

**ÇİMENTO VE POLİPROPİLEN LİF KULLANARAK  
KİLLİ ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ  
İlham ŞAHBAZ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO VE POLİPROPİLEN LİF KULLANARAK  
KİLLİ ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**İlham ŞAHBAZ**  
0000-0003-1020-5010

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

## TEZ ONAYI

İlham ŞAHBAZ tarafından hazırlanan “ÇİMENTO VE POLİPROPİLEN LİF KULLANARAK KİLLİ ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

**Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER  
0000-0003-3735-9554  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



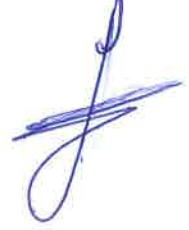
**Üye** : Doç. Dr. Eyübhan AVCI  
0000-0001-7206-0158  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



**Üye** : Doç. Dr. Ali MARDANI-AGHABAGLOU  
0000-0003-0326-5015  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
Enstitü Müdürü  
30/09/2020



**B. U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**30/09/2020**

**İlham ŞAHBAZ**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ÇİMENTO VE POLİPROPİLEN LİF KULLANARAK KİLLİ ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

**İlham ŞAHBAZ**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Zemin iyileştirmesi, zeminin zayıf mühendislik özelliklerinin çeşitli yöntemler kullanılarak iyileştirilmesidir. Bu çalışmada, yüzeysel zemin stabilizasyonu kapsamında çimento ve polipropilen lif ile stabilizasyon ele alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, çimento ile poliropilenin killi zeminin mühendislik parametrelerine etkisini incelemektir.

Tez çalışması kapsamında, Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünden alınan zemine ilk olarak elek analizi, hidrometre, özgül ağırlık ve kıvam limit deneyleri yapılarak zemin sınıflandırılması yapılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil olarak sınıflandırılan doğal zemine toplam ağırlığın %5, %10 oranlarında çimento ve %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında polipropilen lif katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Kompaksiyon deneyi ile bu karışımların optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Optimum su mutevalarına göre hazırlanan bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyi, CBR Kaliforniya taşıma gücü deneyleri ve şişme deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri için hazırlanan numuneler; 1, 7 ve 28 gün sürelerinde desikatörde bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuşlardır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda doğal zemine ilave edilen katkı maddelerinin zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Lakin polipropilen lifin zemin içinde topaklanması nedeniyle serbest basınç dayanımını bir miktar düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca kür süresiyle birlikte çimentolu numunelerde mukavemette beklenildiği gibi bir artış olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin iyileştirmesi, çimento, polipropilen lif, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı

**2020, ix + 76 sayfa.**

## ABSTRACT

M.Sc. Thesis

### IMPROVEMENT OF CLAYED SOIL USING CEMENT AND POLYPROPYLENE FİBER

**İlham ŞAHBAZ**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Assist. Prof. Dr. Yeşim Sema ÜNSEVER

Soil stabilization is the improvement of the soil's weak engineering properties by lots of different methods. In this study, surface soil stabilization with cement and polypropylene fiber is discussed. The aim of this study is to examine the effect of cement and polypropylene fiber on engineering properties of the clayed soil.

In this study, first of all, sieve analysis test, hydrometer test, specific gravity test and Atterberg limit test were performed to the soil, taken from Bursa Uludağ University campus, to classify the soil according to Unified Soil Classification System, which is classified as low plasticity clay soil. Then, 5%, 10% cement and 0,5%, 1,0%, 1,5% polypropylene fiber are added to this natural soil to prepare test specimens. These test specimens' optimum water contents and maximum dry unit weights are obtained by Proctor compaction tests. After that, the samples are prepared according to their optimum water contents and unconfined compression tests, California bearing ratio (CBR) tests and swelling tests are done on these samples. The samples that prepared for unconfined compression tests are kept in desiccator for 1, 7 and 28 days and then they are tested.

The results of the experiments show that additives added to the natural clay soil improves the soil's engineering properties. However, polypropylene fiber added to the soil reduces the unconfined compressive strength of the soil a little bit due to the coagulation of the fiber inside the soil. In addition, curing time increases the unconfined compressive strength of the cemented samples as expected.

**Key words:** Soil improvement, cement, polypropylene fiber, compaction, unconfined compressive strength

**2020, ix + 76 pages.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenmesi ve çalışmalarım süresince gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı tez yürütmenim ve danışmanım kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yeşim S. ÜNSEVER ' e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, laboratuvar çalışmalarım öncesi ve sırasında yardımlarından ötürü sınıf arkadaşım Mamadou Lamine DIALLO'ya, gerekli kaynak ve malzemeleri teminindeki katkılarından dolayı değerli hocam Doç. Dr. Ali MARDANİ AGHABAGLOU'na, tez deneylerimi yaptığım PROTEST şirketine ve deneylerimde elinden gelen yardımı esirgemeyen laboratuvarın değerli çalışanlarına, özellikle Emin ÇAVUŞ'a ve Levent IŞIKSEVER'e teşekkürlerimi sunarım.

Polipropilen lif göndererek tezime katkıda bulunan ATLAS1 firmasına teşekkür ederim.

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

İlham ŞAHBAZ  
30/09/2020



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1.GİRİŞ.....	1
2. KURUMSAL TEMELLERİ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Zemin Stabilizasyonu.....	3
2.1.1 Derin Zemin Stabilizasyonu.....	4
2.1.2 Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu.....	11
2.2. Konuya Dair Önceki Çalışmalar .....	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	34
3.1. Materyal .....	34
3.1.1. Zemin.....	35
3.1.2. Çimento .....	37
3.1.3. Polipropilen Lif .....	38
3.2. Yöntem .....	39
3.2.1. Dane Çapı Dağılımının Bulunması .....	39
3.2.2. Kıvam Limitleri Tayini .....	41
3.2.3. Özgül Ağırlık Deneyi (Piknometre metodu).....	43
3.2.4. Standart Proktor (Kompaksiyon) Deneyi.....	44
3.2.5. Serbest Basınç Deneyi.....	45
3.2.6. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	47
3.2.7. Şişme Deneyi.....	48
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	49
4.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları.....	49
4.2. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	53
4.3. Kompaksiyon Deney Sonuçları.....	55
4.4. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	59
4.5. Kaliforniya Taşıma Oranı, CBR Deney Sonuçları.....	63
4.6. Şişme Deneyi Sonuçları .....	65
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	69
KAYNAKLAR .....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	76



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum karbonat
MgCO <sub>3</sub>	Magnezyum karbonat
CaO	Kalsiyum oksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
H <sub>2</sub> O	Hidrojen dioksit
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum hidroksit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
MI	Düşük plastisiteli kil
Na <sub>2</sub> O	Sodyum oksit
K <sub>2</sub> O	Potasyum oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir (III) oksit
SO <sub>3</sub>	Kükürt trioksit
Na <sub>6</sub> O <sub>18</sub> P <sub>6</sub>	Sodyum heksametafosfat
D	Eşdeğer dane çapı
μ	Suyun viskozitesi
ρ <sub>s</sub>	Numunenin yoğunluğu
ρ <sub>w</sub>	Suyun yoğunluğu
H <sub>R</sub>	Hidrometre kalibrasyon eğrisinden alınan değer
t	Zaman
G <sub>s</sub>	Zemin danelerinin bağıl yoğunluğu
H <sub>r</sub>	Hidrometre okuması
w	Su muhtevası
LL	Likit limit
PL	Plastik limit
PI	Plastisite indisi
q <sub>u</sub>	Serbest basınç dayanımı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CBR	The California Bearing Ratio
UK	Uçucu kül
DTA	Differential Thermal Analysis
XRD	X-Ray Diffraction
S	Doğal zemin
C	Çimento
PP	Polipropilen lif
N	Vuruş sayısı
M	Kütle
TS	Türk Standartları
ASTM	American Society for Testing Materials

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Vibrokompaksiyon yöntemi .....	6
Şekil 2.2. Vibrokompaksiyon ile iyileştirme yapılacak uygun zeminlerin dane çapı dağılımı .....	6
Şekil 2.3. Jet kolon imalat aşamaları.....	7
Şekil 2.4. Jet Grout teknikleri .....	8
Şekil 2.5. Kompaksiyon kazıklarının üretim aşamaları .....	9
Şekil 2.6. Taş kolon imalatı .....	10
Şekil 2.7. Kireç.....	14
Şekil 2.8. Kirec stabilizasyonun yol yapımında uygulanması .....	15
Şekil 2.9. İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları .....	17
Şekil 2.10. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu .....	17
Şekil 2.11. Bitüm ile stabilizasyon.....	18
Şekil 2.12. Çimento ile zemin stabilizasyonu .....	20
Şekil 2.13. Topraklanma reaksiyonunun mekanizması.....	21
Şekil 2.14. Polipropilenin kimyasal formülasyonu .....	23
Şekil 3.1. Doğal malzemenin alındığı yerin konumu.....	35
Şekil 3.2. Zeminin dane boyutu dağılım eğrisi .....	36
Şekil 3.3. Zeminin plastisite kartındaki yeri (kırmızı nokta ile işaretlenmiştir) .....	37
Şekil 3.4. Çimentonun tane dağılımı eğrisi .....	38
Şekil 3.5. Hidrometre deneyi .....	40
Şekil 3.6. Casagrande cihazı .....	42
Şekil 3.7. Plastik limitin belirlenmesi .....	43
Şekil 3.8. Piknometre ve vakum uygulanması.....	44
Şekil 3.9. Standart proktor deneyi.....	45
Şekil 3.10. Serbest basınç deneyi cihazı .....	46
Şekil 3.11. CBR deney düzeneği .....	47
Şekil 3.12. Şişme deneyi .....	48
Şekil 4.1. Çimento katkısının kıvam limitlerine etkisi.....	51
Şekil 4.2. Polipropilen lif katkısının kıvam limitlerine etkisi .....	51
Şekil 4.3. %5 çimento ile birlikte polipropilen katkısının kıvam limitlerine etkisi .....	52
Şekil 4.4. %10 çimento ile birlikte polipropilen katkısının kıvam limitlerine etkisi .....	52
Şekil 4.5. Zemin + çimento katkısının özgül ağırlık değerleri.....	54
Şekil 4.6. Zemin + polipropilen lif katkısının özgül ağırlık değerleri .....	54
Şekil 4.7. Zemin + %5 çimento + polipropilen lif katkısının özgül ağırlık değerleri .....	55
Şekil 4.8. Zemin + %10 çimento + polipropilen lif katkısının özgül ağırlık değerleri .....	55
Şekil 4.9. Karışımların kompaksiyon grafikleri.....	57
Şekil 4.10. Karışımların kuru birim hacim ağırlık değişimleri .....	58
Şekil 4.11. Karışımların optimum su içeriği değişimleri .....	58
Şekil 4.12. Sırasıyla S, SC5 ve SPP1,0 numunelerin kırılma şekilleri .....	60
Şekil 4.13. Zemin + çimento katkısının serbest basınç dayanımları.....	61
Şekil 4.14. Zemin + polipropilen lif katkısının serbest basınç dayanımları .....	62
Şekil 4.15. Zemin + %5çimento + polipropilen lif katkısının serbest basınç dayanımları .....	62

Şekil 4.16. Zemin + %10çimento + polipropilen lif katkısının serbest basınç dayanımları .....	63
Şekil 4.17. Deney karışımlarının CBR değerleri .....	65
Şekil 4.18. Zemin + çimento katkısının şişme yüzdesi değerleri.....	67
Şekil 4.19. Zemin + polipropilen lif katkısının şişme yüzdesi değerleri .....	67
Şekil 4.20. Zemin + %5 çimento + polipropilen lif katkısının şişme yüzdesi değerleri .	68
Şekil 4.21. Zemin + %10 çimento + polipropilen lif katkısının şişme yüzdesi değerleri .....	68

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Önerilen kireç karışım oranları .....	15
Çizelge 2.2. Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması .....	22
Çizelge 2.3. Standart proktor deneyi sonuçları .....	24
Çizelge 2.4. Lif-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımları ve liflerden kaynaklanan dayanım artışları .....	27
Çizelge 3.1. Deney numunelerine ait notasyon bilgileri .....	34
Çizelge 3.2. Doğal malzemenin özellikleri .....	36
Çizelge 3.3. Portland çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler .....	37
Çizelge 3.4. Polipropilen lifin özellikleri .....	38
Çizelge 4.1. Karışımların kıvam limitleri değerleri .....	50
Çizelge 4.2. Özgül ağırlık deney sonuçları .....	53
Çizelge 4.3. Standart proktor deneyi sonuçları .....	56
Çizelge 4.4. Serbest basınç deneyi sonuçları .....	59
Çizelge 4.5. CBR deneyi sonuçları .....	64
Çizelge 4.6. Şişme deneyi sonuçları .....	66

## 1. GİRİŞ

Tüm mühendislik yapıları temelleri vasıtasıyla zemine yük iletirler. Zeminin yeterli mukavemete sahip olması durumunda bu yükleri emniyetle taşıyabilesi söz konusudur. Bunun yanı sıra zeminin diğer mühendislik özellikleri de yapıya uygun olmalıdır. Ancak çoğu zaman zeminler, üzerine inşa edilecek yapılar için gereken zemin koşullarını karşılayamamaktadır. Bu ve benzeri durumlarda aşağıdaki önlemler alınarak iyileştirme yapılması gerekebilir:

1. Yapı temelleri projesine uygun zemin seçmek,
2. Zayıf zemini taşıma gücü daha yüksek olan zeminler ile değiştirmek,
3. Temelleri taşıma gücü zayıf olan zemine değil, sağlam tabakada inşa etmek,
4. Zeminin zayıf olan özelliklerini zemin stabilizasyonu teknikleri ile iyileştirmek.

Yapının yerini değiştirmek, özellikle ulaşım yapılarında çok mümkün olmamaktadır. Ayrıca gelinen bu noktada hızlı nüfus artışına bağlı olarak yapı alanları oldukça azalmış, insanların yapılaşmak için uygun zemin arama lüksü kalmamıştır. Temel zeminini değiştirmek de mali açıdan ekonomik olmamakla beraber inşaat sürecinin uzamasına sebep olacaktır. Diğer bir yöntem derin temel uygulamasıyla yapıyı daha aşağıdaki sağlam zemin tabaklarına oturtmaktır. Bu yöntem de ekonomik olmayabilmektedir. Bu durumda mevcut zeminin iyileştirilmesi daha makul bir çözüm olabilir. Zemin stabilizasyonu, zeminlerin belirli özelliklerinin, değişik yöntemlerle iyileştirilmesi olarak tarif edilebilir. Çok sayıda zemin stabilizasyon yöntemleri (kompaksiyon, mekanik stabilizasyon, dinamik stabilizasyon ve b.) vardır. Bunlardan biri de katkı maddeleri ile stabilizasyondur. Zemine katkı maddeleri karıştırarak bazı fiziksel özelliklerini değiştirerek zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirmesidir. Katkı maddeleri olarak kireç, çimento, bitüm, uçucu kül, polimer ve b. maddeler kullanılmaktadır.

Stabilizasyon gerçek anlamda yirminci yüzyılın bir mühendislik olayıdır. Özellikle son yıllarda yeni yeni yöntemler uygulanmaya başlanmıştır. Taşıma gücü zayıf zeminlerin kullanılma zorunluluğu ve sağlam zemin bölgelerinin gittikçe azalması, daha büyük

boyutlardaki yapıların oluşturdukları büyük gerilmeler bunun nedenlerinden birkaç tanesidir (Kızılcelik 2010).

Bu yüksek lisans tez çalışmada bu zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmış ve çimentonun polipropilen lif ile birlikte killi zeminlerin stabilizasyonu üzerine deneysel çalışma yapılmıştır. Yüksek lisans tezi olarak yapılan bu çalışma kapsamında Bursa kentinde Bursa Uludağ niversitesi bölgesinden alınan killi zemin numunesine çeşitli oranlarda portland imentosu ve polipropilen lif ilave edilerek oluşturulan stabilize malzemenin özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla yalın numune ile elek analizi, hidrometre, atterberg limitleri, özgül ağırlık, proktor (kompaksiyon) deneyleri yapılarak zeminin sıkışabilirlik ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra alternatif malzeme olarak kullanılan imento ve polipropilen lif, killi zemine kuru zemin ağırlığının farklı oranlarında karıştırılarak serbest basınç (tek eksenli), taşıma oranının tayini (CBR) ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda çimentonun ve polipropilen lif katkısının killi zeminlerin mukavemet özelliklerinde nasıl etki ettiği, ne kadar iyileştirme yaptığı belirlenmeye çalışılmıştır.

Tezin 1. bölümünde tez çalışmasının amacı ve kapsamı yer almaktadır. Tezin 2. bölümünde zemin iyileştirme yöntemleri ve bu konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalar araştırılmıştır. Tezin 3. bölümünde çalışmada kullanılmış malzemelerin özellikleri, izlenilen yöntem ve yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Tezin 4. Bölümünde deney bulguları sunulmaktadır. Tezin 5. bölümünde ise tez çalışması sonunda elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve daha sonra yapılabilecek çalışmaları için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. KURUMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Zemin Stabilizasyonu

Zeminler bir inşaatta en önemli temel malzeme elemanıdır. Taneli ve boşluklu maddeler topluluğudur. Yer küresinin kabuğunun üst kısmını oluşturmaktadır. Zeminler her zaman istenilen özelliklerde olmayabilir. İnşaat yerini değiştirmek veya uygun özelliklere sahip olan zemin ile değiştirmek ise teknolojik ve ekonomik açıdan makül çözümler olmamaktadır. İnşaat sahasının değiştirilmesinin de ekonomik olmayacağı durumlarda zemin stabilizasyonu uygun bir yöntemdir. Bu yöntem, derin temellerden daha ekonomik olabilir ve süre avantajı da olduğu için, daha çok tercih edilmektedir.

Zemin stabilizasyonu zemin boşluklarının çeşitli bileşimlerdeki karışımlarla doldurulmasıyla, zeminlerin sıkışabilirliğinin azaltılması ve bazı projeler için geçirimsizliğinin azaltılmasıdır. Stabilizasyon kavramı çoğu zaman zeminin kayma mukavemetini artıran, geçirgenlik, sıkışma özelliklerini ise azaltan işlemler için kullanılır (Çetin 2011).

Zeminin iyileştirilmesi ile zeminin,

- Kayma dayanımı artar,
- Gerilme-deformasyon modülü artar,
- Sıkışabilirliği azalır,
- Şişme ve büzülme potansiyeli kontrol altına alınır,
- Geçirimsizliği azalır,
- Sıvılaşma potansiyeli azalır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinde amaç, zeminin boşluklarını sıkıştırarak veya çeşitli karışımlarla doldurulmak suretiyle azaltmaktır. Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki amaçlar için yapılır;

- Zeminlerin mukavemetlerini artırmak,

- Toplam oturmayı azaltmak suretiyle konsolidasyonu hızlandırmak,
- Permeabiliteyi düşürerek geçirimsizliği sağlamak,
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlamak,
- İstinat duvarlarını desteklemek,
- Zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltmak (Çetin 2011).

Zemin iyileştirilme yöntemler üç farklı şekilde incelenebilir;

- Zemini geçici olarak iyileştirmek;
- Zemini sıkıştırarak zemini kalıcı olarak iyileştirmek;
- Zemini katkı maddeleri katarak kalıcı olarak iyileştirmek (Kılıç 2008).

Zemin iyileştirme yöntemlerinde en önemli faktörlerden biri uygulama derinliğidir. Uygulama derinliği açısından;

- Derin zemin stabilizasyonu
  - Yüzeysel zemin stabilizasyonu
- şeklinde sınıflandırılırlar.

### **2.1.1 Derin Zemin Stabilizasyonu**

İyileştirilmesi gereken zeminlerin kalınlığın çok fazla olması halinde yüzeysel zemin stabilizasyonu yöntemleri yetersiz kalır. Bu sebepten dolayı derin zemin stabilizasyonu teknikleri geliştirilmiştir.

#### **➤ Enjeksiyon**

Enjeksiyon, akışkan malzemelerin basınç altında zeminin içerisindeki boşluklara doldurulmasıdır. Buradaki asıl amaç zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmektir. Bu iyileştirme zemini daha boşluksuz, geçirimsiz hale getirerek mekanik ve hidrojeolojik özellikleri değiştirilerek elde edilir. Enjeksiyon yöntemi ile tünel kazısından sonra, yüzeysel oturmaların engellenmesi, sıvılaşma potansiyelini azaltılması ve taşıma gücünü



arttırılması amaçlanır. Çakıl ve kum gibi iri taneli zeminlerde, çimento, kireç, bentonit gibi taneli malzemeler, ince kum ve sitli zeminlerde ise kimyasal malzemeler kullanılmaktadır. Daha çok kullanılan kimyasal malzemeler reçine, silikatlar ve poliüretandır. Zemindeki boşlukların çapı da enjeksiyon malzemesinin seçiminde önemli faktördür. Zemin özelliklerine bağlı olarak birçok farklı enjeksiyon teknikleri vardır.

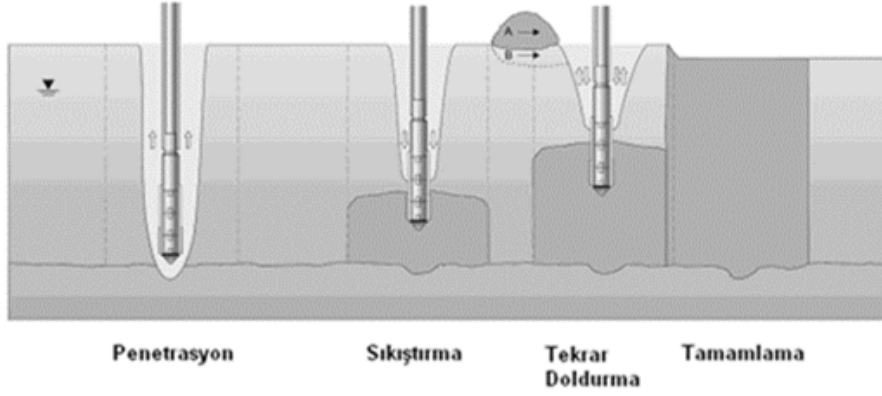
Enjeksiyon teknikleri;

- Emdirme (permeasyon) enjeksiyonu
- Çatlatma enjeksiyonu
- Kompaksiyon enjeksiyonu
- Jet enjeksiyonu olarak sıralanabilir.

#### ➤ **Vibroflotasyon / Vibrokompaksiyon**

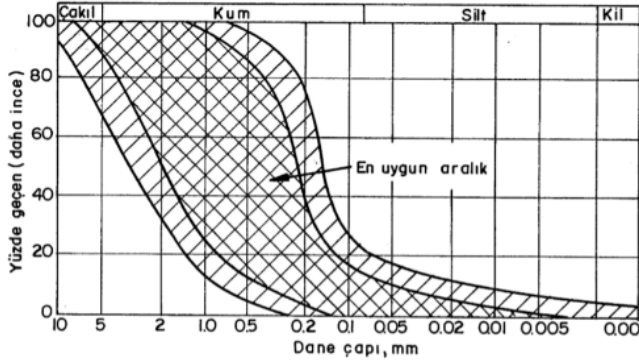
Vibroflotasyon daha çok kumlu zeminlerde uygulanan bir derin kompaksiyon tekniğidir. Bu yöntemde, zemine bir vibratör ile verilen yatay titreşimler sonucunda granüler zeminlerin sıkışması sağlanır. İlk olarak 1930'lu yıllarda Almanya'da uygulanmaya başlanılmıştır ve şimdilerde ise bütün dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, vibroflot adı verilen bir sonda kullanılır. Zemin içine yerleştirilen vibroflot kendi ağırlığı ve yarattığı yüksek enerji titreşimleriyle zemini sıkıştırır. Vibroflotun çapı 40-50 cm, uzunluğu 3,00 – 5,00 m ve ağırlığı 3-8 ton olmaktadır.

İlk olarak vibroflot, istenilen noktaya getirilir. Su jeti ve bir miktar titreşim ile zemine indirilir. Kendi ağırlığı altında istenilen derinliğe kadar indikten sonra kuyu içi kum, çakıl ile doldurulur ve vibratör çalıştırılır. Üst kısımdan bir miktar su akıtıldıktan sonra su jeti kesilir. Vibroflot yavaş yavaş yukarı çekilmek suretiyle, sonda çapından daha büyük bir kolon oluşturulmuş olur. Bu işlem, planda 1-2 m aralıklarla tekrarlanır (Şekil 2.1) (Gücek 2011).



