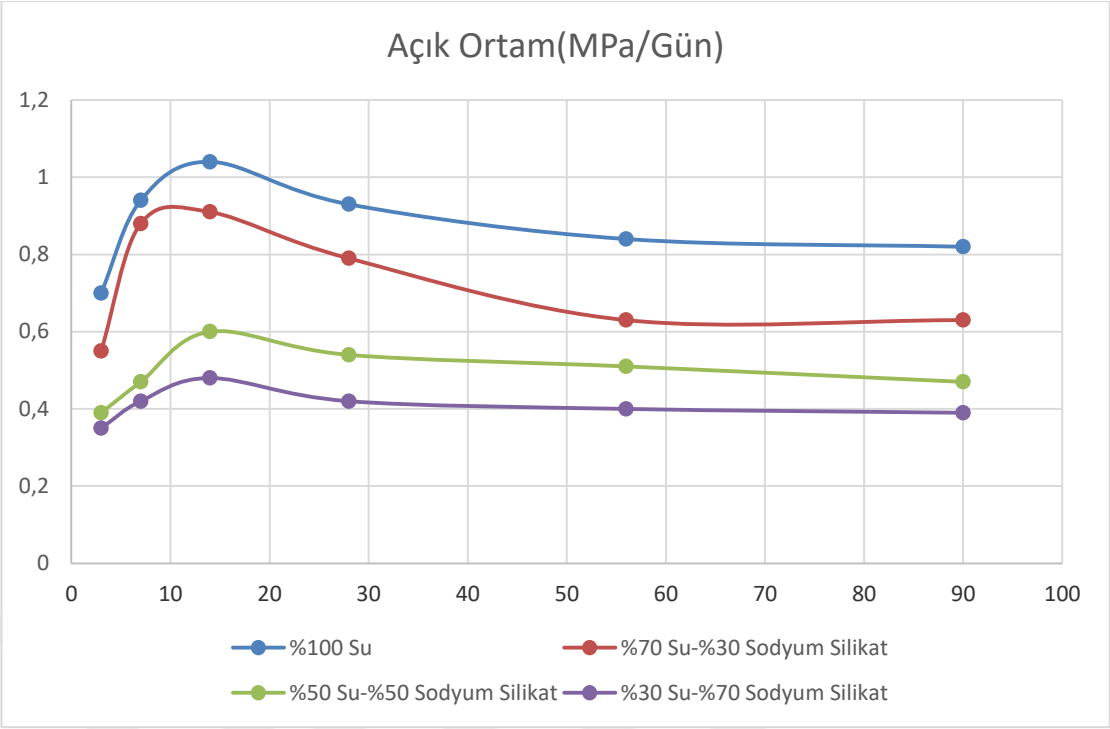
Şekil 4.22: Yüksek plastisiteli kil ile %30 su-%70sodyum silikat kullanılarak yapılan maksimum sıkılık+5 değerinde yapılmış olan SBD değerleri ve grafik ile gösterimi