**Şekil 2.1.** Vibrokompaksiyon yöntemi

Bu teknik yeraltı su seviyesi altındaki gevşek kumlu zeminlerin sıkıştırılması için çok uygundur. Fakat zemin içerisindeki ince daneli malzeme ve organik madde miktarı fazla olduğu zaman bu teknikten alınabilecek verim önemli ölçüde düşmektedir. Bu sebepten vibrokompaksiyon kullanılan granüler malzeme içerisinde ince daneli malzeme oranı %20'yi geçmemelidir. Vibrokompaksiyon ile iyileştirme yapılacak uygun zeminlerin dane çapı dağılımı Şekil 2.2' de verilmiştir.



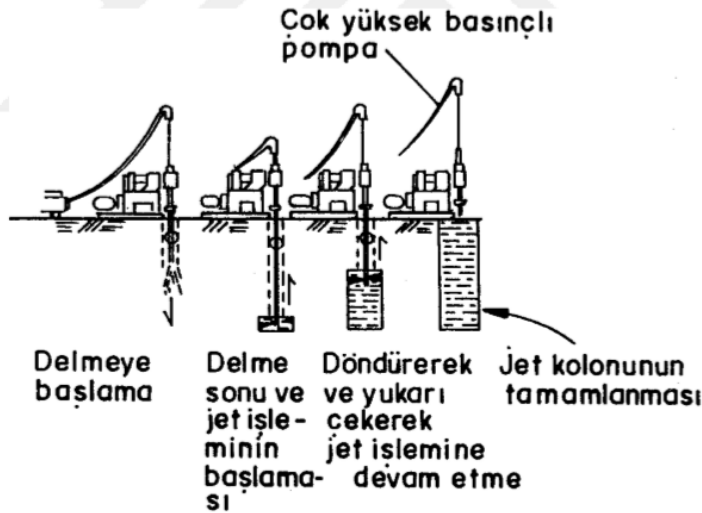
**Şekil 2.2.** Vibrokompaksiyon ile iyileştirme yapılacak uygun zeminlerin dane çapı dağılımı (Özen 2018)

### ➤ Jet Grout

Yeni bir yapının inşası için ilk olarak yapının üstünde yer aldığı zeminin ıslahı ve gerekli durumlarda kuvvetlendirilmesi gerekir. Projeden önce yapılan zemin etütleri zeminin yapıdan gelecek olan yükleri taşıyamayacağını gösteriyorsa, kazıklı temel tercih edilebilir

ya da zeminin taşıma gücü arttırılabilir (veya ikisi birlikte). Teknoloji ilerledikçe yeni yöntemler bulunmuştur. Bunlardan daha çok ilgi çeken Jet-grouting yöntemidir. Bu yöntem ilk olarak 70'li yılların başında Japonya'da uygulanmıştır. Sonrasında İtalya'da ve diğer Avrupa ülkelerinde ve 1986 yılında ülkemizde de uygulanmıştır.

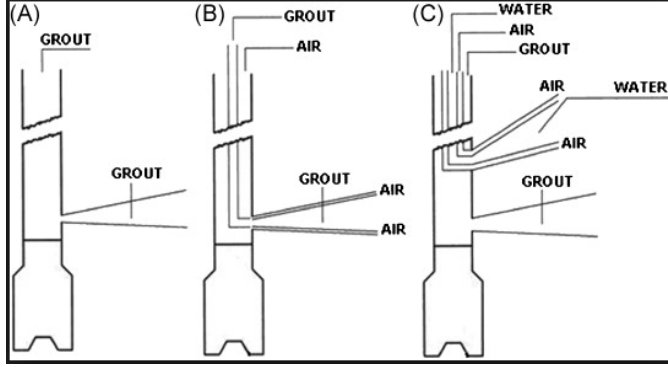
Bu yöntemde ilk etapta zemin, belirlenen derinliğe kadar klasik delgi makineleriyle 90 mm çapında delikler açılmaktadır. Delgi sırasında akışkan olarak daha çok su ve hava gerekli durumlarda bentonit süspansiyonu kullanılmaktadır. İkinci aşamada su ve çimento karışımı tijin ucundaki monitör denilen özel parçaya bağlanıp püskürtme memelerinden yüksek basınçla zemin içerisine yatay olarak püskürtülür. Su ve çimento karışımı yüksek basınç sayesinde yanlardaki zeminle iyice karışır. Tij sabit bir hızla döndürülerek yukarıya çekilir ve bu şekilde delik çapından daha büyük çapta jet grout kolonları elde edilir. Şekil 2.3'te jet grout kolonunun imalat aşaması görülmektedir (www.zetas.com.tr).



**Şekil 2.3.** Jet kolon imalat aşamaları (Özen 2018)

Jet grout uygulaması jet 1 (mono jet), jet 2 (double jet) ve jet 3 (triple jet) üç ayrı şekilde yapılmaktadır. Jet 1 yönteminde sadece enjeksiyon jeti ile kesme ve dolgu işlemleri yapılır. Zemine sadece enjeksiyon şerbeti basılmaktadır. Jet 2 yönteminde jetin içerisinde bir boru yerleştirilmiştir ve bu borudan basınçla zeminle hava verilmektedir. Jet 3 yönteminde ise sistem iç içe yerleştirilmiş üç borudan oluşmaktadır ve havanın yanı sıra

basınçla su verilmektedir (Ghabae 2015). Şekil 2.4'te bu teknikler sistematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.4. Jet Grout teknikleri (Nikbakhtan ve Osanloo 2009)

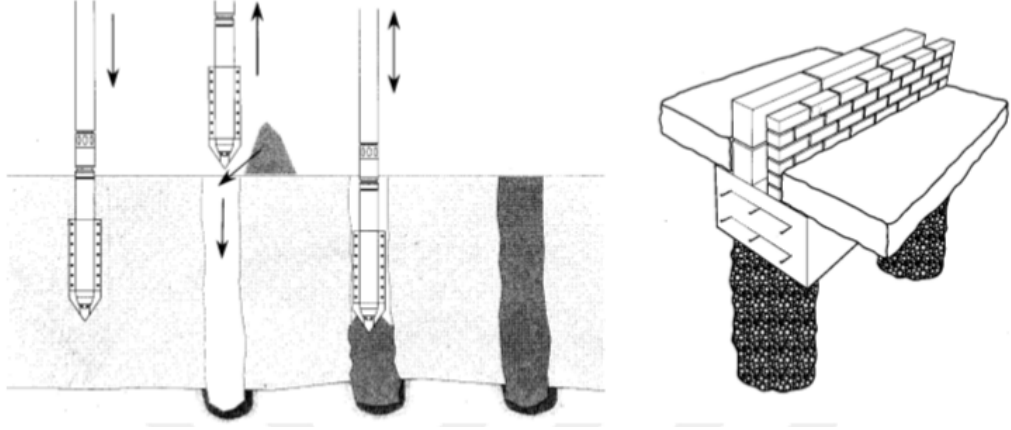
### ➤ Patlama

Ülkemizde kullanılmayan bu yöntem, kohezyonsuz gevşek zeminlerde kullanılır. Zemini daha küçük parçalara ayrılması ve sıkıştırılması ile sağlandığı bir zemin stabilizasyon yöntemidir. Patlatma sıkılaştırması, zeminde açılmış kuyularda patlayıcıların patlatılması şeklinde yapılır. Kuyuların içerisine sıkıştırılması istenilen derinliğe kadar boru yerleştirilir. 5 – 15 m arası mesafede açılmış kuyulara patlayıcılar düşey olarak 3 ila 6 m aralıklarla patlayıcılar kuyulardaki boruların içerisine yerleştirilir. Boru çıkartılır ve kuyu doldurulur. Zemin durumuna göre daha az veya çok patlayıcı kullanılmaktadır. Patlayıcı olarak en fazla dinamit, TNT ve ammonit kullanılır. Bu yöntem ile 70-100 m' ye kadar sıkıştırılma yapılabilmektedir (Özen 2018). Patlatmanın etkinliğini en çok etkileyen kil ve silt oranıdır. Bu yöntemin en etkili olduğu zeminler, gevşek kumlardır.

### ➤ Kompaksiyon kazıkları

Granüler zeminleri sıkıştırmak suretiyle zeminin yoğunluğunu arttırmayı hedeflenen kazık türüdür. Zeminin bu şekilde sıkıştırılmasıyla dayanım özellikleri de artmaktadır. Sıvılaşma potansiyelini azaltmakta ve taşıma gücünü arttırmaktadır. İnce daneli zeminlerde de uygulanabildiğinden çok kullanılan bir stabilizasyon yöntemidir. Uygulama şekli olarak kum drenlere benzerdir.

Bu yöntemde zemine ucu bir plaka ile kapalı şekilde kaplama borusu çakılır. İri daneli dolgu malzemesi kaplama borusunun içerisine yerleştirilir ve sıkıştırılır. Kaplama borusu yukarı çekilir (alt plaka zemine kalır). Şekil 2.5’ te kompaksiyon kazığı üretim aşamaları görülmektedir (Özen 2018).



**Şekil 2.5.** Kompaksiyon kazıklarının üretim aşamaları (Özen 2018)

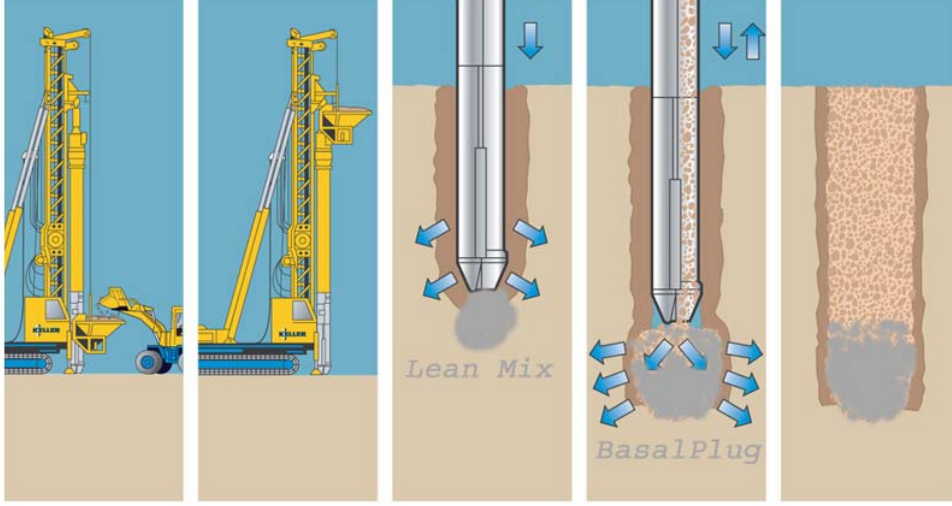
### ➤ Taş kolonlar

Bu yöntem yumuşak ve gevşek zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır. İyileştirilmesi gereken zemin derinliği 10 m’den az olduğu zaman tercih edilmektedir. Taş kolonlar, ince taneli zeminlerde, sıkıştırılmanın zor olduğu yerlerde “donatı” gibi iş görür. Yapıdan gelen yükler bu kolonlarla taşınır ve oturmaların daha az olmasını sağlar. Bununla birlikte zeminde dikey dren gibi çalışarak drenajı ve oturmayı hızlandırır.

Taş kolon uygulamalarında bir taş kolonun 20-50 ton arasında taşıyabileceği bilinmektedir. İyileştiriminin daha belirgin şekli zeminler sıvılaşma riski yüksek olan, dayanımı düşük olan silt ve kil katmanlarında görülmektedir. İyileştirmesi gereken derinlik 6-10 m arasında olduğunda benzer zemin stabilizasyon türlerinin arasında daha ekonomik bir yöntemdir (Erol ve diğ. 2016).

Taş kolonlar hazırlanırken ilk olarak vibroflotasyon ile kolonlar oluşturulur. Klasik foraj ile problemlili zemin dışarı çıkarılır ve yerine çakıl yerleştirilerek sıkıştırılır. Boru çakma

veya itme ile zemin sıkıştırılarak taş kolonların imalatları yapılabilmektedir. Taş kolon imalatı Şekil 2.6'da aşamalar halinde görülmektedir.



**Şekil 2.6.** Taş kolon imalatı

Taş kolonlar oldukça geniş kullanım alanları vardır. Temel zeminin iyileştirilmesinde, toprak ve yol dolgularının, köprü ayaklarının desteklenmesinde, heyelan stabilizasyonunda, kumlarda sıvılaşmanın azaltılmasında, birincil konsolidasyon zamanının azaltılmasında kullanılabilir (Şahan 2016).

#### ➤ **Ön yükleme ve Kum drenler**

Ön yükleme metodu kısaca yapı inşaatı başlamadan önce zeminde olabilecek oturmaların tamamlanması sağlamaktır. Bunun için zemin yapı yükünden daha fazla olmak şartı ile kum ve çakıl dolgu ile yüklenmektedir. Bu şekilde zeminin konsolidasyonunun istenilen seviye kadar tamamlanması beklenilir. Oturma değerleri beklenen seviyeye geldikten sonra bu dolgu yükü kaldırılarak yapı inşasına başlanılır. Bu yöntemin en çok uygulandığı zeminler sıkışabilen (killi ve b.) zeminlerdir (Şengezer 2010).

Ön yükleme bazen çok uzun sürebiliyor. Bunun sebebi zemindeki kil tabakalarının kalın olmasıdır. Böyle olduğu zaman inşaat süresi uzayacaktır ve bu istenmeyen bir durumdur. Bu durumda iki şey yapılabilir:

- Ön yükleme miktarını arttırmak
- Düşey kum drenleri oluşturmak

Birinci metod ekonomik olmamaktadır. Bu gibi durumlarda bu sürecin daha kısa olması için düşey kum drenleri yöntemi seçilir. Düşey drenler zemin içerisinde bulunan boşluk suyunun drenaj yolunu kısaltır ve böylece boşluk suyu basınçları hızla sönmümlenir. Kum drenleri özellikle birincil konsolidasyonda çok etkilidirler. Kum drenleri ön yükleme metodu ile birlikte kullanılırlar ve daha etkili bir yöntem haline gelirler.

### **2.1.2 Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu**

Yüzeysel zemin stabilizasyonu, zeminin ilk birkaç metresinin, çeşitli yöntemler kullanılarak iyileştirilmesidir. Yüzeysel zemin stabilizasyonları daha çok demiryolu, karayolu gibi yapı yükü çok az olan yol inşaatlarında tercih edilen bir yöntemdir. Katkı maddesi katılıp katılmamasına göre bu stabilizasyon yöntemi iki şekilde olmaktadır.

#### **Katkısız Stabilizasyon**

Zemine herhangi bir madde katmaksızın uygulanan yöntemlerle, mevcut zeminin durumu değiştirilebilir. Bu şekilde doğal zemine herhangi bir madde katmaksızın yapılan iyileştirmeye katkısız stabilizasyon olarak tanımlanır. Bu yöntem üç başlık incelenebilir.

#### **➤ Kompaksiyon**

Kompaksiyon en çok kullanılan zemin iyileştirme tekniklerinden biridir. Mekanik araçlar kullanarak, zemin boşluklarının azaltılarak, zemin tanelerinin birbirlerine yaklaşması sonucunda zemin içerisinde daha sıkı bir yerleşim oluşturulmasına, kompaksiyon denir. Yapı işlerinde kompaksiyon, inşaat sürecinin önemli bir parçasıdır. Kompaksiyon dış

kuvvetlerin etkisiyle olur ve zamana bağılı değildir. Su muhtevası zemin sıkışabilmesinde çok önemlidir. Öyle bir su muhtevası vardır ki, o su muhtevasında zemin maksimum kuru birim hacim ağırlığına sahip olur. Bu su muhtevası zeminin en iyi sıkışabildiği su muhtevasıdır ve optimum su muhtevası olarak tanımlanır. Su muhtevası azaldıkça sıkışma azalır, arttıkça ise boşluk suyu basıncı artar ve bu basınçtan dolayı daneler birbirine yaklaşamaz ve dolayısıyla sıkışabilme azalacaktır.

Kompaksiyonun zemin üzerinde aşağıdaki etkileri vardır:

- Boşluk oranını azaltır ve dolayısıyla geçirimsizlik azalır,
- Zeminin taşıma gücünü artırır,
- Zeminde daha sonra olabilecek oturmaları azaltır.

Kompaksiyon işlemlerinde en çok kullanılan sıkıştırma makineleri; düz ayaklı silindirler, lastik tekerlekli silindirler, keçi ayaklı silindirler, titreşimli silindirlerdir.

#### ➤ **Mekanik stabilizasyon**

Yoğunlaştırma veya mekanik stabilizasyon anlamına gelen kompaksiyon ile yük altında kalıcı deformasyon yapmayan stabil bir zemin elde edilmiş olur. Zeminin karıştırılması yolda, sabit veya hareketli bir plentte veya malzeme ocağında yapılır ve karışım yola serilerek standart yöntemlerle sıkıştırılır. Mekanik stabilizasyondan amaç granülometrinin düzeltilmesi, likit limit (LL) veya plastisite indeksinin (PI) azaltılması, dren kabiliyetinin artırılması, mukavemet ve durabilitenin artırılması, uzun dönemli oturmaların ve don duyarlılığının azaltılması, kapileritenin azaltılması, değişen su içeriği ile taşıma gücünün azalmasının önlenmesi ve uzun dönemli durabilitenin artırılması olarak sayılabilir (Öntürk 2011).

#### ➤ **Drenaj**

Bu yöntemde yer altı suyunun düşürülmek istendiği zeminlerde hendekler açılarak, suyun burada toplanması sağlanır. Yer altı suyun bu hendeklerde toplanabilmesi için, eğimli



drenaj sistemleri ile (delikli borular, granüle zeminler, jeotekstilli sistemler ve b.) toplanması gerekir. Drenaj sistemine gelen su, eğim vasıtasıyla hazırlanan hendeklere toplanır ve su pompası veya doğal yollarla zeminden uzaklaştırılır (Gücek 2011).

### **Katkı Maddeleri ile Stabilizasyon**

Katkı maddeler ile stabilizasyon işleminde, zeminlerin mekanik özelliklerinde çevre ve yükleme koşullarına göre gerekli iyileştirmenin ucuz, güvenli ve doğal bir malzemeyle gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Daha çok ulaşım, su yapıları, katı atık depolama tesislerinde uygulanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan kimyasal stabilizasyon maddeleri portland çimentosu, kireç, uçucu kül, bitüm, asfalt, geotekstil, kalsiyum klorür, sodyum klorür ve selüloz atıklarıdır. Özellikle son yıllarda bu alternatif malzemelere araştırmalar arttıkça yeni malzemeler eklenmiştir (yapay polimerler, kullanılmış lastikler, pirinç kabuğu külü, metal cüruf vb.).

#### **➤ Kireçle stabilizasyon**

Kireç taşının yani diğer bir isimle kalker malzemesinin kalsine edilerek meydana gelen maddeye kireç denir. Kireç yapısında kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) veya magnezyum karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) bileşenlerini bulundururlar. Kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonat dışında yapısında alüminyum, silisyum, kükürt ve demir gibi elementlerde farklı oranlarda bulundurulabilirler (Karaca 2018).

Kireç, kireç taşının 850-1450 °C derecelerde özel fırınlarda pişirilmesiyle elde edilir. Bu işleme kalsinasyon ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) adı verilmiştir. Kireç suyla karıştırıldığında, bir müddet sonra tipine göre havada veya suda sertleşme özelliği gösterir. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi kireç, beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı maddedir. CaO, su ile temas ettiğinde ( $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{Isı}$ ) reaksiyonu gerçekleşir, sönmüş kirece  $\text{Ca(OH)}_2$  (kalsiyum hidroksit) dönüşür (Ghabae 2015).



**Şekil 2.7.** Kireç

Zemin stabilizasyonu için genellikle yüksek miktarda kalsiyum içeren kireç kullanılmaktadır. Yüksek kalsiyum içeren kireç %5'ten fazla magnezyum oksit veya magnezyum hidroksit içermemektedir. Bazı durumlarda ise dolomitik kireç kullanılmaktadır. Dolomitik kireç, %35 ile %46 arasında magnezyum oksit veya magnezyum hidroksit içermektedir. Dolomitik kireç ile zemin stabilizasyonu, magnezyum fraksiyonunun etkisi kalsiyum fraksiyonuna göre oldukça yavaş olmasına rağmen, oldukça iyi sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Can 2017).

Kireç ile zemin iyileştirilmesi, kullanım amacına göre farklı derecelerde olabilmektedir. Düşük miktarda iyileştirme, geçici yollar veya yapı inşasında kullanılacak olan yürüme platformları gibi durumlarda uygulanmaktadır. Yüksek miktarda iyileştirme ise; testler, tasarım ve uygun uygulama teknikleri ile desteklenerek zeminin kalıcı olarak stabilizasyonunu sağlamaktadır. Kireç ile zemin stabilizasyonu en çok karayolu inşaatlarında uygulanmaktadır (Can 2017).

Kireç stabilizasyonu, zemine kireç ilave edilerek kirecin su ile tepkimeye girmesi şeklinde olmaktadır. Çizelge 2.1 ile zemin türlerine göre kireç stabilizasyonunda uygun kireç oranları verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Önerilen kireç karışım oranları (Kızılcelik 2010)

Zemin cinsi	Modifiye için (%)	Stabilizasyon (%)
İnce çatlaklı kaya	2-3	önerilmez
İyi derecelendirilmiş kil	1-3	-3
Kumlar	önerilmez	önerilmez
Kumlu killer	önerilmez	-5
Siltli killer	1-3	2-4
Plastik killer	1-3	3-8
Yüksek plastisiteli killer	1-3	3-10
Organik zeminler	önerilmez	önerilmez

Uygulama açısından, diğer stabilizasyon çeşitleri arasında kireç stabilizasyonu daha kolay olmasıyla da dikkat çekiyor. Laboratuvarda belirlen karışım oranındaki kireç zeminin yüzeyine serilir ve iyileştirme yapılacak derinliği kadar iş makineleriyle karıştırılır. Karışımın zemin en sonda silindriyle sıkıştırılır. Kirecin zeminin karışma ve sıkıştırması 3 farklı şekilde yapılabilmektedir;

1. Kireç ile zemin arazide karıştırılır ve su verilerek sıkıştırılır.
2. Daha önceden kireç, zemin ve su karışımı hazırlanır. Arazide sıkıştırılarak yerleştirilir.
3. Belirlenen oranlardaki su ve kireç karışımı zemine enjekte olunur ve zemin sıkıştırılır (Ghabae 2015).



**Şekil 2.8.** Kirec stabilizasyonun yol yapımında uygulanması

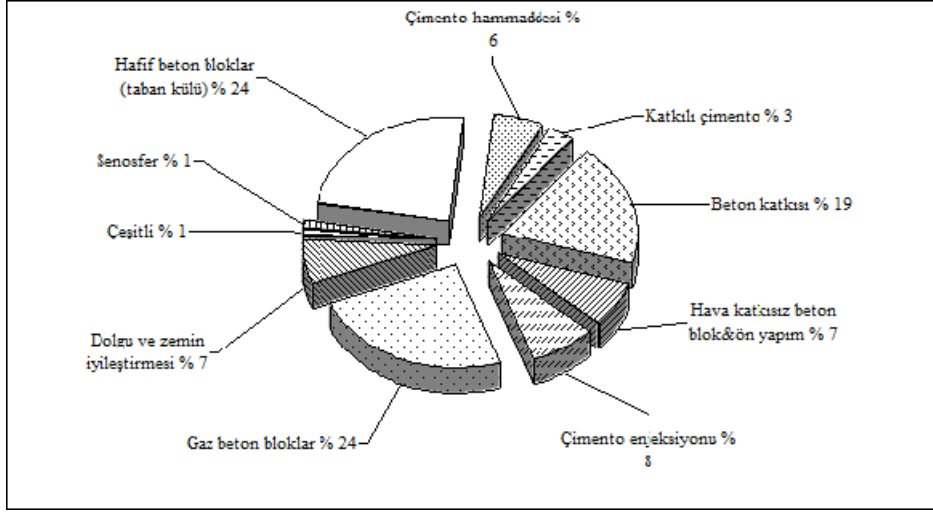
### ➤ Uçucu küller ile stabilizasyon

Uçucu kül kömürün yanmasıyla oluşur ve genellikle termik santrallerin bir yan ürünüdür. Uçucu küller puzolanik bir malzemedir. Kireç ile nemli ortamda bir araya geldiğinde bağlayıcı özellik kazanırlar. Bu teknikte, uçucu kül tek başına kullanılmaz. Belirli bir miktarda kireç ile kullanılır. Genellikle %10-35 arası uçucu kül, %2-10 arası kireç ile karıştırılır. Bu şekilde kullanıldığında (uçucu kül, kireç ve su) uçucu küllerin puzolanik özellikleri nedeniyle katkılı zemin bir süre sonunda dayanım kazanır. Zeminde bu dayanım kazanması çok yavaş bir şekilde olur. Zaman ilerledikçe uçucu küllerin puzolanik özellikleri de artar. Uçucu küller puzolanik özelliği, CaO miktarı yüksek olan türlerinde daha fazladır. Uçucu kül eklendiği zeminin plastisite indeksini düşürür, böylece mukavemet artışı kolaylaştırır.