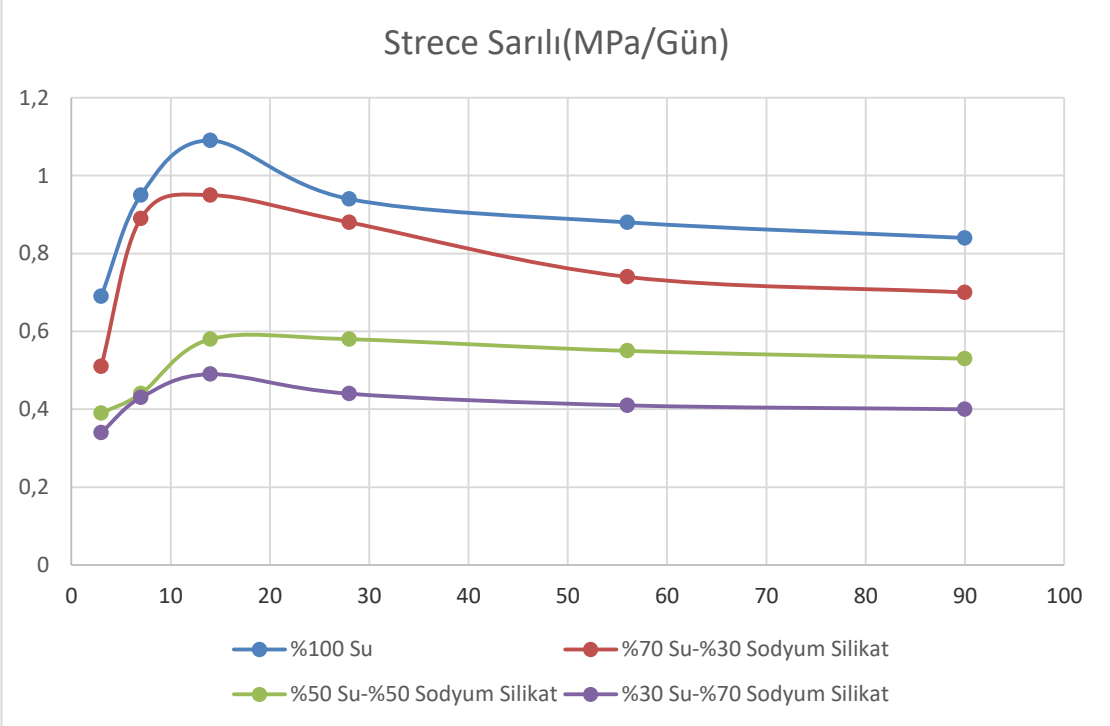
Şekil 4.23: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve açık ortamda bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi



Şekil 4.24: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve strece sarılı halde bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi



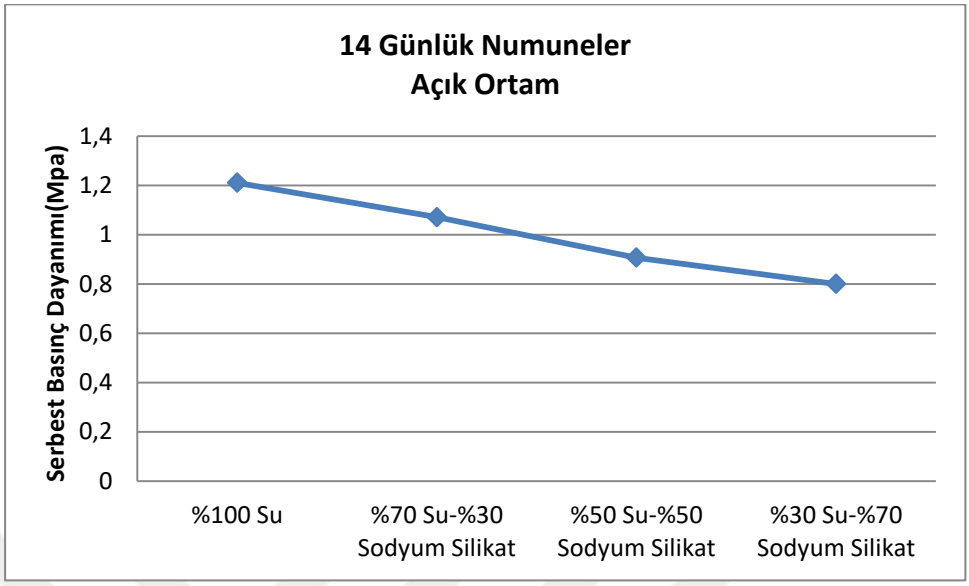
Şekil 4.25: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkt+5 değerinde yapılan ve açık ortamda bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi



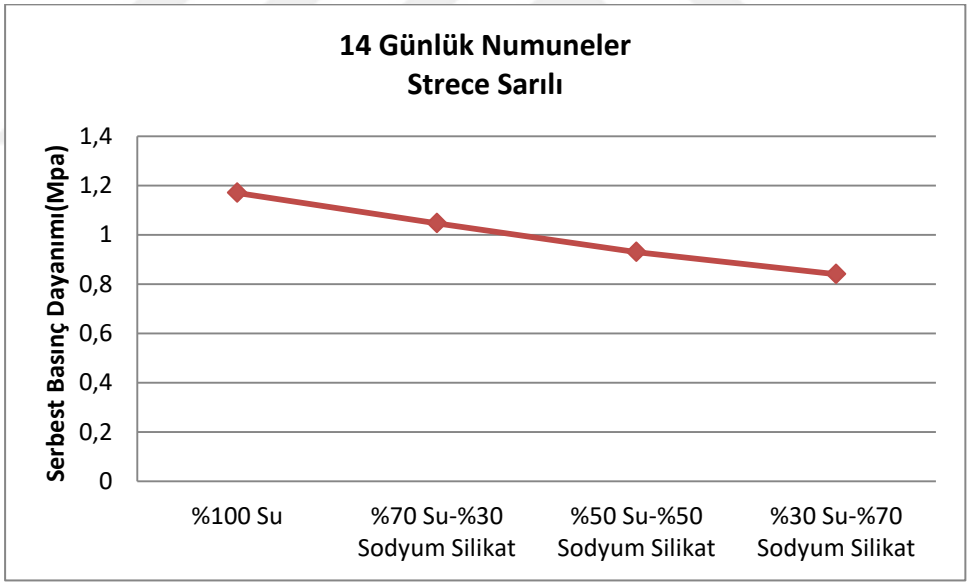
Şekil 4.26: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılık+5 yapılan ve strece sarılı halde bekletilen numunlerin SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

Yapılmış olan Serbest Basınç Deneyi sonucunda Sodyum Silikat oranının artması ile serbest basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm numulerde en yüksek

değerler 14. gün ölçülen sonuçlarda görülmektedir. Numunelerin en yüksek değerlere çıktığı 14. gün değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

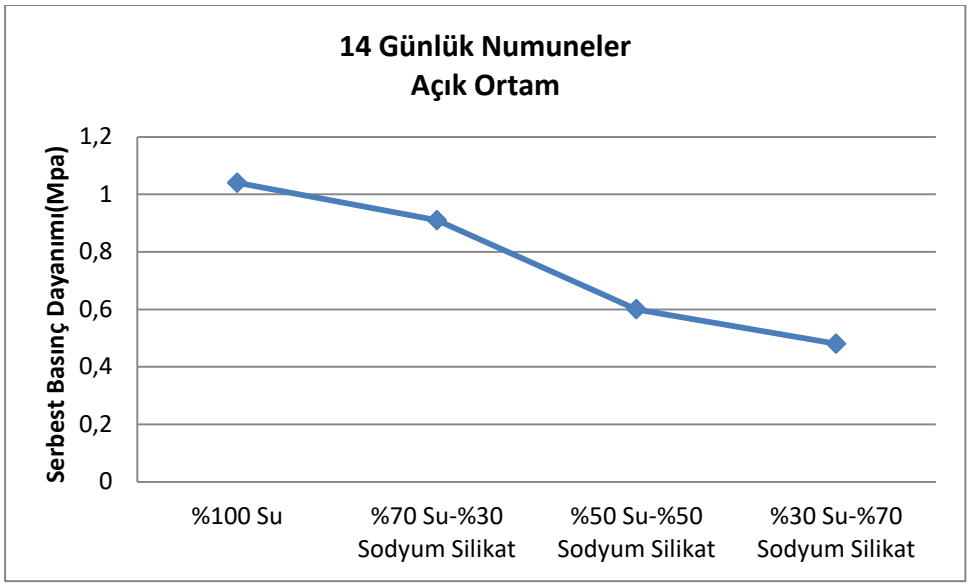


Şekil 4.27: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

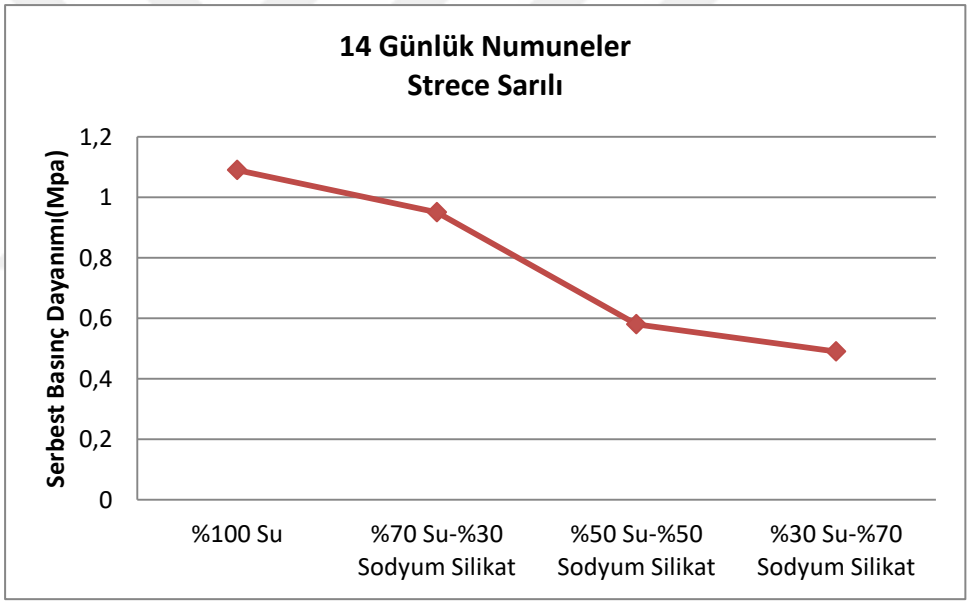


Şekil 4.28: Yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü üzere yüksek plastisiteli kil ile maksimum sıkılıkta yapılan Serbest Basınç Dayanımı değerleri, numunelerin karıştırıldığı sodyum silikat miktarı ile ters orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. Sodyum Silikat miktarı çözelti içerisinde artıığında Serbest Basınç Dayanım değerleri azalmıştır.



Şekil 4.29: Yüksek plastisiteli kil ile Wopt+5 değerinde yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi



Şekil 4.30: Yüksek plastisiteli kil ile Wopt+5 değerinde yapılan ve açık halde bekletilen numunlerin 14. gün SBD değerleri ve grafik ile gösterimi

Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü üzere yüksek plastisiteli kil ile Wopt+5 değerinde yapılan Serbest Basınç Dayanımı değerleri, numunelerin karıştırıldığı sodyum silikat miktarı ile maksimum sıkılıkta yapılan deneylerde olduğu gibi ters orantılı olduğu ortaya çıkmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneylerde kullanılan Bursa İli Mudanya İlçesi Hasköy Mahallesinden alınan ve yüksek plastisiteli olduğu tanımlanan kil ile yapılan stabilizasyon çalışmalarında sodyum silikatın mühendislik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar 17 ay sürmüştür. Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü üzere yüksek plastisiteli kil ile Wopt+5 değerinde yapılan Serbest Basınç Dayanımı değerleri, numunelerin karıştırıldığı sodyum silikat miktarı ile maksimum sıkılıkta yapılan deneylerde olduğu gibi ters orantılı olduğu ortaya çıkmıştır.

Yapılan proctor testlerinde Sodyum silikat/Çözelti oranın artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri azalırken optimum su muhtevası değerleri artmıştır.

Sodyum silikat/Çözelti oranı %30 (%70 su - %30 sodyum silikat) ile yapılan stabilizasyonda zeminin optimum su muhtevası değeri %18,15, kuru birim hacim ağırlığı ise 12,862 kg/m^3 olarak ölçülmüştür.

Sodyum silikat/Çözelti oranı %50 (%50 su - %50 sodyum silikat) ile yapılan stabilizasyonda zeminin optimum su muhtevası değeri %24,9, kuru birim hacim ağırlığı değeri ise 11,795 kg/m^3 olarak ölçülmüştür.