Uçucu kül, termik santrallerin bir yan ürünüdür. Taş kömürün yanması ile ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıklarda (1100-1600 °C) yanma sonrasında oluşan malzeme soğuduktan sonra uçucu kül haline gelmektedir. Termik santrallerin bacasında gaz ile sürüklenir ve filtrelerde toplanır. Bu sepele uçucu kül adını almıştır. Bu kül tanecikleri çok ince olup yaklaşık 0,5-150 mikron boyutlarındadır (Ghabae 2015).

Ülkemizde kömür ile çalışan 16 adet termik santral olduğu bilinmektedir. Bu santrallerde yılda yaklaşık 15- 16 milyon ton civarında uçucu kül toplanmaktadır, 30-40 yıl sonra ise artarak 50 milyon tona çıkacağı öngörülmektedir. Türkiye’ de uçucu külün %5’i çimento ve beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Çetin 2011).

Şekil 2.9’da İngiltere’de inşaat sektöründe uçucu kül kullanımı örnek olarak gösterilmiştir. İngiltere’de uçucu külün beton, hafif beton blok ve gaz beton blok üretiminde daha çok kullanıldığı görülmektedir (Aruntaş 2006).



**Şekil 2.9.** İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları (Aruntaş 2006)

Uçucu küller yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır. Genellikle taşıma ve şişme problemi olan zeminlerde uygulandığında daha güzel sonuçlar alınmaktadır. Uçucu kül mekanik stabilizasyonda da çok etkili olmaktadır. Uygulama şekli olarak kireç ve çimento stabilizasyonuna benzerdir. Belirlenmiş oranlarda optimum su muhtevsındaki uçucu kül zemin yüzeyine serilir, gerekli araçlarla karıştırılır ve silindirler vasıtasıyla sıkıştırılır. Şekil 2.10'da arazide bir uçucu kül ile stabilizasyon çalışması gösterilmiştir (Çetinkaya 2012).



**Şekil 2.10.** Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu

### ➤ Bitümlü stabilizasyon

Bitüm kullanım alanı çok geniş olan bir malzemedir. İnşaat mühendisliğinde yol inşaatı ve bakımı gibi işlerde kullanılmasına rağmen bu tip uygulamalarda çalışan çoğu insan tarafından bitümün özellikleri hala bilinmemektedir. Bitümün ham maddesi ham petroldür (Koç 2017). Bitüm stabilizasyonu daneleri birleştirici yönde bir rol oynayarak zeminin suyun zararlı etkilerinden korunmasını sağlar. Bitüm danelerin yüzeyini kaplayarak ince daneli zeminlerin suda yumuşamasını önler, iri daneli zeminlerin ise kohezyon kazanmasını sağlar (Yorulmaz 2018). Bitümlü stabilizasyon, kireç, çimento ve uçucu küle göre daha pahalı olmasından dolayı daha az tercih edilmektedir.

Bitüm, siyah renkli, yapışkan ve sıcakken sıvı olan bir malzemedir. Bitüm katkılı stabilizasyon daha ziyade granüle zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır. Bitümlü maddelerin, yapışkan olması sayesinde daneler arasında bağlayıcılık ile geçirimsizlik sağlama özelliği vardır. Uygulama şekline baktığımız zaman kırma taş, çakıl, kum ve benzeri taneli zeminler, sıvı haldeki bitümlü madde ile karıştırılır, iş makineleri ile serilir ve silindirler vasıtasıyla kompaksiyon uygulanır (Şekil 2.11). Burada taneli malzemelerin, kil ve organik maddelerden arınmış olmasına çok dikkat edilmelidir. Bitümlü maddeler ile stabilizasyonda en uygun bitüm oranı %2-10 olarak bilinmektedir (Yorulmaz 2018).



**Şekil 2.11.** Bitüm ile stabilizasyon (Yorulmaz 2018)

Hemen hemen tüm yollarda kullanılabilen bitüm, temel malzemesine uygulandığı zaman daneli malzemeye kohezyon özelliği kazandırır. Bununla birlikte daneler asfaltta daha iyi kaplanacaktır. Ayrıca danelerin arasındaki boşlukları kapattığından, zemin daha boşluksuz bir temel malzemesine dönüşmüş olur. Bitüm zemine katbek, emülsiyon ya da köpük şeklinde eklenmektedir. Bitüm ile stabilizasyonda genel olarak plastisite indisi düşük olan zeminlerde daha güzel sonuçlar alınmaktadır (Koç 2017).

### ➤ Çimento ile Stabilizasyon

Kil ve kalkerin özel fırınlarda pişirilmesi ile çimento denilen bir bağlayıcı malzeme ortaya çıkmıştır. Çimento su ile bir araya geldiğinde çabuk sertleşen bir malzemedir. Çimento stabilizasyonu granüler zeminlerin, düşük plastisiteli killi, siltli zeminlerinde daha çok kullanılmaktadır. Yüzeysel zemin iyileştirmede kullanım alanı açısından kirece, uçucu küle benzer şekilde bütün yol inşaatlarında tercih edilen bir yöntemdir. Bunun dışında çimento, birçok derin stabilizasyon yöntemlerinde de kullanılmaktadır. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda daha çok portland çimentosu tercih edilmektedir.

Çimento, katkı malzemesi olarak en çok kullanılan malzemelerdendir. Katılan çimento miktarı kuru zemin ağırlığının kumlarda %2-6, killerde %8-12 arasındadır. (Demiröz ve Karaduman 2009). Zemin çimento ile yerinde veya özel bir karıştırıcı ile karıştırılabilir ve ince tabakalar haline serilip silindirle sıkıştırılır. Çimento stabilizasyonunda elverişli zeminler düşük plastisiteli kumlu killer, iyi derecelendirilmiş kum, kil veya çakıl, kum, kil karışımlarıdır. Çimentolu zemin basınç mukavemeti, betonda olduğu gibi, zamanla ve kompaksiyon miktarı ile artar. Yol temeli gibi zeminlerden beklenen rijit beton gibi değil, bükülebilir bir malzeme gibi davranması istenir. Bu yüzden mukavemetin fazla artmaması gerekir. Çimento stabilizasyonunda, çimento, zemin danelerinin birbirine bağlanmasını sağlar. Beton içerisinde yaptığı işleri burda da yapar. Beton ile çimento iyileştirilme arasındaki fark uygulama şekli ve çimento oranının çok daha düşük olmasıdır.

Zemin ile çimento karışımı 3 şekilde yapılmaktadır;

1. **Plastik zemin-çimento karışımları**, genellikle şevlerde kullanılmaktadır. Belirli oranlarda su, zemin ve çimento içeren, sıva harcı kıvamında karışımlardır.
2. **Çimento katkılı zemin karışımları**, katılaşmamış ya da yarı-katılaşmış zemin-çimento karışımlarıdır. Genellikle, yol dolguları, temel altı dolguları ve iksa arkası dolgularında kullanılmaktadır.
3. **Sıkıştırılmış zemin-çimento karışımları** ise öğütülmüş zemin ile portland çimentosu ve suyun karışması ve sıkıştırılmasıyla oluşur. Islanma-kuruma ve donma-çözölmeye karşı yüksek dayanıma sahiptir (Çetin 2011).

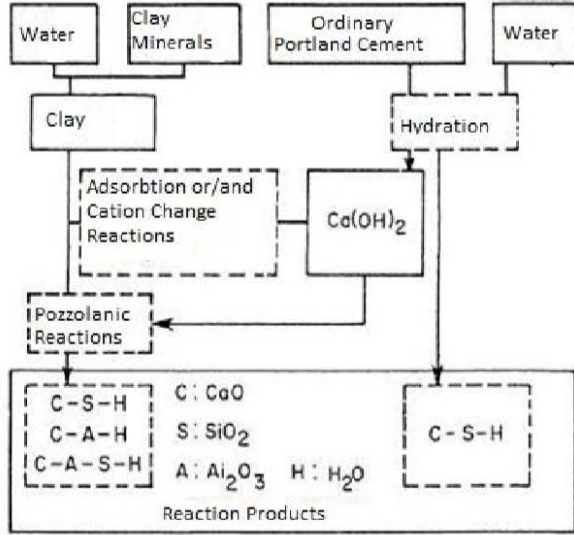


**Şekil 2.12.** Çimento ile zemin stabilizasyonu

Şekil 2.12’de çimento ile stabilizasyon yapılırken çekilmiş bir fotoğraf verilmiştir. Çimento stabilizasyonunun etkili bir yöntem olduğu bilinmektedir. Çimento, silikat stabilizasyonu için zorunlu olan gerekli puzolanik malzemeleri içermektedir. Çimento, beton taneleri gibi toprak tanelerini bağlar. Betondan farklı olarak, zemin stabilizasyonlarında çok düşük miktarda çimento kullanmak yaygındır. Zemin-çimento karışımları düşük dayanımlı beton olarak tanımlanabilir. Betona benzer şekilde dayanım değerleri çimento oranına ve zamana bağlıdır. Çimento, stabilize edilmiş zeminlerde deneyler yapılarak mukavemet ve direnç (nem ve ısı değişimine karşı) değerleri elde



edilmelidir. Topraklanma reaksiyonunun mekanizması Şekil 2.13'de verilmiştir (Karaçoban 2018).



Şekil 2.13. Topraklanma reaksiyonunun mekanizması (Karaçoban 2018)

Hem kumlu hem de killi zeminlerde çimento stabilizasyonu uygulanabilir. Toz haline getirilmiş zemin ve çimento karıştırılırken çimento stabilizasyonları başlar. Bu yöntem sıvı halde olmayan, homojen ve yoğun zeminlerde etkilidir. Zemine çimento eklendiğinde sıvı limiti azalır, plastik limit ve işlenebilirlik artar. Sıvı sınırı %45-50' den düşükse ve plastiklik endeksleri %25'ten düşükse, bu yöntem çok etkilidir. Çimentonun dayanım katkısı kireçlenme süresi ile ilgilidir (Karaçoban 2018).

### ➤ Yapay Polimerler ile Stabilizasyon

Son yıllarda polimerler, yüzeysel zemin stabilizasyonu kapsamında alternatif malzeme olarak geoteknik mühendisliğinin ilgi alanına girmiştir. Bu polimerler arasında, polipropilen, polyester ve kopolimer daha çok kullanılan polimerlerdir. Bu malzemeler yüksek çekme mukavemetine sahiptirler (Çetin 2011). Lifler genel olarak esnek, makroskopik olarak homojen yapıda, uzunluk/çap oranı çok büyük olan küçük kesitli materyaller olarak tanımlanabilir. Bir maddenin lif olarak kabul edilebilmesi en gerek şart uzunluk/çap  $\geq 100$  olmasıdır.

Polimer, birçok küçük monomerin birleşmesinden oluşan uzun zincirli moleküllerdir. Polimerler yapılarına göre homopolimer ve kopolimer olarak sınıflandırılır.

Homopolimer, bütün monomerleri aynı tip, kopolimer ise iki ve daha farklı tipten oluşan polimerlerdir. Polimer oluşumuyla sonuçlanan reaksiyonlara, polimerleşme denir. Polimerler kaynağına bakıldığında, doğal ve yapay polimerler olarak iki grupta toplanırlar. Doğal ve yapay (sentetik) polimerler de kendi içerisinde yapılarına göre gruplara ayrılırlar. Doğal polimerlerden çeşitli işlemlerden sonra elde edilen yarı-sentetik polimerler de vardır (Ghabae 2015). Çizelge 2.2’de kaynaklarına göre sınıflandırılması ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

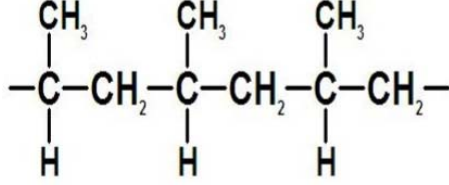
Toprağın liflerle güçlendirilmesi, genelde kumlu toprakların iyileştirmesinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Liflerin killi toprakta kullanımına ilişkin araştırmaların sayısı ise sınırlıdır. Daha önceden yapılmış olan çalışmalar zemine liflerin eklenmesinin, zeminin güçlendirilmesi için yararlı, güvenilir ve ekonomik bir çözüm yolu olduğunu göstermektedir (Öztürk 2009).

**Çizelge 2.2.** Polimerlerin kaynaklarına göre sınıflandırılması (Karaca 2018).

<b>Polimerler</b>		
<b>Doğal Polimerler</b>	<b>Sentetik Polimerler</b>	<b>Yarı-Sentetik Polimerler</b>
DNA, RNA, Proteinler	Polietilen	Rejenere Selüloz ve türevleri
Selüloz ve türevleri	Polipropilen	Modifiye Nişasta
Nişasta	Poli (etilen teraftalat)	
Agaroz	Polistiren	
Doğal kauçuk	Poli (vinil klorür)	

Polipropilen, toprak nemi veya sızıntı suyu ile absorbe etmeyen veya reaksiyona girmeyen hidrofobik ve kimyasal olarak inert bir malzemedir. Polipropilen bir orta kristallik seviyesine sahiptir ve yorulmaya karşı çok iyi bir dirence sahiptir. Polipropilen malzemenin kimyasal formülü Şekil 2.14' de verilmiştir. Monomer propileninden yapılmıştır ve  $(C_3H_6)_x$  'in kimyasal formülasyonuna sahiptir. Polipropilen 165 °C erime noktasına sahiptir. Polipropilen sağlamdır ve genellikle diğer bazı plastiklerden daha

katıdır, oldukça ekonomiktir ve yorulmaya karşı çok iyi bir dirence sahiptir (Öztürk 2007).



**Şekil 2.14.** Polipropilenin kimyasal formülasyonu (Öztürk 2007)

Polimer bazlı liflerin zemin stabilizasyonu ile ilgili yapılmış araştırmalarda, liflerin yalnız kullanıldığında zeminler üzerinde etkisinin fazla olmadığı görülmüştür. Bu lifler, çimento ve kireç gibi bağlayıcı özelliği olan malzemelerle birlikte kullanıldığında ise zemin içerisinde donatı rolünü üstlenmiştir ve böyle zemin stabilizasyonunda güzel sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca daha önceki çalışmalarda polimer bazlı liflerin, kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanımına daha elverişli olduğu görülmüştür (Çetin 2011).

## 2.2. Konuya Dair Önceki Çalışmalar

Aytekin ve Nas (1997) çalışmalarında, Trabzon ili Arsin ilçesi Yolüstü köyü civarında bulunan sarı, kahverengi ve kırmızı renkli zeminlerin dayanımının artırılması için değişik oranlarda kireç ve çimento katkıları ile iyileştirilmesi araştırılmıştır. Bu amaçla her üç zeminin mineralojik özellikleri; DTA (Differential Thermal Analysis) ve XRD (X-Ray Diffraction) yöntemleri ile belirlenmiştir. Zeminlerin her biri katkısız ve değişik oranlarda çimento ya da kireç katkılı olarak optimum su muhtevasında sabit bir sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırılarak serbest basınç dirençlerindeki ve kesme kutusu deneyi ile kayma parametrelerindeki değişim izlenmiştir.

Numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinden, kireç katkı malzemesi olarak kullanılması durumunda, basınç dayanımındaki artışın belli bir katkı oranının (%15) üzerinde olması halinde etkili olmadığı görülmüştür. Kireç katkısı daha da arttırıldığı zaman (%30) basınç dayanımında azalmalar olmaktadır. Çimento katkılı numunelerde ise

çimento oranının arttırılması ile serbest basınç dayanımında sürekli artışlar gözlenmektedir. Sonuç olarak en makul karışımın %5 - %10 arasında olmasının uygun olacağı görülmüştür. Dayanımın çok önemli olmadığı durumlarda kirecin, aksi taktirde çimentonun katkı maddesi olarak seçilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Aytekin (2002) çalışmasında, değirmen atıklarının mekanik stabilizasyon uygulamalarında, zeminin dayanım ve geçirimliliğini nasıl etkileyeceği araştırmıştır. Bu amaçla değişik katkı oranlarında numuneler hazırlanmış ve serbest basınç ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Değirmen atığı malzemesi katkı olarak kullanılmasıyla üretilen numunelerin serbest basınç dayanımları %15 civarında katkı kullanılması halinde, %14 civarında artış olmaktadır. Katkı oranının arttırılması halinde ise numunelerin dayanımları azalmaktadır. Aynı orandaki katkı için numunelerin geçirimliliği de %122 artmaktadır. Sonuç olarak değirmen atığı zemin stabilizasyonunda olumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Uygun katkı oranının %10 ile %20 arası olduğu belirlenmiştir.

İnan ve diğ. (2005) çalışmasında İzmir Çiğli Jet Üssünden temin edilen bir tip yumuşak kilin, değişik uçucu küller ile stabilizasyonu üzerine bir deneysel araştırma sunmuştur. Bu amaçla, kuru kil ağırlığının %5, 10, 15 ve 20'si oranlarında uçucu kül ile hazırlanan farklı karışımlar üzerinde standart proktor deneyleri yaparak optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemiştir. Bu değerlere göre hazırlanan numuneler, 1, 7, 28 ve 90 günlük kür süresiyle bekletilerek serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deney sonuçları Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

**Çizelge 2.3.** Standart proktor deneyi sonuçları (İnan ve diğ. 2005)

Karışım	UK (%)	CH (%)	Yatağan külü		Soma Külü	
			Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Optimum su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Optimum su muhtevası (%)
CH-UK0	0	100	16,15	17,3	16,15	17,3
CH-UK5	5	95	15,93	18,3	14,23	22,5
CH-UK10	10	90	15,22	19,2	14,13	22,9
CH-UK15	15	85	14,80	20,1	13,83	23,0
CH-UK20	20	80	13,95	21,8	13,64	24,0

Çizelge 2.3'te görüldüğü gibi deneyler sonucunda her iki uçucu kül zeminin basınç dayanımını arttırmıştır. Artışlardaki farklılıkların ise uçucu küllerin içerisinde serbest kireç miktarına bağlı olduğuyla açıklanmıştır.

Türköz (2006) çalışmasında, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüs alanında yer alan yüksek şişme potansiyeline sahip Meşelik killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu araştırmıştır. Araştırmada kil zemine sönmüş kireç katkısı ile zeminin şişme nasıl değişeceği incelenmiştir. Bunun için, standart ve modifiye enerji seviyelerinde ve farklı sönmüş kireç yüzdelerinde (%0, 1, 3 ve 5) hazırlanmış, 88 ayrı numune üzerinde serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonunda, sönmüş kireç katkısının killerin şişme potansiyeline pozitif etki ettiği, %3 seviyesinden sonra ise daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek enerjiyle sıkıştırılmış numunelerde daha yüksek etki görüldüğü belirlenmiştir.

Çakılcıoğlu (2007) tarafından yapılan çalışmada, bentonit kiline %10 kireç, %5-10-15-20-25 oranlarında uçucu kül ve zeolit ilave edilerek deneyler yapılmış ve zemin stabilizasyonu üzerine etkileri belirlenmiştir. Karışımların belirlenen kıvam limitlerine göre katkı oranları arttırıldıkça plastisite indisleri azalmıştır. Özgül Ağırlık Deneyinde zeolitlere katılan %10 ve %20 uçucu küllerde özgül ağırlık değerinde yükselme görülmüştür. Serbest basınç deneyinde en yüksek mukavemet değeri günlük, 7 günlük ve 28 günlük kürde bekleyen numunelerde %10 zeolit ve %25 zeolite katılan %15 uçucu kül numunesinde görülmüştür. Üç eksenli hücre basınç deneyinde en yüksek mukavemet %5 zeolit karışımı uçucu küllerde görülmüştür. CBR deney sonuçlarında bentonit kiline katılan her katkının mukavemeti arttırdığı gözlenmiştir. Çalışma kapsamında %100 Kil + %10 Kireç + %5 Zeolit + %5 Uçucu Kül katkılı karışımların en uygun karışım olduğu belirlenmiştir.

Öztürk (2007) çalışmasının amacı, killi zeminlere liflerin eklenmesinin zemin kayma mukavemetine olan etkilerini araştırmaktır. Kaoline ağırlık olarak %0,25, %0,50 ve %1,00 yüzdelerinde lifler eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Kayma mukavemeti deneylerinde numuneler standart ve modifiye sıkıştırma metotları uygulanarak hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde kompaksiyon, direkt kesme, CBR serbest basınç,

çekme dayanımı ve lineer büzülme deneyleri yapılmıştır. Zemine propilen liflerin eklenmesi kayma açısı, kohezyon, basınç dayanımı, CBR değerlerini artırmış, büzülme oranını ise düşürmüştür. CBR testlerinden elde edilen sonuçlardan, liflerin ilave edilmesinin, liflerin Kaliforniya yatak oranı değeri üzerinde olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. %1,00 lif ilavesiyle taşıma kapasitesi değerindeki artış, %21,50 ile %60,13 arasında gözlenmiştir. En önemli artış ağırlıkça %0,50 ve %1,00 liflerin eklenmesi ile gözlemlenmektedir. Genel olarak zemin stabilizasyonu gereken yerlerde propilen liflerin ağırlıksal olarak düşük miktarda kullanımı bu tekniği diğerlerine göre ekonomik bir alternatif olarak kılmaktadır. Bu çalışmada ağırlıkça %0,50'lik lif katma oranı, toprak takviyesi için en uygun çözüm olarak bulunmuştur.

Aksoy ve diğ. (2008) çalışmalarında, Elazığ ili Sürsürü mahallesinden alınan killi bir zemini Tunçbilek uçucu külü ile stabilizasyon çalışması yapmıştır. %0, %3, %5 ve %10 oranlarında uçucu külün kil zemine ilavesiyle deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç dayanımlarına bakılmıştır. Deney sonuçlarına göre uçucu kül ilavesinin zeminin plastisitesine fazla etkisi olmamıştır. Artan uçucu kül oranı ile serbest basınç dayanımı da artmıştır.

Kılıç (2008) çalışmasında, çimento katkısı ile kil zeminlerin mukavemetine etkisini araştırmıştır. Bunun için farklı oranlarda (%6, %10, %15, %20 ve %25) çimento ilavesiyle hazırlanan numunelere veyn, üç eksenli basınç ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çimento ile yapılan iyileştirmede mukavemetin arttığı görülmüştür. Veyn ve üç eksenli basınç deneylerinde artan çimento yüzdesi arttıkça drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin de arttığı görülmüştür. Çimento katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetinde zamanla bir artış meydana geldiği gözlenmiştir.

Yılmaz ve Sevensan (2010), bu deneysel çalışmada Ankara kiline değişik oranlarda Çayırhan termik santralı uçucu külü ve değişik tip polipropililen lifler katılarak elde edilen karışımların, tek eksenli basınç dayanımlarının nasıl değiştiğini araştırmışlardır. İlk olarak Çayırhan uçucu külü ve Ankara kilinin sınıflama deneyleri yapılmıştır. Daha sonra

Ankara kilinin kompaksiyon karakteristikleri tek başına ve üç farklı uçucu kül içeriğiyle (uçucu külün kile oranı kuru ağırlıkça %10, %20 ve %30) standart Proctor kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içerikleri belirlenen katkısız ve üç farklı uçucu kül katkılı Ankara kilinin lifsiz ve lifli karışımları elde edilmiştir. Lif-kil ve lif-uçucu kül-kil karışımlarda lifin kile oranı kuru ağırlıkça %0,5 ve %1,0 olarak belirlenmiştir. Çalışmada 19.0 mm uzunluğunda M tipi ve F tipi olmak üzere iki farklı tipte lif kullanılmıştır. Uçucu kül puzolanik bir malzeme olduğundan kür süresinin dayanım üzerindeki etkisini görmek amacıyla lifsiz uçucu kül-kil karışımları 1, 7, 14 ve 28 günlük kür sonunda tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Lif-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımları ise sadece 28 gün kürde bekletildikten sonra elde edilmiştir.

Çizelge 2.4'te lif-uçucu kül-kil karışımlarının 28 gün kürden sonra elde edilen tek eksenli basınç dayanımları incelendiğinde %1,0 lif katkısının %0,5 lif katkısına nazaran tek eksenli basınç dayanımını üzerindeki etkisi daha çok olduğu görülmüştür. Diğer yandan lifin tek eksenli basınç dayanımına etkisinin belirli bir eğilim içerdiğini de söylemek oldukça zordur. Dayanımlardaki dalgalanmanın karışıma rastgele katılan lif miktarının potansiyel yenilme düzlemlerinde yığılaşmalarıyla açıklanabilir. Ayrıca, lifin tek başına (uçucu kül katılmadan) kile katılması durumunda tek eksenli basınç dayanımı az da olsa düşme eğilimindedir.

**Çizelge 2.4.** Lif-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımları ve liflerden kaynaklanan dayanım artışları (Yılmaz ve Sevecan, 2010)

UCK/KİL	FİBER/KİL	Fibersiz	M19	F19	M19 fiberden kaynaklanan dayanım artışı	F19 fiberden kaynaklanan dayanım artışı
0	0.5	196.2	162.7	136.1	-17.1	-30.6
0	1	196.2	215.2	184.4	9.7	-6.0
10	0.5	306.1	345.8	272.0	13.0	-11.1
10	1	306.1	467.7	377.0	52.8	23.2
30	0.5	505.2	515.2	443.2	2.0	-12.3
30	1	505.2	563.5	710.6	11.6	40.7

Boso (2010) çalışmasında katkı maddesi olarak bor bileşiklerinden borik asit ve boraks pentahidrat kimyasalları kullanmış ve bu katkı maddelerinin killerin mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada İstanbul dolayında yaygın sorunların görüldüğü Gürpınar killeri (kil1 ve kil2) üzerinde çalışılmıştır. Mühendislik özellikleri birbirine yakın olan bu kil zeminlere farklı oranlarda borik asit, boraks pentahidrat kimyasalları eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde kıvam limitleri, standart proktor (kompaksiyon) deneyi, tek eksenli basınç deneyi ve kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Standart proktor (kompaksiyon) deney sonuçlarına göre; borik asit ve boraks pentahidrat kimyasallarının kil ile etkileşimi sonucunda her iki numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde bir azalma meydana gelirken, optimum su muhtevası değerlerinde bir artış olmuştur.

Hazırlanarak 24 saat ve 15 gün ve süre ile küre bırakılan kil 1 ve kil 2 numunelerinde artan borik asit miktarı, tek eksenli basınç dayanım değerlerinde düzenli bir azalma meydana getirmiştir. Kesme kutusu deney sonuçlarına göre; her iki numunenin artan borik asit katkısıyla beraber, kohezyon c değerleri artarken, sürtünme açılarında bir azalma meydana gelmiştir. Serbest basınç ve kesme kutusu deneylerinde, 15 gün küre tabi tutulan numunelerde elde edilen değerler 24 saat küre bırakılan numunelere oranla yüksek bulunmuştur. Genel mukavemet davranışı olarak boraks pentahidrat etkisi ile kohezyon, c parametresinin artarken, sürtünme açısı,  $\phi$ 'nin azaldığı görülmektedir. Bor bileşikleri etkisi ile zemin, daha fazla kohezyonlu ve daha az sürtünmeli bir yapı kazanmaktadır.

Tüylüce (2010) çalışmasında deniz kilinin, kireç stabilizasyonu ile iyileştirilerek karada dolgu çalışmalarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu çalışma için, Bursa ilinin Gemlik bölgesinden alınmış olan deniz kili kullanılmıştır. Zeminin geoteknik özelliklerini, optimum su muhtevasını ve eklenebilecek optimum kireç oranını belirlemek amacıyla elek analizi, Atterberg kıvam limitleri ve Proktor deneyleri uygulanmıştır. 60 gün kür edilen sönmemiş kireç katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde doğal zemine oranla 7 kat artış gözlemlenmiştir. Yapılan CBR deneyi incelendiğinde 5 kata varan mukavemet artışları gözlemlenmiştir. Çalışmanın son aşamasında SEM ve



XRD analizleri yapılarak kireç katkılı zeminin kimyasal özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Kireç katkılı numunelerdeki mukavemet artışlarına dayanarak, deniz kilinin kireçle stabilizasyonu sonucunda arazi şartlarında dolgu malzemesi olarak kullanılabilceği, bu sayede dolgu çalışmalarının kolay ve ekonomik bir şekilde yapılabileceği belirlenmiştir.

Gücek (2011) çalışmasında mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Numuneler, kil zemin kuru ağırlığına göre mermer tozu (%5, %10 ve %15) ve uçucu kül (%10, %20 ve %30) ile belli oranlarda karıştırılarak elde edilmiştir. Karışımlar, %15 ve %20 su muhtevalarında standart proctor sıkıştırma enerjisinde hazırlanmıştır. Numuneler; Eksenel basınç, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), şişme, donma-çözülme ve donma-çözülme sonrası eksenel basınç deneylerine tabi tutulmuştur. CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) deney sonuçlarına göre katkı miktarı artışına paralel olarak CBR dayanımının arttığı görülmektedir. Deneylerde, her iki su muhtevastaki numuneler için %10 MT - %20 UK karışım oranı en uygun karışım oranı olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca, katkı maddelerinin şişme potansiyelini azaltıcı yönde etkisi olduğu görülmektedir.

Öntürk (2011) çalışmasında Seyitömer uçucu külü (UK), yapay granit atığı (polisaj) ve bağlayıcı malzeme olarakta kireç kullanarak, mevcut olan zayıf zeminlerin iyileştirmesi üzerine etkileri araştırmıştır. Esas zemin numunesi olarak ele alınan kaolen kiline UK, polisaj ve kireç belirli oranlarda katılarak homojen karışimli numuneler oluşturulmuştur. Hazırlanan yapay numunelere kireç ve uçucu kül miktarı %15 oranında sabit tutularak, %10, %15, ve %20 oranlarında polisaj malzemesi ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan her malzemenin laboratuvar ortamında özgül ağırlık değerleri, zemin sınıflandırma deneyleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmış ve en iyi sonucu alınmış numune üzerinde California Taşıma Oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Kompaksiyon deneylerinde ulaşılan sonuçlara göre en yüksek kuru birim ağırlık CBR deneyleri sonuçları dikkatlice incelendiğinde en yüksek taşıma oranına (%14,86) sahip zemin numunesi, %15 kireç + %15 UK + %55 kaolen + %15 polisaj katkılı numunesinden elde edilmiştir.

Çetin (2011) çalışmasında, İstanbul Eyüp Akpınar bölgesinden alınan yumuşak bir kilin, yüzeysel zemin iyileştirmesi kapsamında, C tipi uçucu kül, eskitilmiş kopolimer ve ağ yapılı polipropilen liflerin katkısıyla taşıma gücünün artırılmasına yönelik bir deneysel çalışma yapmıştır. Araziden elde edilen zemin üzerinde gerçekleştirilen Granülometri analizi ve Atterberg deneyleri sonucunda zemin sınıflandırılması yapılmış ve yüksek plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Modifiye edilmiş, minyatür Harvard #2 kompaksiyon aleti ile farklı su muhtevalarında hazırlanan numunelerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. 7 günlük kür süresinden sonra numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış ve mukavemetleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda, hazırlanan farklı birleşimlerin, yüksek plastisiteli kilin mukavemetini farklı yüzdelerde arttırdığı saptanmıştır.

Etminan (2012) çalışmasında Akpınar ve Şile bölgelerinden alınan yüksek ve düşük plastisiteli yumuşak kil zeminlere uçucu kül, kopolimer, polipropilen ve VHP lifler ekleyerek zeminin taşıma gücünün artırılmasını amaçlamıştır. Çizelge 2.5’de, testler sırasında kullanılan alternatif malzemeleri ve bunların miktarını gösterilmektedir. Bu malzemelerin farklı oranlardaki karışımları ile hazırlanan numunelere kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır.

**Çizelge 2.5.** Alternatif malzemeler ve bunların miktarı (Etminan 2012)

No	Material	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)
1	Fly ash	5	10	15	-	-
2	Polypropylene	0,25	0,5	0,75	1	-
3	Copolymer	0,5	0,75	1	1,25	1,5
4	Homopolymetrepolypropylene	0,25	0,5	0,75	1	1,5
5	Fly ash	10	10	10	-	-
	Polypropylene	0,25	0,5	0,75	-	-
6	Fly ash	10	10	10	-	-
	Copolymer	0,75	1	1,25	-	-
7	Fly ash	10	10	10	-	-
	Homopolymetrepolypropylene	0,25	0,5	0,75	-	-

Deneyle sonununda en yüksek değerler yüksek plastisiteli kile %10 uçucu kül, %1 kopolimer eklendiğinde %342 iyileştirme olarak görülmüştür. Deneylelerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kullanımışt bütün alternatif malzemelerin zeminin kil zeminin mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli killi zeminlere göre bakıldığında ise mukavemet artışlarının farklı yüzdelerde olduğu tespit edilmiştir.

Çetinkaya (2012) çalışmasında yüksek plastisiteli bağlama kilinin zeminlerin mühendislik özelliklerinin uçucu kül ve lif katkısı yardımıyla iyileştirilmesini araştırmıştır. Çalışmalarda farklı oranlardaki kil, uçucu kül ve polipropilen lif karışımları ile hazırlanan numunelere standart proktor, serbest basınç ve CBR deneyleleri yapılmıştır. Yapılan deneyleysel sonununda uçucu kül ve polipropilen lifin zemin CBR ve serbest basınç değerlerinde önemli oranda artış olduğu tespit edilmiştir. En uygun karışım olarak ise eşit miktarda kil-uçucu kül karışımı ve %1,0 polipropilen lif olarak belirlenmiştir.

Ünver (2015) çalışması kapsamında düşük plastisiteli killi bir zemini Soma ve Çatalağzı uçucu külü ile stabilize etmiştir. Bu amaçla katkısız ve %5,10, 15, 20, 25, 30 uçucu kül katkı seviyelerindeki numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite özelliklerinin belirlenmesi için de iğne deliği ve dağılma deneyleleri yapılmıştır. Yapılan deneyleler sonucunda kullanılan Soma uçucu külünün zeminin şişme, dispersibilite ve dayanım özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çatalağzı uçucu külünün ise zeminin şişmesinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, Soma uçucu külüne oranla zeminin dayanımı üzerinde daha az etkili olduğu, dispersibilitesinde bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

Kalıpcılar ve diğ. (2015) çalışmasında Portland çimentosu kullanımının sülfat etkisine maruz kalmış zeminlere etkisini deneyleysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla, dayanım ve geçirgenlik özelliklerinin belirlenebilmesi için serbest basınç ve klor-iyon geçirgenliği deneyleleri yapılmıştır. Bu deneyleler için kür süreleri 1, 7, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında çimento içeriği %5, 10 ve 15 olarak seçilmiş, sodyum ve magnezyum sülfat olmak üzere iki farklı sülfat tuzu kullanılmıştır. Yapılan deneyleler

sonucunda, çimento içeriğinin ve kür süresinin artışı ile birlikte dayanımda artış, kloriyon geçirirmliliğinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

Mardani-Aghabaglou ve ark. (2016) çalışmasında çimento stabilizasyonu ile sülfat saldırısına maruz kalmış kaolinin genişleme seviseyini deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla boyutları 25mm/55mm olan ağırlıkça çimento/kil oranı %5, %10 ve %15 olan numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin bir kısmında sülfata dayanıklı çimento, bir kısmında ise normal portland çimentosu kullanılmıştır. Hazırlanan bu numuneler, magnezyum sülfat çözeltisine batırılarak 30 gün boyunca üç günde bir kalınlıkları kaydedilmiştir. Beklendiği gibi sülfata dayanıklı çimento içeren kaolin numunelerinin genişleme yüzdesi normal portlant çimento içeren kaolin numunelerin genişleme yüzdesinden düşük değerler aldığı görülmüştür.

Fidan (2016) çalışması kapsamında düşük plastisiteli kil zemine %6 kireç ve %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında perlit karıştırmıştır. Bu stabilizasyon çalışmasında perlit doğal ve ince öğütülmüş olarak iki farklı şekilde kullanılmıştır. Hazırlanan karışımların indeks, dayanım, durabilite ve şişme gibi geoteknik özellikleriyle bu özelliklerin perlitin inceltilmesiyle nasıl etkilendiğine bakılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda perlitin inceltilmesinin dayanım ve durabilite değerlerini doğrudan etkilediği ve bu etkinin pozitif yönde olduğu görülmüştür. Perlitin inceltilmesiyle daha düşük perlit oranlarında daha yüksek mukavemet değerlerinin meydana geldiği belirlenmiştir. Sonuç olarak puzalanık katkı inceliğinin zemin stabilizasyon çalışmasında olumlu etkilerinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Karaçoban' ın (2018) çalışmasında, İzmir Körfezi'nden zemin örnekleri alınmış, farklı kimyasal katkı malzemeleri farklı oranlarda eklenerek tarama malzemesinin geoteknik amaçlı muhtemel dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Tarama malzemesini sınıflandırmak için elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limiti deneyleri yapılmıştır. Ayrıca özgül ağırlık ve organik malzeme tayini deneyleri de gerçekleştirilmiştir. En uygun karışım yüzdesini belirlemek için sistematik şekilde bağlayıcı karışımlar oluşturulup, pH ve kıvam limiti değerlerindeki değişimler gözlenmiştir. Daha sonra bu karışımlara standart proktor ve serbest basınç deneyleri

yapılmıştır. En yüksek oranda iyileştirme %9 kireç eklenmiş zemin karışımlarında gözlenmiştir.

Kocabey (2019), çalışması kapsamında öncelikle kirecin öğütülebilirliği incelenmiş ve %90'ı 48 mikron altı malzeme olan öğütülmemiş kireç 20 mikron altı seviyeye indirilmiştir. İkinci aşamada Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil olan doğal zemine %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında öğütülmüş ve öğütülmemiş kireç katılarak deney numuneleri hazırlamıştır. Serbest basınç deneyleri için kür süreleri 1, 7, 14 ve 28 gün olarak belirlemiştir. Yapılan deneysel çalışma neticesinde, 28 günlük kür süresinin ardından %6 kireç içeren öğütülmemiş SL6 ve öğütülmüş SGL6 numuneleri maksimum dayanım değerlerini vermişlerdir. Donma-çözülme ve ıslanma-kuruma çevrimi sonuçlarına göre, öğütülmüş kireç katkısı ile hazırlanan SGL grubu zemin numuneleri öğütülmemiş kireç katkısı ile hazırlanan SL grubu zemin numunelerine oranla daha durabil bir davranış göstermişlerdir. Deneylerden elde edilen veriler ışığında, kirecin inceltilmesinin dayanım ve durabilite davranışı üzerinde doğrudan olumlu bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Vural (2019) çalışmasında, deprem bölgelerinde ciddi çevre sorunu haline gelen, şehirlerde görüntü kirliliği yaratan ve yaşam konforunu bozan deprem yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılmasını amaçlamıştır. Bu amaçla, Sakarya' da 1999 yılı depremlerinde yıkılan binalara ait yıkıntı atıkları ile laboratuvar ortamında zemin iyileştirmesi yapılarak bu zeminlerin CBR değerleri belirlenmiştir. Çalışmada, inşaat yıkıntı atığı, kireç ve kaolin karıştırılarak, bu karışımların 1, 7 ve 28 günlük CBR değerleri ölçülmüştür. İyileştirilecek zemin örneği olarak şişme potansiyeli en yüksek olan kaolen kili kullanılmıştır. Karışımlarda birinci, yedinci ve yirmi sekizinci gün için en düşük CBR değerleri %3 Yıkıntı atığı, %5 Kireç ve %92 Kaolin kullanıldığında, en yüksek CBR değeri ise %23 yıkıntı atığı, %5 kireç ve %72 kaolin kullanıldığında elde edilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu yüksek lisans tez çalışmasındaki temel amaç, çimento ile polipropilen lifin zemin stabilizasyonunda kullanımının araştırılmasıdır. Bu bölümde çalışma kapsamında hazırlanan karışımların özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler, kullanılan malzemeler ve deney numunelerinin notasyonları anlatılmıştır.

#### 3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan doğal malzeme Bursa ilinin Nilüfer ilçesinde Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünden alınmıştır. Alınan malzeme Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik laboratuvarına getirilmiş, deneylerden etüvde kurutulmuş ve ardından deneylerde kullanılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Deney numunelerine ait notasyon bilgileri

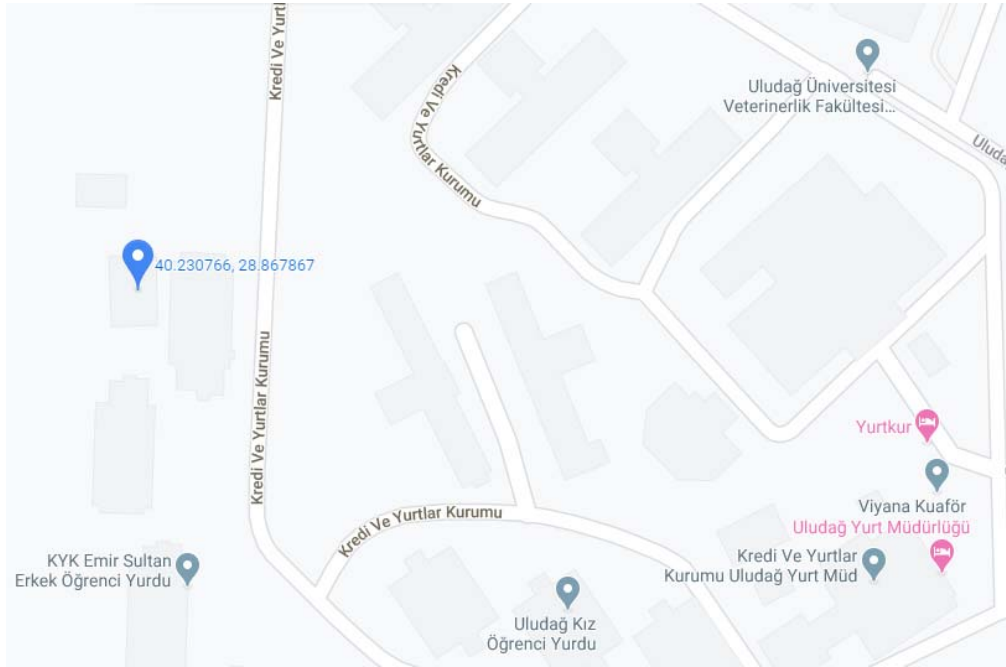
Deney örneklerinin karışımları	Notasyon
Doğal Zemin	S
Doğal Zemin + çimento	SC
Doğal Zemin + polipropilen lif	SPP
Doğal Zemin + %5 çimento	SC5
Doğal Zemin + %10 çimento	SC10
Doğal Zemin + %0,5 polipropilen lif	SPP0,5
Doğal Zemin + %1,0 polipropilen lif	SPP1,0
Doğal Zemin + %1,5 polipropilen lif	SPP1,5
Doğal Zemin + %5 çimento + %0,5 polipropilen lif	SC5PP0,5
Doğal Zemin + %5 çimento + %1,0 polipropilen lif	SC5PP1,0
Doğal Zemin + %5 çimento + %1,5 polipropilen lif	SC5PP1,5
Doğal Zemin + %10 çimento + %0,5 polipropilen lif	SC10PP0,5
Doğal Zemin + %10 çimento + %1,0 polipropilen lif	SC10PP1,0
Doğal Zemin + %10 çimento + %1,5 polipropilen lif	SC10PP1,5

Deneylerde kullanılan çimento Uludağ Üniversitesi Malzeme laboratuvarından polipropilen lif ise Atlas1 firmasından temin edilmiştir. Bu malzemeler deneylerden önce herhangi bir işleme tabi tutulmamıştır.

Doğal malzemeye toplam ağırlığın %5 ve %10'u kadar çimento, %0,5, %1 ve %1,5'i kadar polipropilen lif ve bunların karşılıklı kombinasyonları eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney numunelerine ait notasyonlar bilgileri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

### 3.1.1. Zemin

Bu çalışmada kullanılan zemin malzemesi, Bursa Uludağ Üniversitesinin kampüsünde bir inşaat alanından alınmıştır. Daha sonra Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda 40 No'lu elekten geçirilerek, deneylerde kullanılacak bir malzeme haline getirilmiştir. Doğal malzemenin alındığı yerin konumu Şekil 3.1'de verilmiştir.



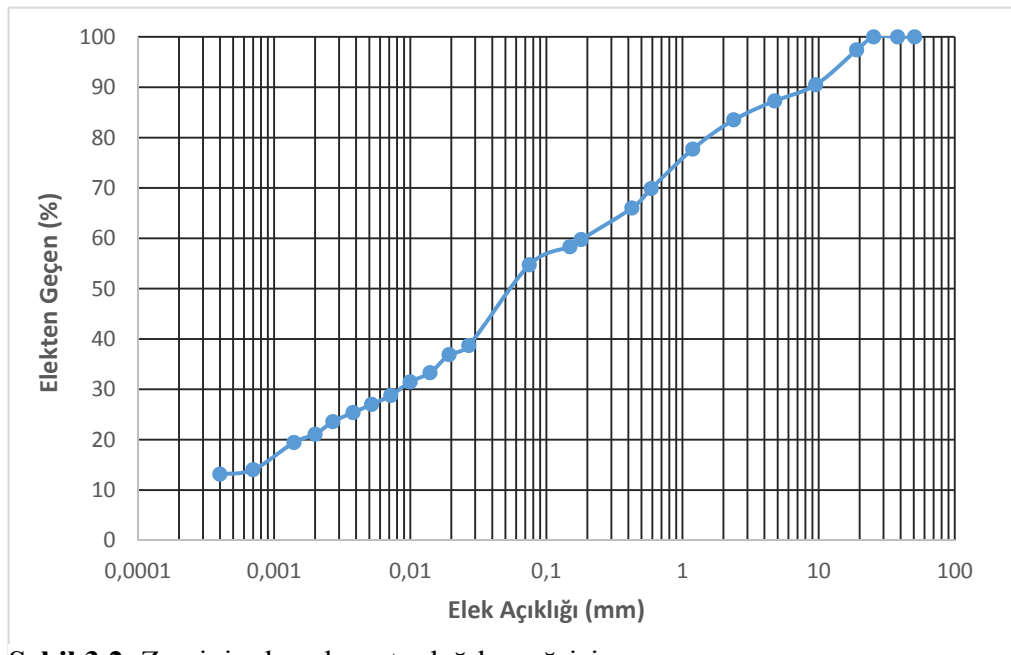
Şekil 3.1. Doğal malzemenin alındığı yerin konumu

Yapılan zemin sınıflandırılması deneylerinin sonuçlarına bağlı olarak malzeme Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Doğal malzemeye uygulanan tanımlama ve sınıflandırma deneyleri sonucunda bulunan mühendislik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Doğal malzemenin özellikleri

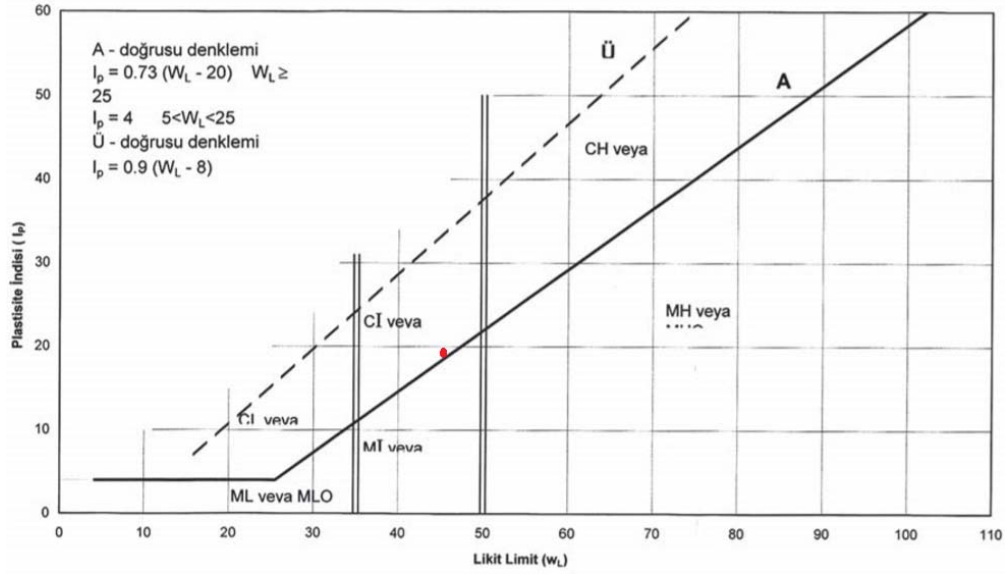
USCS sınıflandırma	CL
Özgül ağırlık	2,53
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,645
Optimum su içeriği (%)	18
Likit limit (%)	47
Plastik limit (%)	28
Plastisite indisi (%)	19
Renk	Sarımtırak

Doğal malzemeye yıkamalı elek analizi yöntemi uygulanmıştır. 200 No'lu elek altında kalan kısmın dane büyüklüğü dağılımı ise hidrometre yöntemiyle belirlenmiştir. Zemine ait dane boyutu dağılım eğrisi ve zeminin plastisite kartında yeri (kırmızı nokta ile işaretli) Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de sırasıyla verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Zeminin dane boyutu dağılım eğrisi





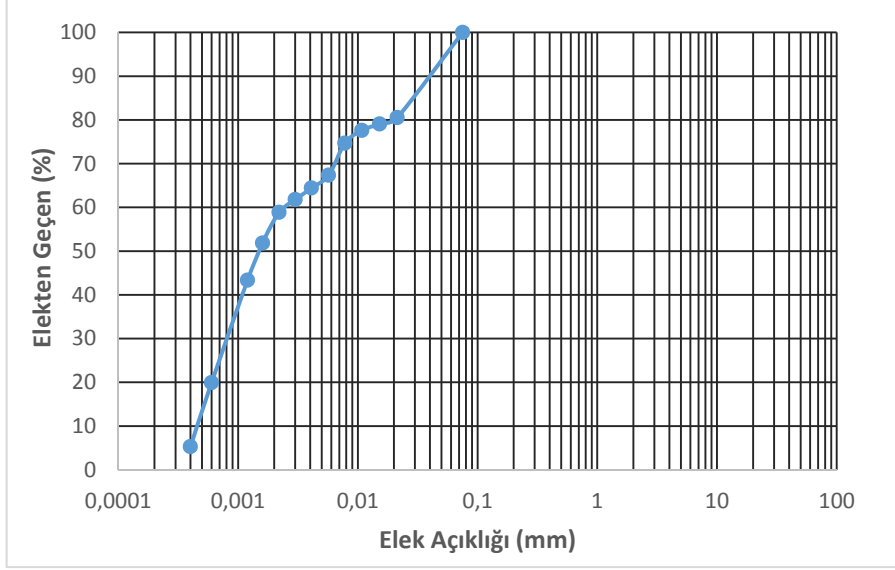
Şekil 3.3. Zeminin plastisite kartındaki yeri (kırmızı nokta ile işaretlenmiştir)

### 3.1.2. Çimento

Deneyleerde kullanılan çimento CEM I 42,5 R portland çimentosudur. Kullanılan çimento ile ilgili kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.3'te, çimentonun tane dağılımı ise Şekil 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Portland çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler

Fiziksel Analiz		Kimyasal Analiz	
İncelik, 45µ elek üzeri (%)	7,60	SiO <sub>2</sub> (%)	18,81
Özgül ağırlık	3,15	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5,71
Özgül yüzey (Blain, cm <sup>2</sup> /g)	3530	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,09
Priz başlama süresi	Min. 60dk	CaO (%)	63,96
Hacim genişmesi	Max. 10mm	MgO (%)	1,16
2 günlük basınç dayanımı	Min. 20 MPa	SO <sub>3</sub> (%)	2,39
28 günlük basınç dayanımı	Min. 42,5 MPa	Cl- (%)	0,01
		Kızdırma kaybı (%)	3,20
		Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O (%)	0,92
		Çözünmeyen kalıntı (%)	0,015



**Şekil 3.4.** Çimentonun tane dağılımı eğrisi

### 3.1.3. Polipropilen Lif

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde Atlas1 firmasından temin edilen F12 tipi fibrilli lif malzeme kullanılmıştır. Polipropilen lif, ağ yapıya sahip, renksiz, doku olarak yumuşak ve pürüzsüz yapıya sahip bir malzemedir. Polipropilen deforme edildip açıldıktan sonra deneylerde kullanılmıştır. Çizelge 3.4'te bu polipropilen lifin özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Polipropilen lifin özellikleri

Görünüm	Doğal beyaz
İçerik	%100 saf
Yoğunluk	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Uzunluk	12mm
Çap	0,018mm
Çekme mukavemeti	450-700 Mpa
Elastisite Modülü	3000-3500 Mpa
Çimento ile uyumu	Çok iyi
Erime noktası	162 °C
Yanma noktası	593°C
Nem tutma	0

### 3.2. Yöntem

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan yöntemler ve yapılan deneylere yer verilmiştir. Doğal zemine ağırlıkça %5, %10 çimento, %0,5, %1, %1,5 polipropilen lif ilavesiyle zemin stabilizasyonu yapılmıştır. Bu katkı malzemelerinin zeminin mühendislik özelliklerini nasıl etkilediğine bakılmıştır. Bu amaçla birçok zemin deneyleri farklı karışımlar üzerinde yapılmıştır. Zemin iyileştirme işlemi için laboratuvarında önceden belirlenmiş oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların özgül ağırlık ve kıvam limit değerleri belirlenmiştir. Bu karışımlar üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılmış ve karışımların kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir. Bulunan optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri (1, 7 ve 28 günlük), taşıma oranı tayini (CBR) deneyleri ve şişme deneyleri yapılmıştır.

#### 3.2.1. Dane Çapı Dağılımının Bulunması

- **Yıkamalı Eleme Metodu**

Yıkamalı eleme metodu, zeminde ince kum ve daha iri boyuttaki malzemenin dane çapı dağılımının tayini için kullanılır. Ayrıca bu deneyde, zemindeki kil ve siltin toplam miktarı da belirlenir.

Zemin numunesinden bir miktar alınarak  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde kurutulup, kuru malzeme miktarı not edilir. Bu numune bir kapın içine yerleştirilir ve üzeri örtülünceye kadar su ilave edilip toprakların ayrışması için bir gün su altında bırakılır. Numuneyi örtmekte kullanılan suyun her bir litresi için 2 g sodyum heksametafosfat ( $\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{P}_6$ ) eklenir. İyice karıştırılıp süspansiyon haline getirildikten sonra 0,075 mm' lik elekten yıkanarak elenir. İri danelerin 75 $\mu\text{m}$ 'lik eleğe zarar vermemesi için 75 $\mu\text{m}$ 'lik eleğin üzerine daha büyük göz açıklığına sahip elek konularak iri danelerin bu eleğin üstünde kalması sağlanır. Bu işlem su duru hale gelinceye kadar devam ettirilir. Eleklerden kalan malzeme tepsiyeye boşaltılarak  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  sıcaklıklı etüve koyulur. Daha sonra etüvden çıkarılan malzeme, uygun bir elek serisinden elenerek gerekli hesaplamalar yapıldıktan

sonra tane çapı dağılımı belirlenir. Yıkama sonucu doğal zeminin ince malzeme yüzdesi (kil+ silt) %55 olarak bulunmuştur (TS 1900-1).

- **Hidrometre Deneyi**

Hidrometre deneyi, daha ince daneli ( $75 \mu\text{m}$ 'dan daha küçük) zeminlerin dane çapı dağılımının bulunması ile ilgilidir. Deney için yaklaşık olarak 50 g - 100 g numune alınır ve geniş ağızlı konik şişeye konur Zemin danalarının iyice ayrışması için üzerine 150 mL hidrojen peroksit çözeltisi eklenir, iyice karıştırılıp ertesi güne kadar bekletilir. Zemin süspansiyonu bundan sonra 15 dakika süreyle mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılır ve bu karışım  $75 \mu\text{m}$ 'lik elekten geçirir. Daha sonra bu süspansiyon, 1000 mL'lik mezüre aktarılır ve damıtık su ile 1000 mL'ye tamamlanır (Şekil 3.5). Mezür düz bir yüzey üzerine oturtulur ve hidrometre süspansiyona daldırılır. Kronometreye bakılarak 24 saate kadar (gerekirse 48 saate kadar) hidrometre okumaları alınır ve gerekli formüllerle hesaplanarak zeminin ince daneli olan kısmının dane dağılımı çizilir. (TS 1900-1).



**Şekil 3.5.** Hidrometre deneyi

### 3.2.2. Kıvam Limitleri Tayini

- **Likit limitin çarpmalı cihazla tayini (tek nokta yöntemi ile ölçüm)**

Likit limit, zeminin plastik bir malzemeden akıcı bir malzemeye dönüştüğü andaki su muhtevasıdır. Bu çalışmada likit limiti belirlemek için Casagrande aleti ile tek nokta yöntemi kullanılmıştır.

Deney için 40 No 'lu elekten geçirilmiş yaklaşık 200 g numune alınır. Numune porselen potaya konur ve damıtık su eklenerek, hamur kıvamına gelinceye kadar karıştırılır. Numunenin kuru için bir müddet bekletilir. Bu karışımdan bir miktar alınarak Casagrande cihazı kabına uygun şekilde yerleştirilir ve oluk açma bıçağıyla numune ikiye bölünür (Şekil 3.6). Krank kolu saniyede 2 devir yapacak bir hızla çevrilir. İki yanda kalan zemin 13 mm boyunca birbirine değdiğinde deney tamamlanır. Bu deneyde vuruş sayısının 20 ile 30 arasındaki olması gerekmektedir. Deney bitiminde su muhtevası ölçülür. Aynı numune ile deney tekrar yapılır. İki deneyde vuruş sayısı eşit ya da  $\pm 2$  farklı ise deney başarılı bir şekilde tamamlanmıştır (TS 1900-1).

Likit limit (LL) bu yöntemde aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır:

$$LL = \left( \frac{W_1 + W_2}{2} \right) \left( \frac{N_1 + N_2}{25} \right)^{0,121} \quad (3.1)$$

Burada ;

$W_1$  ve  $W_2$  : Su muhtevaları,

$N_1$  ve  $N_2$  : Vuruş sayıları' dır.



**Şekil 3.6.** Casagrande cihazı

- **Plastik limitin tayini**

Plastik limit ise, ıslak zeminin yoğrulma sırasında yüzeyinde çatlakların belirdiği su muhtevası olarak tanımlanır. Likit limit deneyi için kullanılan numuneden yaklaşık 20 g numune alınır ve düz bir yüzeyde avuç ile yuvarlanır. Avuç ile yuvarlama sırasında 3 mm kalınlığa ulaştığında çubuklarda, çatlamalar ve kendi kendine kopmalar oluştuğunda, su muhtevasını belirlemek için numune kabına alınır (Şekil 3.7). Bu andaki su muhtevası plastik limit olarak kaydedilir (TS 1900-1).

Likit limit ile plastik limit arasındaki farkı ile Plastisite indisi belirlenmektedir.

$$PI = LL - PL \quad (3.2)$$

Formüldeki ;

PI: Plastisite indisi,

LL: Likit limit,

PL: Plastik limit' tir.



**Şekil 3.7.** Plastik limitin belirlenmesi

### 3.2.3. Özgül Ağırlık Deneyi (Piknometre metodu)

Piknometre deneyi ince daneli zeminlerin özgül ağırlığının bulunmasında kullanılır. Deneyde 4,75 mm'lik elekten geçen kısım kullanılmıştır. Hacim şişesi tartılır. İçerisine yaklaşık 50 g zemin numunesi aktarılır ve şişe yeniden tartılır. Hacim şişesinin işaret çizgisine kadar su eklenir ve havası alındıktan sonra tartılır. En sonda şişenin içerisindeki boşaltılır ve sadece su doldurulmuş şekilde şişe tartılır. (Şekil 3.8). Bütün veriler kaydedilir ve aşağıdaki formülden zeminin özgül ağırlığı hesaplanır. Deney en az iki sefer yapılır ve ortalaması alınarak zemin özgül ağırlığı olarak kaydedilir.

Zeminin özgül ağırlığı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$G_s = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1)(M_3 - M_2)} \quad (3.3)$$

Burada;

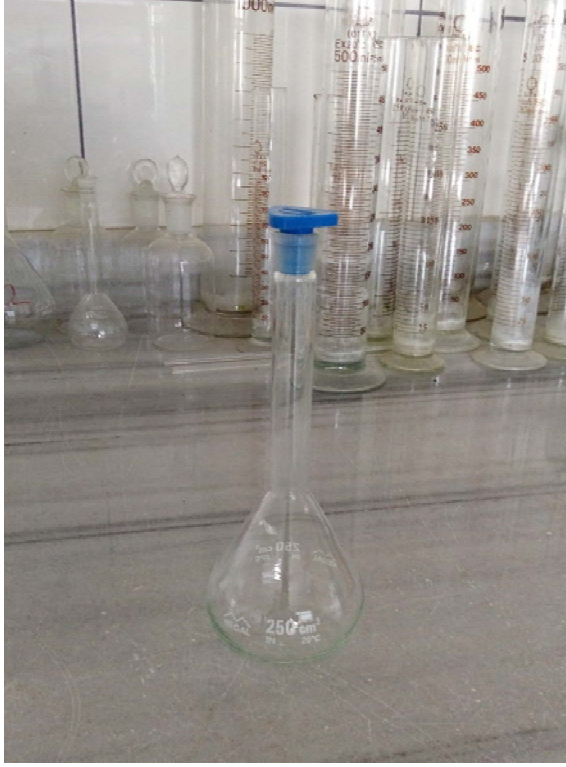
G<sub>s</sub>: Bağıl yoğunluk,

M<sub>1</sub>: Piknometre ağırlığı,

M<sub>2</sub>: Piknometre ve zemin ağırlığı,

M<sub>3</sub>: Piknometre, zemin ve su ağırlığı,

M<sub>4</sub>: Piknometre ve su ağırlığı 'dır.



**Şekil 3.8.** Piknometre ve vakum uygulanması

#### **3.2.4. Standart Proktor (Kompaksiyon) Deneyi**

Kompaksiyon, zeminin tabakalar halinde serilerek, silindirle titreşim vererek, tokmaktama gibi işlemlerle sıkıştırılmasına denilir. Proktor deneyi, standart ve modifiye proktor deneyi olarak yapılmaktadır. Bu çalışmada standart proktor deneyleri yapılmıştır. Bu deneyde, kuru yoğunluğun (sıkıştırmanın) maksimum olduğu su muhtevasının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Şekil 3.9'da kullanılan standart proktor deneyi aleti görülmektedir.





**Şekil 3.9.** Standart proktor deneyi

Standart proktor deneyi, kabın içine 3 eşit tabaka halinde tokmakla 25 darbe uygulanarak yapılmıştır. Açıkta kurutulup uygun elekten geçirilerek elde edilen zeminden bir miktar alınır, belirli miktarda su ile karıştırılır. Standart çelik kalıp, tabanla birlikte tartılır. Üst yakası da takılmış olarak kalıp sert bir yüzey üzerine oturtulur ve nemli zemin, üç tabaka halinde ve her tabakasına 25 darbe uygulanarak sıkıştırılır. Yaka çıkarılır ve sıkıştırılmış zemin, çelik cetvelle, kalıbın üst kenarı hizasında dikkatle düzlenir. Kalıp ve zemin, tartılır. Sıkıştırılmış zemin kalıptan çıkarılır ve su muhtevası belirlemek için zeminden bir miktar alınır. Geriye kalan zemin ufalanarak deneyden artan zeminle karıştırılır. Bu zemine uygun artışlarla su eklenerek karıştırılır ve en az beş değer verecek şekilde bu işlemler tekrarlanır.

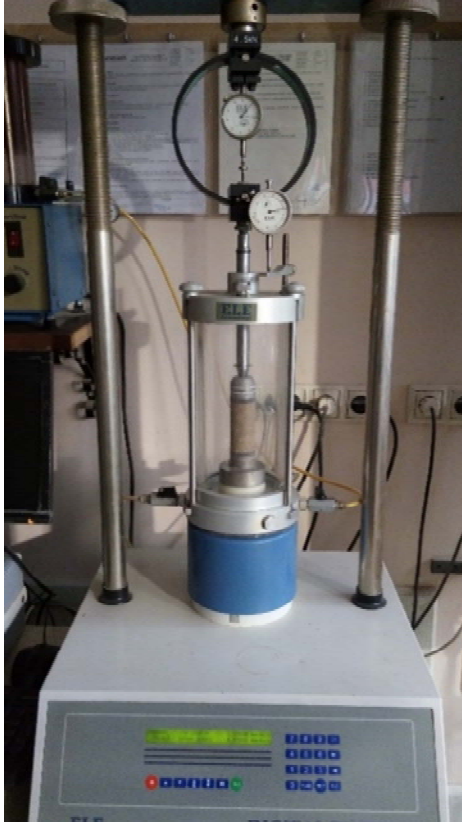
Deney sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlık ( $\rho_k$ ) ve bunlara karşılık gelen su muhtevası ( $w$ ) değerleri, bir grafik kağıdı üzerinde işaretlenerek kompaksiyon eğrisi çizilir. Bu eğrinin tepe noktası en büyük kuru birim hacim ağırlık, bu noktaya karşılık gelen su muhtevası ise optimum su muhtevası olarak belirlenir (TS 1900-1).

### **3.2.5. Serbest Basınç Deneyi**

Serbest basınç deneyi, temel zeminlerinin üzerine gelecek yük karşısında gösterecekleri direnci tanımlamak amacıyla yapılan deneydir. Serbest basınç deneyinde zemin

numunesine yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye yapılmaktadır. Bu yük artışları altında numunenin boy kısılması ölçülmekte ve bu değerlere göre gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmektedir. Eksenel gerilmenin göçme kabul edilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri zeminin serbest basınç değeri ( $q_u$ ) kabul edilmektedir. Deney numunesi olarak boyu 76mm, çapı 38mm olan numuneler hazırlanmıştır.

Numune deney aletine yerleştirilir. Boy değişmeyi ölçen komparatör saati ve kuvvet halkası sıfırlanır. Yükleme numunede dakikada %0,5 - %2 arası birim boy kısılması oluşturacak biçimde yapılır. Yük ve boy değiştirme okumaları uygun aralıklarda alınır ve föye kaydedilir. Deney süresi en fazla 10 dakika olmalıdır. Deney, yük artışının düşme göstermesine kadar devam ettirilir (TS 1900-2). Şekil 3.10'da deney yapılırken çekilmiş bir fotoğrafta serbest basınç cihazı görülmektedir.



Şekil 3.10. Serbest basınç deneyi cihazı

### 3.2.6. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Kaliforniya Taşıma Oranı, alanı 1935 mm<sup>2</sup> olan pistonun belirli bir hızda zemine itilmesi şeklinde çalışır. Deneyde yük - penetrasyon bağıntısından taşıma oranının bulunur. CBR, dane boyutu 20 mm'den küçük malzeme için elverişlidir.

Sıkıştırma işlemi dinamik sıkıştırma metot 1 (TS 1900-2) seçilmiş olup numune 5 tabaka halinde ve her tabakaya 2,5 kg'lık tokmak ile 56 vuruş yaparak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılmış numuneler tümüyle suya boğulmuş ve normal ıslanma süresini (96 saat) tamamlamaya bırakılmıştır.

Islatma tamamlandıktan sonra numuneler, sudan çıkarılıp, 15 dakika süreyle süzölmeye bırakılmıştır. Kalıp içindeki numuneye birlikte şekil 3.11'de görüldüğü gibi basınç cihazının plâkası üzerine yerleştirilir. Penetrasyon pistonu, numunenin yüzeyine oturtulur ve dakikada 1,20 mm' lik bir hızla zemine itilir. Yük okuma belirli penetrasyon değerlerinde alınır. 2,5 mm ve 5 mm CBR değerleri okunduktan sonra deney sonlandırılır. Bu iki değerlerden yüksek olanı CBR değeri olarak seçilmiştir.



Şekil 3.11. CBR deney düzeneği

### 3.2.7. Şişme Deneyi

CBR deneyi için sıkıştırılmış numunelerin suda bekleme süresince üzerine 0,01mm bölüntülü ve 30 mm kapasiteli bir kompaktör saati yerleştirilerek şişme miktarı ölçülmüştür (Şekil 3.12). Literatürde şişme potansiyelini belirlemek için birçok yöntem bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında bu yöntem tercih edilmiştir. Şişme yüzdesi; bir zemin numunesinin, sabit bir sürşarj yüklemesi altında su altında, tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimi olarak tanımlanmaktadır. Bu hacim artışının, numunenin başlangıçtaki hacmine oranı olarak da hesaplanır.

$$S_v = \frac{\Delta H}{H_0} * 100 \quad (3.4)$$

$S_v$ : Şişme yüzdesi

$\Delta H$ : Yükseklik farkı

$H_0$ : İlk yükseklik' tir.



Şekil 3.12. Şişme deneyi

#### **4. BULGULAR ve TARTIŞMA**

Yüksek lisans tezi olarak yapılan bu çalışmada Bursa ilinde Bursa Uludağ Üniversitesi alanında bulunan zemin üzerinde stabilizasyon çalışması yapılmıştır. Stabilizasyon malzemesi olarak çimento ve polipropilen lif kullanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında; kıvam limitleri, özgül ağırlık deneyleri, standart proktor deneyleri, serbest basınç deneyleri, CBR deneyleri ve şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır.

Doğal malzemeye çimento ve polipropilen lif ilavesiyle yapılan kimyasal stabilizasyonda öncelikle likit ve plastik limit değerleri saptanmıştır. Belirlenen oranlarda hazırlanan karışımlara proktor deneyleri yapılarak maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su yüzdesi değerleri bulunmuştur. Daha sonrasında bulunan optimum su içeriklerine göre hazırlanan numuneler ile diğer deneyler yapılmıştır.

##### **4.1. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları**

Tez çalışması kapsamında, doğal zemin içerisine %5, %10 oranlarına çimento ve %0,5, %1,0, %1,5 oranlarında polipropilen lif katılarak, çimento ve polipropilenin, zeminin plastisitesi üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Karışımlar hazırlandıktan sonra bekleme yapılmadan likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan karışımların TS 1900-1 (2006) standardına uygun olarak yapılan likit limit ve plastik limit deney sonuçları ve plastisite indisi değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Doğal zemin numunesine ait plastisite indisi değerlerinin çimento ve polipropilen lifli karışımlara göre yüksek olduğu çizelgede görülmektedir.

Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4’de sırasıyla çimentonun, polipropilen lifin, %5 çimento ile polipropilen lifin ve %10 çimento ile polipropilen lifin, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerindeki değişimleri gösterilmektedir. Doğal zemine çimento ilavesi yapılarak hazırlanan karışımlarda likit limit değerinde azalma plastik limit değerinde ise artma görülmüştür (Şekil 4.1). Çimento ilavesi %10’u geçtikten sonra karışımın nanoplastik duruma geçtiği görülmüştür. Bu tür karışımlar yapılacak deneyler

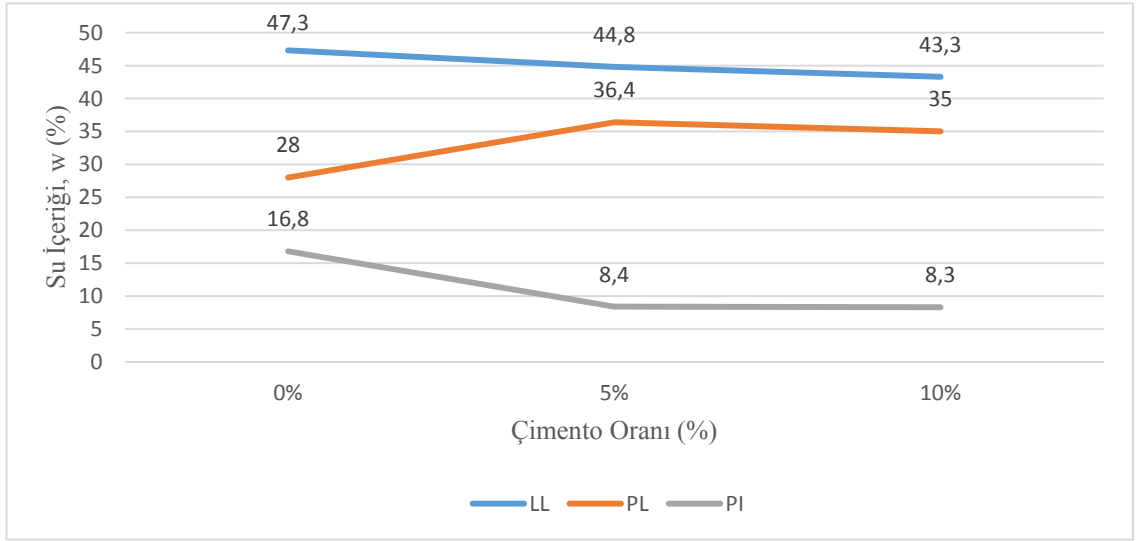
için uygun olmadığı için çimento yüzdesi %10'dan sonra daha yüksek oranlı çimento karışımları oluşturulmamıştır.

Polipropilen lif ile hazırlanan karışımlara bakıldığı zaman, %0,5 oranında polipropilen lif eklendiğinde likit limit değeri bir miktar düşmüş olsa da, lif yüzdesi arttıkça likit limit değerinde bir miktar artış görülmüştür. Genel olarak, polipropilen lifin plastik limit değerini artırdığı söylenebilir (Şekil 4.2-4.4). Polipropilen lif için ise lif yüzdesi arttıkça numunelerin karıştırılmasının zorlaşması nedeni ile %1,5 sınır değer seçilmiştir.

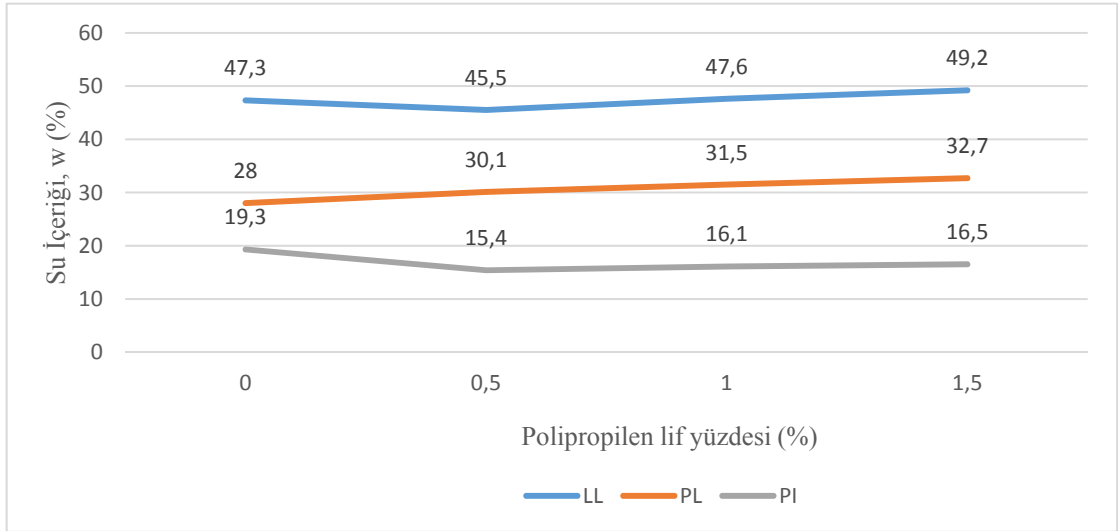
Şekillerden görüldüğü üzere, doğal zemine eklenen çimento, zeminin plastisite indisi değerini 19,3'den 8,3'e kadar düşürmüştür. Çimentolu zemine eklenen %0,5 polipropilen lif, bu düşüşü bir miktar desteklese de lif yüzdesinin artışı zeminin plastisite indisini tekrar yükseltmiştir. Bu durumda çimento ile birlikte düşük yüzdelerde polipropilen lif kullanımının plastisite indisini düşürmede etkili olduğu söylenebilir.

**Çizelge 4.1.** Karışımların kıvam limitleri değerleri

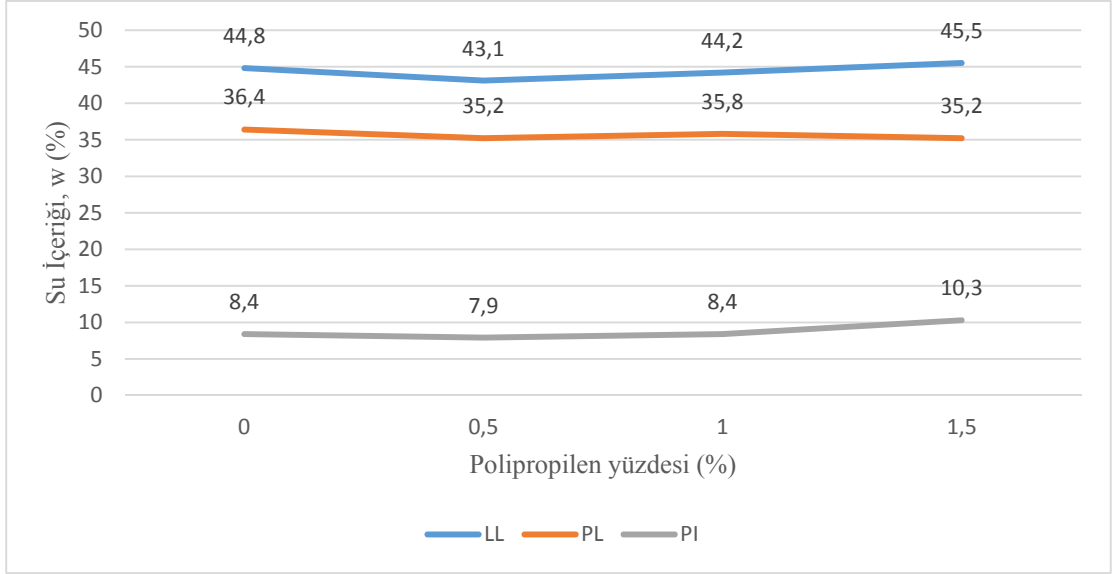
No	KARIŞIM	LİKİT LİMİT (%)	PLASTİK LİMİT (%)	PLASTİSİTE İNDİSİ (%)
1.	S	47,3	28,0	19,3
2.	SC5	44,8	36,4	8,4
3.	SC10	43,3	35,0	8,3
4.	SPP0,5	45,5	30,1	15,4
5.	SPP1,0	47,6	31,5	16,1
6.	SPP1,5	49,2	32,7	16,5
7.	SC5PP0,5	43,1	35,2	7,9
8.	SC5PP1,0	44,2	35,8	8,4
9.	SC5PP1,5	45,5	35,2	10,3
10.	SC10PP0,5	41,2	34,7	6,5
11.	SC10PP1,0	43,6	35,0	8,6
12.	SC10PP1,5	45,0	35,1	9,9



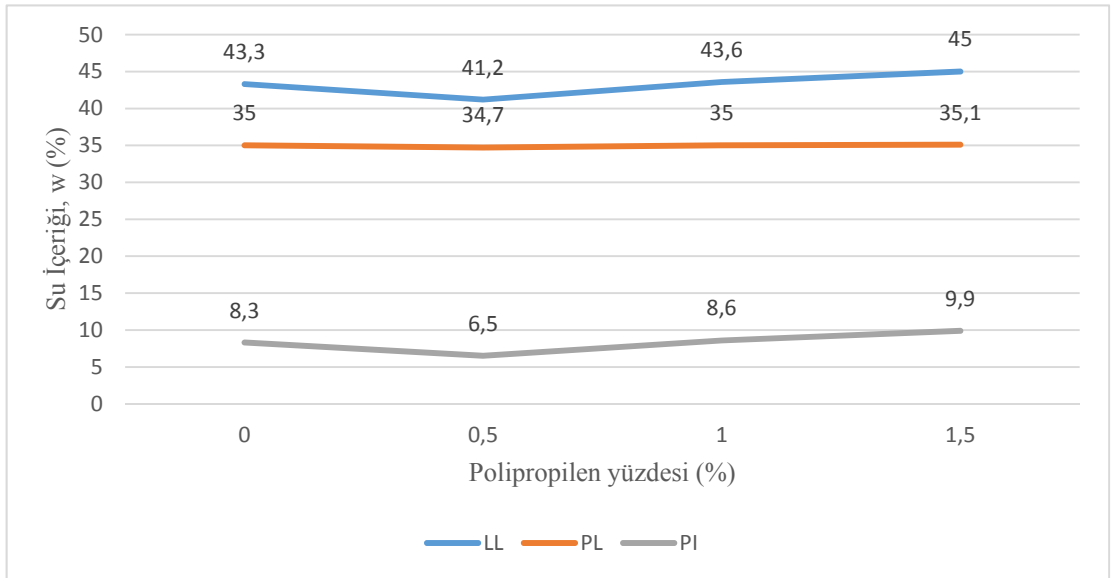
Şekil 4.1. Çimento katkısının kıvam limitlerine etkisi



Şekil 4.2. Polipropilen lif katkısının kıvam limitlerine etkisi



**Şekil 4.3.** %5 çimento ile birlikte polipropilen katkısının kıvam limitlerine etkisi



**Şekil 4.4.** %10 çimento ile birlikte polipropilen katkısının kıvam limitlerine etkisi

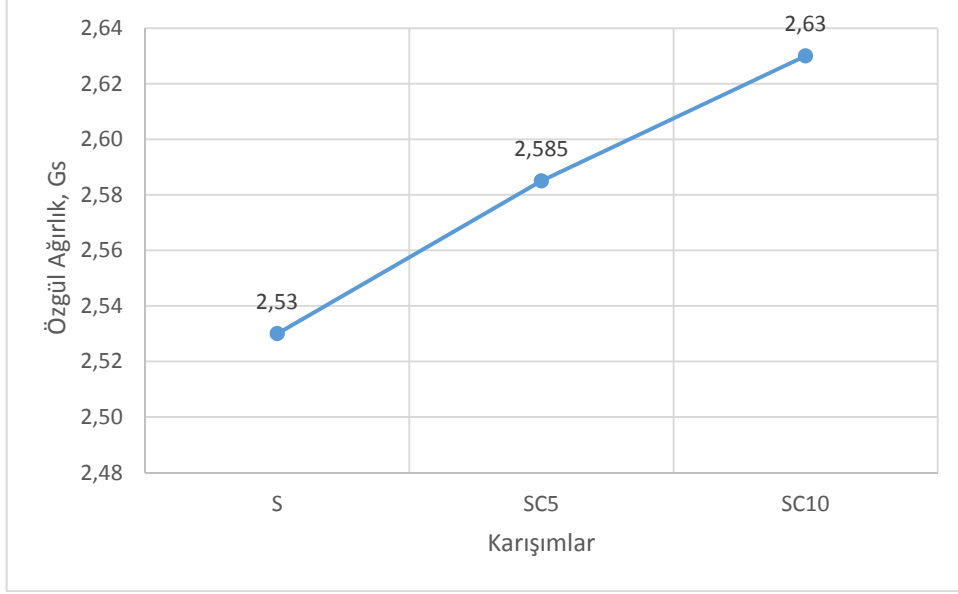


## 4.2. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

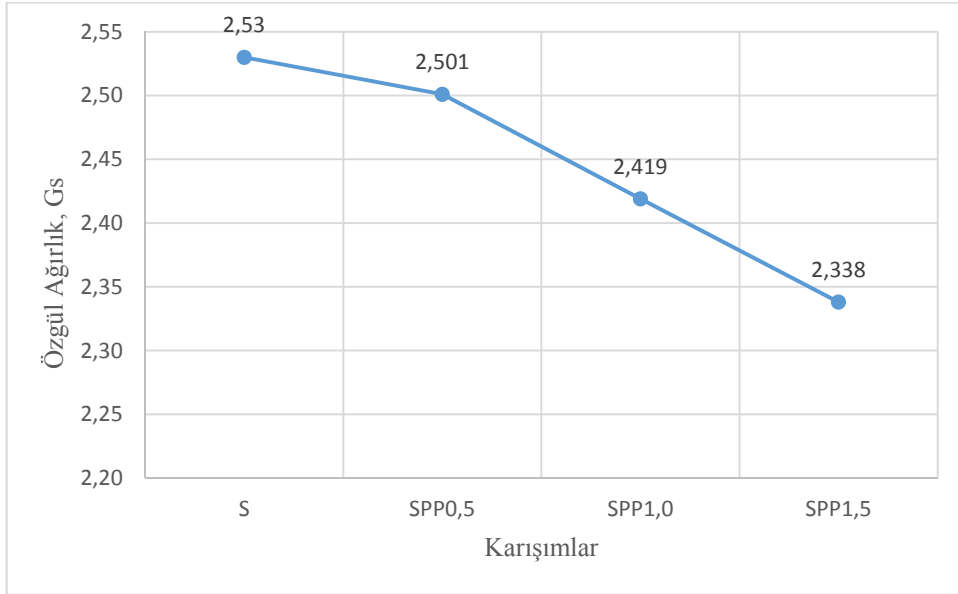
Önceden karıştırılarak beklemeye bırakılan malzemelere yapılan özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Çizelgeden de görüldüğü üzere, çimento ilavesi malzemenin özgül ağırlığını arttırmakta, polipropilen lif ilavesi ise malzemenin özgül ağırlığını düşürmektedir. Şekil 4.5’te çimentonun zeminin özgül ağırlığına etkisi, Şekil 4.6-4.8’de ise polipropilen lif katkısının doğal zeminin özgül ağırlığına etkisi görülmektedir. Çimentonun yoğunluğunun zeminden fazla olması nedeni ile elenen çimento zeminin özgül ağırlığını arttırmıştır. Polipropilen lif yoğunluğunun ise zemin yoğunluğundan düşük olması nedeni ile eklenen lif zeminin özgül ağırlığını düşürmüştür.

**Çizelge 4.2.** Özgül ağırlık deney sonuçları

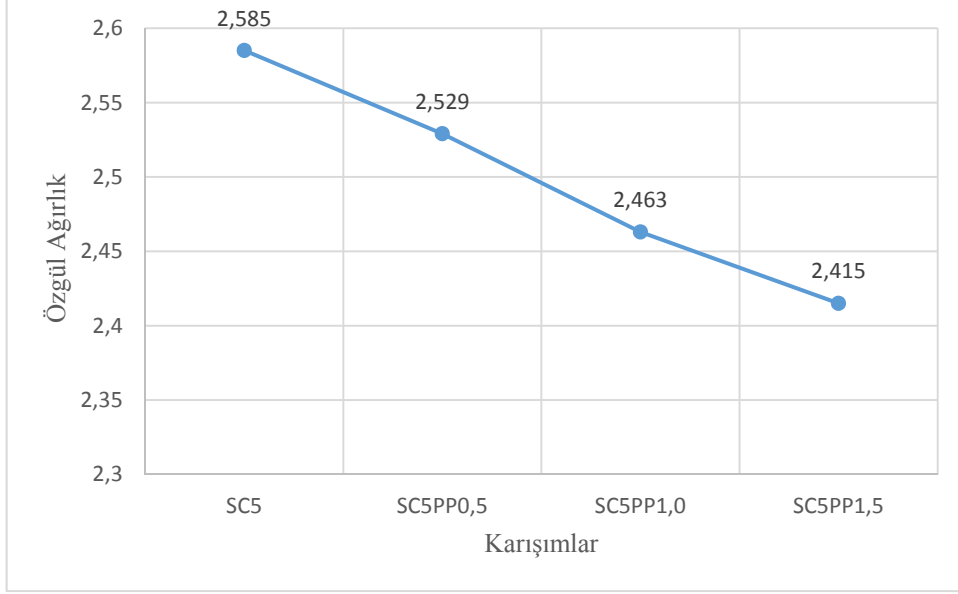
Sıra No	Karışımlar	Gs
1	S	2,530
2	SC5	2,585
3	SC10	2,630
4	SPP0,5	2,501
5	SPP1,0	2,419
6	SPP1,5	2,338
7	SC5PP0,5	2,529
8	SC5PP1,0	2,463
9	SC5PP1,5	2,415
10	SC10PP0,5	2,540
11	SC10PP1,0	2,462
12	SC10PP1,5	2,404



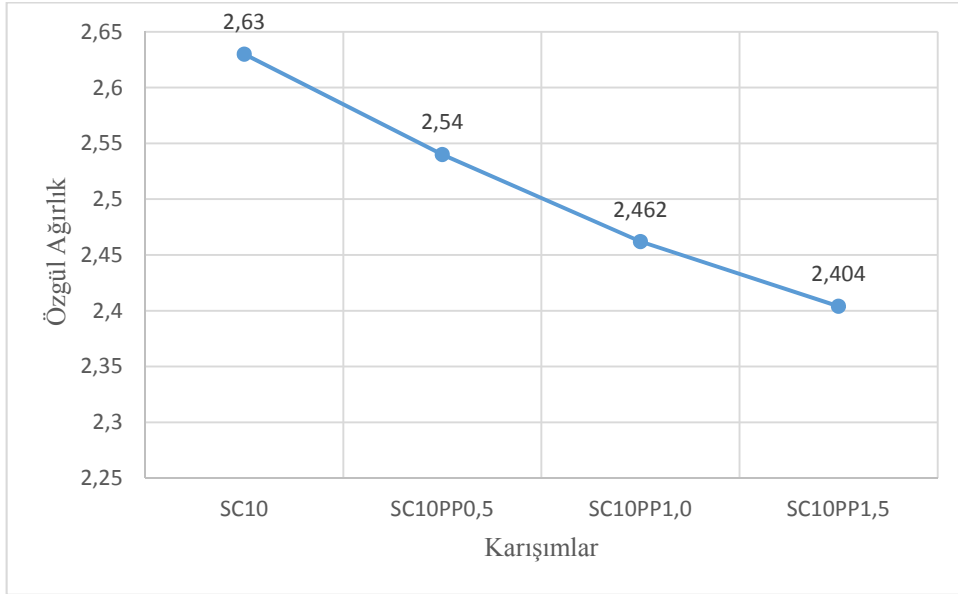
**Şekil 4.5.** Zemin + çimento katkısının özgül ağırlık değerleri



**Şekil 4.6.** Zemin + polipropilen lif katkısının özgül ağırlık değerleri



**Şekil 4.7.** Zemin + %5 çimento + polipropilen lif katkısının özgül ağırlık değerleri



**Şekil 4.8.** Zemin + %10 çimento + polipropilen lif katkısının özgül ağırlık değerleri

### 4.3. Kompaksiyon Deney Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında toplamda 12 farklı karışımın kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğini bulmak amacıyla kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Standart proktor enerjisi ile yapılan kompaksiyon deneyleri numuneler hazırlandıktan hemen sonra yapılmıştır. Doğal zemine, %5, %10 çimento, %0,5, %1,0, %1,5 polipropilen lif ve bunların birlikte ilavesiyle hazırlanan karışımların kompaksiyon değerleri TS 1900-1

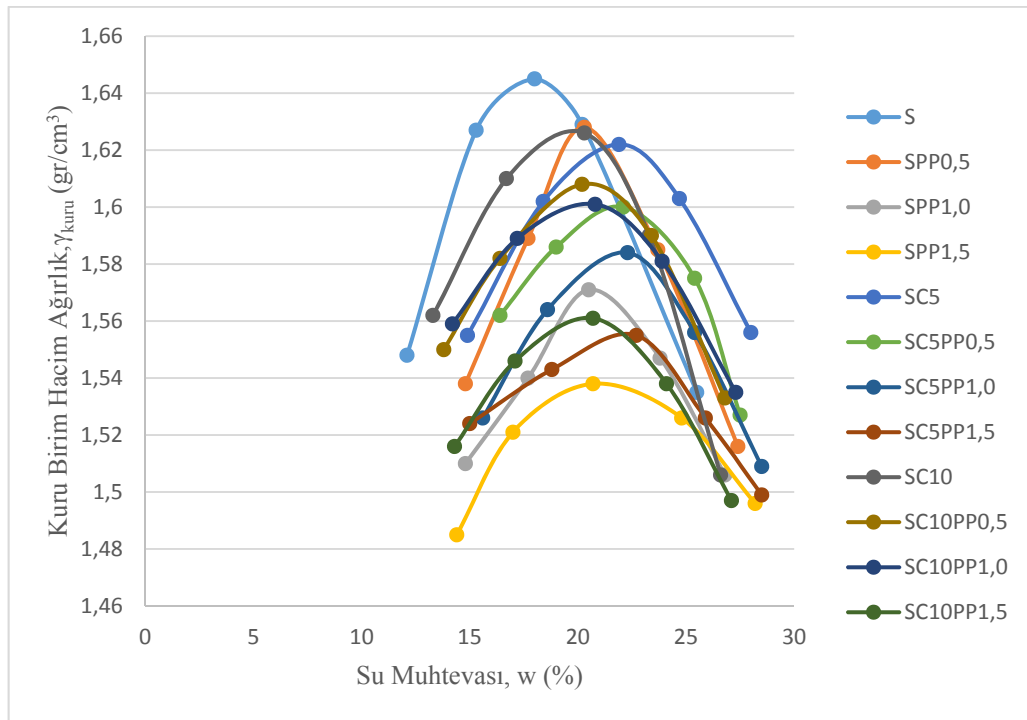
(2006) standardına uygun olarak elde edilmiştir. Bu deneylerden elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.3’de sunulmuştur. Şekil 4.9’da ise bu karışımlara ait kompaksiyon grafikleri görülmektedir.

**Çizelge 4.3.** Standart proktor deneyi sonuçları

Sıra No	Karışımlar	Optimum Su İçeriği, %	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, gr/cm <sup>3</sup>
1	S	18,0	1,645
2	SC5	21,9	1,622
3	SC10	20,3	1,626
4	SPP0,5	20,3	1,628
5	SPP1,0	20,5	1,571
6	SPP1,5	20,7	1,538
7	SC5PP0,5	22,1	1,600
8	SC5PP1,0	22,3	1,584
9	SC5PP1,5	22,7	1,555
10	SC10PP0,5	20,2	1,626
11	SC10PP1,0	20,8	1,608
12	SC10PP1,5	20,7	1,561

Doğal zemine ilk başta çimento (%5, %10) ilavesiyle başlanmıştır. Sadece çimento katılmasıyla elde edilen numunelerin (SC5, SC10) kompaksiyon deney sonuçlarına baktığımız zaman optimum su muhtevası doğal zemine göre artmış, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise azalmıştır. Optimum su muhtevasındaki artışın nedeninin, çimentonun zemine göre daha ince olması ve daha çok suya ihtiyaç duyması olduğu düşünülmüştür. Ayrıca karışımlarda malzemelerin tam homojen karıştırılamaması nedeni ile çimentolu karışımlarda kuru birim hacim ağırlığı değerlerinde düşüş olduğu düşünülmektedir.

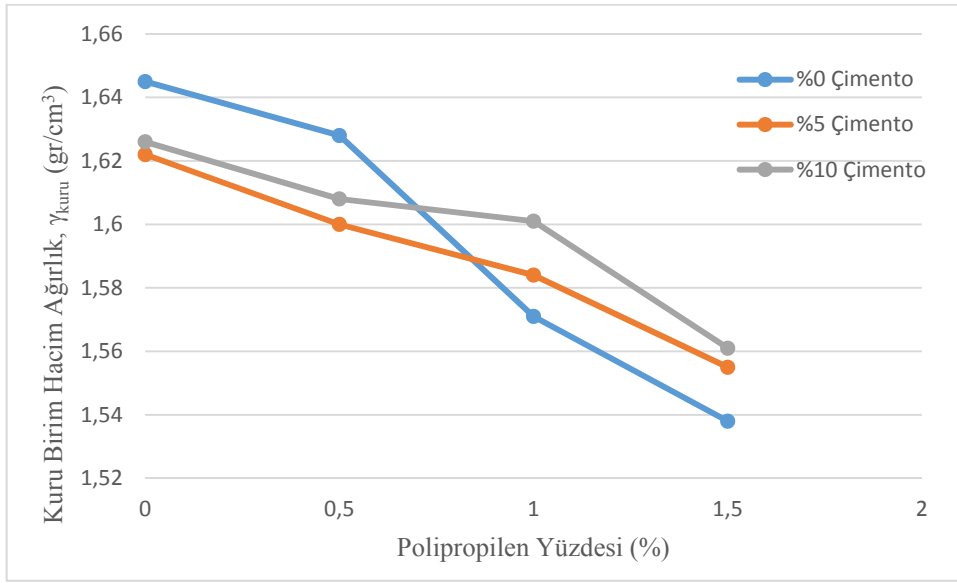
Doğal zemine sadece polipropilen lif ilavesiyle yapılan kompaksiyon deney sonuçlarına baktığımızda polipropilen lif yüzdesi arttıkça optimum su muhtevasının doğal zemine göre arttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin ise azaldığı görülmektedir. Doğal zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,645 \text{ gr/cm}^3$  iken, SPP1,5 karışımının maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,538 \text{ gr/cm}^3$  'e düşmüştür. Polipropilen lifin doğal zemine göre daha çok su çekmesi ve daha hafif bir malzeme olması, numunenin optimum su muhtevastaki artışı ve kuru birim hacim ağırlığındaki düşüşü açıklamaktadır.



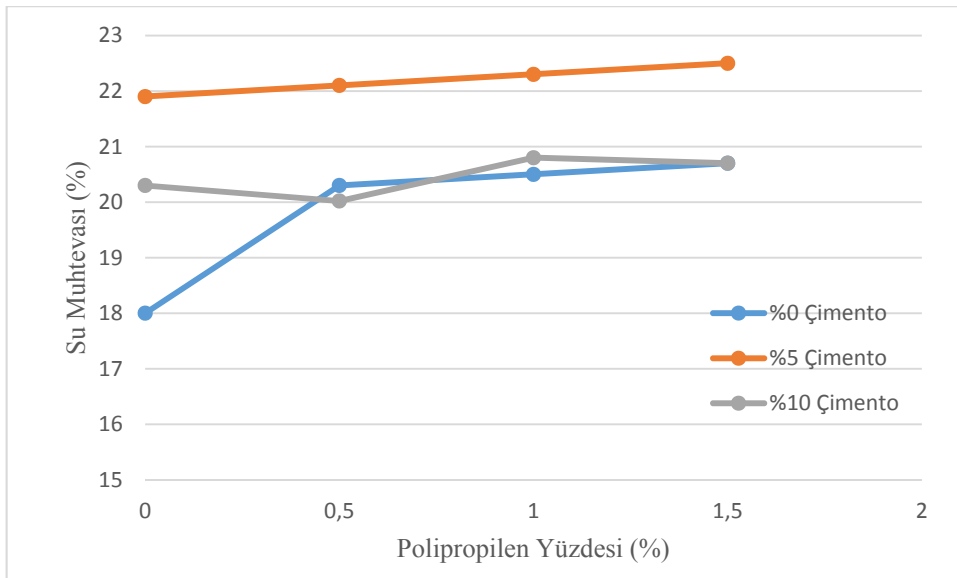
**Şekil 4.9.** Karışımların kompaksiyon grafikleri

Çimento ve polipropilen lifin zemine birlikte ilavesiyle hazırlanan karışımların kompaksiyon deney sonuçlarına baktığımız zaman yine polipropilen lif yüzdesi arttıkça kuru birim hacim ağırlık değerleri düşmüş, optimum su içeriği ise bir miktar artış göstermiştir. Çimento polipropilen lif ile birlikte kullanıldığı zaman, aynı polipropilen lif yüzdesinde çimento yüzdesi arttıkça kuru birim hacim ağırlık değeri de artış göstermiştir. Örneğin SPP1,5 karışımının kuru birim hacim ağırlığı  $1,538 \text{ gr/cm}^3$  iken bu değer, SC5PP1,5 karışımında  $1,555 \text{ gr/cm}^3$ , SC10PP1,5 karışımında  $1,561 \text{ gr/cm}^3$  değerine yükselmiştir.

Genel olarak katkıli numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri 1,538-1,628 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişim göstermiştir. En yüksek kuru birim hacim değeri doğal zeminde (1,645 gr/cm<sup>3</sup>), en düşük ise SPP1,5 karışımında (1,538 gr/cm<sup>3</sup>) görülmüştür. Optimum su içeriği değerleri ise %20,2 ile %22,7 arasında değişmiştir. En düşük optimum su içeriğine doğal zeminde (%18) rastlanmıştır. En yüksek optimum su içeriğine sahip karışım ise SC5PP1,5 karışımıdır (%22,7). Kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değişimi grafikleri sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de sunulmuştur.



**Şekil 4.10.** Karışımların kuru birim hacim ağırlık değişimleri



**Şekil 4.11.** Karışımların optimum su içeriği değişimleri

#### 4.4. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Bu çalışma kapsamında, optimum su muhtevalarında hazırlanan ve 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletilen numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Numuneler bu süre zarfında su içeriğini koruması için desikatörde bekletilmiştir. Kür süreleri sonunda su muhtevası kontrol edilmiş ve numunelerdeki su kaybının deney sonucunu etkileyecek düzeyde olmadığı görülmüştür. Doğal zemin ve katkı maddeleri eklenerek hazırlanan numunelerin serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.2’de özetlenmiştir. Deney sonuçlarına baktığımızda, genel olarak, çimento ilavesinin serbest basınç değerlerinde ciddi bir artışa neden olduğu, polipropilen lif ilavesinde ise polipropilen lif yüzdesi arttıkça serbest basınç değerinde azalma olduğu görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı SC10 karışımı 28 günlük numunesinde (35,04 kg/cm<sup>2</sup>), en düşük basınç dayanımı ise SPP1,5 karışımı 1 günlük numunesinde (1,52 kg/cm<sup>2</sup>) görülmüştür.

**Çizelge 4.4.** Serbest basınç deneyi sonuçları

Sıra No	Karışımlar	q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		
		Kür süresi		
		1 günlük	7 günlük	28 günlük
1	S	2,72	2,80	2,89
2	SC5	9,48	20,50	32,63
3	SC10	12,85	21,19	35,04
4	SPP0,5	2,05	2,14	2,16
5	SPP1,0	1,90	2,01	2,04
6	SPP1,5	1,52	1,96	1,96
7	SC5PP0,5	9,50	17,95	28,53
8	SC5PP1,0	9,09	13,56	21,27
9	SC5PP1,5	7,12	9,78	19,66
10	SC10PP0,5	11,70	20,01	31,44
11	SC10PP1,0	11,89	16,10	27,14
12	SC10PP1,5	9,65	13,91	21,07

Çizelge 4.4'deki değerler incelendiğinde doğal zemine %5 ve %10 oranında çimento eklenerek hazırlanan SC5 ve SC10 karışımlarının doğal zeminin numunesine göre basınç dayanımı değerlerinde artış olmuştur. 28 günlük SC10 karışımın serbest basınç dayanımı doğal zeminine göre yaklaşık 12 kat artış göstermiştir (Şekil 4.13). 7 ve 28 günlük kür sürelerinin basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür. Örnek olarak SC10 karışımının basınç dayanımı 7 günlük kürle yaklaşık 2 kat 28 günlük kürle ise yaklaşık 3 kat arttırmıştır. Çimentolu karışımlardan elde edilen numunelerin (SC5, SC10) deney sonunda boy kısılması azalmış, çok az deforme olmuştur ve kırılma şekilleri de gevrek bir şekilde olmuştur (Şekil 4.12).



**Şekil 4.12.** Sırasıyla S, SC5 ve SPP1,0 numunelerin kırılma şekilleri

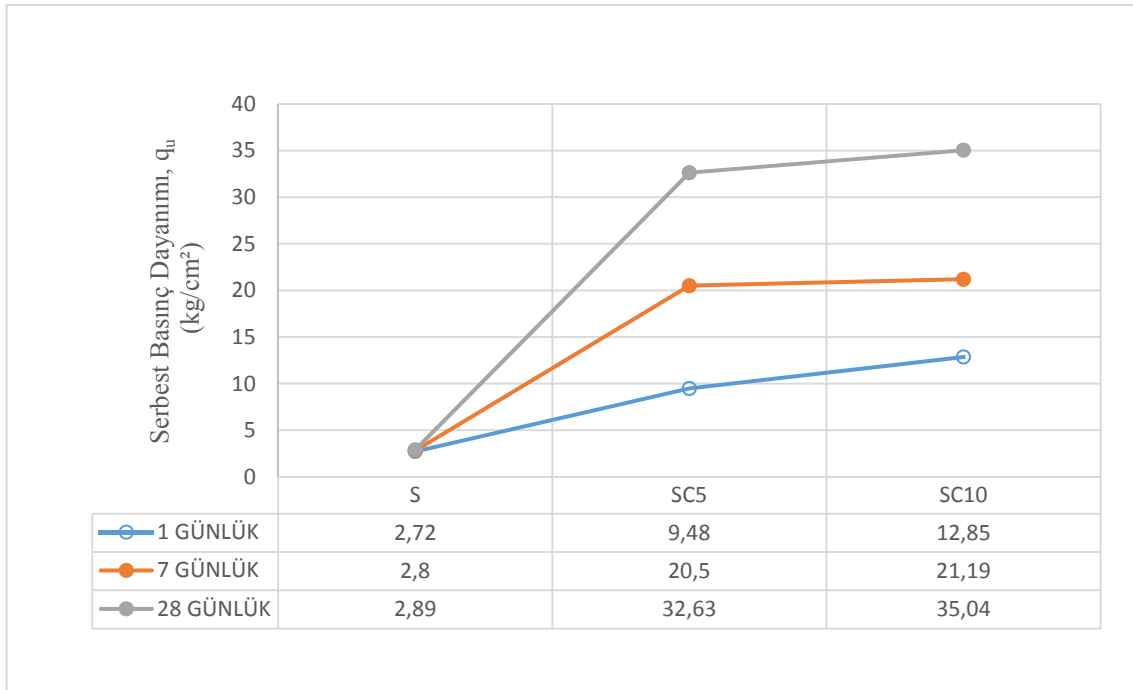
Zemine polipropilen lif katılarak hazırlanan karışımların (SPP0,5, SPP1,0 ve SPP1,5) tek eksenli basınç dayanımı değerlerine baktığımızda, doğal zeminin (S) basınç dayanımı değerlerini iyileştirmediği ve hatta bir miktar düşürdüğü görülmüştür. Polipropilen lif yüzdesi arttıkça da bu düşüş artmıştır (Şekil 4.14). Kür süresinin polipropilen lifli karışımların basınç dayanımına fazla etkisi olmamıştır. Deney sonunda boy kısılması artmış yani kırılmadan önce daha fazla deforme olmuştur.

Zemine %5 çimento ve polipropilen lifin belirlenen oranlarda eklenmesiyle hazırlanan karışımların (SC5PP0,5, SC5PP1,0, ve SC5PP1,5) basınç dayanımı değerleri doğal zemine göre artış göstermiştir. Bu artış çimento ilavesinden dolayı olmuştur. Polipropilen

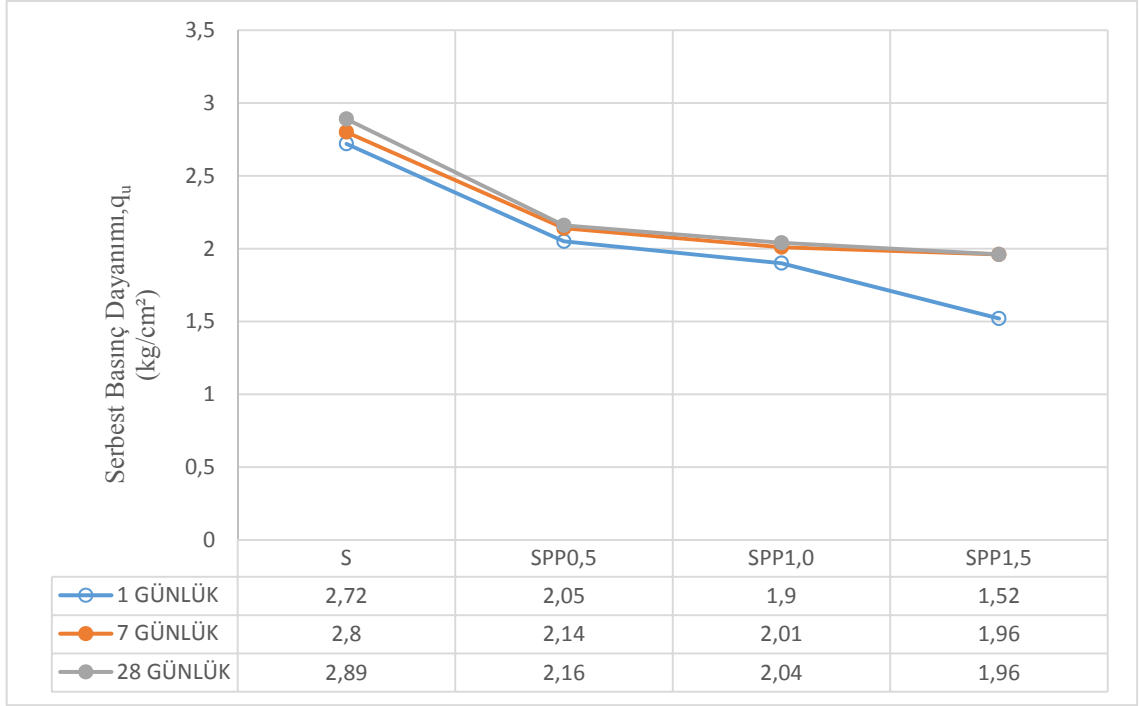


lif yüzdesi arttıkça basınç dayanımı değeri düşüş göstermiştir. Serbest basınç değerindeki düşüş 1 günlük numunelerde fazla belli olmaz iken 7 ve 28 günlük kür sonrası kırılan numunelerde daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 4.15).

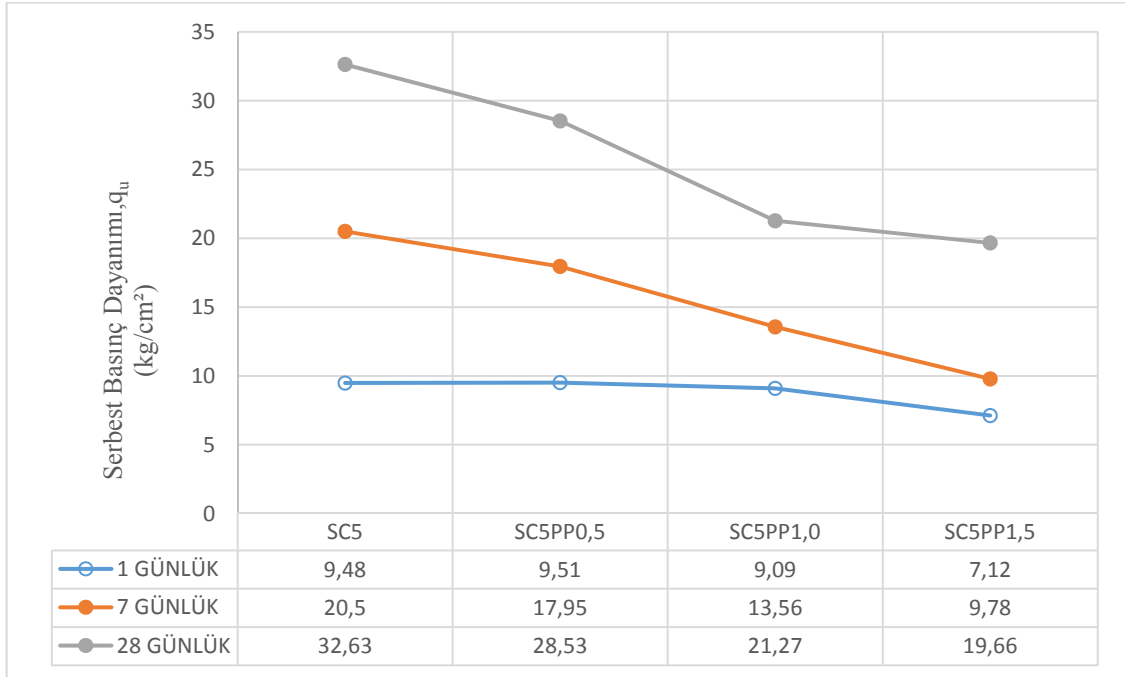
Doğal zemine %10 çimento ve polipropilen lifin belirlenen oranlarda eklenmesiyle hazırlanan karışımların (SC10PP0,5, SC10PP1,0, ve SC10PP1,5) basınç dayanımı değerleri doğal zemine göre artış göstermiştir (Şekil 4.16). Bu karışımlar, %5 çimento ve polipropilen lif eklenmesiyle hazırlanan karışımlara benzer davranış göstermiştir.



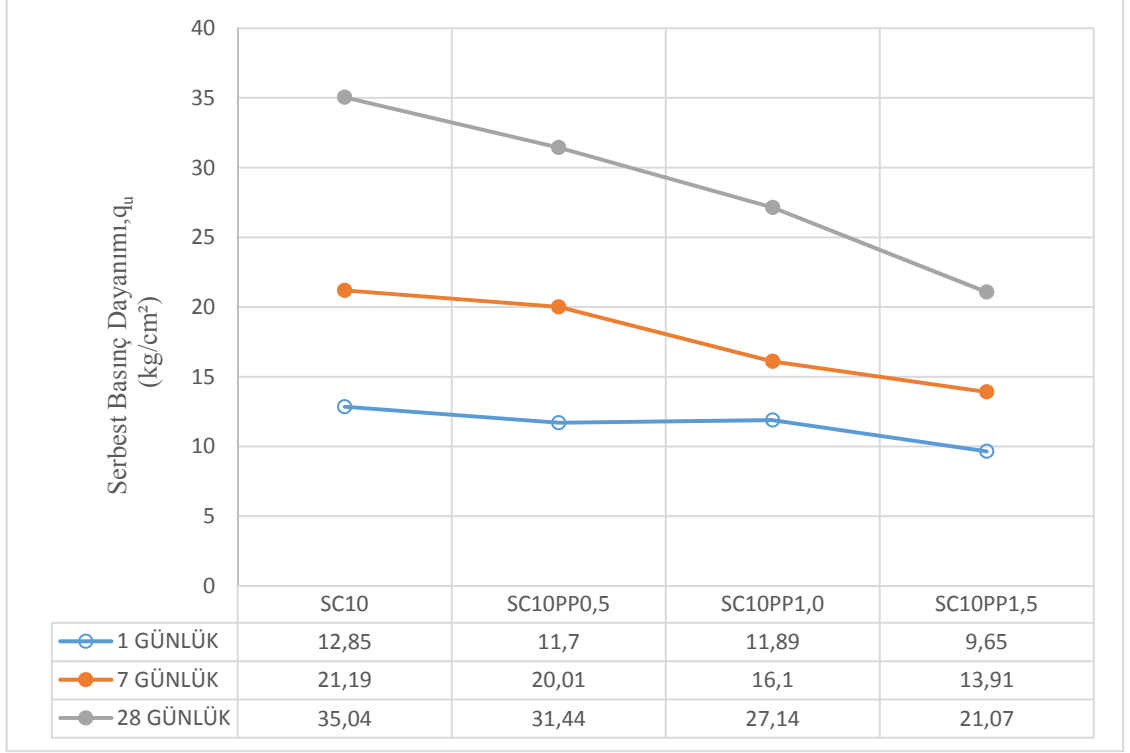
**Şekil 4.13.** Zemin + çimento katkısının serbest basınç dayanımları



Şekil 4.14. Zemin + polipropilen lif katkısının serbest basınç dayanımları



Şekil 4.15. Zemin + %5çimento + polipropilen lif katkısının serbest basınç dayanımları



**Şekil 4.16.** Zemin + %10çimento + polipropilen lif katkısının serbest basınç dayanımları

#### 4.5. Kaliforniya Taşıma Oranı, CBR Deney Sonuçları

Kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine göre hazırlanan karışım numunelerine CBR deneyi yapılmıştır. Hazırlanan numuneler 4 gün suda bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Çizelge 4.5’de gösterilmektedir.

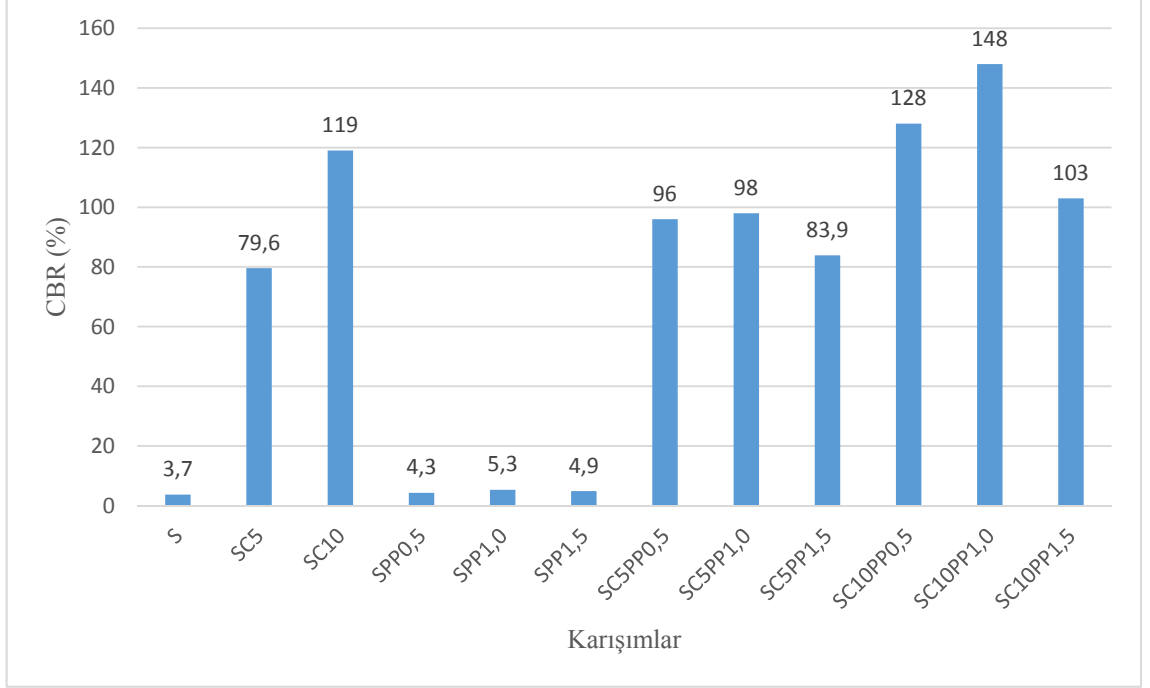
Şekil 4.17’ da görüldüğü gibi doğal zemine çimento ilavesiyle hazırlanan karışımların (SC5 ve SC10) CBR değeri doğal zemine göre artış göstermiştir. Doğal zeminin CBR değeri %3,7 iken SC5 karışımında %79,6 (21 kat), SC10 karışımında %119 (32 kat) gibi bir değer artışı olmuştur. Bütün karışımların CBR değerleri doğal zemine göre artış göstermiştir. En fazla artış ise SC10PP1,0’de (40 kat) görülmektedir.

Zemine polipropilen lif ilavesiyle hazırlanan karışımların (SPP0,5, SPP1,0 ve SPP1,5) CBR değerleri doğal zemine göre artmıştır. Polipropilen lif yüzdesi %1’de 1.43 katlık bir artış göstermiş ve pik yapmış, %1,5’de ise bir miktar düşüş göstermiştir (Şekil 4.17)

**Çizelge 4.5.** CBR deneyi sonuçları

Sıra No	Karışımlar	CBR (%)
1	S	3,7
2	SC5	79,6
3	SC10	119,0
4	SPP0,5	4,3
5	SPP1,0	5,3
6	SPP1,5	4,9
7	SC5PP0,5	96,0
8	SC5PP1,0	98,0
9	SC5PP1,5	83,9
10	SC10PP0,5	128,0
11	SC10PP1,0	148,0
12	SC10PP1,5	103,0

Belirlenen oranlarda çimento ve polipropilen lifin zemine birlikte ilavesiyle hazırlanan karışımların da CBR değerleri doğal zemine göre artmıştır. Polipropilen lif çimentoyla kullanıldığı zamanda da lif yüzdesi %1 olduğunda pik yapmıştır. Şekil 4.17’de %5 ve %10 çimento ile belirlenen oranlarda polipropilen lifin zemin ile karıştırılmasıyla hazırlanan karışımların CBR değerlerindeki değişimler de görülmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere, çimentonun eklenmesiyle olan artışa kıyasla polipropolenden dolayı olan artış minimal düzeydedir.



Şekil 4.17. Deney karışımlarının CBR değerleri

#### 4.6. Şişme Deneyi Sonuçları

Bu bölümde şişme deneylerine ait deney sonuçları sunulmaktadır. Şişme deneyleri, değişen katkı oranlarında numunelerin şişme yüzdesi etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

Doğal zemin üzerinde yapılmış olan likit limit ve plastik limit deneylerinden elde edilen verilere göre orta derece şişme değerleri elde edilmesi beklenmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre beklenen şişme değerlerine ulaşılmıştır. Doğal zeminin şişmesi %1,336 olarak belirlenmiştir. Çimento ve polipropilen lif eklendikten sonra zeminin şişmesinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** Şişme deneyi sonuçları

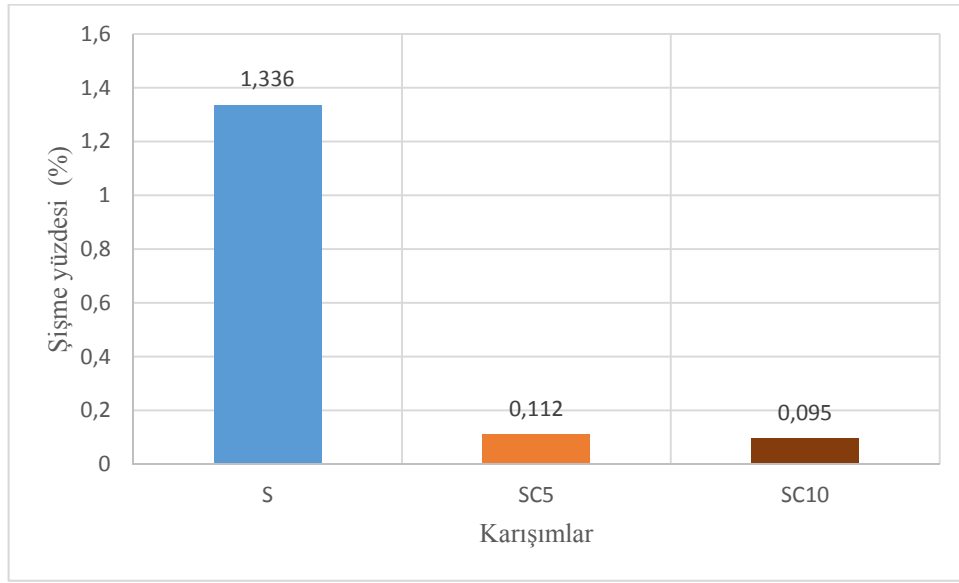
Sıra No	Karışımlar	Şişme yüzdesi (%)
1	S	1,336
2	SC5	0,112
3	SC10	0,095
4	SPP0,5	0,827
5	SPP1,0	1,043
6	SPP1,5	1,138
7	SC5PP0,5	0,060
8	SC5PP1,0	0,129
9	SC5PP1,5	0,147
10	SC10PP0,5	0,043
11	SC10PP1,0	0,086
12	SC10PP1,5	0,129

Doğal zemine çimento ilavesiyle hazırlanan karışımların şişme yüzdesi değeri büyük ölçüde düşmüştür. Doğal zeminin şişme yüzdesi %1,336 iken, %5 çimento ilavesiyle %0,112'ye, %10 çimentolu karışımda ise %0,095'e düşmüştür (Şekil 4.18).

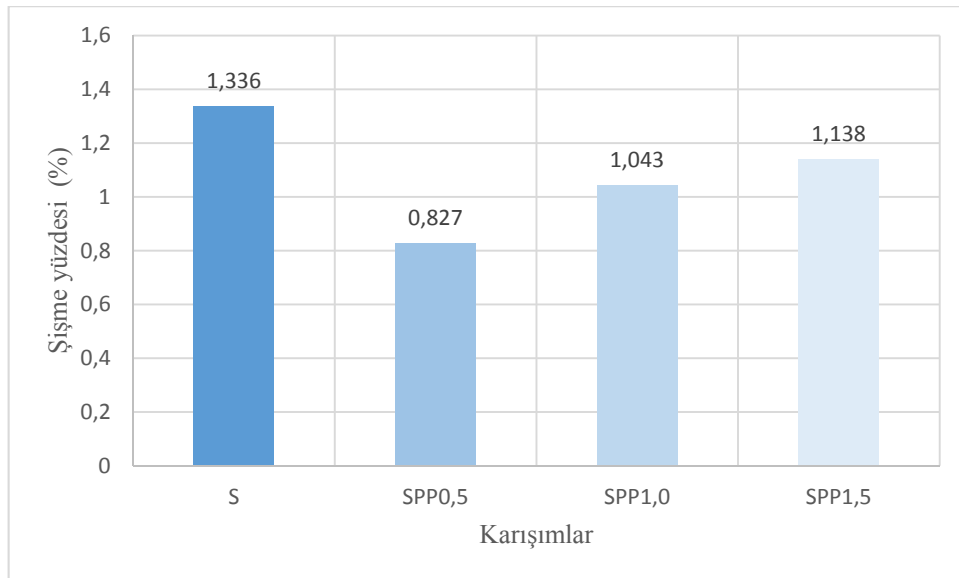
Doğal zemine polipropilen lif ilavesiyle hazırlanan karışımlarda da şişme yüzdesi doğal zemine göre düşük değerler almıştır. %0,5 polipropilen lif eklenmesiyle şişme yüzdesi, %0,827'ye düşmüş, polipropilen yüzdesi arttıkça şişme yüzdesi değerleri de artmıştır (Şekil 4.19). Çimento ve polipropilen lif birlikte kullanıldığı zaman da benzer şekilde değişim göstermiştir. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de sırasıyla %5 ve %10 çimento yüzdesi sabit tutularak farklı polipropilen lif yüzdelerinde şişme yüzdesinin değişimi gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi çimento ile birlikte %0,5 polipropilen lif eklendiği zaman şişme yüzdesi düşmüştür. Şişme değerinin lif ilavesiyle düşmesi kullanılan lifin zemini bir arada tutmasıyla olmuştur. Polipropilen lif yüzdesinin artmasıyla birlikte ise şişme yüzdesi değerlerinde de bir miktar artış görülmüştür. Lif yüzdesinin artmasıyla birlikte

şişme yüzdesindeki bir miktar artış olması, lifin karıştırması zor bir malzeme olduğu için sıkıştırma sırasında topaklaşma olmasıyla açıklanabilir.

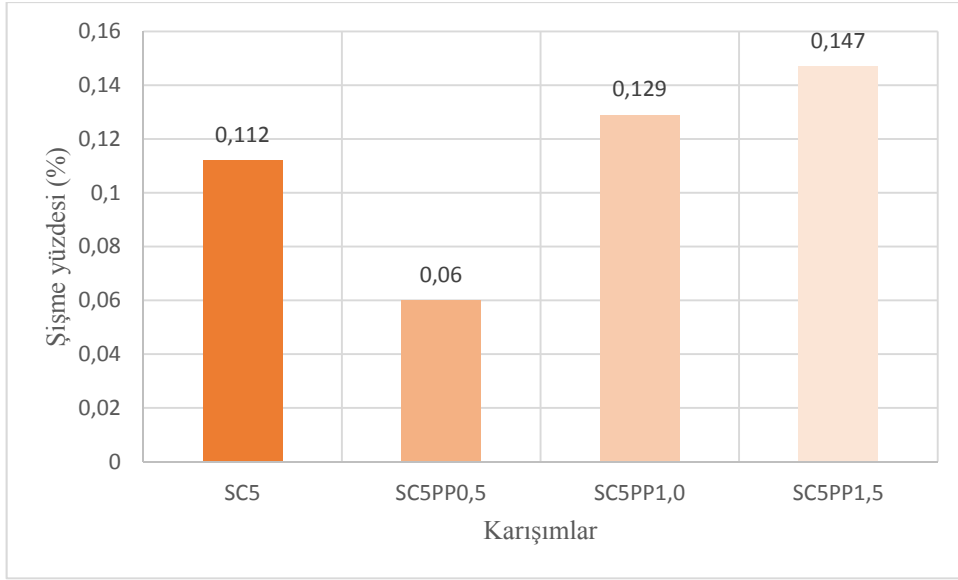
Genel olarak çimento ve polipropilen lif katkısı doğal zeminin şişme potansiyelini düşürmüştür. Bu katkıların şişme potansiyeline etkisi, plastisite karakteristiklerine etkisine benzer şekilde olmuştur. En yüksek şişme değeri doğal zeminde görülürken, en düşük şişme değeri SC10PP0,5 karışımında görülmüştür (%0,043).



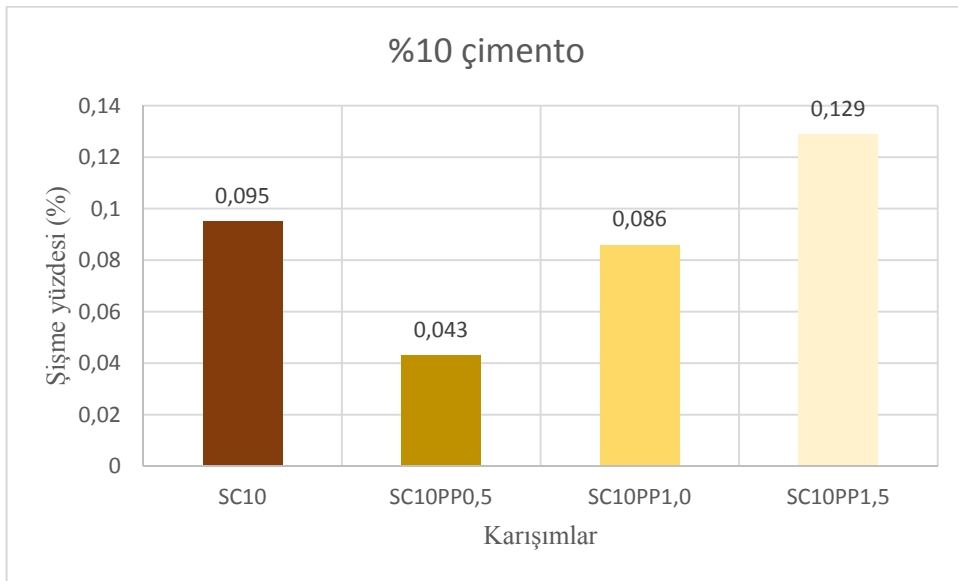
**Şekil 4.18.** Zemin + çimento katkısının şişme yüzdesi değerleri



**Şekil 4.19.** Zemin + polipropilen lif katkısının şişme yüzdesi değerleri



**Şekil 4.20.** Zemin + %5 çimento + polipropilen lif katkısının şişme yüzdesi değerleri



**Şekil 4.21.** Zemin + %10 çimento + polipropilen lif katkısının şişme yüzdesi değerleri



## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan çalışmada, çimento ile birlikte polipropilen lif katkı malzemelerinin zemin stabilizasyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla doğal zemine ağırlıkça %5, %10 çimento, %0,5, %1, %1,5 polipropilen lif ve bunların korelasyonlarının ilavesiyle 12 farklı karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlara kıvam limitleri, özgül ağırlık, serbest basınç (tek eksenli), taşıma oranının tayini (CBR) ve şişme deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Doğal zemine belirli oranlarda çimento katılarak yapılan likit limit ve plastik limit deneylerine bakıldığında likit limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş, plastik limit değerlerinde artış görülmüştür. Bu da düşük plastisiteli bir kil olan zeminimizin doğru orandaki çimento ilavesiyle birlikte daha katı bir kıvam aldığı ve işlenebilirliğinin artması demektir. Polipropilen lifin doğal zeminin kıvam limitlerine etkisine baktığımız zaman, likit limit ve plastik limit değerleri benzer şekilde %0,5 PP eklendiğinde düşmüş, daha sonra polipropilen yüzdesi arttıkça bir miktar artış göstermiştir. Bu yüzden plastisite indisi değerinde kayda değer bir değişim görülmemiştir. Genel olarak çimento doğal zemini daha katı bir hale getirmiş, zeminin davranışını da olumsuz etkilememesi adına %10'un üstüne çıkılmamıştır. Polipropilen lif ise zeminin kıvamına fazla bir etkisi olmamıştır.
- Çimento ve polipropilen lif katkısıyla hazırlanan karışımların özgül ağırlıklarına baktığımız zaman, çimento ilavesinin doğal zeminin özgül ağırlığını artırdığı, polipropilen lif ilavesi ise düşürdüğü görülmüştür. Doğal zeminin 2,53 olan özgül ağırlık değeri çimento ilavesiyle 2,63'e (SC10) yükselirken, polipropilen lif ilavesiyle 2,338'e (SPP1,5) düşmüştür.
- Yapılan kopmaksiyon deneylerinde çimento ve polipropilen lif katkısının her ikisinin de optimum su içeriği doğal zemine göre daha fazla çıkmıştır. En düşük optimum su içeriği doğal zeminde (%18) bulunmuştur. En yüksek optimum su

içeriği ise %22,7 ile SC5PP1,5 karışımında görülürken, katkılı karışımların optimum su içeriği değerleri arasında fazla fark olmamakla beraber %20,2 ile %22,7 arasında değerler almıştır. Deneylelerden bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine baktığımız zaman, bütün karışımların kuru birim hacim ağırlık değerleri doğal zemine göre daha düşük çıkmıştır. Karışımların kuru birim hacim ağırlık değerleri 1,538-1,628 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişim göstermiştir. En yüksek değer SPP0,5 karışımında, en düşük değer ise SPP1,5 karışımında görülmüştür. Polipropilen lif karıştırılan zeminlerde kuru birim hacim ağırlığındaki düşüş, lif karıştırılmasıyla zemin içinde oluşan boşluklar ve lifin özgül ağırlığının daha düşük olması ile açıklanabilir. Çimento eklenmesi ile kuru birim hacim ağırlığındaki düşüş ise zemin ve çimentonun tam homojen karışmamış olması nedeni ile olduğu düşünülmektedir.

- Serbest basınç deney sonuçlarına baktığımız zaman doğal zemine çimento ilavesiyle basınç dayanımlarında net bir artış olduğu görülmüştür. Polipropilen lif ilavesi ile ise doğal zeminin basınç dayanımında bir miktar düşüş olmuştur. Polipropilen lif yüzdesi arttıkça bu düşüş devam etmiştir. Bu düşüşe numuneler hazırlanırken sıkıştırma sırasında topaklaşma olması neden olarak görülmüştür. Polipropilen lif çimento ile birlikte kullanıldığında da lif yüzdesi arttıkça düşüş devam etmiştir. Doğal zemine sadece çimento ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, deney sonunda boy kısalması doğal zemin numunesine göre azalmış, numune çok az deforme olmuş ve gevrek bir şekilde kırılmıştır. Polipropilen lif ilavesiyle birlikte deney sonu boy kısalması artmış yani numune kırılmadan önce biraz daha fazla deforme olmuştur. En büyük basınç dayanımı SC10 karışımında görülmüştür. S, doğal zeminin 2,72 kg/cm<sup>2</sup> olan basınç dayanımı bu karışımda 35,04 kg/cm<sup>2</sup>'ye çıkmıştır. En düşük serbest basınç dayanımı ise SPP1,5 karışımında (1,52 kg/cm<sup>2</sup>) görülmüştür. Kür süresinin, çimentolu karışımların basınç dayanımlarında fazlasıyla etkili olduğu görülmüştür.
- Yapılan taşıma oranının tayini deneylerinde her iki katkı malzemesinin de zeminin CBR değerini artırdığı görülmüştür. Sadece çimento ilavesiyle hazırlanan karışımlarda bu artış daha fazla olmuştur. Öyle ki, %3,7 olan doğal zeminin CBR

değeri, SC5 karışımında %79,6 (21 kat), SC10 karışımında %119 (32 kat) gibi bir değer almıştır. Polipropilen lif ilavesi de doğal zeminin CBR değerini bir miktar artırmıştır. Bu artış %1 lif yüzdesine kadar devam etmiş ve pik yapmış, %1,5 lif yüzdesinde ise düşüş göstermiştir. En büyük CBR değeri SC10PP1,0 karışımında %148 olarak bulunmuştur. Lif eklenmesiyle CBR değerindeki artışın lifin zemini bir arada tutmaya pozitif katkısı nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

- Çimento ve polipropilen lif katkısı doğal zeminin şişme potansiyelini düşürmüştür. Bu katkıların şişme potansiyeline etkisi, plastisite karakteristiklerine etkisine benzer şekilde olmuştur. En yüksek şişme değeri doğal zeminde görülürken, en düşük şişme değeri SC10PP0,5 karışımında görülmüştür. %1,336 olan şişme yüzdesi değeri %0,043'e düşmüştür. Lif yüzdesi arttıkça şişme yüzdesindeki artışa lif yüzdesinin artmasıyla numune içinde oluşan boşlukların artmasının neden olduğu düşünülmektedir, az miktarda kullanılan lifin ise zemini birarada tutmada olumlu etkisi olmuştur. Çimento ile birlikte polipropilen lif kullanıldığı zaman daha düşük şişme değerleri elde edilmiştir. Genel olarak şişen zeminlerin iyileştirilmesinde hem çimento hem de polipropilen lifin pozitif sonuçlar verebileceği söylenebilir.

Yapılan bütün deneylerin sonucunda çimentonun doğal zeminin basınç dayanımını, CBR değeri ve şişme potansiyelini pozitif etki gösterirken, polipropilen lif CBR değeri ve şişme potansiyelini iyileştirirken, basınç dayanımı açısından iyileştirme söz konusu değildir. Bu çalışmada sonuç olarak çimentonun düşük plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği, polipropilen lifin ise tek başına zemin iyileştirmesinde fazla etkili olmamasına rağmen çimentoyla birlikte düşük yüzdelerle (iyileştirilecek zemin parametresine bağlı olarak %0,5 ile %1,0 arasında) kullanımının çimentonun etkisine pozitif yönde katkısı olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile çimento ile polipropilen lifin uyumunun iyi olduğu söylenebilir. Çalışmanın deney sayısını arttırarak, kür süresi ve katkı oranlarını değiştirerek ve katkı malzemelerinin farklı zemin türleri üzerindeki etkisini inceleyerek ileriki çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, farklı boylarda polipropilen lifler kullanılarak lif uzunluğunun etkisine, farklı özellikte çimento kullanılarak sülfat etkisine bakılabilir.

## KAYNAKLAR

- Aksoy, H.S., Yılmaz, M., Akarsu, E.E. 2008.** Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu. FÜ Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, :88-92
- Anonim, 2014.** Zemin Teknolojisi A.Ş Jet-Grout Tekniği ve Uygulamaları. <http://www.zetas.com.tr/index.php?id=224000&dil=TR->(Erişim tarihi: 20.09.2020)
- Aruntaş, H. Y. 2006.** Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Der.* 2006, 21(1): 193-203
- Aytekin, M. 2002.** Zeminlerin değirmen atığı malzeme ile stabilizasyonu. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 718-725.
- Aytekin, M., Nas, E. 1997.** Zeminlerin katkı maddeleri ile stabilizasyonu. *TMMOB İnşaat Mühendisliği Odası 14. Teknik Kongresi*, İzmir, 825-836.
- Boso, Ö. 2010.** Killerin mukavemeti üzerinde bor bileşmelerinin etkisinin araştırılması. *Y. Lisans Tezi*, İÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Can, B. 2017.** Sülfat içeriği ve sıkıştırma su muhtevasının killi zeminlerin kireç stabilizasyonuna etkisi. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Coşkun, Y. 2015.** Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirilmesinin üç eksenli basınç deneyleri kullanılarak değerlendirilmesi. *Y. Lisans Tezi*, ASÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Aksaray.
- Çakıoğlu, İ. 2007.** Yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonu. *Y. Lisans Tezi*, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.
- Çetin, A.Y. 2011.** Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Çetinkaya, M. 2012.** Polipropilen liflerin uçucu kül zemin karışımlarında geoteknik özelliklere etkisi. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Demiröz, A., Karaduman, M. 2009.** Zemin iyileştirme metotları. *Selçuk-Teknik Dergisi*,8(3): 176-191

**Etminan, E. 2012.** Soft soil stabilization using fly ash, polypropylene, copolymer and VHP. *M. Sc. Thesis*, ITU Graduate School of Science Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Istanbul.

**Erol, O., Bayram, Z. Ç., Kuruoğlu, Ö. 2016.** Vibro Sıkıştırma ve Taş Kolonlar. Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. <https://www.yukselproje.com.tr/vibro-sikistirma-ve-tas-kolonlar.html>-(Erişim tarihi: 20.09.2020).

**Fidan, D. 2016.** Killerin stabilizasyonunda doğal puzolanik katkı maddesi inceliğinin dayanım ve durabiliteye etkisi. *Y. Lisans Tezi*, BAYÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bayburt.

**Ghabaee, S. 2015.** Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

**Gücek, S. 2011.** Mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı. *Y. Lisans Tezi*, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon.

**İnan, G., Sezer, A., Ramyar, K., Yılmaz, H.R. 2005.** Değişik uçucu küllerin yüksek plastisiteli kilin serbest basınç dayanımına etkisi. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Dergisi*, 20(1): 20-25

**Kahpçılar, İ., Mardani-Aghabaglou, A., İnan Sezer, G., Sezer, A. ve Altun, S. 2015.** Çimento stabilize kilin sülfat etkisi altında dayanım ve geçirimsizlik özellikleri. *6. Geoteknik Sempozyumu*, 26-27 Kasım 2015, Çukurova Üniversitesi, Adana.

**Karaca, K. 2018.** Kimyasal stabilizasyon tekniklerinin bentonit üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Y. Lisans Tezi*, KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.

**Karaçoban, H. P. 2018.** Stabilization of dredged material of İzmir Bay soil using cement and lime mixture. *M. Sc. Thesis*. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, Department of Civil Engineering, Geotechnics Program, İzmir.

**Kılıç, G. 2008.** Çimento ile zemin stabilizasyonu. *Y. Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

**Kızılcelik, M. M. 2010.** Yüksek plastisiteli bir kilin kireç ile stabilizasyonu. *Y. Lisans Tezi*, KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.

**Kocabey, S. 2019.** Düşük plastisiteli killerin kireçle stabilizasyonunda inceliğin etkisi. *Y. Lisans Tezi*, BAYÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bayburt.

**Koç, E. 2017.** Zeminin C60B2 bitüm emülsiyonu ile stabilizasyonunu esnek üstyapı maliyetine etkileri. *Y. Lisans Tezi*, İSTE Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay.

**Mardani-Aghabaglou, A., Kalıpcılar, İ., Altun, S., İnan Sezer, G. ve Sezer, A. 2016.** Comparison of undimensional expansion levels of kaolinite stabilized with different types of cements. 2. *Uluslararası Sempozyum*, 2015, 151-160.

**Nikbakthan, B., Osanloo, M. 2009.** Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 498-505

**Öntürk, K. 2011.** Zemin iyileştirilmesinde polisaj, kireç ve uçucu külün kullanımı. *Y. Lisans Tezi*, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.

**Özen, G. 2018.** Yapılarda uygulanan zemin iyileştirme ve geoteknik çalışmalarının değerlendirilmesi. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

**Öztürk, S. 2007.** Engineering properties of kaolinite clay reinforcement with polypropylene fibers. *M. Sc. Thesis*, BÜ Graduate School of Science Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Istanbul.

**Şahan, M.Ü., 2016.** Yapım işlerinde zemin iyileştirme yöntemleri. *Uzmanlık Tezi*, İller Bankası Anonim Şirketi.

**Şengezer, L. 2010.** Granüler zeminlerin dinamik kompaksiyon uygulaması. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

**TS Standardı TS-1900-1,** İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneylemleri, Bölüm 1, Fiziksel Özelliklerin Tayini Mart 2006.

**TS Standardı TS-1900-2,** İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneylemleri, Bölüm 2, Mekanik Özelliklerin Tayini, Mart 2006.

**TS-3530 EN 933-1,** Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneylemler, Bölüm 1, Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini. Nissan 1999.

**Türköz, M. 2006.** Şişen killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik killere uygulanması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, 19(2): 76-88.

**Tüylüce, F. 2010.** Deniz killerinin kireç stabilizasyonu ile iyileştirilmesi. *Y. Lisans Tezi*, KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.

**Ünver, E. 2015.** Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi. *Y. Lisans Tezi*, ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.

**Vural, İ. 2019.** İnşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği. Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1): 1-6

**Yılmaz, Y., Sevcen, Ü. 2010.** Polipropilen lif ve uçucu kül katkılı ankara kilinin bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 133-142

**Yorulmaz, A. 2018.** Mermer toz atıkları ile stabilize edilmiş kil zemin mukavemetinin, donma-çözülme etkisi ve zamana bağlı olarak değişiminin CBR (California Taşıma Oranı) deneyleri ile değerlendirilmesi. *Y. Lisans Tezi*, NĞÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlham Şahbaz  
Doğum Yeri ve Tarihi : Saatlı (Azerbaycan), 1995  
Yabancı Dil :  
Eğitim Durumu  
Lise : Azerbaycan  
Lisans : Fırat Üniversitesi, Tek. Fak., İnş. Müh. (2013-2017)  
Yüksek Lisans :  
Çalıştığı Kurum/Kurumlar :  
İletişim (e-posta) : ilham.sahbaz001.is@gmail.com  
Yayınları :