Sodyum silikat/Çözelti oranı %70 (%30 su - %70 sodyum silikat) ile yapılan stabilizasyonda zeminin optimum su muhtevası değeri %27,4, kuru birim hacim ağırlığı değeri ise 11,542 kg/m^3 olarak ölçülmüştür.

Sodyum silikat oranının artması ile dayanım değerleri azalmıştır.

Sodyum silikat ile yapılan stabilizasyonda numunelerin kohezyon özelliğini yitirdiği ve kum davranışına geçtiği görülmüştür. Stabilizasyon sonrası serbest basınç dayanımdaki azalmanın bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Doğal kil zeminde yapmış olduğumuz Serbest basınç deneylerinde en yüksek SBD değeri açık halde olan 14. günde kırılan numunelerden alınmıştır.

Optimum su muhtevasında Sodyum silikat/çözelti oranı % 30 ile hazırlanmış numunelerde en yüksek SBD değeri açık halde olan 14. günde deney yapılan

numunelerde elde edilmiştir.

Optimum su muhtevasında Sodyum silikat/çözelti oranı % 50 ile hazırlanmış numunelerde en yüksek SBD değeri streçe sarılı halde olan 14. günde deney yapılan numunelerde elde edilmiştir.

Optimum su muhtevasında Sodyum silikat/çözelti oranı % 70 ile hazırlanmış numunelerde en yüksek SBD değeri streçe sarılı halde olan 14. günde deney yapılan numunelerde elde edilmiştir.

Wopt +% 5 doğal kil ile yapılan deneylerde en yüksek SBD değeri strece sarılı halde olan 14. günde deney yapılan numunelerde elde edilmiştir.

Wopt +% 5 ve Sodyum silikat/çözelti oranı % 30 ile hazırlanmış numunelerde en yüksek SBD değeri strece sarılı halde olan14. günde deney yapılmış numunelerde elde edilmiştir.

Wopt +% 5 ve Sodyum silikat/çözelti oranı % 50 ile hazırlanmış numunelerde en yüksek SBD değeri açık halde olan 14. günde deney yapılmış numunelerde elde edilmiştir.

Wopt +% 5 ve Sodyum silikat/çözelti oranı % 70 ile hazırlanmış numunelerde en yüksek SBD değeri strece sarılı halde olan 14. günde deney yapılmış numunelerde elde edilmiştir.

Sodyum silikat ile stabilize edilen numunelerde serbest basınç dayanım değerleri 14. güne kadar hızla artmış 14. günden sonra azalma eğilimine girmiştir. Sodyum silikat oranın artması ile dayanım değerleri azalmıştır.

Öneri

Her geçen gün araştırılan yeni malzemeler ve ilerleye teknoloji ile beraber yeni ürünler piyasaya çıkmaktadır. Yüksek plastisiteli kil ile yapılan çalışmalarda c ve ϕ değerlerinin tespiti için 3 eksenli Basınç Deneyleri yapılması ve çalışmanın devam etmesi kohezyon değerindeki değişimin belirlenmesi için önemlidir. Düşük plastisiteli kil zeminlerde de sodyum silikatın etkisinin araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Önalp A.,** Geoteknik Bilgisi Cilt 2, KTÜ Basımevi, Trabzon 1997

[2] **Kavak A.,** The Behavior Of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading Boğaziçi Üniveristesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi 167 S., İstanbul 1996

[3] **Mıtchell J.K.,** Soil Improvement (State Of The Art Report) X.Soil Mech.And Foundation Eng.Conferans, Stochkolm, 1981

[4] **Impe W.,** Soil Improvement Techniques And Their Evolution, Aa Balkema Rotterdam 124 S. 1989

[5] **Erşan, H.,**Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,75 S., İstanbul,1996

[6] **Kavak A.,** The Behavior Of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading Boğaziçi Üniveristesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi 167 S., İstanbul 1996

[7] **Nelson, J.D. and Miller, R.D**. (1992). *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering* (First edition). New York: John Wiley and Sons.Inc. 259.

[8] **Gourly, C.S., Newill, D., and Schreiner H.D**. (1993). Expansive soils: TRL's research strategy. *Proceedings of the First International Symposium On Engineering Characteristics of Arid Soils,* London.

[9] **Prusinski, J.R., Bhattacharja, S.,** (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* 1652(1), 210–227.

[10] **Middleton, G.F.,** (1953). *Build your house of earth: a manual of pise and adobe construction* (First edition). London: Angus and Robertson, 111.

[11] **Narasihma, A. V, Penchalaiah, B., Chittranjan, M., and Ramesh, P**. (2014). Compressibility behaviour of black cotton soil admixed with lime and rice-husk ash, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*.3(4), 11473–11480.

[12] **Nicholson, P.G.,** (2015). *Soil Improvement and Ground Modification Methods* (First edition). Boston: Butterworth-Heinemann, 19-60

[13] **Şadoğlu E. ve Çalık Ü.,** Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 551–562, 2020.

[14] **Bahar, R., Benazzoug, M., and Kenai, S.** (2004). Performance of compacted cement stabilized soil. *Cement and Concrete Composites*. 25(6). 633–641.

[15] **Türköz M., Savaş H., Tosun H.,** Stabilization of problamatic clay soils with magnesium choloride solution, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (1), 234–242, 2011.

[16] **Prusinski, J, R., Bhattacharja, S.,** Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils, Transport. Res. Rec., 1652, 215–227 , 1999.

[17] **Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N, ve Balasubramaniam, A. S.,** Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments, ASCE Press, New York, 1996.

[18] **Miura, N., Horpibulsuk, S., Nagaraj, T. S.**, Engineeringbehavior of cement stabilized clay at high water content, Soils and Found., 41 (5), 33–45, 2001.

[19] **Mollamahmutoğlu M., Avcı E., Deveci E., Gökçe A.**, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 36:2 (2021) 985-996

[20] **Habercom, G.E.H.** (1976). Soil stabilization (abibliography with abstracts). *National Technical Information Service Biblio.* 221.

[21] **Nicholson, P.G.,** (2015). *Soil Improvement and Ground Modification Methods* (First edition). Boston: Butterworth-Heinemann, 19-60

[22] **Bhattacharja, S. and Bhatty, J.** (2003). Comparative performance of portland cement and lime instabilization of moderate to high plasticity clay soils. *Portland Cement Association*., RD125, Skokie, Illinois. 26.

[23] **Federal Highway Administration.** (1992a). *Soil and Base Stabilization and Associate Drainage Considerations: Volume I, Pavement Design and Construction Considerations.* Washington: Federal Highway Administration (FHWA-SA-93-004). 160.

[24] **Henn, R.W.** (1996). *Practical Guide to Grouting of Underground Structures*. London, UK: Thomas Telford.

[25] **Avcı, E.** (2015). *Spinor A6 Süspansiyon Enjeksiyonunun, Solüsyon Türü Kimyasal Enjeksiyonlara Alternatifliğinin Araştırılması*. Yayımlanmış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[26] **Kutzner, C. (**1996). *Grouting of Rock and Soil*. Amsterdam/The Netherland: A.A. Balkema, 190-195.

[27] **Holtz, R.D.,** Kovacs, W.D., and Sheahan, T.C., (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering* (Second edition). New Jersey: Pearson Education Inc.

[28] **ASTM D4318-10e1** (2010). *Standart Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-16.

[29] **ASTM D698-12e2** (2012). *Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standad Effort*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-13

[30] **Mollamahmutoğlu, M., Avci, E.** (2020). *Effects of Particle Gradation, Relative Density and Curing on the Strength of Silicate Grouted Sand*. Geotechnical Geological Engineering, 38(6): 6695-715.

[31] **ASTM D2166/D2166M-13** (2013). *Standart Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-6.

[32] **ASTM D854-14** (2014). *Standart Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pynometer.* Pennysylvania/USA: ASTM International, 1-8

[33] **ASTM D422-63** (2007). *Standard Test Methods for Particle Size Analysis of Soils*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-8.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Anıl ACAR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği