

**T.C.**  
**BAYBURT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLLERİN KİREÇLE STABİLİZASYONUNDA**  
**İNCELİĞİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Sefa KOCABEY**

**Ocak - 2019**  
**BAYBURT**



**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLLERİN KİREÇLE STABİLİZASYONUNDA  
İNCELİĞİN ETKİSİ**

**İnş. Müh. Sefa KOCABEY**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ**

**T.C.**  
**BAYBURT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLLERİN KİREÇLE STABİLİZASYONUNDA**  
**İNCELİĞİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Sefa KOCABEY**

**2019**  
**BAYBURT**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAY SAYFASI

### DÜŞÜK PLASTİSELİ KİLLERİN KİREÇLE STABİLİZASYONUNDA İNCELİĞİN ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ danışmanlığında, İnş. Müh. Sefa KOCABEY tarafından hazırlanan bu tez çalışması 16/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Fahri Uluç ÖZBAYOĞLU

İmza :

Üye : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. Metin UÇURUM

**Enstitü Müdür V.**

Not: Bu tezde kullanılan ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bu çalışmada şahsıma ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Sefa KOCABEY

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLLERİN KİREÇLE STABİLİZASYONUNDA İNCELİĞİN ETKİSİ

Sefa KOCABEY

Bayburt Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

Zemin stabilizasyonu zayıf mühendislik özelliklerine sahip olan bir zeminin çeşitli yöntemler kullanılarak iyileştirilmesidir. Bu çalışmada, yüzeysel zemin stabilizasyonu kapsamında kireçle stabilizasyon ele alınmıştır. Laboratuvar çalışmaları Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana gayesi, katkı maddesi olan kirecin öğütülebilirliğini incelemek ve öğütülmüş kirecin dayanım ve durabiliteye olan etkisini araştırmaktır.

Çalışma 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 hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyleri için kür süreleri 1, 7, 14 ve 28 gün olarak belirlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışma neticesinde, 28 günlük kür süresinin ardından %6 kireç içeren öğütülmemiş SL6 ve öğütülmüş SGL6 numuneleri maksimum dayanım değerlerini vermişlerdir. SGL6 numuneleri SL6 numunelerine oranla %23,6 daha fazla dayanım göstermişlerdir. 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.

**2019, 107 sayfa**

**Anahtar kelimeler:** Zemin stabilizasyonu, kireç, incelik etkisi, serbest basınç dayanımı, durabilite

## **ABSTRACT**

MSc. Thesis

### **EFFECT OF FINENESS ON LIME STABILIZATION OF LOW PLASTICITY CLAYS**

Sefa KOCABEY

Bayburt University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Department of Civil Engineering  
Supervisor: Lecturer PhD. Fatih YILMAZ

Soil stabilization is the improvement of a soil with poor engineering properties using various methods. In this study, stabilization with lime was investigated within the scope of surface soil stabilization. Laboratory studies were carried out at the Soil Mechanics Laboratory of Engineering Faculty of Bayburt University. The main aim of the study is to examine the grindability of the lime, which is additive and investigate the effect of grinded lime on strength and durability.

In this study, firstly, the grindability of the lime was examined and ungrinded lime, 90% of which is below 48 microns, was reduced to less than 20 microns levels. Secondly, the test samples were prepared by adding 2%, 4%, 6%, 8% and 10% of grinded and ungrinded lime to a low plasticity clay according to the Unified Soil Classification System. Curing times for strength test were determined as 1, 7, 14 and 28 days.

As a result of the experimental study, after 28 days of curing time, the ungrinded SL6 and the grinded SGL6 samples that contained 6% of lime had maximum strength values. The SGL6 samples showed 23,6% more strength than SL6 samples. According to the results of freezing-thawing and wetting-drying durability tests, the SGL samples prepared with grinded lime showed more durable behaviour with respect to the SL samples prepared with ungrinded lime. In the light of the data obtained from the experiments, it can be concluded that fineness of the lime has a direct positive effect on the strength and durability characteristics.

**2019, 107 pages**

**Keywords:** Soil stabilization, lime, fineness effect, unconfined compressive strength, durability

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak çalıştığım bu çalışma, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Çalışmam boyunca bana her türlü yardımını esirgemedi sunan ve çalışmamı tamamlamam için gerekli bilgi ve becerileri kazanmamda çok büyük bir paya sahip olan çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecinde şahsıma maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli arkadaşlarım dostlarım ve kardeşlerime ayrı ayrı teşekkür eder; bu zorlu ve bir o kadar da güzel yolda ilerlememe destek oldukları için de ayrıca sevgi ve saygılarımı sunarım.

İnşaat mühendisi olmamda ve bu yolda kararlı adımları atmamda her türlü desteğini benden esirgemeyen 'Sen yeter ki iste ALLAH verir.' diyerek sürekli destek veren başta babam Zülküf KOCABEY ve annem Firdes KOCABEY olmak üzere; abim Zekeriya KOCABEY'e, kardeşlerim Samet ve Halil İbrahim KOCABEY'e ve yüksek lisans tezim boyunca yol arkadaşım, can yoldaşım, en büyük destekçim, biricik eşim Seda KOCABEY'e sonsuz teşekkür ederim.

Hayatımızı adadığımız geleceğimiz, canım oğlum Tuğtekin'e...

Sefa KOCABEY

Ocak/2019

## İÇİNDEKİLER

|                                            |             |
|--------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖZET.....</b>                           | <b>i</b>    |
| <b>ABSTRACT .....</b>                      | <b>ii</b>   |
| <b>TEŞEKKÜR.....</b>                       | <b>iii</b>  |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b> | <b>vii</b>  |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>               | <b>x</b>    |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>             | <b>xiii</b> |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                      | <b>1</b>    |
| 1.1 Amaçlar .....                          | 3           |
| <b>2. KAYNAK ÖZETLERİ.....</b>             | <b>5</b>    |
| 2.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri .....     | 5           |
| 2.1.1 Derin iyileştirme yöntemleri .....   | 10          |
| 2.1.1.1 Kum dren metodu .....              | 11          |
| 2.1.1.2 Plastik dren .....                 | 11          |
| 2.1.1.3 Vakumla su emme metodu.....        | 11          |
| 2.1.1.4 Önyükleme metodu.....              | 11          |
| 2.1.1.5 Vibroflotasyon yöntemi .....       | 12          |
| 2.1.1.6 Kompaksiyon kazıkları .....        | 13          |
| 2.1.1.7 Patlatma metodu .....              | 13          |
| 2.1.1.8 Dinamik kompaksiyon .....          | 14          |
| 2.1.1.9 Taş kolonlar.....                  | 15          |
| 2.1.1.10 Derin karıştırma yöntemi .....    | 17          |
| 2.1.1.11 Kireç kazıkları .....             | 19          |

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.1.12 Jet grout.....                           | 20        |
| 2.1.1.13 Elektro-osmoz.....                       | 23        |
| 2.1.1.14 Isıl işlemler.....                       | 24        |
| 2.1.1.14.1 Islatma metodu .....                   | 24        |
| 2.1.1.14.2 Dondurma metodu .....                  | 25        |
| 2.1.2 Yüzeysel iyileştirme yöntemleri.....        | 25        |
| 2.1.2.1 Katkısız stabilizasyon .....              | 26        |
| 2.1.2.1.1 Kompaksiyon yöntemi .....               | 26        |
| 2.1.2.1.2 Drenaj yöntemi .....                    | 27        |
| 2.1.2.2 Katkılı stabilizasyon .....               | 29        |
| 2.1.2.2.1 Bitüm ile iyileştirme .....             | 30        |
| 2.1.2.2.2 Uçucu kül ile iyileştirme .....         | 31        |
| 2.1.2.2.3 Çimento ile iyileştirme.....            | 33        |
| 2.1.2.2.4 Kireç ile iyileştirme .....             | 35        |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                 | <b>41</b> |
| 3.1 Materyal .....                                | 41        |
| 3.1.1 Doğal malzeme .....                         | 42        |
| 3.1.2 Kireç.....                                  | 45        |
| 3.2 Yöntemler.....                                | 46        |
| 3.2.1 Deneylerde referans alınan standartlar..... | 46        |
| 3.2.2 Kıvam limitleri .....                       | 46        |
| 3.2.3 Öğütme işlemi .....                         | 48        |
| 3.2.4 Kompaksiyon deneyi .....                    | 49        |
| 3.2.6 Serbest basınç deneyi.....                  | 50        |
| 3.2.7 Islanma-kuruma periyodu deneyi .....        | 51        |

|           |                                      |           |
|-----------|--------------------------------------|-----------|
| 3.2.8     | Donma-çözülme çevrimi.....           | 51        |
| <b>4.</b> | <b>ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>      | <b>53</b> |
| 4.1       | Deneylerden Elde Edilen Veriler..... | 53        |
| 4.1.1     | Öğütme işlemi .....                  | 53        |
| 4.1.2     | Kıvam limitleri .....                | 55        |
| 4.1.3     | Kompaksiyon.....                     | 60        |
| 4.1.4     | Serbest basınç dayanımları.....      | 63        |
| 4.1.5     | Durabilite tetkikleri.....           | 73        |
| 4.1.5.1   | Islanma-kuruma periyodu .....        | 73        |
| 4.1.5.2   | Donma-çözülme çevrimi.....           | 81        |
| <b>5.</b> | <b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>     | <b>84</b> |
|           | <b>KAYNAKLAR.....</b>                | <b>87</b> |
|           | <b>EKLER.....</b>                    | <b>95</b> |
| EK 1      | .....                                | 96        |
| EK 2      | .....                                | 102       |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                      |           |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                     |                                   |
|---------------------|-----------------------------------|
| %                   | Yüzde                             |
| A                   | Alan                              |
| Al                  | Aluminyum                         |
| Ca                  | Kalsiyum                          |
| Ca(OH) <sub>2</sub> | Kalsiyum Hidroksit                |
| CaCO <sub>3</sub>   | Kalsiyum Karbonat                 |
| CaO                 | Kalsiyum Oksit (Sönmemiş Kireç)   |
| CH                  | Yüksek Plastisiteli İnorganik Kil |
| CL                  | Düşük Plastisiteli İnorganik Kil  |
| cm                  | Santimetre                        |
| cm <sup>2</sup>     | Santimetrekare                    |
| cm <sup>3</sup>     | Santimetreküp                     |
| CO <sub>2</sub>     | Karbondiyoksit                    |
| CS <sub>2</sub>     | Karbondisülfür                    |
| dk                  | Dakika                            |
| GC                  | Killi Çakıl                       |
| GM                  | Siltli Çakıl                      |
| GP                  | Kötü Derecelenmiş Çakıl           |
| gr                  | Gram                              |
| GW                  | İyi Derecelenmiş Çakıl            |
| H <sub>2</sub> O    | Su                                |
| JG                  | Jet Grout                         |
| k                   | Geçirgenlik Katsayısı             |
| K                   | Potasyum                          |
| kg                  | Kilogram                          |

|                      |                                    |
|----------------------|------------------------------------|
| km                   | Kilometre                          |
| kPa                  | Kilopaskal ( $\text{kN/m}^2$ )     |
| LL                   | Likit Limit                        |
| lt                   | Litre                              |
| m                    | Metre                              |
| $\text{m}^2$         | Metrekare                          |
| $\text{m}^3$         | Metreküp                           |
| Mg                   | Magnezyum                          |
| MgO                  | Magnezyum Oksit                    |
| MH                   | Yüksek Plastisiteli İnorganik Silt |
| ML                   | Düşük Plastisiteli İnorganik Silt  |
| mm                   | Milimetre                          |
| Na                   | Sodyum                             |
| PI                   | Plastisite İndisi                  |
| PL                   | Plastik Limit                      |
| rpm                  | Dakikadaki Devir Sayısı            |
| S                    | Kum                                |
| s                    | Saniye                             |
| SC                   | Killi Kum                          |
| SL                   | Doğal Zemin Kireç Karışımı         |
| SM                   | Siltli Kum                         |
| SP                   | Kötü Derecelenmiş Kum              |
| SW                   | İyi Derecelenmiş Kum               |
| w                    | Su Muhtevası                       |
| $w_{\text{opt}}$     | Optimum Su Muhtevası               |
| $w_n$                | Doğal Su Muhtevası (%)             |
| $^{\circ}\text{C}$   | Santigrad Derece                   |
| $\rho_k$             | Kuru Yoğunluk                      |
| $\rho_{k\text{max}}$ | Maksimum Kuru Yoğunluk             |

## **Kısaltmalar**

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| AASHTO | Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği |
| ASCE   | Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği                     |
| ASTM   | Amerikan Test ve Malzeme Kurumu                         |
| CBR    | Kaliforniya Taşıma Oranı                                |
| FHWA   | Federal Otoyol Yönetimi (Amerika)                       |
| SGL    | Öğütülmüş Kireç Karışımlı Zemin                         |
| SL     | Normal Kireç Karışımlı Zemin                            |
| TS     | Türk Standartları                                       |
| USCS   | Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi              |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 Zemin stabilizasyon yöntemlerinin uygulanabilirliği .....                                                       | 2  |
| Şekil 1.2 Zemin stabilizasyon yöntemleri.....                                                                             | 3  |
| Şekil 2.1 Dane boyutuna göre zemin iyileştirme metotları.....                                                             | 5  |
| Şekil 2.2 Vibroflotasyon metod.....                                                                                       | 12 |
| Şekil 2.3 Dinamik kompaksiyon .....                                                                                       | 15 |
| Şekil 2.4 Taş kolon yapımı.....                                                                                           | 16 |
| Şekil 2.5 Derin karıştırma yöntemi, burgulu ve kanatlı karıştırıcı .....                                                  | 17 |
| Şekil 2.6 Derin karıştırma yönteminin farklı uygulamaları .....                                                           | 18 |
| Şekil 2.7 Derin karıştırma uygulama şekilleri.....                                                                        | 18 |
| Şekil 2.8 Derin karıştırmada önerilen farklı yöntemler .....                                                              | 19 |
| Şekil 2.9 Jet grout metodunun imalat aşamaları: A- Delme, B-Püskürtme, C-Kolon<br>şeklinin oluşması ve D-Tamamlanma ..... | 21 |
| Şekil 2.10 Killerde elektro-osmoz.....                                                                                    | 24 |
| Şekil 2.11 Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet<br>artışı .....                        | 39 |
| Şekil 3.1 Doğal malzemenin alındığı Demirözü ilçesinin konumu.....                                                        | 42 |
| Şekil 3.2 Mastersizer Hydro 3000 lazer kırınım cihazı .....                                                               | 44 |
| Şekil 3.3 Doğal malzemenin dane boyutu dağılım eğrisi .....                                                               | 44 |
| Şekil 3.4 Söndürülmüş kalker kireci tane dağılım.....                                                                     | 45 |
| Şekil 3.5 Düşen koni penetrasyon cihazı ve etüve koyulan numuneler .....                                                  | 47 |
| Şekil 3.6 Retsch marka PM 200 modeli bilyeli öğütücü .....                                                                | 48 |
| Şekil 3.7 Standart proktor deneyi yapım aşamaları.....                                                                    | 49 |
| Şekil 3.8 Tek eksenli serbest basınç deneyi yapım aşamaları.....                                                          | 50 |
| Şekil 3.9 Islanma-kuruma periyodu deneyi .....                                                                            | 51 |
| Şekil 3.10 Havada donma-çözülme cihazı ve donma-çözülme deney düzeneği.....                                               | 52 |
| Şekil 4.1 SL karışımlarına ait likit limit değerleri.....                                                                 | 57 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.2 SGL karışımlarına ait likit limit değerleri .....                         | 57 |
| Şekil 4.3 SL karışımlarına ait plastik limit değerleri .....                        | 58 |
| Şekil 4.4 SGL karışımlarına ait plastik limit değerleri .....                       | 58 |
| Şekil 4.5 SL karışımlarına ait plastisite indisi değerleri .....                    | 59 |
| Şekil 4.6 SGL karışımlarına ait plastisite indisi değerleri .....                   | 59 |
| Şekil 4.7 SL karışımlarına ait optimum su içerikleri .....                          | 61 |
| Şekil 4.8 SGL karışımlarına ait optimum su içerikleri .....                         | 61 |
| Şekil 4.9 SL karışımlarına ait maksimum kuru yoğunluk değerleri .....               | 62 |
| Şekil 4.10 SGL karışımlarına ait maksimum kuru yoğunluk değerleri .....             | 62 |
| Şekil 4.11 Serbest basınç dayanımı deneyi numune örnekleri .....                    | 63 |
| Şekil 4.12 Numunelerin desikatörde kür edilmesi .....                               | 63 |
| Şekil 4.13 Numunelerin hazırlanma aşamaları .....                                   | 64 |
| Şekil 4.14 Tek eksenli serbest basınç dayanım testi .....                           | 65 |
| Şekil 4.15 SL karışımının 1 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi .....   | 67 |
| Şekil 4.16 SGL karışımının 1 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi .....  | 67 |
| Şekil 4.17 SL karışımının 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi .....   | 68 |
| Şekil 4.18 SGL karışımının 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi .....  | 68 |
| Şekil 4.19 SL karışımının 14 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi .....  | 69 |
| Şekil 4.20 SGL karışımının 14 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi ..... | 69 |
| Şekil 4.21 SL karışımının 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi .....  | 70 |
| Şekil 4.22 SGL karışımının 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi ..... | 70 |
| Şekil 4.23 SGL ve SL karışımlarının 1. gün serbest basınç dayanımı değerleri .....  | 71 |
| Şekil 4.24 SGL ve SL karışımlarının 7. gün serbest basınç dayanımı değerleri .....  | 71 |
| Şekil 4.25 SGL ve SL karışımlarının 14. gün serbest basınç dayanımı değerleri ..... | 72 |
| Şekil 4.26 SGL ve SL karışımlarının 28. gün serbest basınç dayanımı değerleri ..... | 72 |
| Şekil 4.27 SGL ve SL karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundan görüntüler .....    | 73 |
| Şekil 4.28 SL2 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi .....    | 75 |
| Şekil 4.29 SL4 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi .....    | 76 |
| Şekil 4.30 SL6 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi .....    | 76 |

|                   |                                                                                                  |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.31</b> | SL8 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi.....                             | 77 |
| <b>Şekil 4.32</b> | SL10 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi.....                            | 77 |
| <b>Şekil 4.33</b> | SGL2 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi .....                           | 78 |
| <b>Şekil 4.34</b> | SL4 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi.....                             | 78 |
| <b>Şekil 4.35</b> | SGL6 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi .....                           | 79 |
| <b>Şekil 4.36</b> | SGL8 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi .....                           | 79 |
| <b>Şekil 4.37</b> | SGL10 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi ....                           | 80 |
| <b>Şekil 4.38</b> | SL ve SGL karışımların ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi.....                      | 80 |
| <b>Şekil 4.39</b> | SL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.....      | 82 |
| <b>Şekil 4.40</b> | SGL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları.....     | 82 |
| <b>Şekil 4.41</b> | SL ve SGL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç değişimi... .. | 83 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 Zemin cinslerine göre zemin stabilizasyon yöntemleri .....             | 7  |
| Çizelge 2.2 Zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımı . | 8  |
| Çizelge 2.3 Zemin iyileştirme teknikleri ve kullanılma amaçları .....              | 9  |
| Çizelge 2.4 Zemin stabilizasyonunda yaklaşık maliyet tablosu.....                  | 10 |
| Çizelge 2.5 Jet grout yöntemi imalat parametreleri.....                            | 21 |
| Çizelge 2.6 Jet grout sistemleri karşılaştırma tablosu .....                       | 22 |
| Çizelge 2.7 Sıkıştırma gereçlerinin genel karakteristik özellikleri .....          | 27 |
| Çizelge 2.8 Kimyasal stabilizasyonda katkı seçimi için rehber .....                | 29 |
| Çizelge 2.9 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....                               | 32 |
| Çizelge 2.10 Uçucu küllerin sağlaması gereken fiziksel değerler.....               | 32 |
| Çizelge 2.11 Farklı zemin sınıflarına göre çimento miktarı .....                   | 34 |
| Çizelge 2.12 Kireç ve çimento stabilizasyonunda durabilite kriterleri.....         | 35 |
| Çizelge 2.13 Kalsiyum kirecinin bileşimi.....                                      | 36 |
| Çizelge 2.14 Zemin cinsine göre stabilizasyonda kullanılan optimum kireç miktarı.  | 38 |
| Çizelge 2.15 Farklı zemin çeşitleri için yaklaşık kireç miktarı.....               | 38 |
| Çizelge 2.16 Önerilen kireç karışım oranları .....                                 | 39 |
| Çizelge 3.1 Deney numunelerine ait notasyon bilgileri.....                         | 41 |
| Çizelge 3.2 Doğal malzemenin özellikleri .....                                     | 43 |
| Çizelge 3.3 Söndürülmüş kalker kirecine ait fiziksel ve kimyasal özellikler .....  | 45 |
| Çizelge 3.4 Deneyler ve standartları.....                                          | 46 |
| Çizelge 4.1 Öğütme işlemi sonucu elde edilen veriler .....                         | 54 |
| Çizelge 4.2 Deney numunelerinin kıvam limitleri .....                              | 55 |
| Çizelge 4.3 SL ve SGL karışımlarına ait kompaksiyon parametreleri .....            | 60 |
| Çizelge 4.4 SL karışımlarına ait serbest basınç dayanımı deney sonuçları .....     | 65 |
| Çizelge 4.5 SGL karışımlarına ait serbest basınç dayanımı deney sonuçları .....    | 65 |
| Çizelge 4.6 Islanma-kuruma periyodu deney sonuçları .....                          | 74 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 4.7</b> Islanma-kuruma periyodu deneyi kütle kaybı yüzdeleri .....                                           | 75 |
| <b>Çizelge 4.8</b> SL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları .....  | 81 |
| <b>Çizelge 4.9</b> SGL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları ..... | 81 |



## 1. GİRİŞ

Türk dil kurumunda taban, döşeme, yer, yeryüzü, dünya anlamına gelen zemin, inşaat mühendisliğinde kayaların mekanik ve kimyasal ayrışması sonucunda oluşan katı danelerle bunların arasındaki su ve/veya hava dolu boşluklardan meydana gelen, değişen orijinlere sahip, yer kürenin dış kabuğunu oluşturan, içinde organik maddeler içerebilen doğal malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Tunç, 2002).

Mühendislik açısından önemli olan zemin bazen istenilen özellikte ve nitelikte olmayabilir. Yapılması düşünülen yapı için elverişsiz olabilir. Eğer zemin elverişsiz ise (aktif kil, çakıl, gevşek kum, yumuşak kil, turbalık ve bataklık zeminler, vs...) 4 farklı şekilde çözüm üretilebilir:

- Yapılacak yapıyı iyileştirilmemiş zemine göre projelendirmek veya yapının yerini değiştirmek.
- Zayıf zemini taşıma gücü daha yüksek bir zemin ile değiştirmek.
- Zayıf zemini geçerek temeli sağlam tabakaya inşa etmek.
- Zemini iyileştirmek.

Zemin stabilizasyonu (modifikasyon, iyileştirme, ıslah vb.) zeminin mühendislik özelliklerini belirli yöntemlerle iyileştirme işlemine verilen genel bir addır. Diğer bir deyişle zemin stabilizasyonu amaçlanan herhangi bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak zeminlerin belirli özelliklerinin farklı kimyasal, fiziksel ya da biyolojik yöntemler kullanarak iyileştirilmesidir (Özaydın, 2012).

Stabilizasyondaki temel amaç zemini istediğimiz özelliklere kavuşturmadır. Yapılan işin niteliğine göre beklenen oturma miktarlarını düşürmek, beklenen deformasyonları azaltmak, geçirimsizliği azaltmak, sızıntı suyu kontrolü yapmak ve taşıma gücünü artırmak stabilizasyonun başlıca hedefleridir (Uzuner 2000).

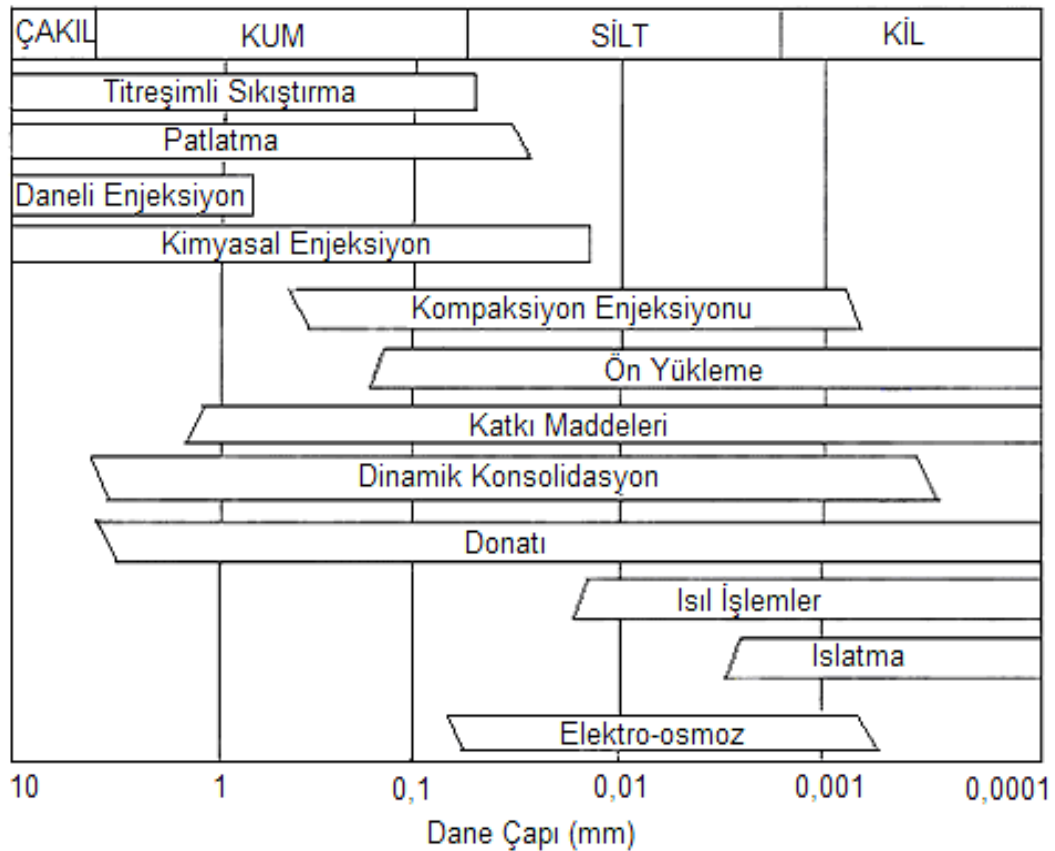
Bunların yanı sıra yarma ve dolguların stabilitesini arttırmak, kayma dayanımını artırmak, istinat duvarlarını desteklemek, zeminin sıvılaşma kapasitesini düşürmek,

şişme ve büzülme potansiyelini kontrol altına almak ve sıkışabilirliği azaltmak için zemin iyileştirilmesine başvurulabilir.

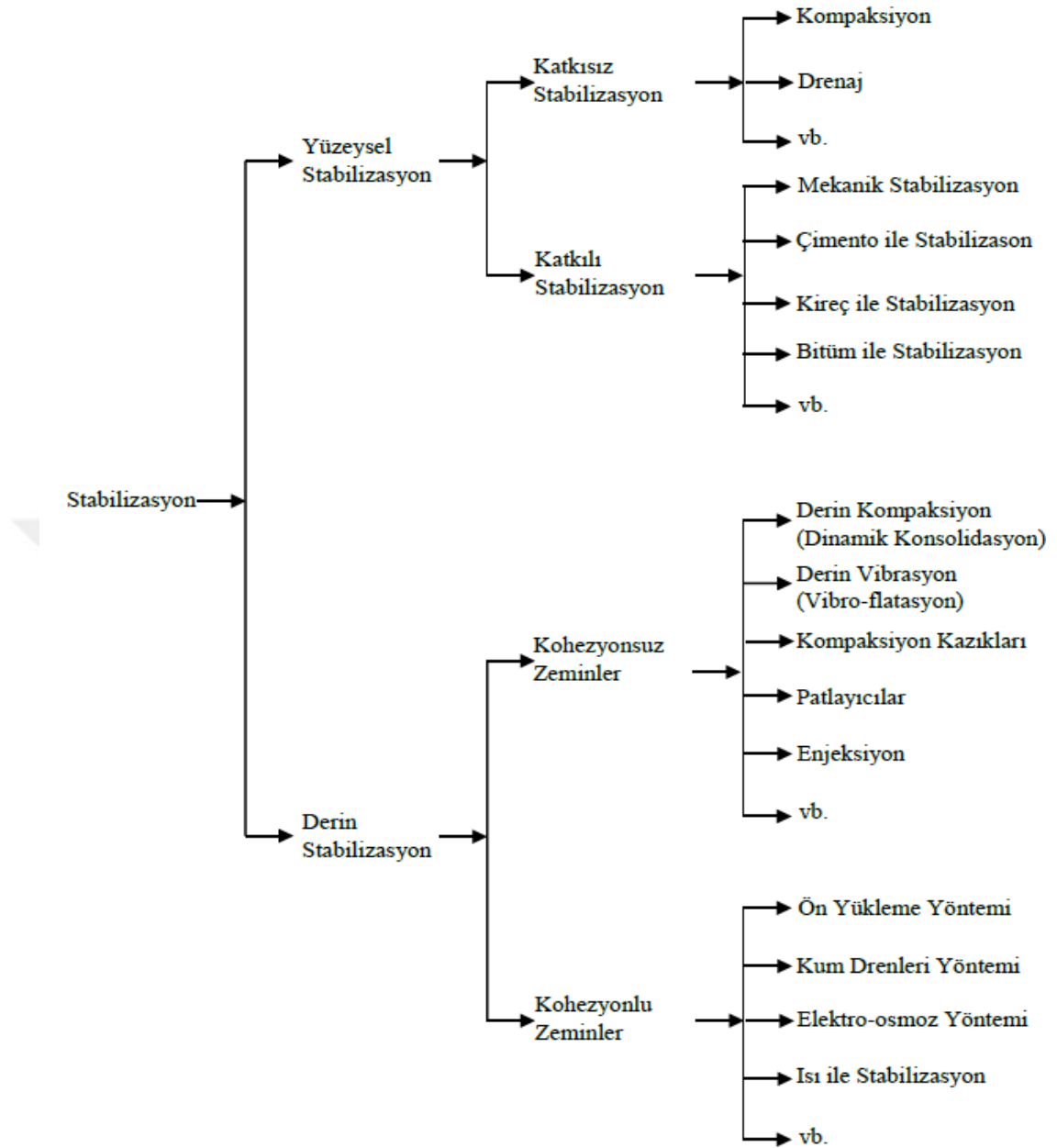
Zemin stabilizasyon yöntemleri üç ana gruba ayrılır.

- Katkı maddeleriyle zemini kalıcı olarak iyileştirme (çimento, kireç, bitüm, uçucu kül gibi katkılar ile zeminin homojen olarak karıştırılması, zeminin değiştirilmesi, kireç kazıkları, geotekstil ile iyileştirme vs.)
- Katkı maddeleri kullanmadan zemini kalıcı olarak iyileştirme (vibro-kompaksiyon, dinamik konsolidasyon, yüzey kompaksiyonu vs.)
- Zeminin geçici olarak iyileştirilmesi (ısıt işlemler, yer altı su seviyesinin düşürülmesi ve elektro-osmoz)

Zemin stabilizasyon yöntemlerinin uygulanabilirliği ve bu yöntemlerin sınıflandırılması Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 1.1 Zemin Stabilizasyon Yöntemlerinin Uygulanabilirliği (Yıldırım, 2002)



Şekil 1.2 Zemin stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013)

## 1.1 Amaçlar

Bu çalışmanın ana gayesi; zemin iyileştirmede sıkça kullanılan kirecin, inceltilebilirliğinin incelenmesi ve inceliğin dayanım, indeks ve durabilite değerleri üzerinde nasıl sonuçlar oluşturabileceğinin araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında öncelikli olarak kirecin optimum inceliği araştırılmıştır ve bir aralık belirlenmiştir.

Belirlenen aralıktaki inceltile kireç ve 40 No'lu elekten elenmiş doğal zemin belirli oranlarda karıştırılarak çalışmanın amacına uygun olan gerekli tüm deneyler yapılmıştır.

Deneyler için hazırlanan numunelere 1, 7, 14 ve 28 günlük kürler uygulanmıştır. Sonrasında tek eksenli serbest basınç deneyi uygulanarak katılan kirecin incelikle birlikte hangi oranlarda daha iyi sonuçlar verdiği araştırılmıştır.

Hazırlanan numunelere ıslanma-kuruma ve donma-çözölme deneyleri uygulanarak durabilite tetkikleri yapılmıştır.

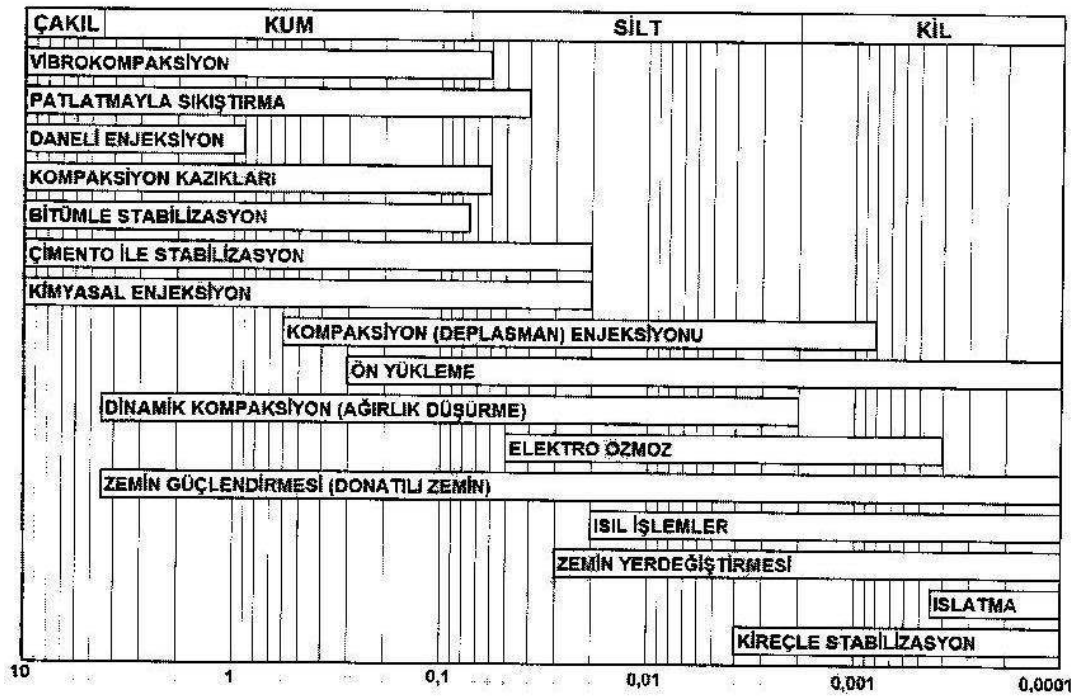


## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Zemin iyileştirme yöntemleri ve bu yöntemlere ilişkin bilgiler, örnekler ve araştırmalar bu bölümde yazılmıştır.

### 2.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zeminin iyileştirilmesindeki ana ilke, zeminde var olan boşlukların azaltılması, zemindeki boşlukların bazı karışımlarla doldurulması, zemindeki su miktarının azaltılması veya zeminin güçlendirilmesidir (Sağlam, 1985). Dane boyutuna göre zemin iyileştirme metotları Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Dane boyutuna göre zemin iyileştirme metotları (Sağlam, 1985)

Zeminlerin yetersiz taşıma gücüne sahip olması, farklı oturmalar yapması, yanal ya da dikey yükler altında taşıma gücü kaybı, sıvılaşma ya da aşırı yer değiştirmeye sahip

olmasının yanı sıra temel kazısı ya da dolgularıyla ilgili problemler, şevlerin duraysızlığı, kazı sırasında veya sonrasında olabilecek kabarmalar ve problemlili zeminlerin varlığı (çöken, şişen, organik, karstik vb. zeminler) zeminlerin iyileştirilmesinin gerekli olduğu başlıca hallerdir.

Van Impe (1989), iyileştirme yöntemlerinde farklı bir gruplandırmaya giderek bu yöntemleri üç grupta toplamıştır. Bunlar, geçici etkiye sahip kozmetik yöntemler, kalıcı etkiye sahip, hiçbir katkı kullanılmaksızın uygulanan yöntemler ve katkı maddeleri kullanılarak gerçekleştirilen kalıcı etkili yöntemlerdir.

Zemin stabilizasyonunda genel olarak kimyasal ve mekanik iyileştirme yöntemleri kullanılır. Mekanik stabilizasyon zeminlerin hidrolik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin fiziksel işlemlerle değiştirilmesidir. İyileştirilmesi gereken zeminin kazılması, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve tekrar yerine yerleştirilmesi aşamalarını içermektedir (Edil vd, 2002). Bu yöntemde zemin yolda, sabit veya hareketli bir plentte ya da malzeme ocağında karıştırılır ve karışım yola serilerek kontrollü bir şekilde sıkıştırılır (Çalık, 2012). Mekanik stabilizasyondaki amaç gradasyonun düzenlenmesi, likit limitin veya plastisite indisinin azaltılması, kapilaritenin düşürülmesi, ve dayanım ve durabilitenin arttırılmasıdır (Winterkorn ve Fang, 1975). Kimyasal stabilizasyon ise zemine katılan katkılar vasıtasıyla zemin ile katkı arasında reaksiyon yaptırılıp zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi işlemidir (Lambe vd, 1990). Bunların yanı sıra bazı durumlarda elektriksel ve termal stabilizasyon yöntemleri de kullanılabilir.

Geoteknik mühendisliği açısından zemin iyileştirme tekniği olarak seçilen yöntem ne olursa olsun, çalışma sahasında standart ve koni penetrasyon deneyleri yapılarak elde edilen sonuçların kontrol edilmesi son derece önemlidir. Elde edilen veriler yeterli olmadığı takdirde, farklı biçimlerde iyileştirme yöntemleri uygulanarak istenilen özellikler elde edilinceye kadar tekrar edilmelidir (Kayabalı, 2010).

İyileştirme çalışmaları zemin cinslerine ve amacına göre farklılıklar arz eder. Çizelge 2.1’de zemin cinslerine göre zemin stabilizasyon yöntemleri (Hunt, 1986; 1994) ve Çizelge 2.2’de zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımları verilmiştir (U. S. Army Corps. of Eng., 2003).

**Çizelge 2.1** Zemin cinslerine göre zemin stabilizasyon yöntemleri (Hunt 1986; 1994)

| Zemin cinsleri           |          | Stabilizasyon yöntemleri                                                                                          |
|--------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çeşitli dolgular         | Sığ      | Kazı/Geri dolgu                                                                                                   |
|                          | Derin    | Dinamik kompaksiyon, kum kolonlar                                                                                 |
| Organik zeminler         | Sığ      | Kazı/Geri dolgu, geotekstil                                                                                       |
|                          | Derin    | Sürşarj, geotekstil, kum kolonlar                                                                                 |
|                          | Tabakalı | Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar, taş kolonlar               |
| Yumuşak killer           | Sığ      | Kazı/Geri dolgu, geotekstil                                                                                       |
|                          | Derin    | Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar                                                                      |
|                          | Tabakalı | Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar                                    |
| Killer                   |          | Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal(dondurma), elektro-osmoz, geosentetik, drenaj                 |
| Gevşek siltler           | Sığ      | Kazı/Geri dolgu, tuz katkısı                                                                                      |
|                          | Derin    | Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonlar, elektro-osmoz, vakum kuyuları                                         |
| Gevşek kumlar            | Sığ      | Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon                                                            |
|                          | Derin    | Vibroflasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma) |
| Sıvılaşılabilen zeminler |          | Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj                                                             |
| Şişen zeminler           |          | Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento, uçucu kül, tuz, kimyasal katkıları                                         |
| Çatlaklı kayalar         |          | Enjeksiyon, ankraj, püskürtme beton, yüzey altı yatay drenaj                                                      |

**Çizelge 2.2** Zemin iyileştirme yöntemlerinin stabilizasyon amacına göre kullanımı  
(U. S. Army Corps. of Eng., 2003)

| Amaçlar                                                                                                                           | Stabilizasyon Yöntemleri                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sıvılaşma direncini artırmak,<br>Deplasmanları azaltmak.                                                                          | Vibrokompaksiyon<br>Taş kolonlar<br>Derin dinamik kompaksiyon<br>Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon<br>Çakıl kolonlar<br>Jet grout<br>Kompaksiyon enjeksiyonu<br>Granüler kolonlar (kum ve çakıl) |
| Farklı oturmaya maruz kalabilecek yapıların zeminlerini ıslah etmek.<br>Farklı oturma, deformasyon ve kırılma direncini artırmak. | Kompaksiyon enjeksiyonu<br>Mini kazıklar<br>Jet grout                                                                                                                                            |
| Ani oturmaları azaltmak.                                                                                                          | Vibrokompaksiyon<br>Derin dinamik kompaksiyon<br>Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon<br>Jet grout<br>Kompaksiyon enjeksiyonu<br>Granüler kolonlar (kum ve çakıl)                                   |
| Şişen zeminleri ıslah etmek.                                                                                                      | Çimento stabilizasyonu<br>Kireç stabilizasyonu<br>Drenaj<br>Mekanik stabilizasyon                                                                                                                |
| Şev stabilitesini artırmak.                                                                                                       | Çakıl drenler<br>Payanda dolgusu<br>Granüler kolonlar (kum ve çakıl)<br>Kompaksiyon enjeksiyonu<br>Zemin çivi ve vidaları<br>Jet grout                                                           |
| Konsolidasyon oturması oranını artırmak.                                                                                          | Sürsarj dolgulu veya dolgusuz yüzey drenler<br>Granüler kolonlar (kum ve çakıl)                                                                                                                  |
| Konsolidasyon oturmalarını azaltmak.                                                                                              | Sürsarj (Ön yükleme)<br>Jetgrout<br>Taş kolonlar<br>Kompaksiyon enjeksiyonu<br>Elektro-osmoz                                                                                                     |
| Sızıntı yollarını kapamak ve / veya su akımı doğrultusundaki borulanmayı azaltmak.                                                | Penetrasyon enjeksiyonu<br>Kompaksiyon enjeksiyonu                                                                                                                                               |
| Erozyon direncini artırmak.                                                                                                       | Mekanik stabilizasyon<br>Bioteknik stabilizasyon<br>Kompaksiyon                                                                                                                                  |
| Çatlaklardan ve bileşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek.                                                                    | Kompaksiyon enjeksiyonu                                                                                                                                                                          |
| Göçen zeminleri ıslah etmek.                                                                                                      | Derin dinamik kompaksiyon<br>Enjeksiyon<br>Vibrokompaksiyon                                                                                                                                      |

Zemin türüne ve iyileştirme amaçlarına göre uygulama stabilizasyon yöntemleri Çizelge 2.3 yardımıyla açıklanmıştır (Öntürk, 2011).

**Çizelge 2.3** Zemin iyileştirme teknikleri ve kullanılma amaçları (Öntürk, 2011)

| Uygulanan yöntem      | Zemin türü |            | Zemin iyileştirme amacı |                 |           |                   |           |
|-----------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------|-----------|-------------------|-----------|
|                       | Daneli     | Kohezyonlu | Taşıma Gücü             | Oturma Kontrolü | Stabilite | Çevresel Sebepler | Sıvılaşma |
| Vibrokomp.            | ✓          |            | ✓                       | ✓               |           |                   | ✓         |
| Kum Sık. Kazıkları    | ✓          |            | ✓                       | ✓               |           |                   | ✓         |
| Kompaksiyon Kazıkları | ✓          |            | ✓                       | ✓               |           |                   | ✓         |
| Dinamik Kompaksiyon   | ✓          |            | ✓                       | ✓               |           | ✓                 | ✓         |
| Patlatma              | ✓          |            | ✓                       |                 |           |                   | ✓         |
| Önyükeme              |            | ✓          | ✓                       | ✓               |           |                   |           |
| Düşey Direnler        |            | ✓          | ✓                       | ✓               |           |                   |           |
| Isıtma                |            | ✓          |                         | ✓               |           |                   |           |
| Soğutma               | ✓          | ✓          |                         |                 |           | ✓                 |           |
| Geosentetikler        |            | ✓          | ✓                       | ✓               |           |                   |           |
| Mini Kazıklar         | ✓          | ✓          | ✓                       | ✓               |           |                   |           |
| Fore Kazıklar         | ✓          | ✓          | ✓                       |                 | ✓         |                   |           |
| Zemin Çivileri        | ✓          | ✓          |                         |                 | ✓         |                   |           |
| Donatılı Zemin        | ✓          |            |                         |                 |           | ✓                 |           |
| Derin karıştırma      | ✓          | ✓          | ✓                       | ✓               | ✓         | ✓                 | ✓         |
| Taş Kolonlar          |            | ✓          | ✓                       | ✓               | ✓         |                   | ✓         |
| Permeasyon enj.       | ✓          |            | ✓                       | ✓               | ✓         | ✓                 |           |
| Çatlatma Enj.         |            | ✓          | ✓                       | ✓               |           | ✓                 |           |
| Komp. Enj.            | ✓          | ✓          | ✓                       | ✓               |           |                   | ✓         |
| Jet Enj.              | ✓          | ✓          | ✓                       | ✓               | ✓         | ✓                 | ✓         |

Yöntemlerin uygulanmasında oluşabilecek maliyetlerin dikkate alınması gerekmektedir. Çizelge 2.4'te zemin stabilizasyonunda yaklaşık maliyet tablosu verilmiştir (U.S. Army Corps. Of Eng., 2003). Zemin iyileştirme çalışmaları içerisinde jet grout ve derin zemin karıştırması yöntemleri gibi çok yüksek maliyetli çalışmaların yanı sıra, kompaksiyon, derin dinamik kompaksiyon ve düşey drenler gibi düşük maliyetli çalışmalar da yer alır.

**Çizelge 2.4** Zemin stabilizasyonunda yaklaşık maliyet tablosu (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

| Metodlar                         | Göreceli maliyet  | \$/m                                                         | \$/m <sup>2</sup>                            | \$/m <sup>3</sup> | Referans         |
|----------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------|------------------|
| Derin dinamik kompaksiyon        | Düşük             | -                                                            | 8-32                                         | 5                 | FHWA (1998)      |
| Vibrokompaksiyon                 | Düşük-Orta        | Arka dolgusuz 15, granüler arka dolgulu 25                   | -                                            | 1-4               | Ledbetter (1985) |
| Taş kolonlar                     | Orta              | 45-60                                                        | -                                            | -                 | Adailer (1996)   |
| Çakıl direnler                   | Orta              | 11-22                                                        | -                                            | -                 | FHWA (1998)      |
| Patlatma tekniği ile kompaksiyon | Düşük             | -                                                            | -                                            | 2-4               |                  |
| Jet grout                        | Yüksek-Çok yüksek | Sızma kontrolü 30-200<br>Kazı sahasının desteklenmesi 95-650 | -                                            | -                 |                  |
| Zemin çivileri                   | Orta-Yüksek       | -                                                            | Geçici 165-775, Sürekli 160-400              | -                 |                  |
| Kompaksiyon enjeksiyon           | Düşük-Orta        | -                                                            | -                                            | 5-50              |                  |
| Derin zemin karıştırılması       | Yüksek-Çok yüksek | -                                                            | -                                            | 100-150           | Hayward (1996)   |
| Kimyasal enjeksiyon              | Yüksek            | -                                                            | -                                            | 150-400           |                  |
| Biotechnik stabilizasyon         | Uygulamaya bağlı  | Bitkilendirilmiş geogridler 40-100                           | Şevi ağ şeklinde saran bitkilendirme 275-550 | -                 | ASCE (1997)      |
| Zeminin değiştirilmesi           | Orta              | -                                                            | -                                            | 10-20             | Hayward (1996)   |
| Düşey drenler                    | Düşük             | 1.2-4                                                        | -                                            | -                 | FHWA (1998)      |
| Taneli enjeksiyon                | Orta              | -                                                            | -                                            | 3-30              | Adailer (1996)   |

Zemin stabilizasyon yöntemleri uygulama derinliğine göre derin iyileştirme ve yüzeysel iyileştirme yöntemleri olmak üzere 2'ye ayrılır.

### 2.1.1 Derin iyileştirme yöntemleri

En çok kullanılan derin iyileştirme yöntemleri kum drenleri, plastik drenler, taş kolonlar, vakumla su emme metodu, ön yükleme metodu, dinamik kompaksiyon,

vibrokompaksiyon, kompaksiyon kazıkları, patlatma metodu, kireç kazıkları, derin karıştırma, jet grout, ısıt işlemler ve elektro-osmoz şeklinde sıralanabilir (Ayan, 2009).

#### **2.1.1.1 Kum drenleri metodu**

Bu metot zemine kazık çakılarak ve delme burguyla zemini çıkararak oluşturulan temiz kum filtresi kolonu oluşturma işlemidir. Düşük geçirgenlik katsayısına sahip killerde konsolidasyon hızı, bu yöntemle, kil içindeki drenaj suyu, tahliye yolunu kısaltarak arttırılabilir. Bu yöntemle oturmaları hızlandırmak için ek dolgu da yapılabilir ve oturmalar istenilen değere geldiğinde yapılan ek dolgular kaldırılır (Menard ve Boise, 1975). Uygulamada yapılan kum drenler genel olarak 30-60 cm çapında ve 1-3 metre açıklıklarla üçgen veya kare şekiller ile belirli açıklıklarla teşkil edilirler (Demiröz ve Karaduman 2009).

#### **2.1.1.2 Plastik dren**

Çok ince daneli bazı zeminlerde ön yükleme süresi çok uzun olabilir (5-10 yıl). Bu süreyi kısaltıp oturmaları hızlandırmak için zeminde belirli aralıklarla drenler oluşturulur. Bu işlem için zemine bir kaplama borusu çakılır ve genelde bu boru çekilirken içine çakıl, kum gibi malzemeler doldurulur. Bu drenlerin çapı 60 cm'dir (Uzuner, 2000).

#### **2.1.1.3 Vakumla su emme metodu**

Hem dolgunun ekonomik olmadığı yerlerde hem de yumuşak zeminin kayma dayanımının sürşarj yüksekliğine sınırlamalar getirdiği yerlerde yüzeye vakum uygulanmak suretiyle yapılmaktadır. Kum tabakasının üstüne geçirimsiz bir tabaka serilir ve çevresi kapatılır. Yüzeye yapılan vakum bu dren sistemi içerisinde. Oluşturulan farkla da boşluk suyu basıncı oturmaları neden olur (Ayan, 2009).

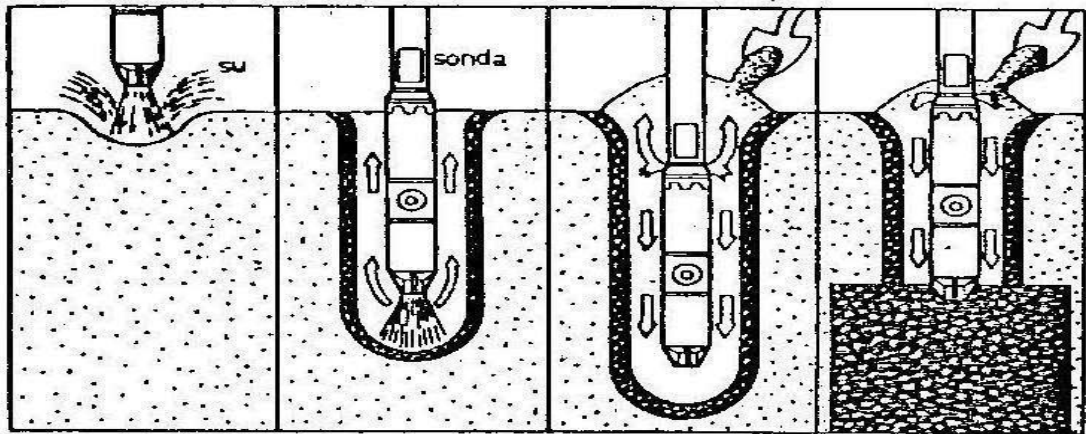
#### **2.1.1.4 Önyükleme metodu**

Sıkışabilir bir zemin üzerine yapılan yapının yükünden dolayı meydana gelebilecek oturmalar yapıya zarar verebilecek düzeyde olabilir. Ayrıca yapı yüklerinden dolayı meydana gelen gerilmelerden dolayı oluşacak konsolidasyon oturması uzun yıllar

sürebilmektedir. Bu nedenle yapıyı yapmadan önce, yapı yüküne eşdeğer veya daha fazla bir dolgu yüküyle zemine ilave yük uygulanır ve gerilme artışlarıyla beraber oturmalar hızlandırılır. Önyükleme yapıldıktan sonra istenilen oturma oluştuğunda, yapılan ilave dolgu kaldırılarak yük boşaltılır. Böylelikle zamanla oluşacak olan istenmeyen oturumlar engellenmiş olur ve oturmanın büyük bir kısmı gerçekleşmiş olur (Demiröz ve Karaduman 2009).

### 2.1.1.5 Vibroflotasyon yöntemi

Vibroflotasyon tekniğinde vibroflot olarak adlandırılan 1,5-2,5 m uzunlukta, 0,3-0,5 m çapında, büyük silindirik bir vibratör kullanılır (Öksüz, 2006). Öncelikle vibroflot bir vincin üzerine asılarak istenilen yere getirilir ve ucundaki su jeti açılarak titreşimle beraber yüksek basınçlı su fişkırtarak kendi ağırlığıyla zemine indirilir. İstenilen derinliğe geldiği zaman suyun akış hızı düşürülür ve bir kısım suyun yönü yukarı çevrilir. Suyun akış yönü dolgu malzemesin zeminin en uç noktasına gitmesine neden olur. Bu işlem sürdükçe zamanla vibroflot çevresinde 2-3 m çapında bir alan sıkışmış olur. Sonda adım adım yukarı çekilerek işleme devam edilir. Bu işlem yapılan işin planında 1-2 m aralıklarla tekrarlanır. Bu yöntemle 10-15 m derinliğine kadar zemin sıkıştırma yapılabilir. Vibroflotasyon metodu Şekil 2.2’de verilmiştir (Braja, 1999).



Şekil 2.2 Vibroflotasyon metodu (Braja, 1999)

Bu yöntem gevşek kum tabakası olan yerlerde ve su seviyesi yüksek kohezyonsuz zeminlerde oldukça etkilidir. Silt boyutlu danelerin zemin içindeki miktarı çoğaldıkça,

kompaksiyonun etkisi azalmaktadır. Yüksek miktarlarda çakıllı kum ya da çimentolaşmış kum içeren zeminleri bu yöntemle iyileştirmek zor olacağı gibi ekonomik de olmayacaktır.

Direk güç kompaksiyonu sıkıştırmanın başka bir şeklidir. Gereken derinliğe bir ucu açık bir kaplama borusu vibratör yardımıyla indirildikten sonra en uca biraz kum yerleştirilir. Daha sonra basınçlı hava verilir. Hava verildiği sırada kaplama borusu çekilir. Sonra, boru vibrasyonla birlikte tekrar itilerek kumlu malzeme sıkışır ve geniş bir ampül gibi olur. Bu işlemleri tekrar ederek yüzeye vardığımız zaman yaklaşık 60-80 cm çapında bir kum kazığı elde etmiş oluruz (Önalp, 1983).

#### **2.1.1.6 Kompaksiyon kazıkları**

Bu yöntem 1950'lerde Japonya'da geliştirilmiştir ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gevşek kumlu zeminleri iyileştirmek için geliştirilmiştir. Killi zeminler için de uygulanmaktadır. En iyi sonuç çok ince malzemeli suya doymuş zeminlerde elde edilmektedir. Suya doymuş killi zeminlerde bu yöntem elverişli değildir (Öztoprak, 2016). Kompaksiyon kazığı, gevşek kum tabakasına zeminin yoğunluğunu artırmak ve zemini sıkıştırmak için çakılan önceden dökülmüş veya bir ucu kapalı olan boş, çelik yer değiştirme kazığıdır.

Zemin, çakma işlemi sırasında oluşan yer vibrasyonu ve zeminin gerçek yer değiştirmesi ile sıkışır. Kazıklar genel olarak yerinde bırakılır. Yapılan bu işlemten dolayı biraz pahalı bir yöntemdir. Kazıklar zeminin istenilen düzeyde sıkışmasını sağlamak için yakın açıklıklı olarak çakılır. Kompaksiyon kazıkları arasında genelde 1,0-1,5 m dolayında açıklık bırakılır (Tumluer, 2006).

#### **2.1.1.7 Patlatma metodu**

Bu yöntem eskiden beri kullanılan bir yöntem olup, zemin tabakalarının içine belli aralıklarla yerleştirilen sınırlı miktardaki patlayıcıların ardışık olarak ateşlenerek patlatılması ve böylece hızlı basınç dalgaları oluşturularak zemini daha küçük parçalara ayırıp gevşek daneli zeminlerin sıkıştırılması işlemidir. Bu yöntemin en önemli avantajı ise etkin, kolay ve diğer yöntemlere göre ekonomik olması ve her

zaman kullanılabilmesidir. 30-40 m derinliğe kadar kullanılabilir. Patlatmalar dinamit ve TNT ile yapılır. Etkinlik derecesini önceden kestirmek zordur (Çetin, 2006).

Patlayıcıları koymak için bir boru, su jeti ve çakma gibi yöntemlerle zemine indirilir. Patlayıcı yerleştirilince boru yukarı çekilir. Zemin yüzeyinin altının gevşek kalan kısım yüzeysel kompaksiyonla sıkıştırılabilir. Fakat bu uygulama günümüzde pek yaygınlaşmış değildir (Öksüz, 2006).

Patlayıcıların aktif olarak kullanıldığı başka bir durum ise suyun altındaki gevşek zeminin 1-3 m üstünden yapılan atımlardır. 18 m su altında bulunan çakıllı kumda 2,5 m yüksekte, 20 kg'lık dinamit atımında yüzeyin 25 cm çökebildiği görülmüştür (Önalp, 1983).

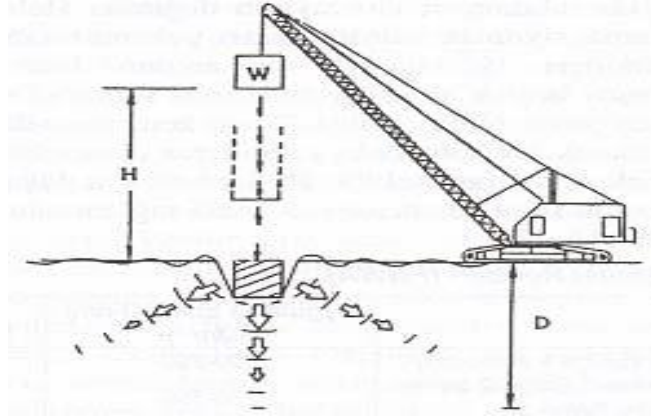
Löslerde uygulanan yöntem ise araziye suyla çevreledikten sonra 5 kg'lık atımlar yapmaktır. Etkinin dar sınırlı olması için arsanın kenarlarına 50 cm eninde ve birkaç metre derinlikte hendekler kazılıp, suyun derine etki edebilmesi için belli noktalarda sondaj delikleri açılmaktadır (ENPC-LCPC, 1977).

### **2.1.1.8 Dinamik kompaksiyon**

Zeminlerin mekanik özelliklerinin yüzeyden daha derin seviyelere kadar iyileştirilmesine yönelik zemin stabilizasyon işlemidir. Bu yöntem Almanya'da otoyolların yapımı sırasında, 1930'lu yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Aynı yöntem 1957'li yıllarda İngiltere'de Road Araştırma Laboratuvarında analiz edilip kullanılmaya başlanmıştır (Loos, 1936).

Dinamik kompaksiyon 40 m'ye varan yüksekliklerden büyük ağırlıkları (10-200 ton) bir vinç yardımıyla düşürmek suretiyle, sıvılaşma, yüzey çatlaması, şok dalgaları ve yoğunluğunun artırılması amacıyla kohezyonlu veya kohezyonsuz zeminlerin iyileştirilmesi ve boşluk oranının azaltılması işlemidir. Ağırlık genel olarak betonarme dikkörtgen bir blok şeklindedir (Uzuner, 2000). Kalınlığı 20 m'ye kadar iri daneli, gevşek zeminler %70-80 rölatif sıklığa kadar sıkıştırılabilmektedir. Genellikle yerleşme bölgelerinde kullanılan bu yöntem moloz dolgularda ve iri daneli zeminlerde başarılı sonuçlar vermiştir (Ayan, 2009).

Dinamik kompaksiyon uygulaması Şekil 2.3'te sunulmuştur.



**Şekil 2.3** Dinamik kompaksiyon (Tunç, 2002)

Yüksekten düşürme işlemi bir veya daha fazla pas ile tüm alana belli aralıklarla uygulanır. Oluşan çukurlar dozer vb. makinelerle düzeltilmekte veya oluşan çukurların içine granüler malzeme doldurulmaktadır. Bir sonraki pasta zemin tekrar sıkıştırılıp işlemler tekrar edilir. Kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilirliği daha çok olmasına rağmen kohezyonlu zeminlerde de iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Menard, 1977). Kohezyonlu zeminlerde daha iyi sonuçlar alınabilmesi için zemin yapısını bozacak enerji, makul zamanda artan boşluk suyu basıncı ve suyun hareketleri için çatlak kanallarının oluşması gereklidir (Önalp, 1983; Uzuner, 2000; Das, 2002; Tunç, 2002).

Dinamik kompaksiyon sonucunda zeminin içerisinde yayılma hızı yaklaşık 3 km/s olan boylamsal dalgaların yanı sıra enine ve yüzeysel dalgalar da oluşur. Bu dalga oluşumunun bir sonucu olarak kesme gerilmelerinde ve su muhtevalarında değişimler meydana gelir. Dinamik kompaksiyonun diğer yöntemlere göre ekonomik olabilmesi için, iyileştirilecek zemin alanının 5000 m<sup>2</sup>'den, ince daneli zeminlerde ise 15000 m<sup>2</sup>'den fazla olması gerekmektedir (Leonards vd, 1980).

#### **2.1.1.9 Taş kolonlar**

Taş kolonların ilk kullanımı 19. yy. 'da Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Avrupa'da 1950'den, Amerika'da ise 1972'den sonra yaygınlaşmıştır (Demir, 2007). Türkiye'de ise ilk defa 1990'lı yıllarda Borçelik Gemlik Soğuk Hadde Fabrikası'nda uygulanmıştır (Durgunoğlu vd, 1992).

Genelde yumuşak ve orta yumuşak killi zeminlerde kullanılan bu yöntemin amacı, zemine gelen yüklerin taş kolon ve zemin tarafından taşınmasıdır. Bu yöntem hem oturmanın azalmasına hem de taşıma kapasitesinin çok daha yüksek seviyelere çıkmasına olanak sağlar. Oturma problemlerini %50-60 oranında azaltır. Taş kolonlar düşey dren gibi çalışıp oturma hızını da artırırlar. Az kohezyonlu ince daneli (killi-siltli) zeminlerde sıvılaşmaya karşı da kullanılmaktadır (Özdemir, 2007).

Taş kolonların imalat aşaması 3 temel süreçten oluşur. Zemin içinde düşey bir delik oluşturulur, içine malzeme konulur ve sıkıştırılır. Kohezyonlu zeminlerde taş kolon yapımı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Performansında yapım metotları da ayrıca bir öneme sahiptir ve bunlar da genel olarak vibroflasyon, tokmaklama metodu, dinamik yer değiştirme metodu ve tampon metodu olmak üzere 4'e ayrılır (Vekli, 2009).



**Şekil 2.4** Taş kolon yapımı

Bu metodun güvenilirliği şantiye ekibinin bilgi, beceri ve deneyimine dayanmaktadır. Taş kolonlar tek ve büyük bir kolon taşıma gücünün geliştirilmesinde, akaryakıt tanklarının oturduğu zeminlerde, radye temellerde ve baraj yapılarının stabilizasyonunda daha sağlam bir altyapısı olması için kullanılmıştır (Hughes ve Withers, 1974).

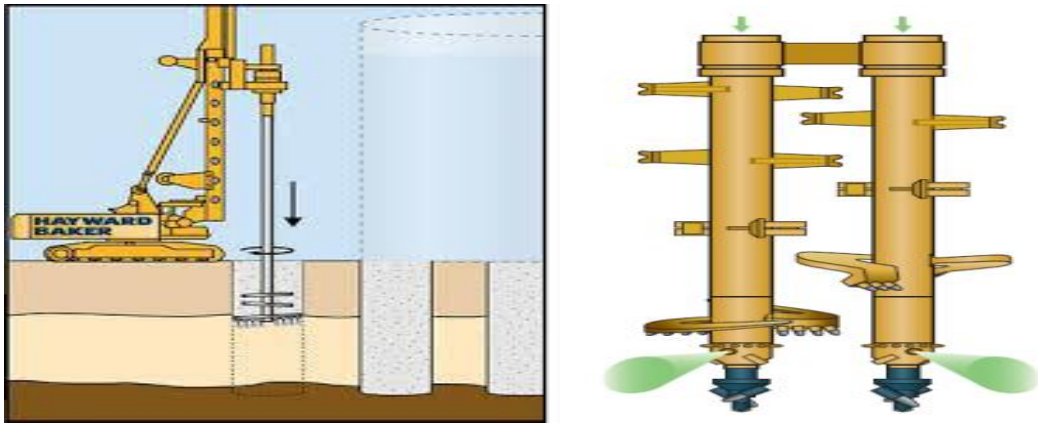
### 2.1.1.10 Derin karıştırma yöntemi

1954 yılında ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal Karayolları İdaresi'nde (FHWA), yapılan 82 çalışma sonucunda uygulanan derin karıştırma yöntemi, Japonya ve İskandinavya ülkelerinde geliştirilmiştir. Son yıllarda bu yöntem Japonya, İsveç, Finlandiya ve Çin gibi ülkelerde artarak yaygınlaşmaktadır (Bruce ve Bruce 2003).

Derin karıştırma yöntemi ucunda palet bulunan, ortası delik ve içi boş bir burgu aleti ile veya kanatlı karıştırıcılar ile zeminle bağlayıcı malzemeleri karıştırıp kolonlar oluşturma işlemidir. Stabilize edilmiş bir tabaka oluşturmak için yapılan kolonların üst üste gelmesi sağlanabilir (Kayabalı ve Mollamahmutoğlu, 2004).

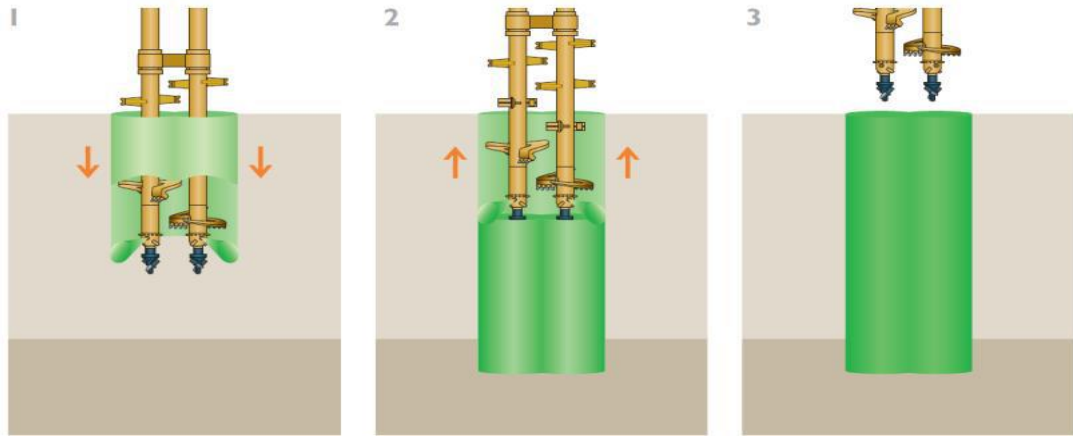
Derin karıştırma yönteminde zeminin kayma mukavemetinin artırılması, geçirimsizliğinin azaltılması veya zararlı maddelere karşı dayanımının artırılması hedeflenir. Bağlayıcı malzeme olarak çimento, kireç, yüksek fırın cürufu, uçucu kül veya bunların kombinasyonu kullanılmaktadır. Ucu boş burgu istenilen derinliğe ulaştırıldıktan sonra boru içinden bağlayıcı malzeme pompalanarak zemine karıştırılır. Kullanılan bağlayıcı madde zeminin cinsine göre iyileştirilmesi istenen zemin hacminin %20-30'u kadar olmalıdır (Doru, 2014).

Derin karıştırma yöntemi, burgulu ve kanatlı karıştırıcılar Şekil 2.5'te verilmiştir.



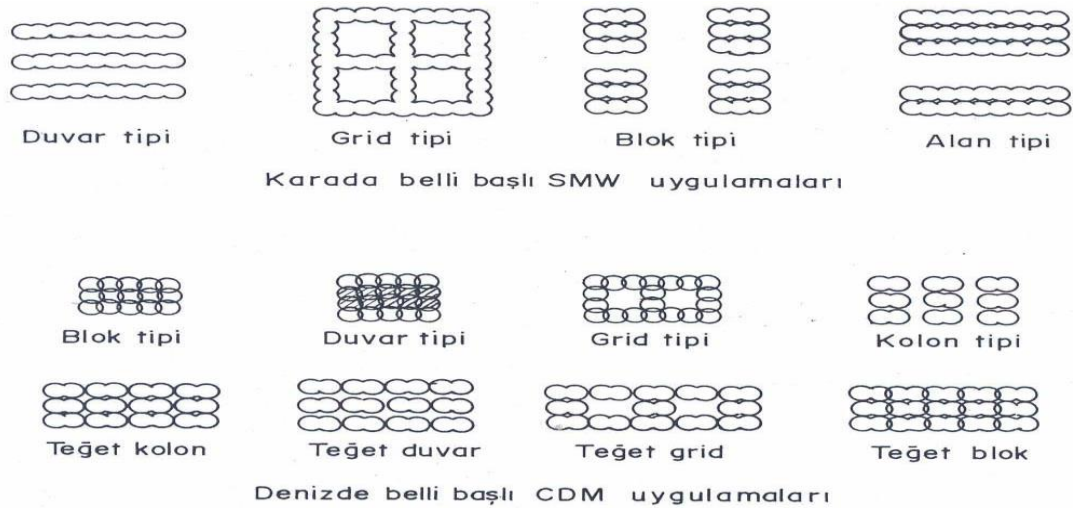
**Şekil 2.5** Derin karıştırma yöntemi, burgulu ve kanatlı karıştırıcı

Karıştırma işlemi aşağıdan yukarıya veya tam aksine yukarıdan aşağıya doğru yapılabilir. Şekil 2.6'de derin karıştırma yönteminin farklı uygulamaları gösterilmiştir.



**Şekil 2.6** Derin karıştırma yönteminin farklı uygulamaları

Kolonlar uygulama şekline göre duvar, grid, teğet ve blok tipi olarak farklı biçimlerde uygulanabilir. Bu kolonların çapı genellikle 0,6 m-1,2 m olup, derinliği 40 m' ye kadar ulaşabilir (Bagherinia, 2013). Derin karıştırma yöntemi kendi başına, duvar tarzı yapılar için tek sıra halinde, ayaklar oluşturabilmek için gruplar halinde veya hücreler oluşturmak için belirli modellerde uygulanabilirler. Şekil 2.7'de derin karıştırma yönteminin tipleri ve modelleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.7** Derin karıştırma yönteminin uygulama şekilleri (Yang, 1997)

Derin karıştırmada önerilen farklı yöntemler Şekil 2.8'de gösterilmiştir (Porbaha, 1998).



**Şekil 2.8** Derin karıştırmada önerilen farklı yöntemler (Porbaha, 1998)

Derin karıştırmanın uygulama alanları ise geçirimsizlik perdeler, rıhtım yapıları, kazı çukurlarının desteklenmesi, tünel zemininin desteklenmesi, sıvılaşmanın önlenmesi ve temel takviyesinin yapılması olarak sıralanabilir (Altun, 2010). Kireç kolonlarda toplam karışım malzemesi kuru zemin olarak %5-15 arasında kullanılmaktadır. Ergun tarafından yapılan çalışmada portland çimentosu ve yüksek fırın cürufu ile türlü zeminlerin bu yöntemle daha avantajlı bir şekilde iyileştirilebileceği sonucuna varmış olup, karışımda kireç kullanıldıktan sonra 80 kata kadar dayanım, 40 kata kadar deformasyon modül artışları olduğunu gözlemlemiştir (Ergun, 1996).

#### 2.1.1.11 Kireç kazıkları

Kireç kuyusu veya kazığı metodu Çin’de eskiden beri uygulanmaktadır ve sönmemiş kirecin (CaO) sıkıştırılmasıyla uygulanır. Su içeriği %50’den fazla olan ince siltli ve siltli kil zeminlerde çok etkili bir yöntemdir (Horne, 1964). Su ile reaksiyona giren sönmemiş kireç, ağırlığının %32’si kadar su emmektedir. Reaksiyonda meydana gelen hidratasyon sonucunda, kirecin hacmi artar ve uygulandığı sondaj kuyusunun etrafında 1250-1400 kPa’lık yüksek basınç meydana getirir. Bu da zeminde radyel oturmalara neden olur. Hacim artışı engellenmezse %96 oranında bir değişiklik meydana gelir. Günümüzde yapılan uygulamalarda 10 m’lik derin bir kuyu için çapı 30 cm civarında

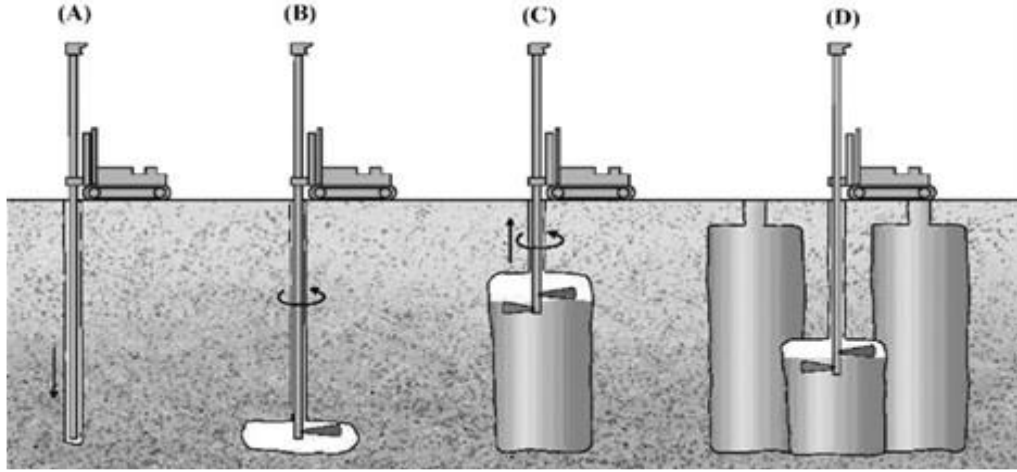
bir kazık kullanılır ve 1-2 m aralıklarla zemine tatbik edilir (Demiröz ve Karaduman, 2009).

İnşaat sahasındaki kireç kazıklarını sırayla kum kazıklarıyla değiştirilerek (bir kireç kazığı, bir kum) verim kaybının önüne geçilir. Böylece daha ekonomik olur. Dolayısıyla su, kum kazıklardan dışarı atılır. Sönmemiş kirecin avantajı ise hacim artışının çok büyük ve permeabilitesinin yüksek olmasıdır. Reaksiyon sonucunda yüksek sıcaklıklar meydana geleceğinden suyun viskozitesini azaltıp reaksiyonları da hızlandıracaktır (Ayan, 2009).

Kireç kazıkları kil dolgulu bir şevin duyarlılığını arttırdığı gibi etrafındaki zeminde kayma dayanımını artırır (Handy ve Williams, 1967). Ayrıca uygulandığında hacim artışına sebep olduğundan dolayı kazık çevresindeki doygun killi zeminde radyal çatlaklar meydana getirir ve zeminin sıkıştırılmasında etken bir rol oynar (Tystovich vd, 1971).

#### **2.1.1.12 Jet grout**

Zemin içine yüksek basınçla stabilizasyon özelliği bulunan akışkan bir malzeme pompalamak suretiyle zemin kütlelerini kesip sürekli ve istikrarlı kolonlar yapma kavramı Japonya’da 1965 yılında ortaya çıkmıştır (Karol, 2003). Güzel bir karışımla homojen şerbet haline getirilmek istenen çimentonun veya bentonitin, delme makinesiyle istenilen derinlikte, bir pompa yardımıyla çok yüksek bir basınçla (400-700 bar) zeminin içine püskürtülmesi ve zemini yırtarak içine karışması/karıştırılması işlemine jet enjeksiyonu ya da jet grout denilmektedir (Demiröz ve Karaduman, 2009). Welsh vd. (1986) tarafından yapılan çalışmaya göre jet grout’ı yüksek basınçlı su jetleriyle kesilmiş zeminin yerine, eşzamanlı ve kontrollü olarak çimento enjeksiyonu verilmesi olarak tanımlamışlardır. Bu yöntemde karışım, zemine yüksek hızda enjekte olur, doğal yapısını bozar ve zemin ve yapılan karışım birleşerek yeni malzeme oluşur. Bu malzemeye birlikte zeminin elastisite modülü ve taşıma gücü artarken geçirimsizliği azalmaktadır. Bu yeni malzeme homojen ve sürekli yapıdadır ve karakteristik özellikleri önceden belirlenebilir. Püskürtme işlemi zemine sokulan sondaj tijlerinin ucundaki enjektörlerden yapılır. Genel itibariyle 4 aşamadan oluşur. Bu aşamalar Şekil 2.9 yardımıyla açıklanmıştır.



**Şekil 2.9** Jet grout metodunun imalat aşamaları: A-Delme, B-Püskürtme, C-Kolon şeklinin oluşması ve D-Tamamlanma (Nikbakhtan ve Osanloo, 2009)

Kullanılan üç adet jet grout sistemi bulunmaktadır. En uygun olan sistem; zemin ve uygulama için lazım olan fiziksel karakteristiklerin fonksiyonuna ve ekonomik koşullara göre belirlenmektedir. Genel olarak birbirlerinin yerine kullanılabilirlerdir.

Jet grout sistemlerinin karşılaştırması ve imalat parametreleri Çizelge 2.5 ve 2.6’da gösterilmiştir.

**Çizelge 2.5** Jet grout yöntemi imalat parametreleri (Lunardi, 1997)

| Sistem | Enjeksiyon Tipi | Basınç  | Nozul Adeti ve Çapı | Çekme Hızı | Dönme Hızı | Su/Çimento Oranı | Pompa Kapasitesi |
|--------|-----------------|---------|---------------------|------------|------------|------------------|------------------|
|        |                 | (bar)   | (adet, mm)          | (cm/dk)    | (rpm)      |                  | (lt/dk)          |
| Jet-1  | Çimento         | 400-500 | 1-2 x 2-5           | 15-100     | 5-15       | 1,0 – 1,5        | 70-600           |
| Jet-2  | Çimento         | 400-550 | 1-2 x 2-5           | 10-30      | 4-8        | 1,0 – 1,5        | 70-600           |
|        | Hava            | 10-12   |                     | 10-30      |            |                  | 4000-10000       |
| Jet-3  | Çimento         | 50-100  | 1-2 x 4-5           | 6-15       | 4-8        | 1,2 – 1,5        | 80-200           |
|        | Hava            | 10-12   |                     | 6-15       |            |                  | 4000-10000       |
|        | Su              |         |                     | 6-15       |            |                  | 40-100           |

**Çizelge 2.6** Jet grout sistemleri karşılaştırma tablosu (Altun, 2010)

| <b>Zemin Cinsi</b>           | <b>Kolon Çapı</b>                                    | <b>JG Kolon Dayanımı</b>                                   |
|------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Jet-1<br>Kum ve Çakıl<br>Kil | 60 cm – 90 cm<br>(110 cm’e kadar)<br>60 cm – 90 cm   | 70 – 250 kg/cm <sup>2</sup><br>20 – 100 kg/cm <sup>2</sup> |
| Jet-2<br>Kum ve Çakıl<br>Kil | 90 cm – 180 cm<br>(300 cm’e kadar)<br>90 cm – 150 cm | 35 – 140 kg/cm <sup>2</sup><br>10 – 70 kg/cm <sup>2</sup>  |
| Jet-3<br>Kum ve Çakıl<br>Kil | 150 cm – 240 cm<br>90 cm – 180 cm                    | 35 – 105 kg/cm <sup>2</sup><br>10 – 50 kg/cm <sup>2</sup>  |

Jet grout kil, silt, kum, çakıl ve alüvyon gibi birçok zeminde uygulanabilir. Kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Başlıca kullanım alanlarını; istinat duvarları, derin temeller, batardolar, atık sahaları, geçirimsizlik perdeleri, zemin ankrajları, şev stabilitesi, cutoff duvarlar, geniş sahalarda zemin stabilizasyonu, tüneller ve yapıların temel takviyesi olarak sıralayabiliriz (Melegari ve Garassino, 1997).

Jet grout yöntemi, diğer yöntemlere nazaran bazı avantajlara sahiptir (Okyay, 1987). Her tür zemine tatbik edilebilmesi, malzeme sarfiyatı hesabının büyük ölçüde yapılabilir olması, diğer enjeksiyon yöntemleri gibi çevre kirliliği oluşturmaması, dar yerlerde bile etkin kullanılabilmesi, temel desteklemesi sırasında yapının deformasyonunun çok az ya da hiç olmaması, yüksek riski olan inşaatlarda can güvenliği sağlaması, istenilen derinlikte başlatılıp istenilen derinlikte son bulması, diğer bazı metotlara göre daha hızlı ve güvenilir olması, istenilen mukavemet ve permeabilitesinin tasarlanabilir olması ve zararlı titreşim etkisi çok yapmadığı için hassas ve tarihi yapıların yakınında uygulanabilir olması sahip olduğu bazı avantajlardır.

Ancak avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Yöntem yeni olduğu için gelişme aşamasında olması, yöntemin yeni oluşu ve teorik bilgi eksikliğinden dolayı tasarımlarda kullanılacak kurallar kesinleşmemiştir. Bundan dolayı önceki gözlem ve deneyimlere dayalı tasarım yapılamaması, zemin içine püskürtme yapıldığından dolayı zeminde enjeksiyonun dağılımı ve oluşabilecek geometriyi önceden betimlemek oldukça zordur. Dolayısıyla dikkatli ve detaylı gözlemler ve kontrol testleri yapmak zorunluluğunun meydana gelmesi, çift ve üç

akışkanlı sistem daha kompleks parçalara ihtiyaç duyması ve gerekli olması durumunda maliyetli olması ve yöntemin yeni olması halinde ekipmanların arızalanmalarının çözümünün uzun zaman almasıdır.

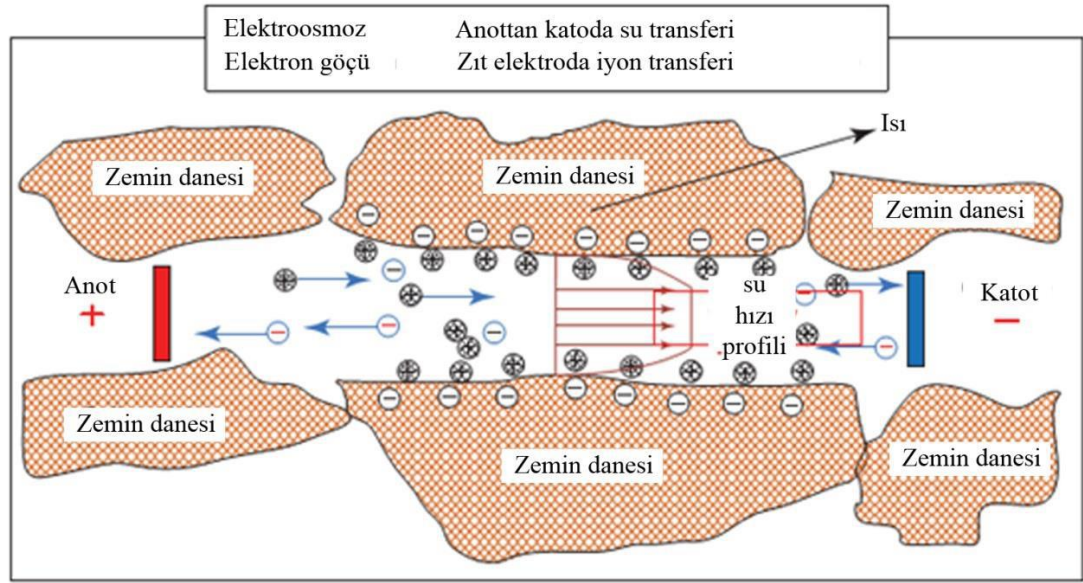
### **2.1.1.13 Elektro-osmoz**

Elektrokinetik olarak da bilinen elektro-osmoz yöntemi kohezyonlu yumuşak zeminlerin dayanım ve deformasyon özelliklerini iyileştirmek için zemine doğru akım uygulanarak yer altı suyunun indirilmesi ve zemin oturmasının hızlandırılması işlemidir (Sağlam, 2011). Bir başka deyişle ince daneli zeminlerin drenajını ve ön oturmayı hızlandırmak için kullanılan bir yöntemdir. Elektro-osmoz boşluk suyunun anottan katota doğru hareket ettirilmesi işlemine verilen addır.

Katotta toplanan su, yapı yapılacak zeminin dışına atılır. Anottan katota doğru su akımı olur ve bu esnada negatif boşluk suyu basıncı oluşur. Efektif gerilmenin artmasına rağmen toplam gerilmenin sabit olması oturmaya sebep olur (Uzuner, 2006). İkinci Dünya Savaşı'ndan önce Almanya'da geliştirilen bu yöntem doygun silt ve siltli killerde normal konsolide olma ve boşluk suyunda eriyik oranının düşük olduğu koşullarda verimli olur. Konunun teorik çözümü başarıyla sonuçlandırıldığı için iyileştirme maliyeti projeye başlamadan gerçeğe yakın olarak çıkartılabilir. İnce daneli zeminlerden suyun drene edilmesi diğer yöntemlerle pek kolay olmamaktadır. Çünkü bu tür zeminlerde daneler arasındaki su serbest olarak uzaklaşamaz. Bundan dolayı elektriksel yöntem kullanılması daha doğru olacaktır. Ancak başarısı uygulayıcının deneyimine bağlı bir yöntemdir (Uzuner, 2000).

Briaud (2013) yaptığı çalışma ile anot ile katot arasında meydana gelen doğru akımın ince daneli zeminlere verilmesi sonucunda su akımının anottan katota doğru hareket ederek suyun drenajının sağlanıp zeminin sıkıştırılabileceğini öne sürmüştü ve bunu Şekil 2.10 ile açıklamaya çalışmıştır.

Elektro-osmoz ve kildeki bazı değişimi, elektrokimyasal zemin iyileştirmesini oluşturur. Elektro-osmoz sonucunda zeminin suyu uzaklaştırılır ve zemin sertleşir. Elektrokimyasal sertleşmedeki amaç kilin içerisindeki anotların yoğunluğunu azaltarak zeminin fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesidir (Çetin, 2003).



**Şekil 2.10** Killerde elektro-osmoz (Briaud, 2013)

#### 2.1.1.14 Isıl işlemler

Termal işlemler diye de adlandırılan ısı işlemler, kayma direncini artırmak, geçirimsizliği azaltmak veya deformasyon modülünü arttırmak amacıyla zeminin ısıtılması ya da zemin suyunun dondurulması suretiyle gerçekleştirilen işlemlerdir. Bu tarz stabilizasyon yöntemleri genellikle ekonomik olmadığından dolayı kullanımları da sınırlıdır (Kayabalı ve Mollamahmutoğlu 2004). Termal işlemler ile iyileştirme yüksek sıcaklıkta iyileştirme ve dondurma yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılarak incelenebilir.

##### 2.1.1.14.1 Isıtma metodu

Isıl işlem ile zeminlerin; kabarma özellikleri, kompresibilite, plastisite indisi, dayanım ve taşıma gücü gibi özelliklerinde iyileştirmeler olur. Başta lölser olmak üzere doymun olmayan kil ve siltler, ortam sıcaklığının artması durumunda dayanımları da artar. Isıtılan killi zemin su kaybeder ve katılaşıır. Zeminde açılan kuyularda yakılan yakıt ile elde edilen yüksek sıcaklıklarda (500-1000 °C) özellikle kil zeminler, kuyu etrafında 2-3 m çapında silindirler olarak sertleşirler. Bu işlem belirli aralıklarla tekrarlanır. Böylece pişen killer, geri dönmez özellik kazanırlar (Uzuner, 2000). Isıtma ile zemin stabilizasyonu istisna bazı ülkeler dışında doğu blok ülkelerinde kullanılmıştır.

Romanya ve Rusya’da bazı teknikler geliştirilmiştir. Rus tekniği; sondaj kuyusunda benzin veya gaz sıvı yakıtın yakılmasıyla yüksel sıcaklıkta zeminin iyileştirilmesidir. Burada kuyular 3 m aralıklarla koyulur ve 15 m derinliğe kuyu açılır (Ayan, 2009).

#### **2.1.1.14.2 Dondurma metodu**

Bu yöntem geçici olarak kullanılan bir iyileştirme yöntemidir. Göçme ve akma eğilimi olan zeminlerde tünellerin, yer altı kazılarının veya açık kazıların yapımını kolaylaştırmak için boşluk suyunu azaltarak zeminin mukavemetini ve katılığını artırmak amacıyla yapılır (Maag, 1938).

Zeminin sıcaklığını azaltmak için zemin içine yerleştirilen borulardan soğuk hava ya da su geçirmek suretiyle yapılır. Zemini daha çabuk dondurmak için sıvı nitrojen veya sıvı karbondioksit kullanılmıştır. -20-40 °C tuzlu suyla nitrojen karıştırıldığında nitrojenin kaynama sıcaklığı -196 °C olur. Böylece daha az sıcaklık ve daha hızlı dondurma imkânı elde edilmiş olur. Karbondioksitin ise kaynama sıcaklığı -79 °C’dir.

Genel bir kaide olarak her ortamda dondurma işlemi uygulanabilir. Ancak maliyeti fazla olan bir işlemdir. İdeal olarak yumuşak zemin şartlarında yer altı su seviyesinin altında ve yaklaşık 7-8 m derinlikte dondurma metodu uygulanır. Lakin yer altı suyunun tabii olarak 2 m/gün 'den fazla hareket ettiği koşullarda bu yöntem kesinlikle uygulanamaz ve iyileştirme çalışmaları başarısızlıkla sonuçlanır (Ayan, 2009).

#### **2.1.2 Yüzeysel iyileştirme yöntemleri**

Derin zemin stabilizasyonunun gerekli görülmediği yerlerde yüzeysel zemin iyileştirme uygulanır. Yüzeysel zemin iyileştirmeleri genelde üstyapı yüklerinin çok fazla olmadığı yapılarda ya da yol inşaatlarında kullanılır. Kısacası fazla derine inmeye gerek kalmaksızın zeminin yüzeysel olarak düzeltilmesi işlemine yüzeysel stabilizasyon denmektedir. Yüzeysel stabilizasyon katkılı ve katkısız olmak üzere 2’ye ayrılır (Öksüz, 2006).

### 2.1.2.1 Katkısız stabilizasyon

Zemine herhangi bir madde katmadan yapılan iyileştirmeye katkısız stabilizasyon denir. Var olan zeminin granülometrisi uygunsa bu yöntem uygulanabilir (Özaydın, 1989). Katkısız stabilizasyon 2 gruba ayrılabilir.

#### 2.1.2.1.1 Kompaksiyon yöntemi

Kompaksiyon, zeminlerin mekanik enerji ile sıkıştırılmasıdır. Başka bir ifadeyle zemin danelerinin aralarındaki boşlukların azaltılması ve birbirine yaklaştırılması ve daha sıkı bir yapıya kavuşabilmeleri için yapılan mekanik işlemlere verilen isimdir (Özaydın, 1989).

Kompaksiyon işleminde su önemli bir etkidir. Su zemin danelerinin daha yoğun bir hale gelmesini ve danelerin yeniden yapılanmasını sağlar. Böylece zeminin kuru birim hacim ağırlığı artar. Dolayısıyla kayma mukavemeti ve zeminin taşıma gücü de artmış olur. Fakat belirli bir su içeriğinden sonra zeminin kuru birim hacim ağırlığı azalmaya başlar. Sıkıştırma parametrelerinden biri olan, zeminin en kolay ve en iyi sıkıştırılabileceği bu su muhtevasına optimum su muhtevası ve buna karşılık gelen birim hacim ağırlığına da maksimum kuru birim hacim ağırlığı denir.

Zemin içindeki su miktarının kompaksiyona etkisi iki farklı şekilde olur. Su miktarı optimum su seviyesinden yüksek ise kompaksiyon güçleşir. Yani zemindeki boşluklarda bulunan havanın bir kısmı hapsedilmekte ve dışarı çıkamamaktadır. Dolayısıyla sıkışan hava hacimlerinde basınç artışları meydana gelir. Zeminin tamamen suya doymuş olmasında ise kompaksiyon imkânsızdır. Çünkü bu durumda uygulanan yük altında boşluk suyu basınçları artar ve bu hidrostatik basınç danelerin birbirine yaklaşmasına engel olur (Aytekin, 2004).

Kompaksiyonda zemin daneleri, havanın dışarı atılmasıyla birlikte birbirlerine yaklaşır. Sıkıştırma yapıldığı zaman, zeminin geçirimsizliği düşer, aşınabilirliği azalır veya gecikir, sıkıştırılabilirliği azalır, muhtemel oturmaları azalır, sıvılaşma yeteneği kaybolabilir, şişme ve büzülme davranışı kontrol altına alınabilir, kayma direnci yükselir ve taşıma gücü artar, birim hacim ağırlığı artar ve zemin dondan aşırı derecede etkilenmez (Çakır, 2001).

Sıkışmaya etki eden faktörleri su içeriği, kompaksiyon enerjisi, zemin cinsi ve granülometrisi, kompaksiyonda kullanılan makine ve sıkıştırma araçları olarak sıralayabiliriz.

Başlıca sıkıştırma araçları; silindirler (düz, lastik tekerlekli, keçi ayaklı vb.), tokmaklar (sıçrayan kurbağa tokmaklar vb.) ve vibratörler (silindir, kiriş, plaka vb.) olmak üzere 3 tiptir (Çakır, 2001).

Genel olarak kohezyonsuz zeminler için düz silindirler ve vibratörler; kohezyonlu zeminler için lastik tekerlekli sıkıştırıcılar, keçi ayaklı silindirler; her iki cins zeminler için ise tokmaklar belirli yerlerde uygundur. Sıkıştırma araçlarının genel özellikleri Çizelge 2.7’de gösterilmektedir (Tülek, 2007).

**Çizelge 2.7** Sıkıştırma gereçlerinin genel karakteristik özellikleri (Tülek, 2007)

| Adı                       | Kütlesi (ton) | Hızı (km/saat) | Titreşim (Hz) | Tabaka kalınlığı (m) | Geçiş sayısı |
|---------------------------|---------------|----------------|---------------|----------------------|--------------|
| Titreşimli tokmak         | 0,30 - 0,10   | -              | 7,00 - 10,0   | 0,20 - 0,40          | 2,0 - 4,0    |
| Titreşimli plaka          | 0,06 - 0,08   | 1,00           | 10,0 - 80,0   | 0,15 - 0,50          | 2,0 - 4,0    |
| Hafif titreşimli silindir | 0,60 - 2,00   | 2,00 - 4,00    | 25,0 - 70,0   | 0,30 - 0,50          | 4,0 - 6,0    |
| Titreşimli ayak           | 6,00 - 15,0   | 8,00 - 10,0    | 25,0 - 30,0   | 0,30 - 1,50          | 4,0 - 6,0    |
| Ağır titreşimli silindir  | 6,00 - 15,0   | 6,00 - 13,0    | 25,0 - 40,0   | 0,30 - 1,50          | 4,0 - 6,0    |
| Vurmalı silindir          | 7,00          | 10,0 - 14,0    | -             | 0,50 - 3,00          | 30’a kadar   |

#### 2.1.2.1.2 Drenaj yöntemi

Yer altı su tablası yer altı suyunun üst yüzeyidir. Bunun yeri, yeraltı suyunun ya da genelde bir akımın sabit bir noktasındaki statik basıncı ölçmeye yarayan iki ucu açık bir boru olarak tanımlanan piyezometre ile belirlenir. Zemin ile alakalı problemlerin büyük bir çoğunluğu genellikle su ile ilgilidir. Su aşırı doygunluk, kaldırma kuvvetleri, sıvılaşma, sızma basınçları vb. problemlere sebep olur (Cedergren, 1989).

Yer altı suyunun neden olduğu başlıca temel ve geoteknik problemler şev yenilmelerine ve toprak kaymalarına sebep olan veya katkı sağlayan sızma basınçlarının oluşması, baraj, rezervuar ve seddelerde borulanma olması, temel ya da temel zemininde yeraltı suyunun varlığının yolları bozması ve göçertmesi, askıda bulunan yeraltı suyunun sebep olduğu dolgu temel yenilmeleri, hidrostatik su basınçlarının sebep olduğu istinat duvarı yenilmeleri, aşırı boşluk suyu basıncının sebep olduğu temel ve toprak dolgu yenilmeleri, yeraltı suyu basınçlarıyla kaldırılan kanal kaplamaları, bodrum ve rıhtım veya dolu savak döşemeleri ve yeraltı su tablası altındaki gevşek granüle zeminin varlığı yüzünden deprem şoklarının sebep olduğu zemin sıvılaşması olarak sıralanabilir (Kayabalı ve Mollamahmutoğlu, 2004).

Drenaj; herhangi bir yerdeki suyun doğal ya da yapay yollarla uzaklaştırılmasına yönelik yapılan çalışmaların tümüne verilen isimdir. Suyu zeminden uzaklaştırarak zeminin faydalı özellikleri ortaya çıkarıp kesme dayanımı ve stabilitesi artırılabilir. Su içeriğindeki artış, özellikle kohezyonlu zeminlerde mukavemetin ve taşıma gücünün azalmasına sebep olur. Drenaj altyapısı, zeminin olabildiğince üniform bir su içeriğinde tutulmasını sağlar (Uzuner, 2006).

Drenaj yapıları, yüzey altı ya da zemin ve yüzeysel suları kontrol altına aldığından dolayı yüzeysel drenaj ve yüzey altı drenaj olmak üzere 2'ye ayrılır. Yüzey altı drenajlar enine yarmada ve dolguda kaba daneli dren şiltesi ve dren borusuyla yatay olarak perfore dren boruları kullanılarak yapılır. Boyuna yüzey altı drenaj yapıları ise, yol gövdesinden suyun dren hendekleri ile uzaklaştırılarak dayanımının artırılması ile yapılır (Tunç, 2001).

Yüzeysel drenaj ise yağışlardan dolayı yüzeysel akışa geçen suların kontrol edilmesidir. Deşarj edilecek suyun debisine, kullanım yerine ve amacına uygun olarak bordür hendeği, drenaj hendeği, düşüm oluğu ve menfez şeklinde uygulanmaktadır (Tunç, 2001). Açılan hendekler yardımıyla sular toplanılarak uzaklaştırılır. Suların cazibeli akımla gitmesi için hendekler eğimli yapılır ve hendek tabanları da suyun akışını sağlayacak şekilde düzenlenir. Hendekler uygun filtre malzemesi ile doldurularak oluşturulur (Uzuner, 2000).

### 2.1.2.2 Katkılı stabilizasyon

Problemlı zeminlere değişik katkı maddeleri ekleyerek fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi işlemine katkılı stabilizasyon denmektedir. Kireç, çimento, uçucu kül ve bitüm yaygın olarak kullanılır. Kimyasal stabilizasyonda katkı seçimi için rehber Çizelge 2.8’de verilmiştir.

**Çizelge 2.8** Kimyasal stabilizasyonda katkı seçimi için rehber (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

| Alan no | Zemin sınıfı                     | Önerilen katkı                      | Kısıtlamalar                     | 200 No.lu elekten geçen     | Açıklamalar                                                                                            |
|---------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1A      | SW<br>SP                         | Bitüm<br>Çimento<br>K-Ç-P*          | -<br>-<br>PI<25                  | -                           |                                                                                                        |
| 1B      | SW<br>SP<br>SW-SC                | Bitüm<br>Çimento<br>Kireç           | PI<10<br>PI<30<br>PI<12          | -                           |                                                                                                        |
| 1C      | SM<br>SC<br>SM-SC                | Bitüm<br>Çimento<br>Kireç<br>K-Ç-P* | PI<10<br>**<br>PI>12<br>PI<25    | En fazla %30<br>-<br>-<br>- |                                                                                                        |
| 2A      | GW<br>GP                         | Bitüm<br>Çimento<br>K-Ç-P*          | -<br>-<br>PI<25                  | -                           | Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda |
| 2B      | GW<br>GP<br>GW-GC<br>GC<br>GP-GC | Bitüm<br>Çimento<br>Kireç<br>K-Ç-P* | PI<10<br>PI<30<br>PI>12<br>PI<25 | -                           |                                                                                                        |
| 2C      | GM<br>GC<br>GM-GC                | Bitüm<br>-<br>Kireç<br>K-Ç-P*       | PI<10<br>**<br>PI>12<br>PI<25    | En fazla %30<br>-<br>-<br>- |                                                                                                        |
| 3       | CH<br>CL<br>ML<br>ML-CL          | Çimento<br>Kireç                    | LL<40 ve PI<20<br>PI>12          | -<br>-                      | Organik ve kuvvetli asidik zeminler uygun olmamaktadır.                                                |

\* K-Ç-P: Kireç-çimento-puzolan kombinasyonu

\*\*  $PI \leq 20 - ((50-200 \text{ No.lu elekten geçen yüzde})/4)$

Bunun yanı sıra mermer tozundan araba lastiğine, kloridlerden özel kimyasal bileşiklere kadar birçok katkı maddesiyle zemin iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Belirlenen katkı maddesini optimum düzeyde zemine ilave etmek, zeminin türüne ve özelliklerine bağlı olarak durabilitesinden fizibilitesine kadar pek çok özelliğini iyileştirebilmektedir.

#### **2.1.2.2.1 Bitüm ile iyileştirme**

Bitüm doğal ya da pirojenik kökenli ve moleküler ağırlıkları farklı olan ağır hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin birleşimi olup çoğu kez bunların gaz, sıvı, yarı-katı veya katı halde olabilen ve metal olmayan türevleriyle birlikte bulunan, yapıştırıcı özelliğe sahip ve karbon disülfürde ( $CS_2$ ) tamamen çözünen bir madde olarak tanımlanır (Kett, 1998; Ilıcalı vd, 2001). Uzuner (2000) bitümü asfalt vb. petrolden elde edilen yapışkan, siyah ve sıcakken sıvı olan ürün olarak tanımlamaktadır. Asfaltten ve malten olmak üzere iki gruptan oluşur ve n-heptanda çözülen kısmına malten, çözilemeyen kısma ise asfaltten denir (Ilıcalı vd, 2001).

Bitümlü maddelerin daneler arasında geçirimsizlik sağlayan bir işlevi vardır. Kullanılacak maddenin kil ve organik maddelerden arındırılmış olması şartıyla ya danelerin birbirine yapışmasını sağlar ya da zemini su geçirmez hale getirerek daneler arasında bulunan suların birbirleriyle olan bağlarını korur veya her ikisini de aynı anda yapar. Bu yöntemde katkı maddesi olarak genelde yaklaşık %5-10 oranında asfalt veya katran kullanılır. Bitümle iyileştirme özellikle karayollarında ve yüzey kaplamalarında kullanılır (Uzuner, 2000).

Asfalt ile yapılan stabilizasyon, zemini suyun zararlı etkilerinden korur ve daneleri birleştirir. Danelerin yüzeyini saran bitüm, ince daneli zeminlerin suyla temas edip yumuşamasını önler. İri daneli zeminlerin ise kohezyon kazanmasını sağlar. Danelerin birbirine yapışması sonucunda ise zeminin rüzgâr ve su erozyonuna karşı olan direncini artırır (Özaydın, 1989).

Bitümle yapılan iyileştirme, killi zeminlerden ziyade granüler ve plastik olmayan zeminlerde uygulanır. Bitüm, kohezyonsuz granüler zeminde daneleri birbirine bağlayarak zemini su geçirmez hale getirir ve yük taşıma kapasitesini artırır. İnce daneli zeminler de ise ana hedef geçirimsizliği azaltmaktır (Hausmann, 1990; Çakıroğlu, 2007).

### 2.1.2.2.2 Uçucu kül ile iyileştirme

Termik santrallerde yakılan pulverize edilmiş kömürden taban külü, cüruf malzeme ve uçucu kül olmak üzere 3 çeşit atık malzeme oluşur (Aksoy, 1992). 0.09 mm inceliğe kadar öğütülen taş veya linyit kömürünün termik santrallerde 1100-1600°C’de yanmasıyla oluşan, baca gazlarıyla beraber atmosfere sürüklenen silisli ve alümine silisli yanma kalıntılarına uçucu kül denilmektedir. Atmosfere sürüklenmeyen ve fırın tabanına düşen daha iri taneli maddelere de taban külü denilmektedir (Mehta, 1986). Termik santrallerinin atıklarının %75-80’lik kısmı uçucu kül geri kalanı ise taban külüdür (Çalık, 2012). Uçucu kül bir fabrika atığıdır ve silika, alümina, değişik oksitler ve alkaliler içerir. Hidrate kireç ile reaksiyona girebilmektedir. Yol temel ve alt temel tabakalarında kullanımı uygundur (Yılmaz, 2015). Genelde %10-35 arası uçucu kül + %2-10 arası kireç karışımları uygun karışımlardır (Yıldırım, 2002).

Hollanda, Almanya ve Belçika’da üretilen uçucu külün neredeyse tamamına yakını, İngiltere’de yaklaşık %50’si, ABD’de %32’si, Çin’de %40’ı civarında uçucu kül diğer alanlarda kullanılmaktadır. Ancak uçucu külün dünya üzerinde %25 civarında bir geri dönüşümü olduğu görülmektedir (Bhattacharjee ve Kandpal, 2002). Türkiye’de 1990’lı yılların verilerine göre sadece %1 civarında uçucu külün yeniden kullanımı söz konusudur. Arta kalan kısmının ise depolanması veya atılmasının çevreye ve kamuya zararı büyüktür (Çalık, 2012).

Uçucu küllerin fiziksel özelliklerini belirlemek için sıkışık-gevşek birim hacim ağırlık, spesifik yüzey, özgül ağırlık ve dane büyüklüğü dağılımı deneyleri; stabilite özelliklerinin belirlenmesi için serbest basınç, üç eksenli basınç gibi dayanım deneyleri ve kimyasal özelliklerini belirlemek için ise kimyasal analiz kullanılır. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen en önemli faktörler, kömür çeşidi ve saflığı, yanma sistemi, öğütülme inceliği ve toplama-depolama metotlarıdır (Atanur, 1972).

Uçucu küller içerdiği CaO miktarı bakımından C ve F sınıfı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kimyasal kompozisyonunda %10’dan fazla oranda CaO içeren küller C sınıfı, daha az içeren küller ise F sınıfı olarak adlandırılmaktadır. Bitümlü kömürün yanması ile F tipi uçucu küller elde edilir. CaO miktarı düşüktür ve silis ve alümina içerdiğinden yalnız başına çimentolaşma özelliği oldukça azdır. Lakin kireç ile

reaksiyona girdiklerinde puzolanik özellik göstermektedir. Linyit ve kömürün yanmasıyla da yüksek oranda kireç içeren C tipi uçucu küller elde edilir. Kireç içerdiği için ek bir katkı maddesi ihtiyacı duyulmaksızın yalnız başlarına bağlayıcı olarak kullanılabilirler. (ASTM C 618; Tumluer, 2006).

Uçucu külün fiziksel özellikleri Çizelge 2.9’da, sağlaması gereken fiziksel değerler Çizelge 2.10’da verilmiştir.

**Çizelge 2.9** Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Gücek, 2011)

| Çap (Mikron) | Renk | Şekil    | Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> ) | İncelik                      |
|--------------|------|----------|------------------------------|------------------------------|
| 1 – 200      | Gri  | Yuvarlak | 2.2 - 2.7                    | Yaklaşık çimento inceliğinde |

**Çizelge 2.10** Uçucu küllerin sağlaması gereken fiziksel değerler (Çalık, 2012)

|                                               | ASTM C 618 (2002) |          | TS 639<br>(1975) |
|-----------------------------------------------|-------------------|----------|------------------|
|                                               | F sınıfı          | C sınıfı |                  |
| İncelik:                                      | 34                | 34       | -                |
| 45 mikron göz açıklıklı kalan miktar, maks. % |                   |          |                  |
| Özgül yüzey, min. mm <sup>2</sup> /g          | -                 | -        | 300000           |
| Dayanım aktivite indeksi:                     | 75                | 75       | 70               |
| 28. gün, min. %                               |                   |          |                  |
| Su ihtiyacı:                                  |                   |          |                  |
| Kontrol numunesine kıyasla, maks. %           | 105               | 105      | -                |

Zemin iyileştirmesinde kullanılan uçucu küllerin kalitesini organik miktarı (LOI), incelik, kimyasal bileşim ve üniformluk etkilemektedir. Yüzeysel zemin iyileştirmelerinde aynı çimento ve kireç gibi kullanılan uçucu kül, kimyasal ve mekanik yöntemler için iyi bir katkı maddesidir. Genelde şişme ve taşıma gücü problemi olan zeminlerde uygulanır. Zemin iyileştirmesinde mukavemeti artırır, ek

kazı ve dolgu maliyetini azaltır, yapım hızını artırır ve taşıma gücü arttığından dolayı yapılacak dolgu kalınlığını azaltır. Bazı zemin iyileştirmelerinde duruma göre çimento ya da kireçle karıştırılabilir (Çetin, 2011).

#### 2.1.2.2.3 Çimento ile iyileştirme

Çimento kil, alçıtaşı ve kalkerden meydana gelen, su ile tepkimesi sonucu sertleşen hidrolik bir bağlayıcıdır. Genel olarak kullanılan türü ise portland çimentosudur. Kırılan kil, kalker ve gerekliyse demir cevheri ve/veya kum eklenerek öğütülür ve toz biçimine getirilir. Bu malzeme döner fırında 1500 °C’de pişirilir. Klinker bu işlemde sonra oluşan ürüne verilen isimdir. Sonra klinkere %4-5 oranında alçıtaşı eklenip çok ince toz haline getirilir ve böylece portland çimentosu elde edilmiş olur (Tumluer, 2006).

Çimento ile iyileştirme zeminin özelliklerini iyileştirmede oldukça etkili bir yöntemdir. Bundan dolayı karayollarında ve hava meydanlarının yapımında çimento ile iyileştirme sıkça kullanılmaktadır. Genelde zeminin kuru ağırlığının %5-15’i oranında çimento ile zemin karıştırılarak kompaksiyon yapılır (Tumluer, 2006).

Çimento ile stabilizasyonda zeminin cinsi ve su/çimento oranı en önemli temel faktörlerdir. Su miktarının çokluğu ya da azlığı mukavemetine ve plastisitesine ciddi anlamda etki etmektedir (Littlejohn, 1982). Saf kohezyonlu ve organik zeminlerde uygun bir yöntem değildir. Serbest basınç dayanımı testleriyle beraber iyileştirme için lazım olan optimum çimento miktarı belirlenir. Zemin ince daneli ise belirlenen optimum su içeriğinden daha yüksek miktarda su katılarak deneyin yapılması daha iyi sonuçlar vermektedir (Uzuner, 2013).

Çimento ile iyileştirme yöntemi gevşek ve akışkan olmayan zeminlerde kullanılmakta ve oldukça da etkili olmaktadır. Zemine çimento eklenmesiyle zeminin likit limiti azalırken plastik limit ve işlenebilirliği artmaktadır. Özellikle killi zeminlerde likit limit %50’den, plastisite indisi de %25’den az ise bu yöntem çok elverişlidir. Çimento, aynı kireç gibi kür süresi arttıkça zeminin dayanımı artırır. Farklı zemin sınıflarına göre çimento miktarı Çizelge 2.11’de sunulmuştur.

**Çizelge 2.11** Farklı zemin sınıflarına göre çimento miktarı (Tunç, 2002)

| AASHTO<br>zemin<br>sınıfı | Birleştirilmiş zemin sınıfı | Tipik çimento<br>içeriği<br>(% ağırlıkça) | Çimento ihtiyacı sınırları |                  |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|------------------|
|                           |                             |                                           | Hacimce<br>(%)             | Ağırlıkça<br>(%) |
| A-1-a                     | GW,GP,GM,SW,SP,SM           | 5                                         | 5-7                        | 3-5              |
| A-1-b                     | GM, GP, SM, SP              | 6                                         | 7-9                        | 5-8              |
| A-2                       | GM, GC, SM,SC               | 7                                         | 7-10                       | 5-9              |
| A-3                       | SP                          | 9                                         | 8-12                       | 7-12             |
| A-4                       | CL, ML                      | 10                                        | 8-12                       | 7-12             |
| A-5                       | ML, MH, CH                  | 10                                        | 8-12                       | 8-13             |
| A- 6                      | CL, CH                      | 12                                        | 10-14                      | 9-15             |
| A-7                       | MH, CH                      | 13                                        | 10-14                      | 10-16            |

Çimento ile stabilizasyonda dikkat edilmesi gereken hususları şöyle sıralayabiliriz;

- Zemin yüzeyinin yumuşatılması ve çimento ile stabilizasyona uygun hale getirilmesi, kullanılacak çimentonun uygulama yapılana kadar nemden korunur şekilde muhafaza edilmeli,
- Bu yöntemi uygulamadan önce uygun olmayan zemin ya uzaklaştırılmalı ya da uygulama yapılacak bölge homojen hale getirilmeli,
- Zemin yüzeyine serilen çimentonun aynı gün içinde karıştırma ve sıkıştırma işlemleri tamamlanmalı ve rüzgârın istenmeyen etkileri hesaba katılarak savrulma minimum seviyeye indirilmeli,
- Çimento ve zemin kuru şekilde karıştırıldıktan sonra su ile karıştırma yapılmalı ve ardından hemen sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmeli,
- Sıkıştırma işlemi 2 saat içerisinde tamamlanmalı ve zemin 30 dakika boyunca işlem görmeden bekletilmemelidir. Sıkıştırma yapılmadan donan çimento güçlendirmeye bir fayda sağlamayacağından dolayı yerinden kaldırılmalı,
- Sıkıştırma işleminden sonra zemin üzerinde kalan gevşek malzeme alınmalıdır,
- İyileştirmenin istenilen ölçüde olup olmadığı ölçüm teknikleriyle kontrol edilmelidir (Kılıç, 2008).

Kireç ve çimento stabilizasyonunda durabilite kriterleri Çizelge 2.12’de yer almaktadır.

**Çizelge 2.12** Kireç ve çimento stabilizasyonunda durabilite kriterleri (Tunç, 2002)

| Zemin türü             | 12 ıslanma-kuruma veya donma-çözülme periyodu sonucu numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp (%) |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Granüler, $PI > 10$    | 8-14                                                                                                    |
| Granüler, $PI < 10$    | 11-14                                                                                                   |
| Kil                    | 6-14                                                                                                    |
| Silt                   | 8-14                                                                                                    |
| A-6, A7                | 7                                                                                                       |
| A-2-6, A-2-7, A-4, A-5 | 10                                                                                                      |
| A-1, A-2-4, A-2-5, A-3 | 14                                                                                                      |

#### 2.1.2.2.4 Kireç ile iyileştirme

Kalkerin yani kireç taşının kalsine edilmesiyle oluşan kalsiyum bazlı maddeye kireç denir. Kimyasal yapısında kalsiyum karbonat ya da magnezyum karbonat bulunur. Bunların dışında demir, kükürt, silisyum ve alüminyum gibi elementlerde farklı oranlarda bulunabilir (Kızılçelik, 2010). Kireç taşının özel fırınlarda çeşitli ısılarda (850-14500 °C) pişirilmesiyle kireç elde edilir. Kireç taşına yapılan bu pişirme işlemine kalsinasyon denir ( $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ ).

Kirecin rengi beyazdır ve türüne göre suda ve havada sertleşme özelliği gösterir. Suyla karıştırıldığında inorganik esaslı bağlayıcı bir maddedir. Kalsinasyon reaksiyonu sonucunda oluşan CaO (sönmemiş kireç), suyla temas ederse söndürülmüş kalker kireci oluşur ve ısı açığa çıkar (Ghabae, 2015).

Atmosferden alınan karbondioksit ile kalsiyum hidroksit reaksiyona girerek yeniden kalsiyum karbonatı oluşturur. Buna da karbonasyon denir. Kirecin depolama ve nakliye sırasında devamlı hava akımının etkisinde kalmasıyla oluşur. Bu reaksiyon kirecin yüzdesini azalttığı için istenmez (Pektaş, 2012). Çizelge 2.13 ‘te kalsiyum kirecinin bileşimi sunulmuştur.

**Çizelge 2.13** Kalsiyum kirecinin bileşimi (Öntürk, 2011)

| Bileşimi teşkil eden maddeler                                                                                 | Kalsiyum kireci (söndürülmüş)<br>S-KK 80 (ağırlıkça %) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| CaO                                                                                                           | En az 80                                               |
| MgO                                                                                                           | < 5                                                    |
| CO <sub>2</sub>                                                                                               | En çok 7                                               |
| Asitte çözünmeyen maddeler, SiO <sub>2</sub> dahil                                                            | En çok 1,5                                             |
| Metal oksitler: AlO <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> dahil | En çok 1                                               |
| SO <sub>3</sub> dahil                                                                                         | En çok 2                                               |

Kireç ile iyileştirme bilinen en eski iyileştirme yöntemlerinden biridir. Eski Babil, Mısır, Çin, Persler ve Hititliler tarafından kullanılmıştır. Romalılar ise kireci yol yapımında ve su içi inşaatlarda kullanmışlardır. Roma'nın yakınında bulunan Pozzuoli bölgesinden çıkarılan volkanik külün kireçle birleştiğinde reaksiyona girdiği ve büyük stabilite kazandığı bilinmektedir (Ghabaee, 2015). Modern inşaat uygulamalarında ilk kez 1924 yılında kullanılmıştır. 1930'lu yıllarda doğrudan killi zeminler üstüne yapılan yolların iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Modern olarak kireç ile iyileştirme 2. Dünya Savaşı sırasında yapılan karayolları ve demiryollarında yoğun bir şekilde uygulanmıştır. Günümüzde temel ıslahı kapsamında otoyollarda, demiryollarında, havaalanlarında, yapı inşaatlarında ve temel ıslahında kullanımı devam etmektedir (Erkan, 2007).

Kireç hem maliyet bakımından ucuz hem de doğada bol miktarda bulunan bir maddedir. Dolayısıyla kireç ile iyileştirme özellikle karayollarında oldukça fazla kullanılmaktadır. Zeminin içeriğindeki kil oranına bakılıp, optimum kireç oranı belirlendikten sonra iyileştirme yapılabilir. Kireç ile zemin iyileştirilmesinde zemine kuru ağırlığının %10'u oranında kireç katılabilir. Kohezyonlu zeminlerde uygulanan bu iyileştirme yöntemi, plastisite indisini düşürür. Yapılacak olan deneylerle katılacak olan kireç miktarı belirlenir (Uzuner, 2013).

Kireç ile iyileştirme dolgu malzemesi şartlarını sağlamayan, basınç dayanımı ve CBR değerleri düşük ve şişme potansiyeli fazla zeminlerin kullanılabilirlik özelliklerinin artırmak amacıyla belirli kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip sönmüş ya da sönmemiş kireç katılması suretiyle yapılan stabilizasyon çalışmasıdır (Kavak vd,

2008). Kireç, zeminlerin kurutulması, işlenebilirliğinin artırılması, hacim değişiminin sınırlandırılması ve dayanım artırılması için kullanılan bir maddedir (Aytekin, 2004). Zemin sınıfı CL, CH, ML, MH, ML-CL, SM, SC-SM, SC, GM, GM-GC, GC olan ve kil, silt içeren ince gradasyonlu zeminlerin kireç katılarak iyileştirilmeleri mümkündür.

Kireç ile zemin stabilizasyonu, uygun olmayan veya yetersiz zeminleri uygun hale getirilmesine, iyileştirme maliyetinin düşürülmesine, dolgu ve yarma hacimlerinin azaltılmasına, kötü hava koşullarında çalışma olanağı sunulmasına, kompaksiyon derecesine kolay ulaşılmasına ve zeminin dayanım ve dayanıklılığının artırılmasına fayda sağlamaktadır (Pektaş, 2012).

Kireç ile iyileştirmede sönmüş kireç(kalsiyum hidroksit) kullanılmaktadır. Daha etkili olmasına rağmen sönmemiş kireç tehlikeli ve yakıcı olduğu için genelde kullanılmamaktadır. Zemin iyileştirmesi için kullanılan kireç miktarı zemin kuru ağırlığının yaklaşık %3-10'u arasında değişmektedir (Ghabaee, 2015). Kil mineralleri içeren zeminlerin çok büyük bir kısmı %3-10 sönmüş kireç katılmasına olumlu cevap verir. Sert ve suda erimeyen kalsiyum silikat jelini hidratlı silis içeren kil mineralleri ve diğer ince daneli malzemeler oluşturur. Kireç kil minerallerinden silisi sökerek reaksiyona girer. Kil tabakalarını silikat jel çevreler ve boşlukları doldurur ve zamanla hidratlı silise dönüşür. Dolayısıyla zemin mukavemet artışı yıl boyunca devam eder (Özaydın, 1989). Kireç ile iyileştirme yapılan uygulamalarda killi malzemenin kimyasal yapısı bozulur ve malzeme eski haline geri dönemez. Su ile temasında kil davranışı göstermemesi, su tutma ve şişme özelliğini kaybetmesi kireç ile iyileştirme de büyük avantaj sağlamaktadır (Özdemir, 2007).

Her zeminde kireç ile stabilizasyon yapmak elbette mümkün değildir. Kireç stabilizasyonu organik olan ve kumlu zeminler için etkili değildir. Çakıllı zeminlerde ise etkisi oldukça fazladır (Ghabaee, 2015). Sülfat içeren killerin kireçle iyileştirilmesinde çimentolaşma ürünleri olan etrenjit ve tomasitin oluşmasından dolayı zeminde şişme problemleri olabilir (Mitchell, 1986; Hunter, 1988), Mitchell (1986) 5000 ppm'den (ppm; milyonda bir, mg/kg) fazla sülfat içeren zeminlerde kullanılmamasını söylemiştir. 1:1 su-zemin oranında 500 ppm, 1:10 su-zemin oranında 2000 ppm'e kadar sülfat oranlarında da şişme problemi görülebilir (Petry ve Little,

1992). Bu yüzden zeminin sülfat içeriğinin tespiti kireç stabilizasyonunda yapılması gereken bir incelemedir. Genel olarak fazla organik madde içeren zeminlerde kireç ile iyileştirme etkili değildir (Çalık, 2012). Zeminde %5'den fazla organik madde bulunması kireç stabilizasyonunda gerçekleşen reaksiyonları durdurucu bir etki yapmaktadır (Arman ve Moonfish, 1972). Ayrıca kireç stabilizasyonuna zarar verir. Organik madde ve sülfat iyonu stabilizasyonu olumsuz etkilediğini önceden belli etmiyor ancak kuruma- ıslanma periyotlarında zemin ufalarak dağılmaktadır. (Nelson ve Miller, 1992). Zemin cinsine göre stabilizasyonda kullanılan optimum kireç miktarı Çizelge 2.14'te verilmiştir.

**Çizelge 2.14** Zemin cinsine göre sabilizasyonda kullanılan optimum kireç miktarı (Tunç, 2002)

| Zemin cinsi olarak      | Zeminin kuru ağırlıkça yüzdesi |
|-------------------------|--------------------------------|
| Siltli kil              | 2 - 4                          |
| İyi derecelenmiş çakıl  | 3                              |
| Plastik kil             | 3 - 8                          |
| Yüksek plastisiteli kil | 3 - 10                         |
| Kumlu kil               | 5                              |
| Kumlar                  | Tavsiye edilmiyor              |
| Organik zeminler        | Tavsiye edilmiyor              |

Nelson ve Miller (1992) farklı çeşitler için zemin iyileştirmesini biraz daha özetlediği çizelge, Çizelge 2.15'te vermiştir.

**Çizelge 2.15** Farklı zemin çeşitleri için yaklaşık kireç miktarı (Nelson ve Miller, 1992)

| Zemin Türü             | Tavsiye edilen yaklaşık kireç miktarları (%) |              |
|------------------------|----------------------------------------------|--------------|
|                        | Sönmemiş kireç                               | Sönmüş kireç |
| Killi Çakıl(GC, GM-GC) | 2-3                                          | 2-4          |
| Siltli kil             | 3-8                                          | 5-10         |
| Kil                    | 3-6                                          | 3-8          |

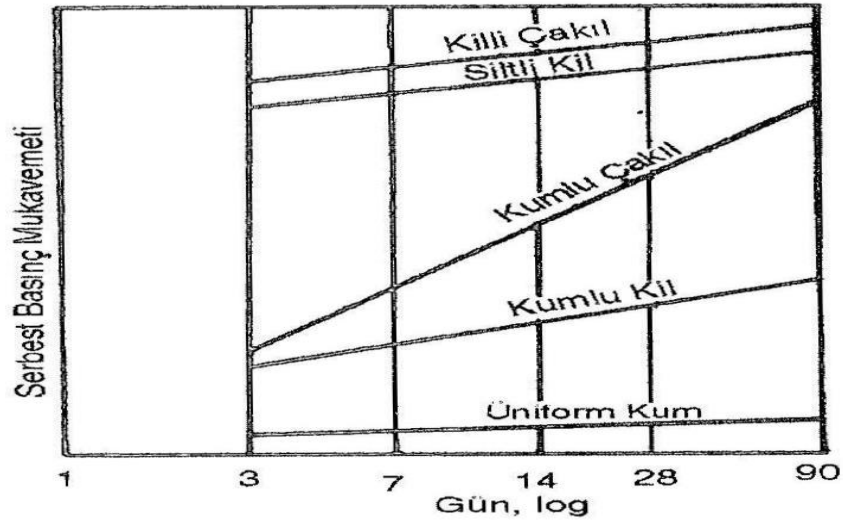
Kireç yüzdesi etkili bir karışım için %5-10 arasında değişir. İlk %2-3 arasındaki ağırlığa kadar olan kısım toprağın özelliğini ve işlenebilirliğini geliştirmede önemli ve

etkili bir etkiye sahiptir (Raj, 1995). Önerilen kireç karışım oranları Çizelge 2.16'da gösterilmiştir.

**Çizelge 2.16** Önerilen kireç karışım oranları (Ingles ve Metcalf, 1972)

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

Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı Şekil 2.11'de verilmiştir.



**Şekil 2.11** Aynı kireç içeriğindeki farklı zemin cinslerinin zamana bağlı mukavemet artışı (Tunç, 2002)

Kireçle iyileştirme için gerekli reaksiyonların olabilmesi için ortamda suyun olması şarttır (Little, 1987). Kireçle zemin iyileştirme sonucunda katyon değişimi, yumaklaşma, agregasyon ve çimentolaşma oluşur (Fang, 1991).

Killerde görülen divalan kalsiyum iyonları ile monovalan katyonları yer değiştirirler. Katyon değişimleri için dizilim  $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^{+} > K^{+} > Na^{+} > Li^{+}$  şeklindedir. Bu dizilimdeki herhangi bir katyon, sağındaki iyonları değiştirebilir. Mesela kalsiyum iyonları kilde, potasyum ve lityum iyonlarının yerine geçebilir. Böylelikle kil danecikleri birbirlerine kenetlenip daha büyük danecikler oluşturur. Sonuç olarak plastik limit, şekil değiştirme modülü, çekme mukavemeti, suya karşı direnç, geçirimsizlik, işlenebilirlik artarken; likit limit, plastisite indeksi, şişme-büzülme azalır, mukavemet ve sıkışabilirlikte ise iyileşme olur (Çalık, 2012).

Kireç stabilizasyonu sonucunda zeminde kısa ve uzun dönemde bazı değişiklikler olmaktadır. Zeminin plastik özellikleri azalması, plastik limitin artması, likit limitin düşmesi, CBR değerlerinde artışların olması, optimum su muhtevalarının artması, proktor eğrisinin düşmesi ve proktor yoğunluklarının düşmesi kısa dönemde olan değişikliklerdir. Uzun dönemde ise kayma mukavemeti, şişme ve büzülme karşı stabilite, çekme gerilmeleri, serbest basınç mukavemeti ve don etkisine karşı olan direnç artmaktadır (Kavak ve Akyarlı, 2007).

Eades ve Grim (1966) zemine farklı oranda kireç katmış ve serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Çalışma sonucuna göre kireç miktarının artışıyla beraber %200-1000 arasında artışlar olduğunu gözlemlemişler ve zemine kireç katılmasıyla yapılan iyileştirmenin zemin dayanımına katkısının 10 yıldan sonra bile devam ettiğini kanıtlamışlardır (Trb, 1987).

Kavak (1996) saf bentonit ve kaolin killere kireç katarak serbest basınç mukavemetlerini incelemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda kaolin için 1 ayda 12 kat, bentonit için ise 1 ayda 6 kata varan artışlar olduğu göstermiştir. Bir aydan sonra mukavemetlerin zaman içerisinde hala arttığı da gösterilmiştir.

Kireç stabilizasyonunda uygulanan başlıca laboratuvar deneyleri ise likit limit ve plastik limit deneyi, cbr deneyi, pH deneyi, harvard proctor deneyi, yıkamalı elek analizi, serbest basınç deneyi, enerji dağılım spektroskopisi, x-ışını kırınım ve taramalı elektron mikroskobu deneyidir (Kızılçelik, 2010).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmadaki temel amaç, kireç ile zemin stabilizasyonda öğütülmüş kirecin normal kirece kıyasla zemin iyileştirmelerinde kullanımının araştırılmasıdır. Bu bölümde çalışma kapsamında hazırlanan karışımların fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler, kaynak alınan standartlar ve deney numunelerinin notasyonları anlatılmıştır.

#### 3.1 Materyal

Bu çalışma kapsamında kullanılan doğal malzeme Bayburt ilinin Demirözü ilçesinden 1975 rakımlı bir bölgeden ve yüzeyden yaklaşık 1.5 m derinlikten alınmıştır. Alınan malzeme Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Deneylerden önce doğal malzeme 24 saat etüvde kurutulmuş ve ardından deney numunelerinin hazırlanması işlemine geçilmiştir. Deney numunelerine ait notasyonlar Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1** Deney numunelerine ait notasyon bilgileri

| Deney örneklerinin karışım oranları          | Notasyon |
|----------------------------------------------|----------|
| Doğal zemin                                  | S        |
| Doğal zemin ve kireç                         | SL       |
| Doğal zemin ve öğütülmüş kireç               | SGL      |
| Doğal zemin ve %2 kireç (1. Grup)*           | SL2      |
| Doğal zemin ve %4 kireç (1. Grup)            | SL4      |
| Doğal zemin ve %6 kireç (1. Grup)            | SL6      |
| Doğal zemin ve %8 kireç (1. Grup)            | SL8      |
| Doğal zemin ve %10 kireç (1. Grup)           | SL10     |
| Doğal zemin ve %2 öğütülmüş kireç (2. Grup)* | SGL2     |
| Doğal zemin ve %4 öğütülmüş kireç (2. Grup)  | SGL4     |
| Doğal zemin ve %6 öğütülmüş kireç (2. Grup)  | SGL6     |
| Doğal zemin ve %8 öğütülmüş kireç (2. Grup)  | SGL8     |
| Doğal zemin ve %10 öğütülmüş kireç (2. Grup) | SGL10    |

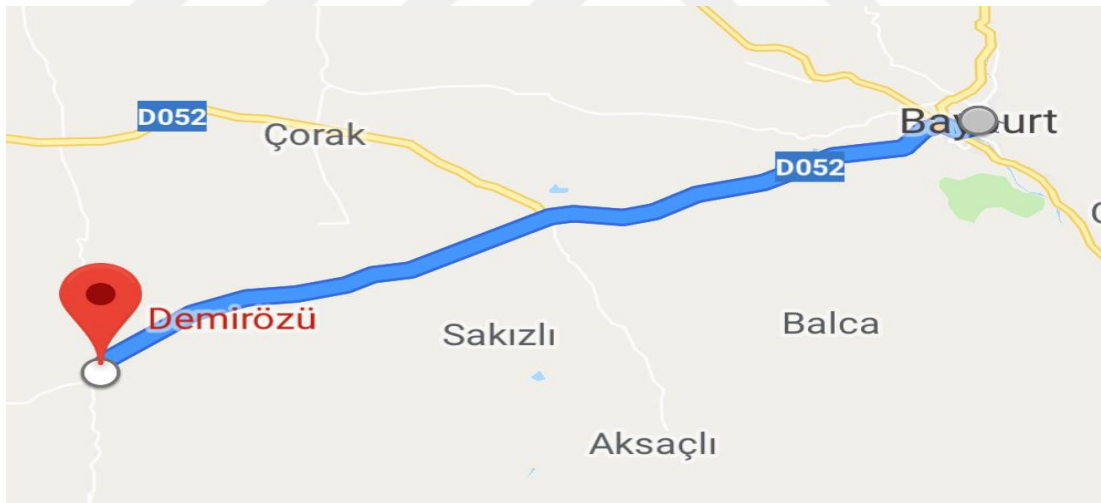
\*1.Grup: Normal öğütülmemiş kireç

\*2.Grup: Bilyeli öğütücüde 650 rpm'de 5 dakika öğütülmüş kireç

Deneylerde kullanılan kireç Karsan Kireç Sanayi ve Ticaret A.Ş. firması tarafınca üretilen sönmüş kireçtir. Kirecin zemin stabilizasyonunda kullanımında incelik etkisinin belirlenmesi amacıyla sönmüş kireç öğütölme işlemine tabii tutulmuştur. Doğal zemine sırasıyla %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kireç, öğütölmüş ve öğütölmemiş biçimde eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır.

### 3.1.1 Doğal malzeme

Deneylerde kullanılan zemin malzemesi Bayburt ilinin Demirözü ilçesindeki  $40^{\circ} 9' 50''$  kuzey enlemi ve  $39^{\circ} 53' 33''$  doğu boylamında bulunan 1975 m rakımlı bölgede bulunan bir araştırma çukurundan, yüzeyden yaklaşık 1,5 metre derinlikten temin edilerek Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Burada 0.425 mm elek açıklığı bulunan 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 Demirözü ilçesinin konumu

Çalışma sırasında kullanılan malzemenin sınıfı, ASTM D 2487 (2011) standardına göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir.

Doğal malzemeye uygulanan zemin mekaniği deneyleri sonucunda bulunan mühendislik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2** Doğal malzemenin özellikleri

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| USCS sınıflandırma                                  | CL         |
| Özgül ağırlık, $G_s$                                | 2.60       |
| Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{k,max}$ ( $Mg/m^3$ ) | 1,66       |
| Optimum su içeriği, $w_{opt}$ (%)                   | 19,5       |
| Likit limit, LL (%)                                 | 49         |
| Plastik limit, PL (%)                               | 25,8       |
| Plastisite indisi, PI (%)                           | 23,2       |
| Renk                                                | Sarımtırak |

Özellikleri Çizelge 3.2’de verilen malzemeye ASTM D 2974 standardına göre Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Analitik Kimya Laboratuvarı’nda organik madde tayini analizi yapılmıştır. Elde edilen verilere göre, doğal malzemenin içerisindeki organik madde oranının %4,9 seviyelerinde olduğu saptanmıştır. Literatür çalışmaları, organik madde miktarı %5’ten çok olan zeminlerin kireçle iyileştirilmesi durumunda zemindeki organik maddelerin kimyasal reaksiyonları azaltıcı etki gösterdiğini ve ıslanma kuruma periyotlarında zemini ufalayıp parçaladığını göstermiştir (Arman ve Moonfish, 1972; Nelson ve Miller, 1992). Dolayısıyla %4,9 bulunan organik madde oranı %5’ten daha az olduğu için kireçle iyileştirme için uygundur.

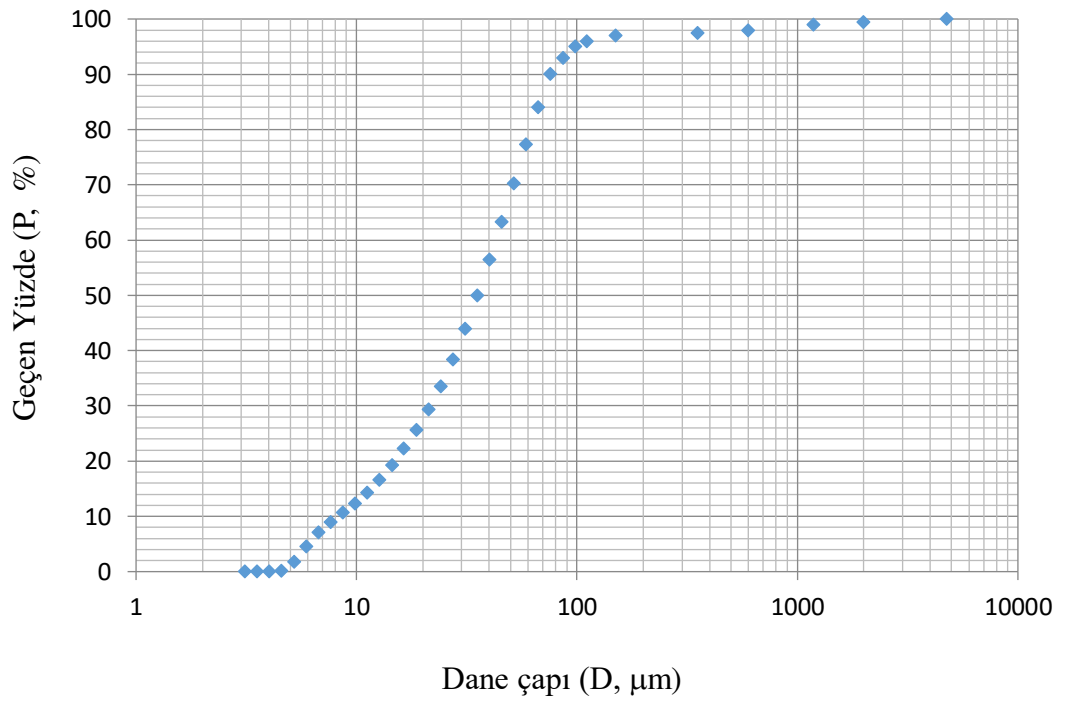
Doğal malzemeye yıkamalı elek analizi ve lazer kırınım yöntemi uygulanmıştır. 200 No’lu elek altı dane büyüklüğü dağılımının belirlenmesinde lazer kırınım yönteminde belirlenen kil yüzdesi hidrometre ve pipet yöntemiyle belirlenenden daha güvenilirdir. Bunun en önemli nedeni tane şeklidir. Kil taneleri genel olarak levhamsı ve yapraksı şekildedir. Su içerisinde yavaş çökerler. Stokes yasası gereğince oval taneler daha küçük taneler gibi hesaplanırlar. Örnek miktarının azlığı, ölçüm süresinin kısalığı, deney sonuçlarının depolanabilirliği ve askıda kalıp çökmeyen malzemenin de ölçülebilmesi lazer kırınım yönteminin avantajları arasındadır (Özer ve Orhan, 2007).

Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde doğal malzemeye lazer kırınım testi yapılmıştır. Deneyin yapıldığı cihaz

Mastersizer Hydro 3000 ile olup cihazın görüntüsü Şekil 3.2’de, belirlenen dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2 Mastersizer Hydro 3000 lazer kırınım cihazı



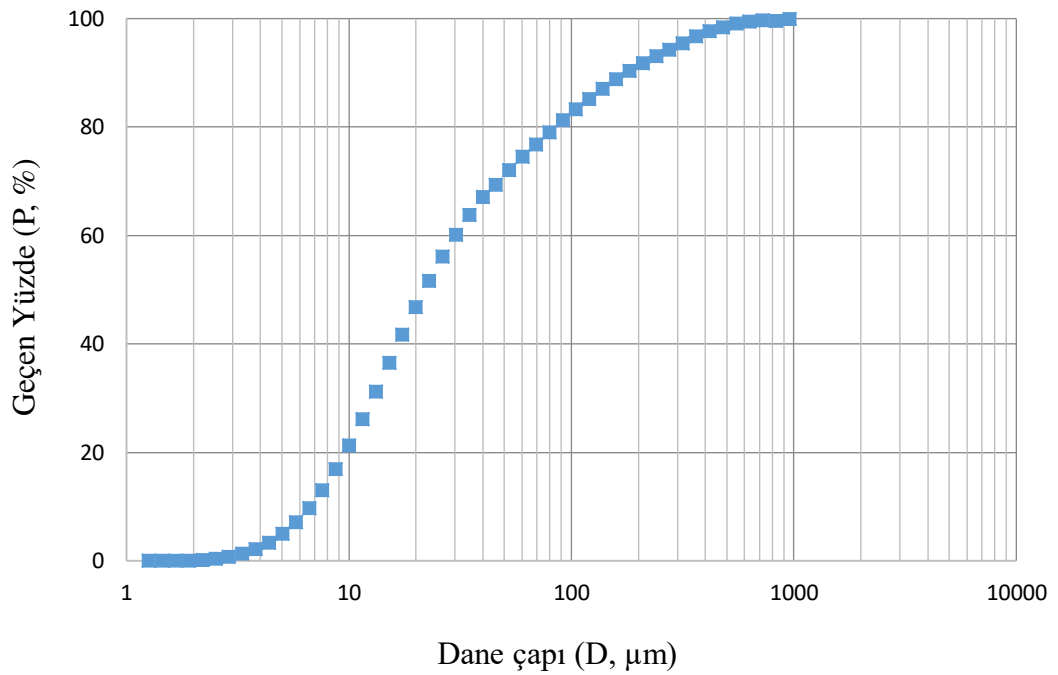
Şekil 3.3 Doğal malzemenin dane boyutu dağılım eğrisi

### 3.1.2 Kireç

Deneylerde kullanılan kireç Karsan Kireç Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen SKK80-söndürülmüş kalker kirecidir. Kullanılan kireçle ilgili kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.3'te, normal kirecin tane dağılımı Şekil 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3** Söndürülmüş kalker kirecine ait fiziksel ve kimyasal özellikler

| Fiziksel analizler           |       |
|------------------------------|-------|
| 75 $\mu$ elek üzeri (%)      | 3.8   |
| Özgül ağırlık                | 2.37  |
| pH Değeri                    | 12.4  |
| Yoğunluk ( $\text{Mg/m}^3$ ) | 0.48  |
| Kimyasal analizler           |       |
| $\text{SiO}_2$ (%)           | 0.23  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)  | 0.11  |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)  | 0.40  |
| Aktif CaO (%)                | 65.00 |
| MgO (%)                      | 1.40  |
| $\text{Ca(OH)}_2$ (%)        | 85.80 |



**Şekil 3.4** Söndürülmüş kalker kireci tane dağılımı

### 3.2 Yöntemler

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan yöntemler ve yapılan deneylere ait referans alınan standartlara yer verilmiştir.

#### 3.2.1 Deneylerde referans alınan standartlar

Çalışma kapsamında yapılan deneyler ve uygulanan ASTM standartları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4** Deneyler ve standartları

| Deneyin adı                     | Standart           |
|---------------------------------|--------------------|
| Elek analizi                    | ASTM D 422 (2007)  |
| Organik madde tayini            | ASTM D 2974 (2007) |
| Özgül ağırlık deneyi            | ASTM D 854 (2010)  |
| Kıvam limitlerinin belirlenmesi | ASTM D 4318 (2010) |
| Standart kompaksiyon deneyi     | ASTM D 698 (2007)  |
| Serbest basınç deneyi           | ASTM D 2166 (2006) |
| Donma çözülme deneyi            | ASTM D 560 (1996)  |
| Durabilite testi                | ASTM D 559 (2003)  |

#### 3.2.2 Kıvam limitleri

1911 yılında İsveçli kimyager Albert Atterberg, tarafından ince taneli zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olan, kıvam limitleri olarak da bilinen su muhtevası değerleri bulunmuştur. Kıvam limitleri ya da diğer adıyla Atterberg limitleri zemin taneleri ve su arasındaki temasları ve değişen su oranına göre zeminin durumunu tanımlar. Atterberg, viskoz akmanın alt sınırı olarak likit limit, kilin plastisite özelliğini kaybettiği sınır için ise plastik limit değerlerini tanımlamıştır (Atterberg, 1911). Diğer bir ifadeyle zemine fazla su verilirse zemin akıcı hale gelir ve kesme direnci yok olur. Kurumaya bırakıldığı zaman kesme mukavemeti kazanır. Bu geçiş durumundaki su muhtevasına likit limit denir (LL veya  $W_L$  ile gösterilir). Plastik limit ise plastik ve katı durumları birbirinden ayıran sınır su muhtevasıdır ( $W_P$  veya PL ile gösterilir).

Bu çalışmada likit limitlerin belirlenmesi için kullanılan yöntem koni penetrasyon yöntemidir. Koni penetrasyon yönteminde standart koninin 5 saniye sonunda zemine 20 mm batmasına karşılık gelen su içeriği, o zeminin likit limitini göstermektedir

40 No'lu elekten elenmiş zemin numunesine bir miktar su katılarak karıştırılır. Deneyi yapan kişi tarafından belirlenen nispeten düşük su içeriğinden başlanarak likit limit kıvamına doğru artırarak devam edilir. Desikatörde 1 gün bekletilen malzeme minimum 10 dakika karıştırılır. Hazırlanan karışım kaba konularak yüzeyi düzlenir. Koni zemin yüzeyine batmayacak şekilde indirilip, deney başlatılır. 5 saniye sonunda okuma yapılır. Tekrar koni kaldırılıp kap içerisinden, koninin şeklinin bulunduğu kısımdan biraz numune alınarak darası belirlenen kaba konur ve tartılır. Tartıldıktan sonra etüve konur. Bu işlem su muhtevasında değişiklik yapılarak tekrarlanır. 20 mm penetrasyon değerine karşılık gelen su içeriği likit limit değeri olarak alınır.

Plastik limit ise 40 No'lu elekten geçmiş ve içerisine bir miktar su katılarak yoğrulmuş malzemenin avuç içiyle cam plaka üzerinde yuvarlanarak, 3 mm'de oluşan çatlamlara karşılık gelen değerdir. Koni penetrasyon cihazı ve etüve koyulan numuneler Şekil 3.5'te verilmiştir.

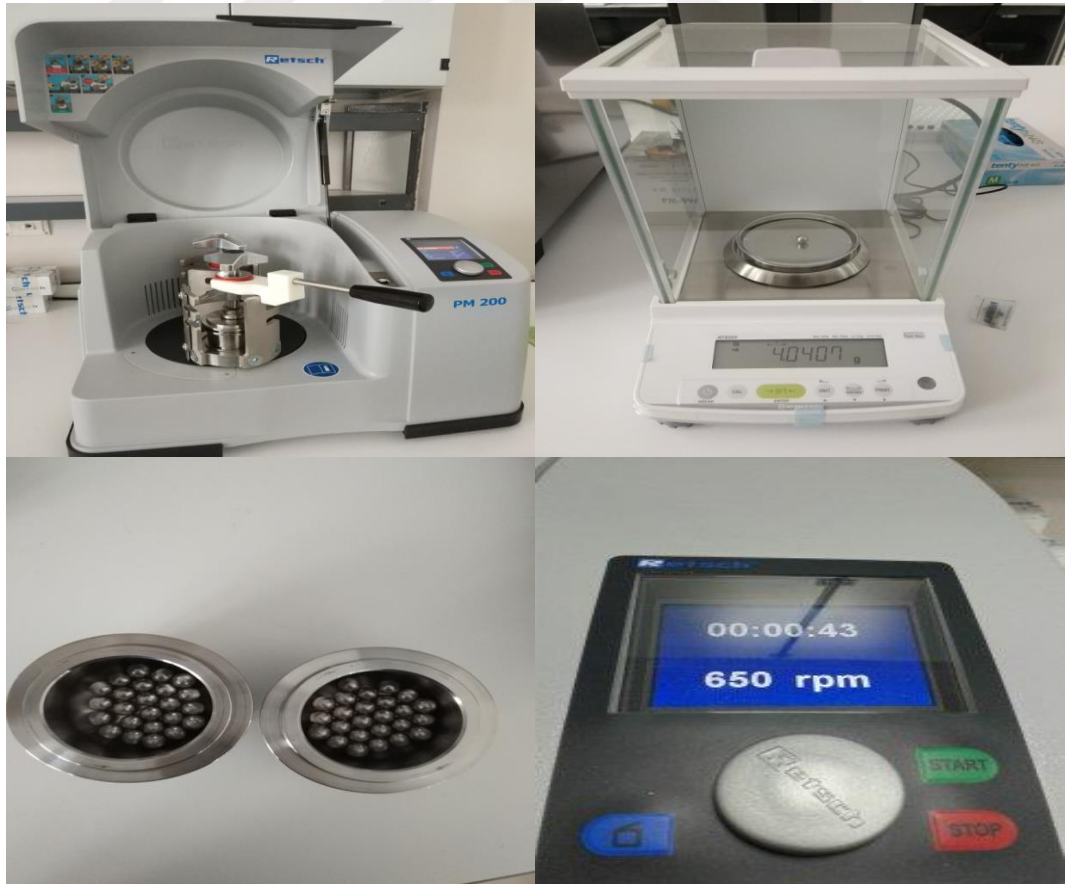


**Şekil 3.5** Koni penetrasyon cihazı ve etüve koyulan numuneler

### 3.2.3 Öğütme işlemi

Öğütme işlemini iki aşamalı gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada 400 gr kireç, Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Laboratuvarı'nda 3200 gr ve 7000 gr bilyeler ile 10 ve 20 dakika olmak üzere ayrı ayrı öğütülmüş ve bunların her biri için lazer kırınım testleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise yapı laboratuvarında 3200 gr ve 7000 gr bilyeler ile öğütülen malzeme ve normal kireç Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde tekrar öğütme işlemine tabii tutulmuştur. 250, 500 ve 650 rpm (durağan bir ekseninde, 1 dakika içerisinde gerçekleştirilen dönüş/devir sayısı)'de 5 dk, 15 dk, 30 dk ve 45 dakikalık öğütme işlemleri yapılarak optimum öğütme değeri yakalanmaya çalışılmıştır.

Retsch marka PM 200 modelli Şekil 3.6'da verilen bilyeli öğütücü ile gerçekleştirilmiştir. İçerisinde iki haznesi olan ve her birinde tanesi yaklaşık 4 gr olan 25 bilye bulunan özel bir kapama aletiyle kapatılan bu aletin bir haznesine her bir deney için yaklaşık 15 gr kireç katılarak öğütme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.6 Retsch marka PM 200 modelli bilyeli öğütücü

### 3.2.4 Kompaksiyon Deneyi

Farklı yöntemlerle zeminin tabakalar halinde serilerek, boşluk oranının azaltılarak ve zemin tanelerinin birbirine yaklaşması sonucunda daha sıkı hale gelmesini sağlayan mekanik işleme kompaksiyon denir. Kompaksiyon ile zemin dayanımı ve taşıma gücü artar, oturmalar azalır ve hacim değiştirme direnci artar (Fidan, 2016). Kompaksiyon deneyi standart proktor ve modifiye proktor olmak üzere iki şekilde yapılır. Bu çalışmada standart proktor deneyi yapılmış olup maksimum kuru birim ağırlık değerine denk gelen optimum su içeriğin bulunması amaçlanmıştır.

Belirli bir miktar kuru zemine biraz su ilave edilerek iyice karıştırılır. Hazırlanan karışım standartlara uygun silindirik çelik kalıba 3 kademedede düzgün bir şekilde yerleştirilir ve her defasında 25 adet tokmak vurulur ya da kompaksiyon aletiyle vurma işlemi yaptırılır. Sıkışan zemin kalıptan çıkarılır. Çıkarılan zeminden eşit dağılımlı olarak numune alınarak etüve konur ve su muhtevası tespit edilir. Bu işlem su katılarak en az 5 defa tekrarlanır. Deney sonuçları  $\rho_k$ -w grafiğine işlenerek kompaksiyon eğrisi grafiği oluşturulur. Bu eğriden  $\rho_{max}$  ve  $w_{opt}$  elde edilir. Şekil 3.7’de standart proktor deneyinin yapılmasına ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.7 Standart proktor deneyi yapım aşamaları

### 3.2.5 Serbest basınç deneyi

Genelde suya doymuş killi zeminlerde kayma direncinin belirlenmesi için kullanılan bir deneydir. Numunenin boy/en oranı en az iki olmalıdır. Bunun nedeni, boy/en oranı 2'den düşük olduğu zaman numunede meydana gelen kayma düzleminin, üst ve alt yükleme başlıkları ile kesişmesidir.

Çalışmada hazırlanan numuneler 100 mm boyunda ve 50 mm çapında silindirik numuneler şeklindedir. Numuneler 1, 7, 14 ve 28 günlük desikatör küründen sonra tek eksenli serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyiyle ilgili birkaç resim Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Tek eksenli serbest basınç deneyi yapım aşamaları

### 3.2.6 Islanma-kuruma periyodu deneyi

Desikatörde 28 gün kür edilen numuneler ASTM D 559 (2003) standardına göre 12 ıslanma-kuruma periyoduna tabii tutulmuştur. Desikatörden çıkarılan her bir numune kuru halde tartılarak deney için hazırlanan su dolu kabın içerisine özenle bırakılır. 24 saat su içinde bekletilen numuneler çıkarılır ve kurumaya bırakılır. Bir sonraki gün tekrar tartılarak tekrar suyun içerisine konur ve bu işlem 12 periyot halinde devam eder. Deney sonunda numunelerin kütle kayıpları ve hacimsel bütünlüğünü koruyup koruyamadığı incelenir. Bu çalışmada kireç ile iyileştirilmiş zeminin ıslanma-kuruma periyodu incelenmiştir. Islanma kuruma periyodu deneyi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Islanma-kuruma periyodu deneyi

### 3.2.7 Donma-çözülme çevrimi

Desikatörde 28 gün kür edilen numuneler ASTM D 560’a (1996) göre donma-çözülme işlemine tabii tutulmuştur. -20 ve 24 °C de 1 gün olmak üzere 7 çevrim yapılmıştır.

Kapalı sistem şeklinde ve havada donma-çözülme cihazında gerçekleşen deneyin ardından tek eksenli basınç deneyi yapılarak numunelerin dayanımları belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrim kabini ve deney düzeneği Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10 Havada donma-çözülme cihazı ve donma-çözülme deney düzeneği

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma kapsamında Bayburt ili Demirözü ilçesinden alınan zemin numunesinin kireçle stabilizasyonu irdelenmiştir. Kirecin inceliğinin zeminin dayanımına etkisi araştırılmak üzere öğütülmüş ve öğütülmemiş olarak iki farklı numune düzeneği hazırlanmıştır. Zemine sırasıyla %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında normal ve öğütülmüş kireç katılarak kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde deneylerden elde edilen bulgular ve bunların araştırılması anlatılmıştır.

##### 4.1 Deneylerden Elde Edilen Veriler

Çalışma kapsamında doğal malzemeye kireç katılarak likit limit ve plastik limit değerleri saptanmıştır. Belirli oranlarla hazırlanan karışımlara kompaksiyon deneyleri yapılarak maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su muhtevaları bulunmuştur ve diğer deney çalışmalarına seçilmiştir.

##### 4.1.1 Öğütme işlemi

Bu çalışmada öncelikle kirecin öğütülebilirliği incelenmiş olup optimum öğütme işlemi için deneme yanılma yöntemiyle kaba öğütme gerçekleştirilmiştir. 3200 gr bilye ile 400 gr kireç ve 7000 gr bilye ile 400 gr kireç 5, 10 ve 20 dakika karıştırılmıştır. Kaba karıştırma sonucu öğütülen kireç ile öğütülmemiş kireç arasında farklılıklar oluşmuş fakat kireç, istenilen boyuta getirilemediğinden dolayı öğütme işlemine nano öğütücüyle devam edilmesine karar verilmiştir.

Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Mastersizer Hydro 3000 ile yapılan lazer kırınım testi sonuçlarına göre herhangi bir öğütülme işlemine tabii tutulmamış kireç danelerinin %90'ı 48 mikron altı malzeme olarak tespit edilmiş ve özgül yüzey alanı 266,5 cm<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir.

Kireç danelerini öğütme işleminde ise Retsch pm 200 nano öğütücü kullanılmıştır. Haznelerin içerisinde her biri yaklaşık 4'er gram ağırlığında olan 25 adet bilye bulunmaktadır. 250, 500 ve 650 rpm'de (rpm; durağan bir eksenle, 1 dakika içerisinde gerçekleştirilen dönüş/devir sayısına tekabül eder.) 5, 15, 30 ve 45 dakika sürelerle farklı öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1** Öğütme işlemi sonucu elde edilen veriler

| Hız (Rpm) | Zaman (Dakika) | D <sub>10</sub> | D <sub>50</sub> | D <sub>90</sub> | Özgül yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /gr) |
|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------|
| -         | -              | 3,97            | 14,4            | 48              | 266,5                                   |
| 250       | 5              | 0,865           | 4,8             | 21,5            | 844,8                                   |
| 250       | 15             | 0,897           | 4,76            | 21,5            | 825,7                                   |
| 250       | 30             | 0,843           | 4,59            | 22,1            | 870                                     |
| 250       | 45             | 0,815           | 4,61            | 18              | 2522                                    |
| 500       | 5              | 0,757           | 4,09            | 21,7            | 2750                                    |
| 500       | 15             | 0,763           | 4,66            | 26,3            | 2604                                    |
| 500       | 30             | 0,741           | 4,63            | 20,2            | 2682                                    |
| 500       | 45             | 0,751           | 4,82            | 24,3            | 2569                                    |
| 650       | 5              | 0,693           | 3,42            | 20,3            | 3135                                    |
| 650       | 15             | 0,743           | 4,56            | 26              | 2648                                    |
| 650       | 30             | 1,14            | 5,65            | 19,1            | 1962                                    |
| 650       | 45             | 1,77            | 6,81            | 26,5            | 1543                                    |

Normal kirecin %90'ı 48 mikron altı malzeme ve özgül yüzey alanı 266,5 cm<sup>2</sup>/gr olarak olarak ölçülmüştür. 250 rpm'de 5, 15 ve 30 dakika öğütülen malzemenin boyutu yarısına, özgül yüzey alanı ise 3 katına çıkmıştır. 250 rpm'de 45 dakikalık öğütme işleminde ise özgül yüzey alanı yaklaşık 10 katına çıktığı gözlemlenmiştir.

Yapılan farklı öğütme işlemleri sonucunda optimum sonuç 650 rpm'de 5 dakika öğütme ile elde edilmiştir. Herhangi bir öğütülme işlemine tabii tutulmamış kireç danelerinin %90'ı 48 mikron altı malzeme olmasına karşın 650 rpm'de 5 dakikalık bir öğütme sonucunda malzemelerin %90'ı yaklaşık 20 mikron altına inmiştir ve özgül yüzey alanı 11 kattan fazla artarak 3135 cm<sup>2</sup>/gr seviyesine gelmiştir.

Malzemenin karıştırılma süresi arttıkça karıştırma hızına bağlı olarak malzeme boyutunda küçülmeler meydana gelmiştir. Ancak sürenin daha da uzatılması veya hızın artırılması danelerin birbirlerine yapışıp boyutlarının büyümesine neden olmuştur.

#### 4.1.2 Kıvam limitleri

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında ASTM D 4318 (2010) standardına göre yapılan kıvam limitleri deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2** Deney numunelerinin kıvam limitleri

| Deney Numuneleri | Likit Limit (%) | Plastik Limit (%) | Plastisite İndisi (%) |
|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|
| S                | 49              | 25,8              | 23,2                  |
| SL2              | 46,3            | 33,9              | 12,4                  |
| SL4              | 44,9            | 34,1              | 10,8                  |
| SL6              | 44,7            | 36,1              | 8,6                   |
| SL8              | 44,2            | 35,8              | 10,4                  |
| SL10             | 44,1            | 34,8              | 9,3                   |
| SGL2             | 46              | 34                | 12                    |
| SGL4             | 45,8            | 34,7              | 11,1                  |
| SGL6             | 44,9            | 33,5              | 11,4                  |
| SGL8             | 44,4            | 31,1              | 13,3                  |
| SGL10            | 44,1            | 33,8              | 10,3                  |

Kıvam limitleri deneyi karışımlar hazırlandıktan sonra bekletilmeden yapılmıştır. Doğal zeminin likit limit ve plastisite indisi değeri diğer bütün numunelerden daha fazla çıkmıştır. Doğal zeminin plastik limiti ise hazırlanan karışımların plastik limitlerinden düşük olduğu belirlenmiştir.

Doğal zemine kireç ilavesiyle birlikte SL ve SGL karışımlarının likit limit ve plastisite indisi değerlerinde doğal zemine göre azalmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Artan kireç oranlarıyla birlikte likit limit değerlerinde azalmalar olurken plastisite indisi değerlerinde düzensiz bir davranış gözlenmiştir.

Genel olarak normal kireç içeren SL karışımlarının likit limit ve plastik limit değerlerinin öğütülmüş kireç içeren SGL karışımlarına oranla daha fazla olduğu

görülmüştür. Plastik limit yüzdesi en fazla %6'lık normal kireç-zemin karışımında çıkmasına rağmen plastisite indisi en düşük yine bu karışımda görülmüştür.

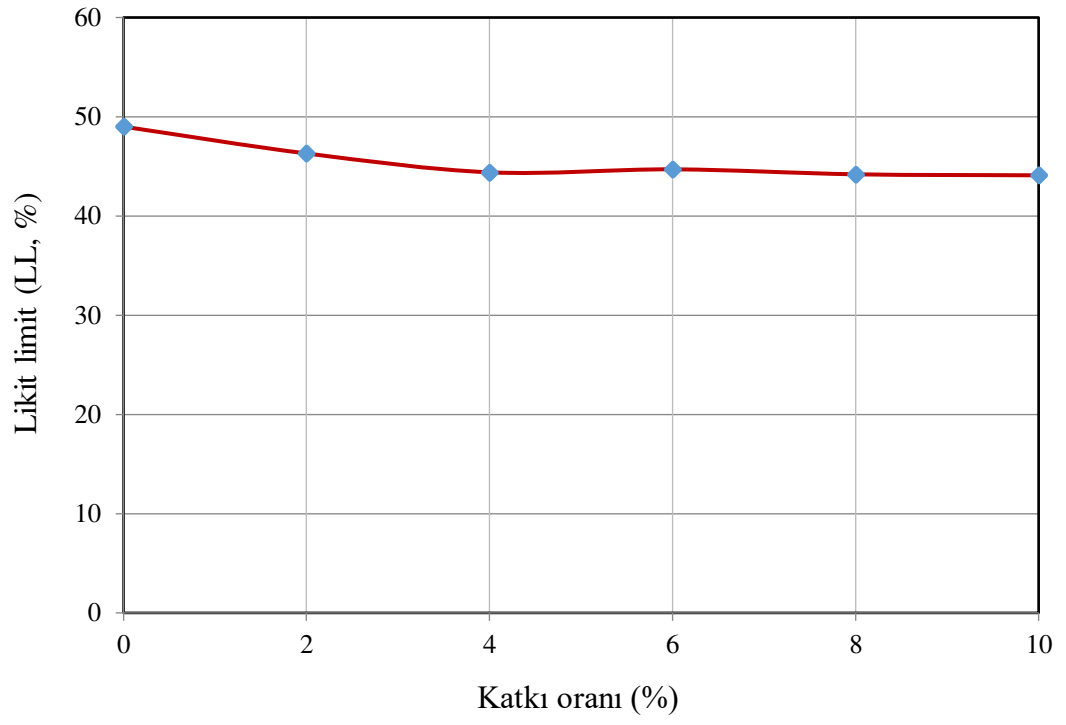
Likit limit değeri en fazla SL2 numunesinde en az SL10 ve SGL10 numunelerinde görülmüştür. Plastik limit değeri en fazla SL6 numunesinde çıkarken en az SGL8 numunesinde izlenmiştir. Plastisite indisi en düşük SL6 numunesinde, en yüksek ise SGL8 numunesinde meydana gelmiştir.

Zemine kireç eklenmesiyle birlikte plastik limit değerinde artış meydana gelmiştir. SL karışımlarında %6'lık kireç oranına kadar doğrusal artış olurken kireç miktarının daha da artmasıyla plastik limitte düşmeler meydana gelmiştir. SGL karışımlarının plastik limitleri arasında herhangi bir düzen görülmemiş, düzensiz bir davranış sergilendiği kanaatine varılmıştır.

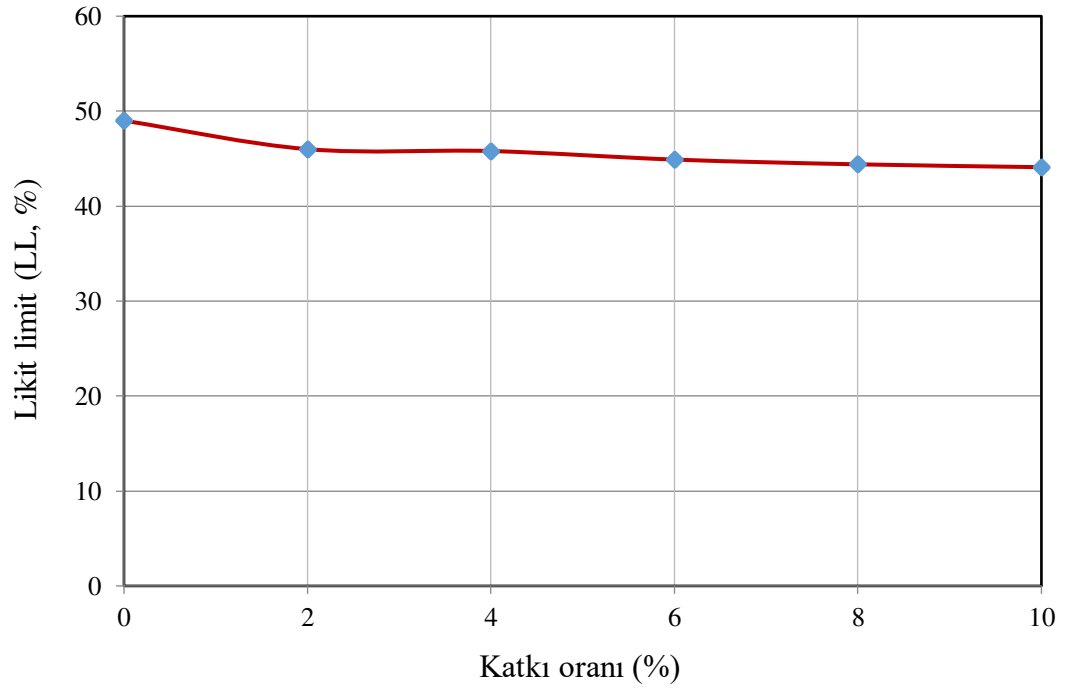
Plastisite indisi değerleri doğal zemine göre düşmüştür. SL karışımlarında SL8 numunesine kadar doğrusal bir azalma meydana gelirken SL10 numunesinin plastisite indisi artmıştır. SGL karışımlarının plastisite indislerinin düzensiz bir davranış gösterdiği belirlenmiştir.

Yapılan koni penetrasyon deneyi sonuçlarına göre oluşturulan grafikler Ek-1'de verilmiştir.

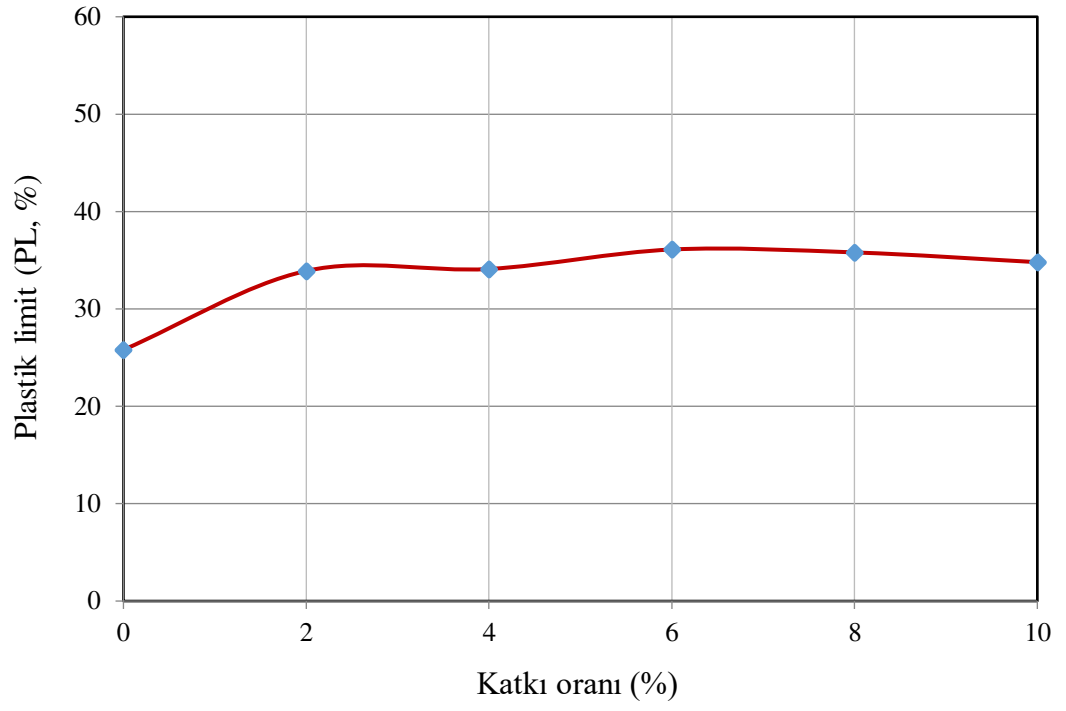
SL ve SGL'ye ait plastik limit, likit limit ve plastisite indisi grafikleri Şekil 4,1, 4,2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.



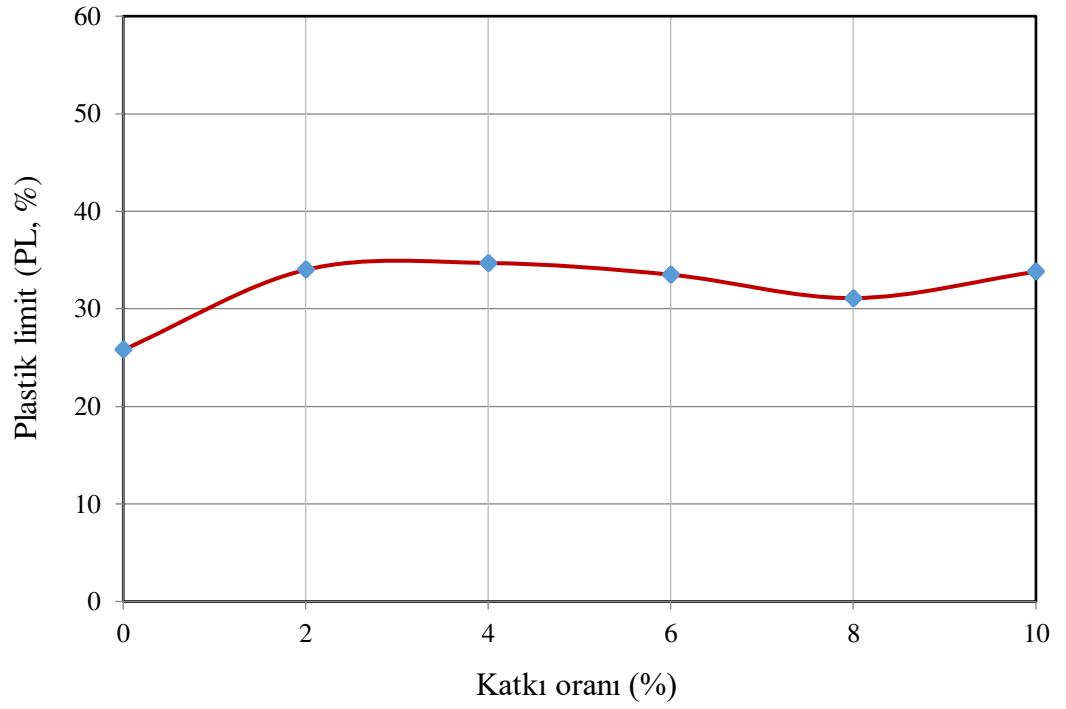
Şekil 4.1 SL karışımlarına ait likit limit değerleri



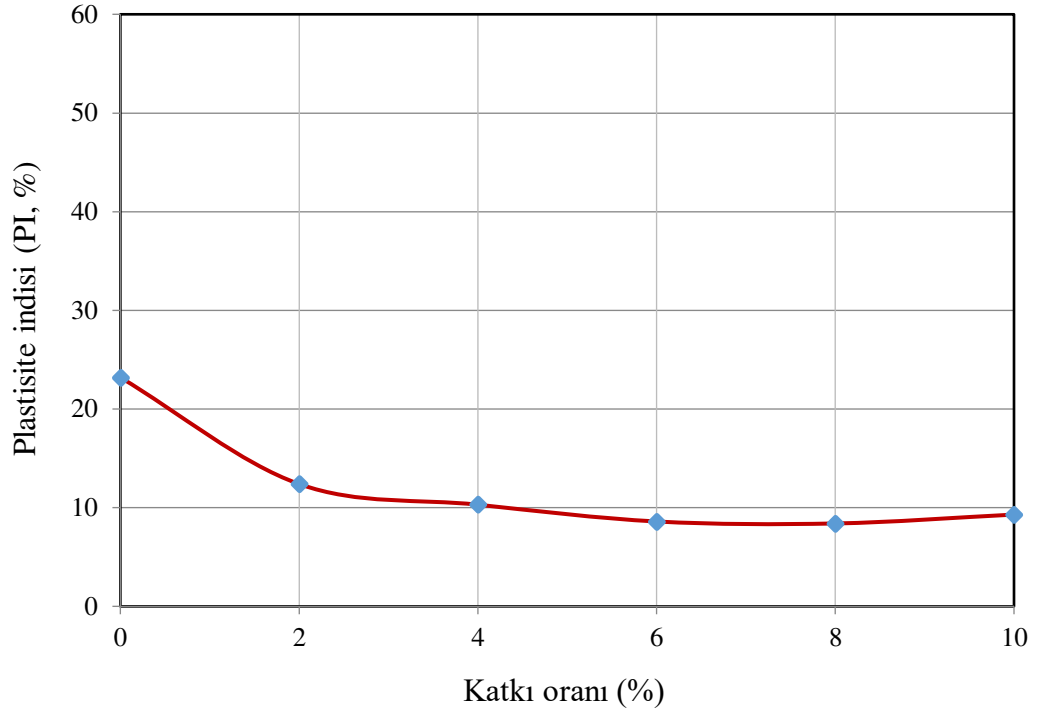
Şekil 4.2 SGL karışımlarına ait likit limit değerleri



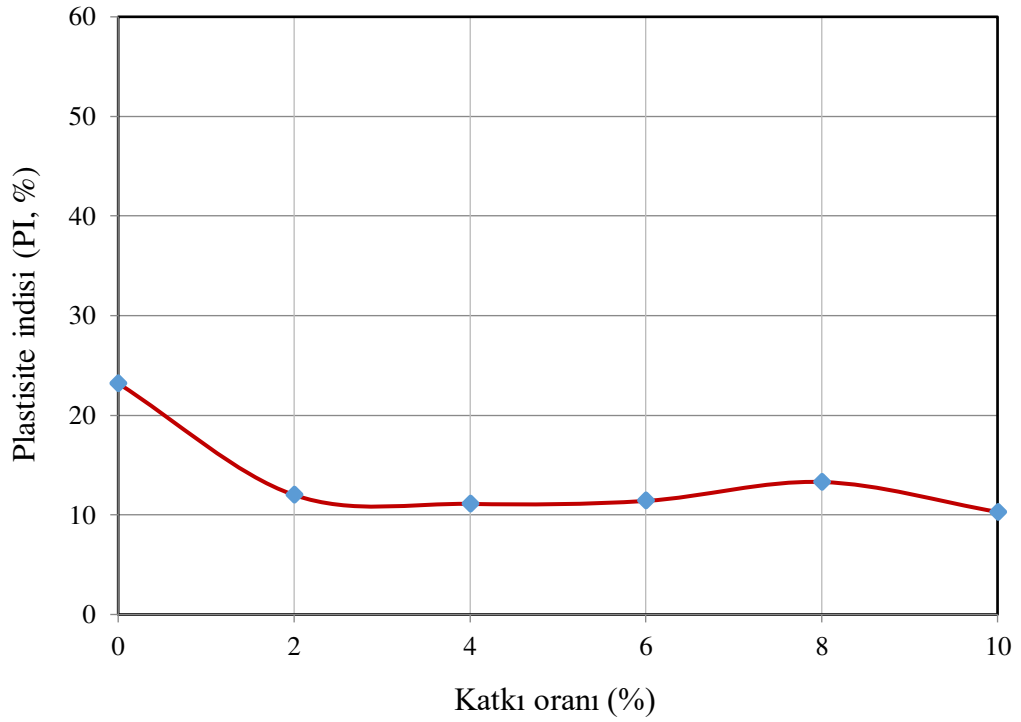
Şekil 4.3 SL karışımlarına ait plastik limit değerleri



Şekil 4.4 SGL karışımlarına ait plastik limit değerleri



Şekil 4.5 SL karışımlarına ait plastisite indisi değerleri



Şekil 4.6 SGL karışımlarına ait plastisite indisi değerleri

### 4.1.3 Kompaksiyon

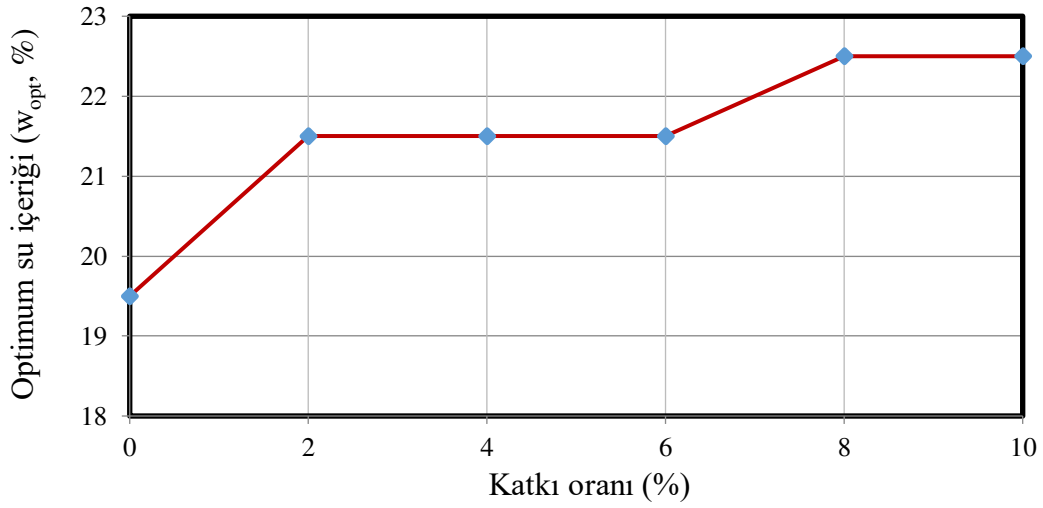
Yüksek lisans çalışması kapsamında 11 çeşit numune hazırlanıp notasyonları belirlenmiştir. Optimal su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının belirlenebilmesi için katkılı ve katkısız olmak üzere her zemin cinsinden 6 adet olarak toplamda 66 adet kompaksiyon yapılmıştır. Zeminden farklı olarak SL ve SGL karışımları sırasıyla %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarındaki karışımlara yapılan kompaksiyon deneylerinden ASTM D 698 standardına göre optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukları elde edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen verilerin grafikleri Ek-2’de verilmiştir. Kompaksiyon deneyleri doğal zeminden başlayarak sırasıyla %2, %4, %6, %8 ve %10 normal ve öğütülmüş kireç karışımlarıyla yapılmıştır. SL ve SGL karışımlarına ait maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içerikleri Çizelge 4.3’te verilmiştir.

**Çizelge 4.3** SL ve SGL karışımlarına ait kompaksiyon parametreleri

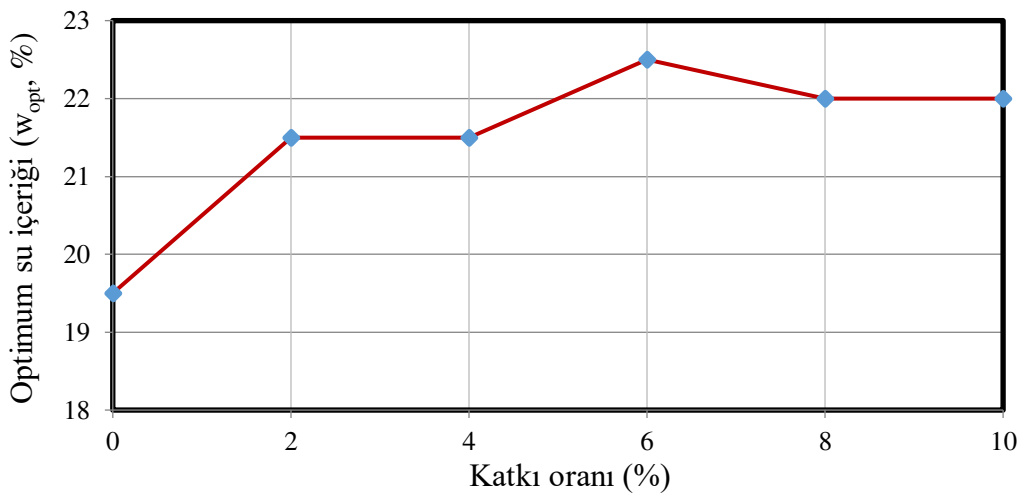
| Numune | Maksimum kuru yoğunluk (Mg/m <sup>3</sup> ) | Optimum su içeriği (%) |
|--------|---------------------------------------------|------------------------|
| S      | 1,66                                        | 19,5                   |
| SL2    | 1,64                                        | 21,5                   |
| SL4    | 1,63                                        | 21,5                   |
| SL6    | 1,63                                        | 21,5                   |
| SL8    | 1,62                                        | 22,5                   |
| SL10   | 1,59                                        | 22,5                   |
| SGL2   | 1,64                                        | 21,5                   |
| SGL4   | 1,64                                        | 21,5                   |
| SGL6   | 1,63                                        | 22,5                   |
| SGL8   | 1,62                                        | 22                     |
| SGL10  | 1,61                                        | 22                     |

Doğal zemine kireç ilavesiyle birlikte optimum su içeriğinde artışlar olmuştur. Maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise azalmalar meydana gelmiştir. Çizelge 4.3 incelendiği zaman doğal zemine eklenen normal kireç ve öğütülmüş kireç arasında birbirine yakın sonuçlar çıktığı görülmüştür. Kirecin öğütülmesi işlemi, optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde belirgin farklılıklar meydana getirmemiştir.

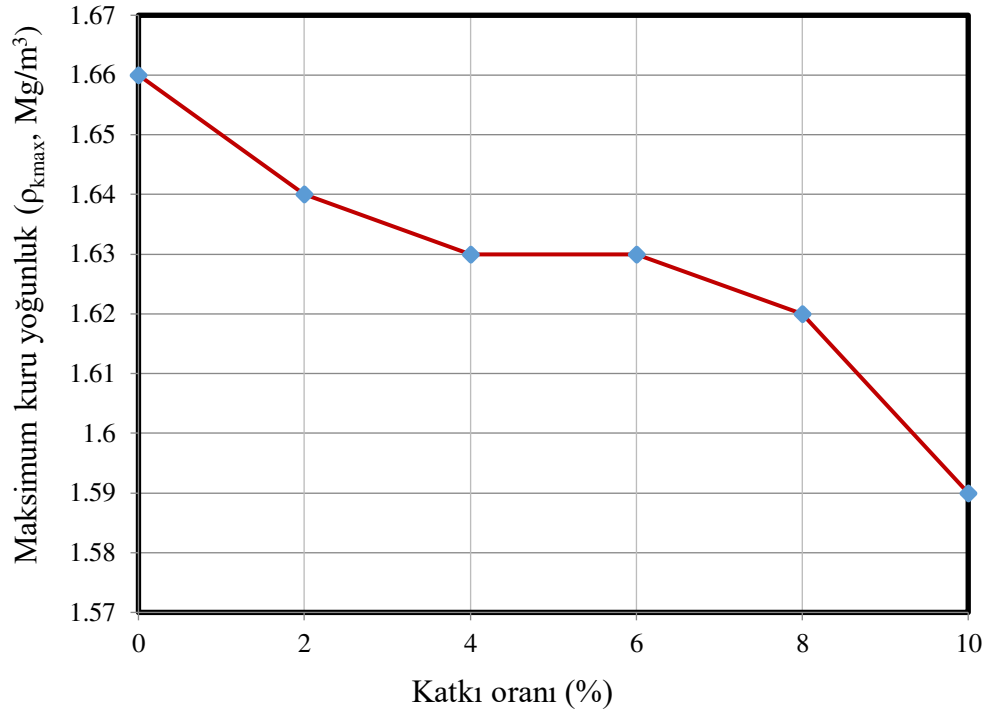
En yüksek maksimum kuru yoğunluk değeri SL2 numunelerinde görülürken en düşük SL10 numunelerinde görülmüştür. Öğütülmüş kireç oranının artırılmasıyla maksimum kuru yoğunlukta azalmalar meydana gelirken, optimum su içeriği önce artıp sonra düşmüştür. Genel olarak normal ve öğütülmüş kireçle hazırlanan numuneler için maksimum kuru yoğunluk  $1,59-1,64 \text{ mg/m}^3$  arasında değişmektedir. Optimum su muhtevaları ise %21,5-22,5 arasındadır. SL ve SGL karışımlarından yapılan kompaksiyon deneyleri sonuçlarına göre Şekil 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10'daki grafikler oluşturulmuştur.



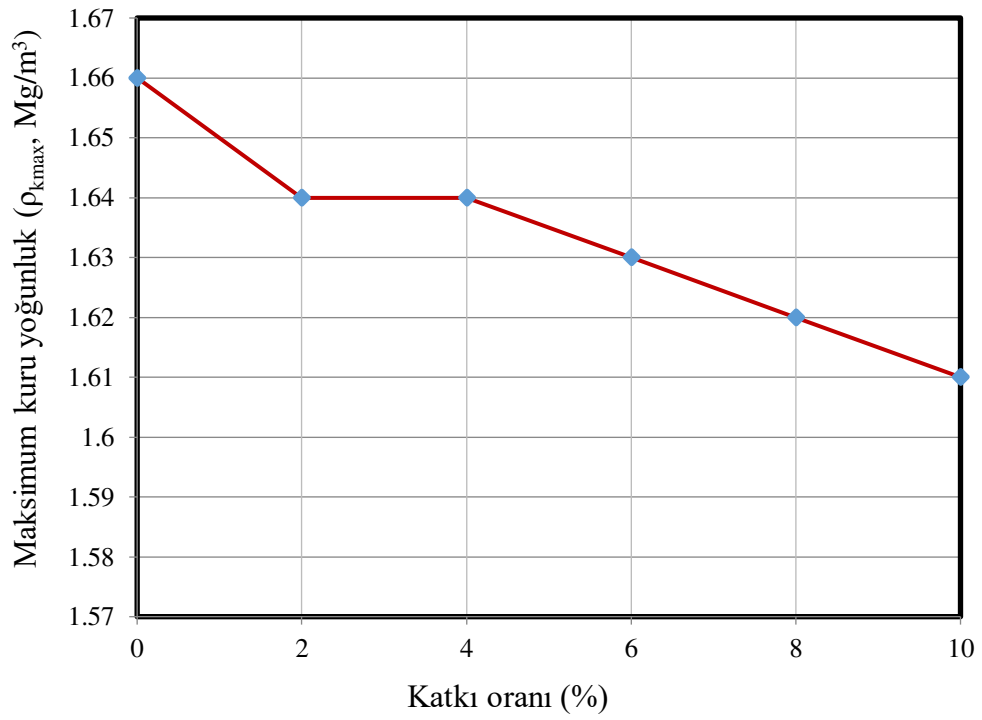
Şekil 4.7 SL karışımlarına ait optimum su içerikleri



Şekil 4.8 SGL karışımlarına ait optimum su içerikleri



Şekil 4.9 SL karışımlarına ait maksimum kuru yoğunluk değerleri



Şekil 4.10 SGL karışımlarına ait maksimum kuru yoğunluk değerleri

#### 4.1.4 Serbest basınç dayanımları

Optimum su içerikleri belirlenen karışımları serbest basınç dayanımlarını öğrenmek için standart proktor aleti kullanılarak sıkıştırılmıştır. 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır. Deneyi gerçekleştirmek için her bir karışım için 3'er tane olmak üzere toplamda 132 numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 1, 7, 14 ve 28 günlük kürlere tabii tutulmuşlardır. Kür süreleri sonunda serbest basınç deneyleri yapılmış olup öğütülmüş ve öğütülmemiş kirecin zemin stabilizasyonunda dayanıma etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.11'de numune örnekleri ve Şekil 4.12'de numunelerin desikatörde kür edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Serbest basınç dayanımı deneyi numune örnekleri



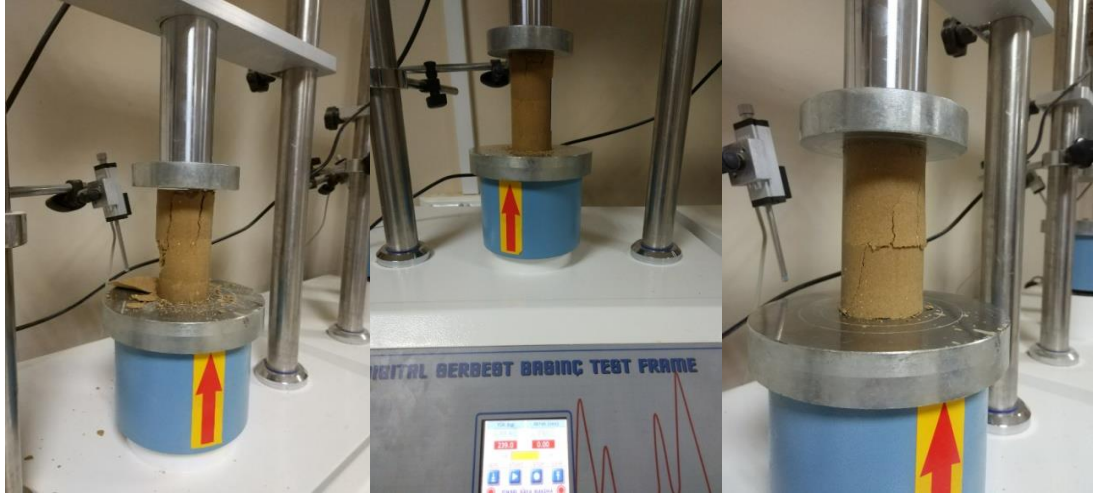
Şekil 4.12 Numunelerin desikatörde kür edilmesi

Deney 3 ana aşamada yapılmıştır. Öncelikle zemin elenmiştir. Elenen zemin %2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında öğütülmüş ve öğütülmemiş kireçle standart proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Son aşama ise sıkıştırılmış karışımın örnek çıkarıcı yardımıyla çıkarılıp hazırlanması işlemidir. Numunelerin hazırlanma aşamaları Şekil 4.13'te verilmiştir.



**Şekil 4.13** Numunelerin hazırlanma aşamaları

Daha sonra kıvam ve kompaksiyon değerleri daha önceden belirlenmiş olan numunelerin dayanımlarını belirlemek için, ilgili standarda uygun olarak hazırlanmış numunelere 1, 7, 14 ve 28 günlük kürlerin ardından tek eksenli serbest basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Çizelge 4.4 ve 4.5'te doğal zemin ve katkılı karışımların serbest basınç dayanımı deney sonuçları verilmiştir.



**Şekil 4.14** Tek eksenli serbest basınç dayanım testi

**Çizelge 4.4** SL karışımlarına ait serbest basınç dayanımı deney sonuçları

| Numune/Kür Süresi | Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa) |        |         |        |
|-------------------|-------------------------------------------|--------|---------|--------|
|                   | 1.gün                                     | 7.gün  | 14.gün  | 28.gün |
| S                 | 143,5                                     | 145,8  | 146,4   | 146,9  |
| SL2               | 381,5                                     | 451,4  | 551,4   | 663,1  |
| SL4               | 529                                       | 1049,1 | 1422,05 | 1865,5 |
| SL6               | 587,2                                     | 1286,2 | 1537,9  | 2073,4 |
| SL8               | 576,4                                     | 1185,4 | 1469    | 1804,5 |
| SL10              | 514,5                                     | 872,3  | 1472,6  | 1610,8 |

**Çizelge 4.5** SGL karışımlarına ait serbest basınç dayanımı deney sonuçları

| Numune/Kür Süresi | Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa) |        |        |        |
|-------------------|-------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                   | 1.gün                                     | 7.gün  | 14.gün | 28.gün |
| S                 | 143,5                                     | 145,8  | 146,4  | 146,9  |
| SGL2              | 420,9                                     | 488,8  | 516,3  | 579,7  |
| SGL4              | 442,2                                     | 1199,4 | 1610,8 | 1705,2 |
| SGL6              | 572,9                                     | 1490,0 | 1850,5 | 2562,3 |
| SGL8              | 581,2                                     | 1083,4 | 1554,4 | 1745,6 |
| SGL10             | 527,5                                     | 746,5  | 1381,1 | 1472,0 |

Tek eksenli basınç dayanımı verileri incelendiğinde doğal zemine kireç ilavesiyle birlikte zemin dayanımlarında ve dolayısıyla serbest basınç deneylerinde artışlar meydana gelmiştir. Kireç katılmayan doğal zeminin davranışı sünek davranış biçimine uymaktadır. Çatlakların oluşumu ve yayılımı izlenebilir haldedir. Ancak öğütülmüş

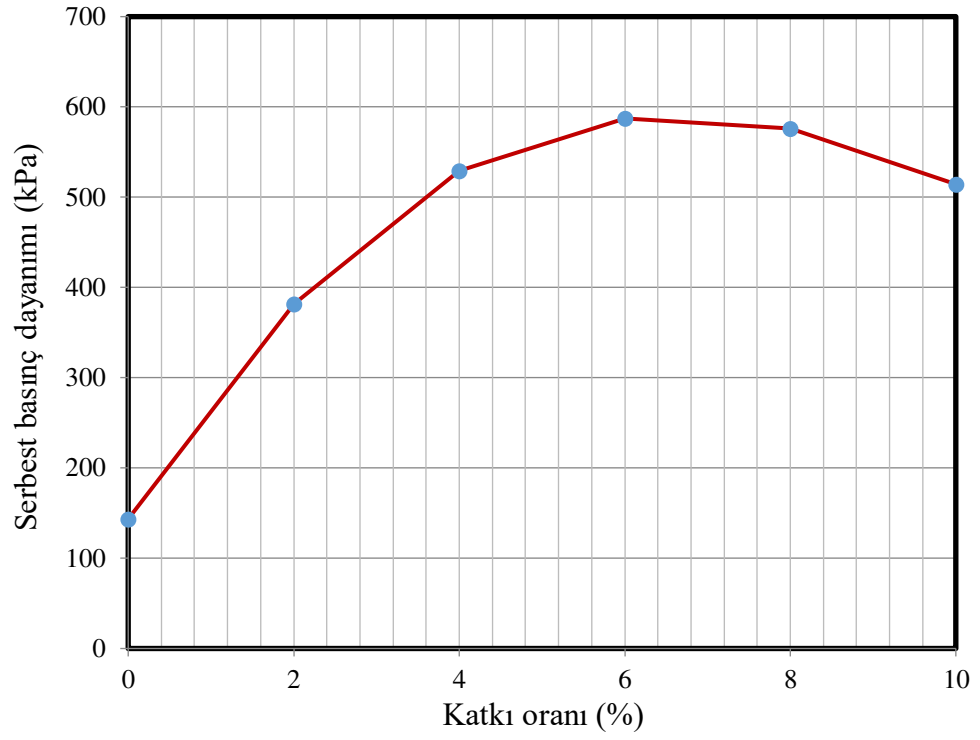
veya öğütülmemiş kireç katılan numunelerin kırılışı gevrek davranış biçiminde olmuştur.

Doğal zemine eklenen kireç ile birlikte, bütün karışımların zemin dayanımları daha ilk günden yaklaşık 3 kat artmıştır. Numuneler hazırlandıktan 24 saat sonra SL6 numunelerinin dayanımları en yüksek seviyeye gelmiş ve doğal zeminin 4 katına ulaşmıştır. Öğütülmüş kireç katılarak hazırlanan numunelerde ise 24 saat sonraki en yüksek değer SGL8 numunesinde görülmüş ve doğal zeminin 4 katı olarak tespit edilmiştir.

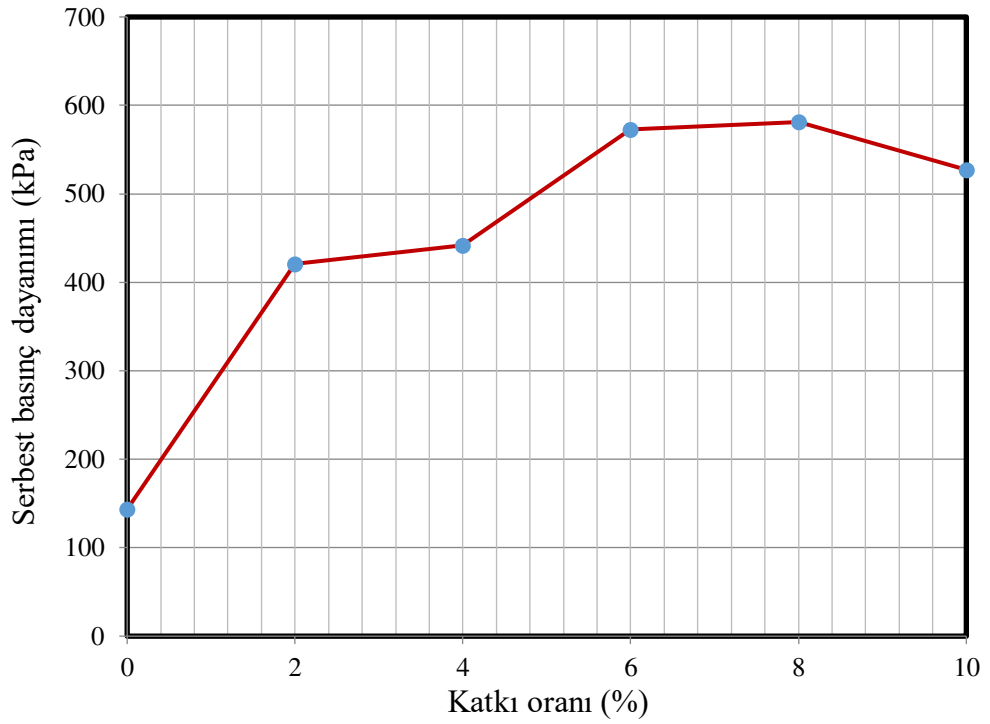
Desikatörde 7 gün kür edilen numunelerin tek eksenli serbest basınç dayanım testi sonuçlarında ise SL6 numunesi doğal zemine göre yaklaşık 9 kat artmıştır. 7. günden itibaren incelik etkisi belirgin hale gelmiş ve SGL6 numunesi doğal zemin numunesinden 10 kat daha fazla dayanım göstermiştir.

14 günlük kür süresi sonunda SL6 numunesi 7 günlük serbest basınç dayanımına göre %20, SGL6 numunesi ise %25 dayanım artışıyla devam etmiştir. 28 günlük serbest basınç deney sonuçlarına göre SL6 numunesi 14 günlük serbest basınç değerinden %35 daha fazla dayanımını artırarak 2073,4 kPa değerine ulaşmış ve doğal zemin numunesine göre 14 kat daha fazla dayanım göstermiştir. SGL6 numunesi ise %40 artışla birlikte doğal zemine göre yaklaşık 18 kat daha fazla dayanıma ulaşmış ve tek eksenli serbest basınç testinde 2562,3 kPa olarak dayanım değeri okunmuştur.

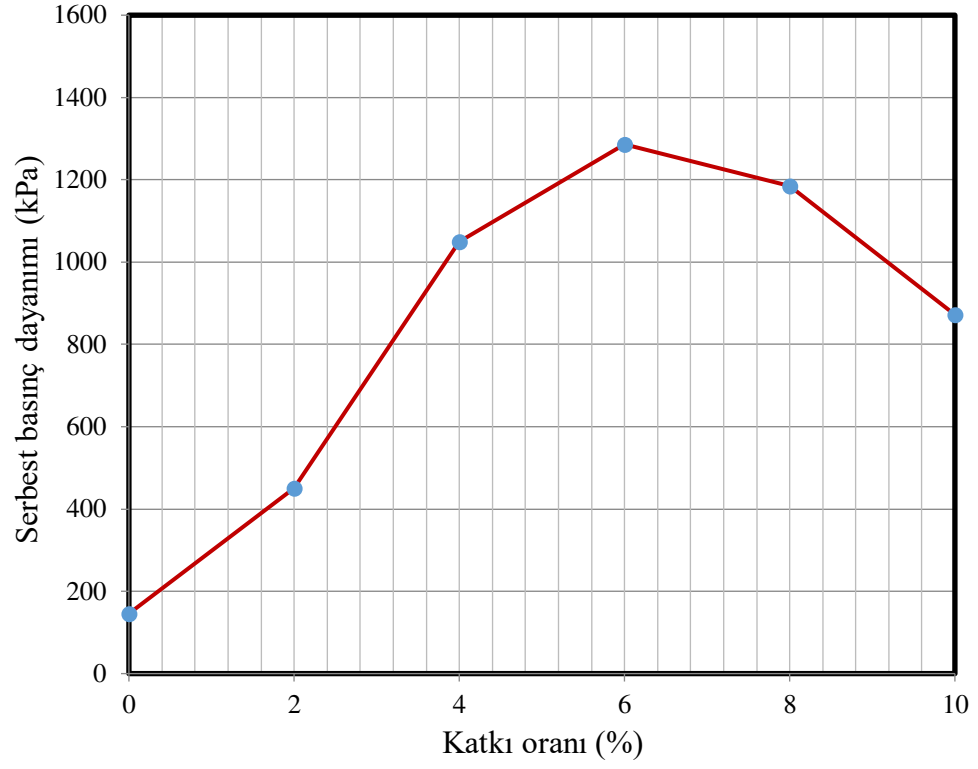
Çizelgeler incelendiğinde 24 günlük kür sonrası yapılan tek eksenli serbest basınç deneylerine göre SL grubunun SGL grubuna göre (SGL6 numunesi hariç) birbirine yakın değerlerde olmasına rağmen daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Karışımların 1, 7, 14 ve 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi verileri Şekil 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 ve 4.22’de gösterilmiştir.



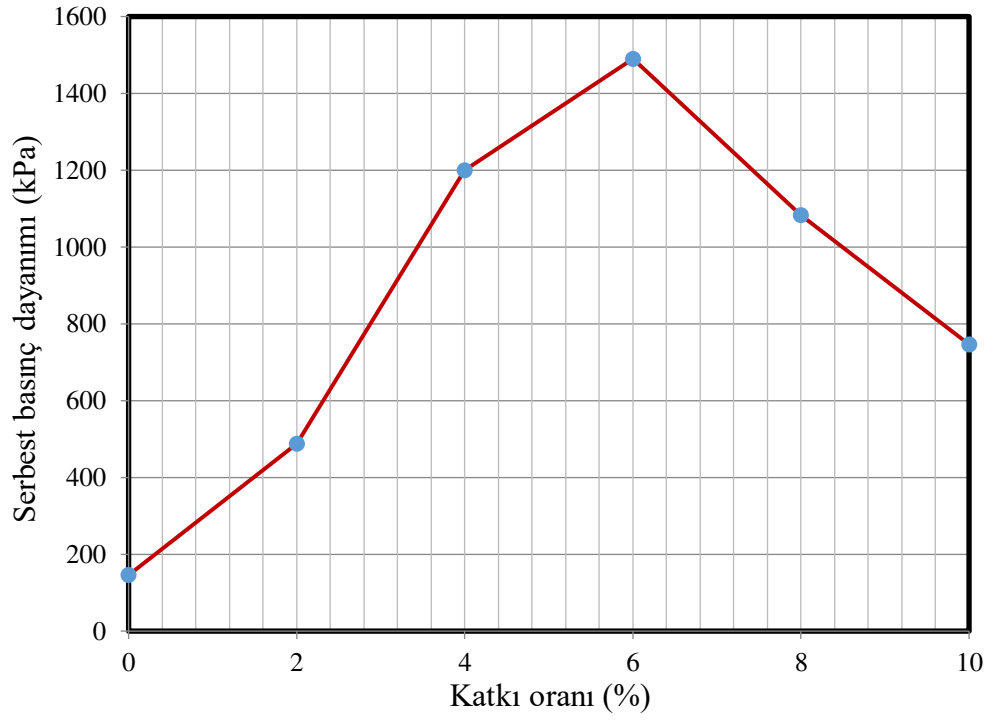
Şekil 4.15 SL karışımının 1 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi



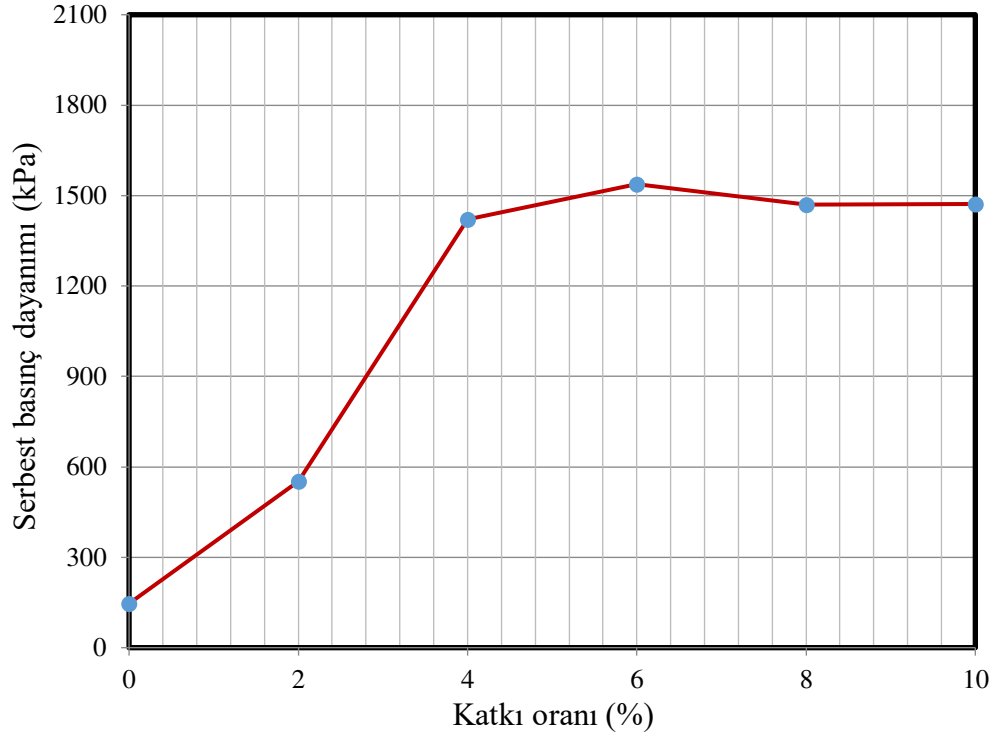
Şekil 4.16 SGL karışımının 1 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi



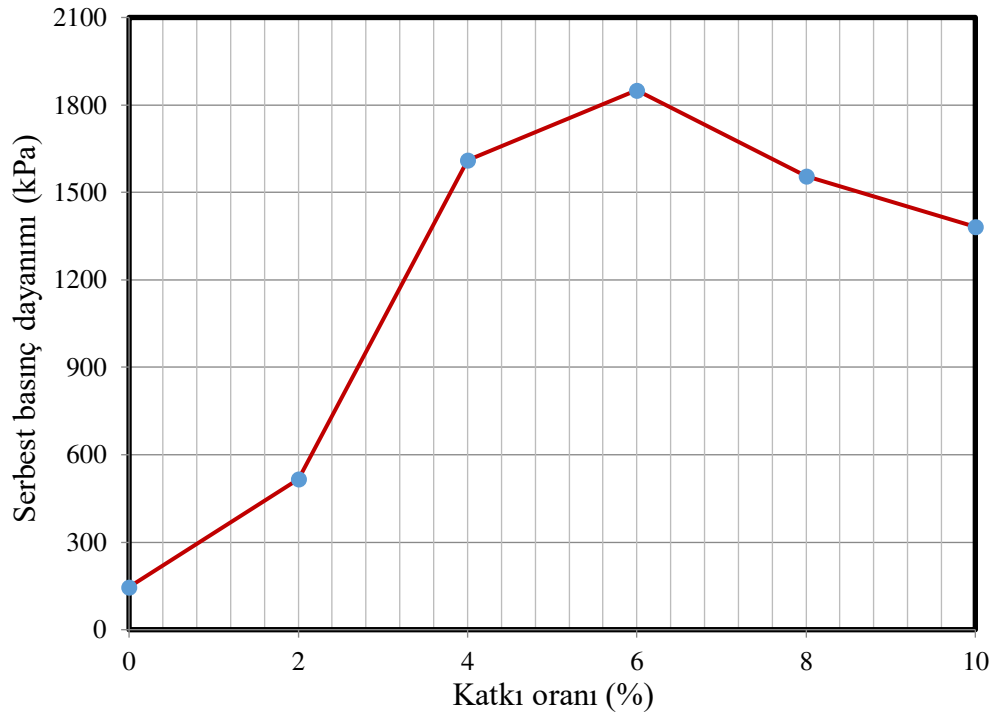
Şekil 4.17 SL karışımının 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi



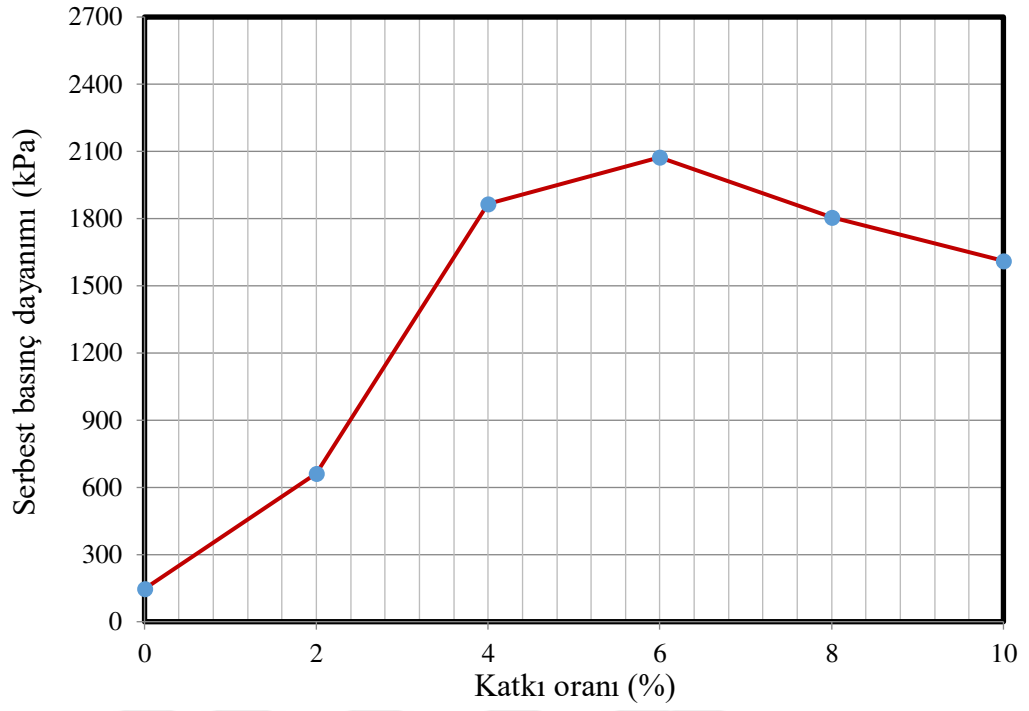
Şekil 4.18 SGL karışımının 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi



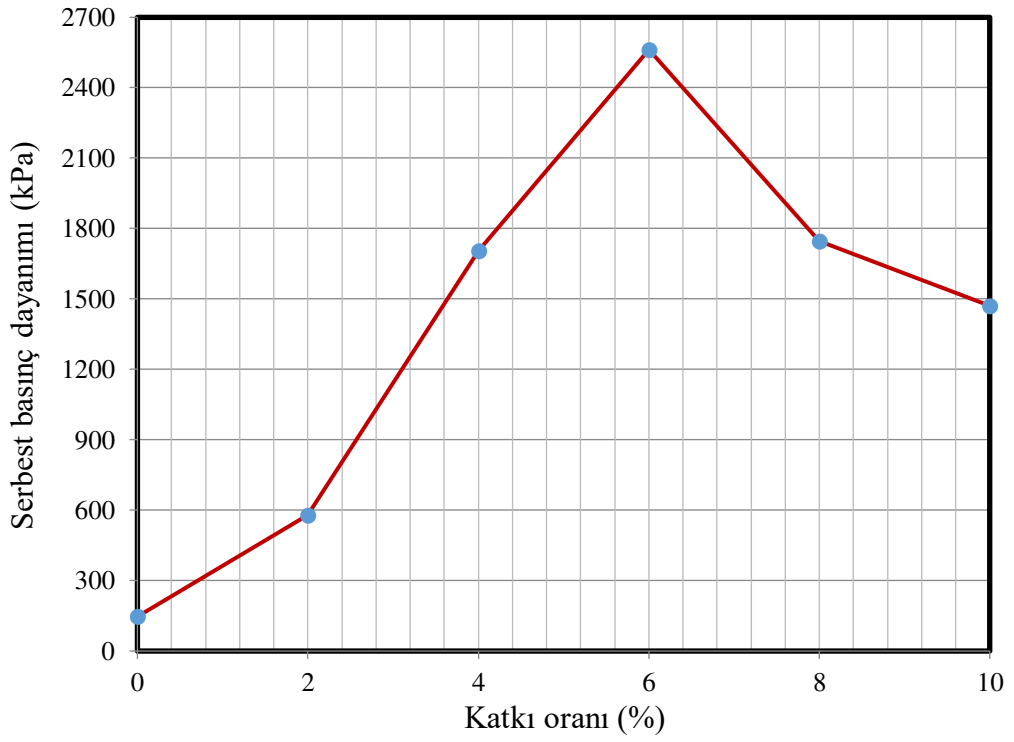
Şekil 4.19 SL karışımının 14 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi



Şekil 4.20 SGL karışımının 14 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi

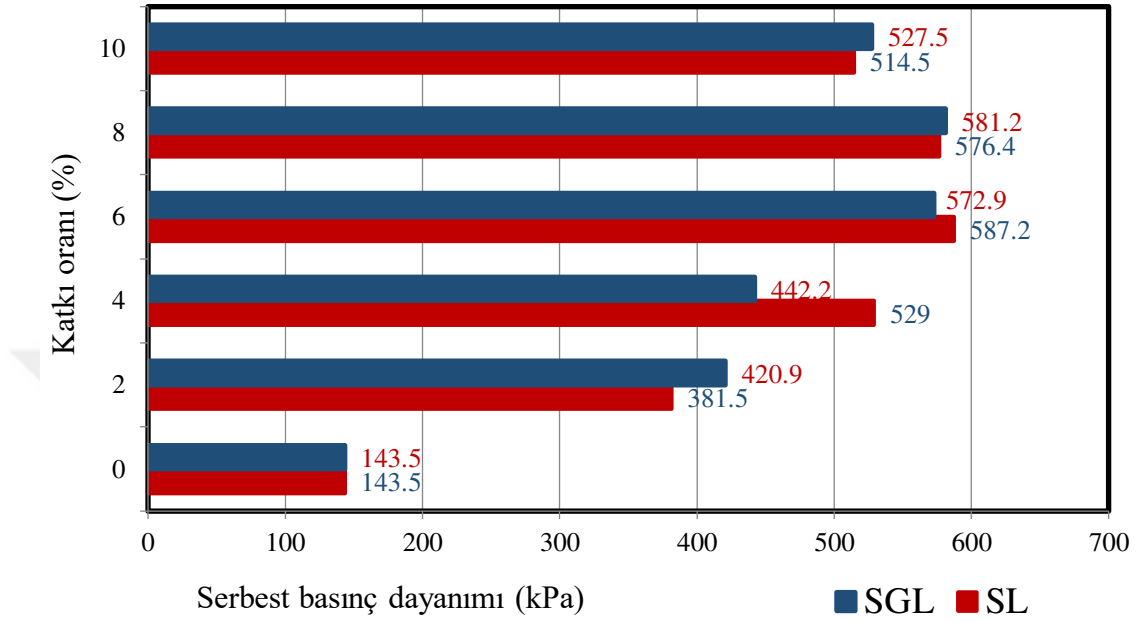


Şekil 4.21 SL karışımının 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi

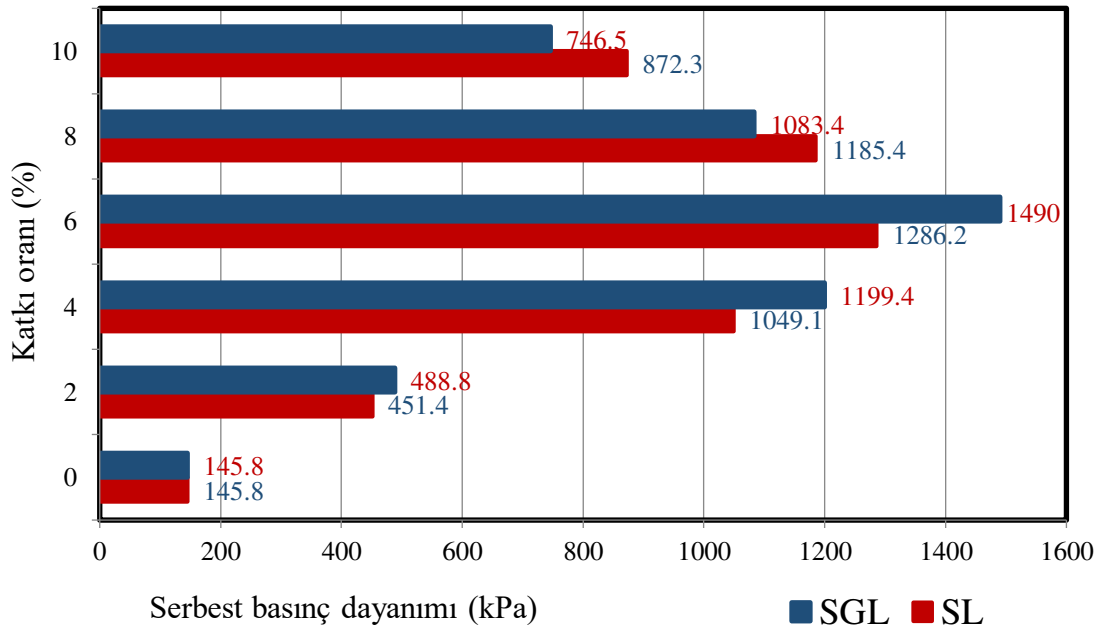


Şekil 4.22 SGL karışımının 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanım testi

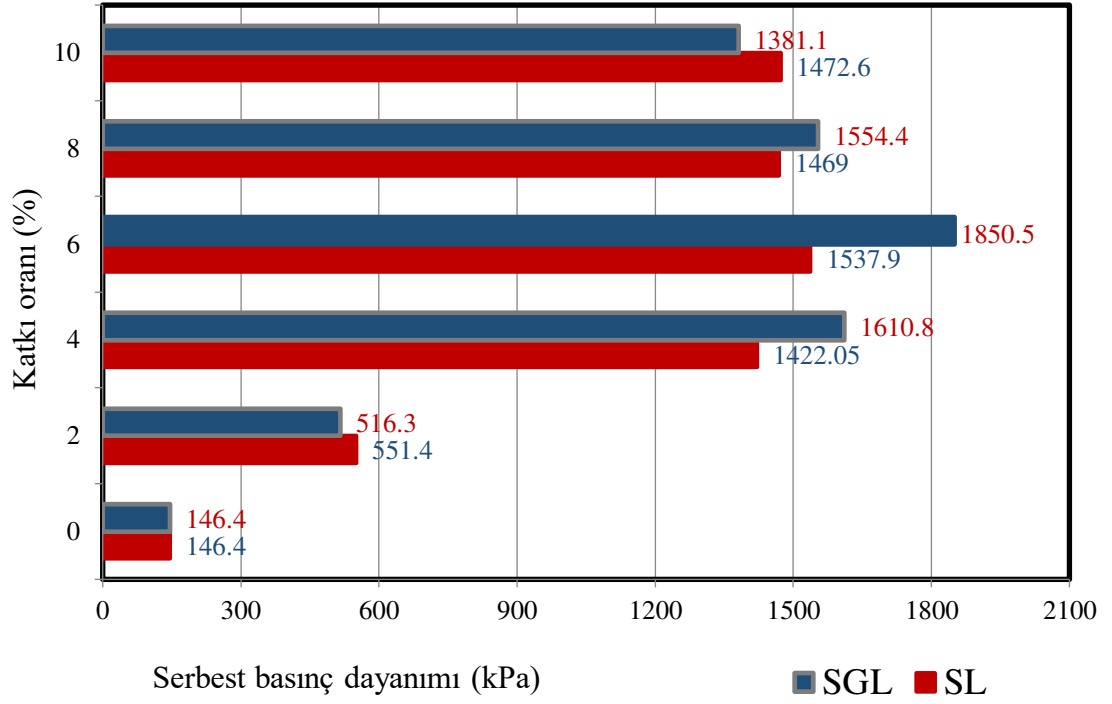
Karışımların 1, 7, 14 ve 28 gün kür sonrası serbest basınç dayanımı test sonuçları Şekil 4.23, 4.24, 4.25 ve 4.26’da karşılaştırılmıştır.



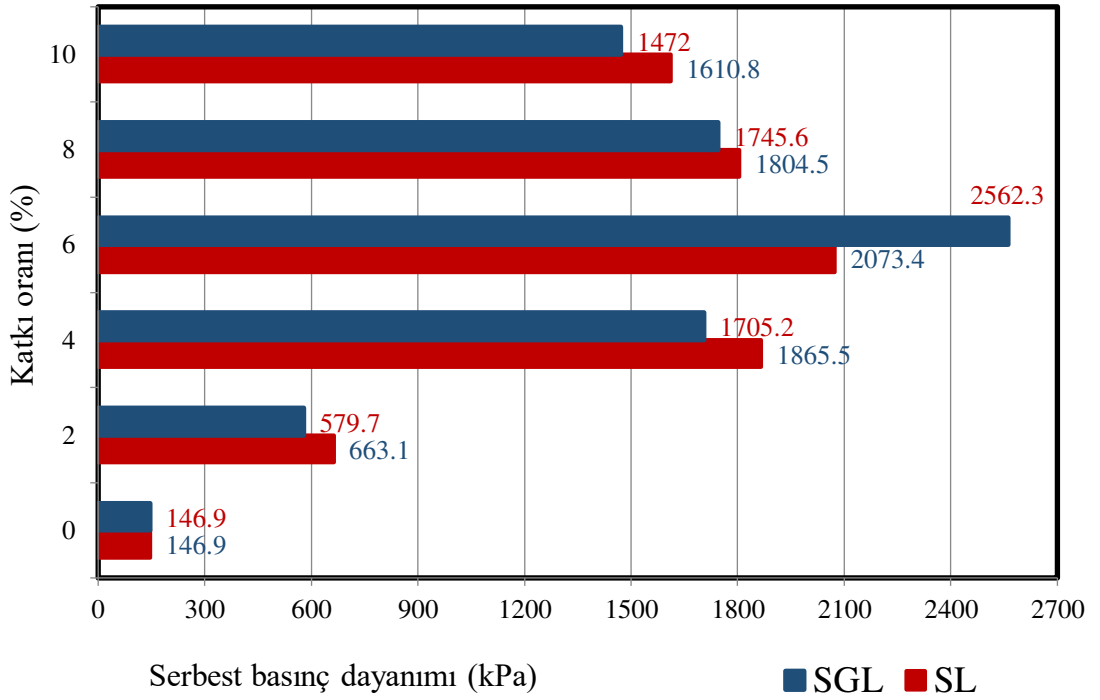
Şekil 4.23 SGL ve SL karışımlarının 1. gün serbest basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.24 SGL ve SL karışımlarının 7. gün serbest basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.25 SGL ve SL karışımlarının 14. gün serbest basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.26 SGL ve SL karışımlarının 28. gün serbest basınç dayanımı değerleri

#### 4.1.5 Durabilite tetkikleri

Yüksek lisans tezi kapsamında hazırlanan karışımların değişken çevre koşullarında gösterdiği davranışları belirlemek, yapılacak iyileştirme çalışmasının özellikle yağışlı veya soğuk iklim kuşağındaki yerlere uygulanabilirliğini belirlemek açısından son derece önemlidir. Bu amaçla, hazırlanan deney numunelerine ASTM D 559 (2003) standardına göre ıslanma-kuruma deneyi ve ASTM D 560 (1996) standardına göre donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır.

##### 4.1.5.1 Islanma-kuruma periyodu

Kireç ve çimento gibi katkı maddeleriyle yapılacak stabilizasyon için durabilite kriterleri Çizelge 2.12’de verilmişti. Bu kriterlere uygunluğun tespiti için çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm olan 11 adet silindirik numune hazırlanmıştır. Dayanıklılık koşulları için ilgili standarda göre, 12 ıslanma-kuruma süresinin sonunda numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp %6-14 arasındadır.

Öncelikle deney için hazırlanan numuneler 28 gün boyunca desikatörde kür edilmiştir. Kürden sonra ASTM D 559 (2003) standardına göre 12 adet ıslanma-kuruma periyodu deneyi yapılmıştır. Şekil 4.27’de SGL ve SL karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundan görüntüler verilmiştir. 12 çevrim sonucunda Çizelge 4.6’daki sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 4.27** SGL ve SL karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundan görüntüler

**Çizelge 4.6** Islanma-kuruma periyodu deney sonuçları

| Numune/<br>Gün      | S     | SL2   | SL4   | SL6   | SL8   | SL10  | SGL2  | SGL4  | SGL6  | SGL8  | SGL10 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| İlk Ağırlık<br>(gr) | 368,4 | 371,2 | 369,4 | 354,9 | 361   | 364   | 371,4 | 356,2 | 359,4 | 354,2 | 361,2 |
| 1.Gün               | -     | 338,8 | 348,1 | 338,7 | 351,1 | 362,2 | 334,3 | 338,1 | 338,9 | 340,2 | 352,2 |
| 2.Gün               | -     | 223,9 | 346,8 | 336,5 | 348,4 | 362   | 238,8 | 331   | 335,9 | 339,2 | 351,9 |
| 3.Gün               | -     | 112,5 | 345,7 | 335,8 | 345,2 | 361,8 | -     | 328,4 | 335,7 | 338,6 | 351,4 |
| 4.Gün               | -     | -     | 339,3 | 334,9 | 343,5 | 361,7 | -     | 319,5 | 335,6 | 337   | 350,3 |
| 5.Gün               | -     | -     | 325,5 | 332,7 | 342,9 | 361,6 | -     | 304,5 | 333,6 | 336,2 | 350   |
| 6.Gün               | -     | -     | 279,2 | 329,2 | 339,3 | 361,5 | -     | 265,8 | 331,3 | 334,9 | 349,7 |
| 7.Gün               | -     | -     | 237,6 | 326   | 338,7 | 361   | -     | 233,5 | 330,7 | 330,3 | 349,5 |
| 8.Gün               | -     | -     | 205,5 | 319,9 | 338,5 | 360,7 | -     | 205,3 | 328,3 | 328,2 | 349   |
| 9.Gün               | -     | -     | 177   | 311,6 | 338,4 | 360,3 | -     | 181,8 | 323,3 | 326,1 | 348,9 |
| 10.Gün              | -     | -     | 150   | 298,5 | 331,4 | 360   | -     | 154,2 | 317,2 | 319,1 | 348,8 |
| 11.Gün              | -     | -     | -     | 286,9 | 330,5 | 358,8 | -     | -     | 315,9 | 318,8 | 348,7 |
| 12.Gün              | -     | -     | -     | 279,7 | 327,6 | 358,5 | -     | -     | 312,2 | 314,6 | 347,8 |

Bu sürecin sonunda doğal zemin numunesi ikinci güne gelmeden tamamen dağılmıştır. %2 kireç içeren numuneler, ikinci ıslanma-kuruma döngüsünden sonra volumetrik stabilitelelerini kaybettikleri gözlemlenmiştir. %4 ve %6 kireç içeren SL4 ve SL6 numuneleri, 5 ve 9 gün boyunca ıslanma-kuruma döngüsüne karşı dayanıklılık gösterdi. Sırasıyla %8 ve %10 kireç içeren SL8 ve SL10 numuneleri, 12. ıslanma-kuruma döngüsünün bir sonucu olarak ilgili standartlarda dayanıklılık şartlarını sağlamıştır.

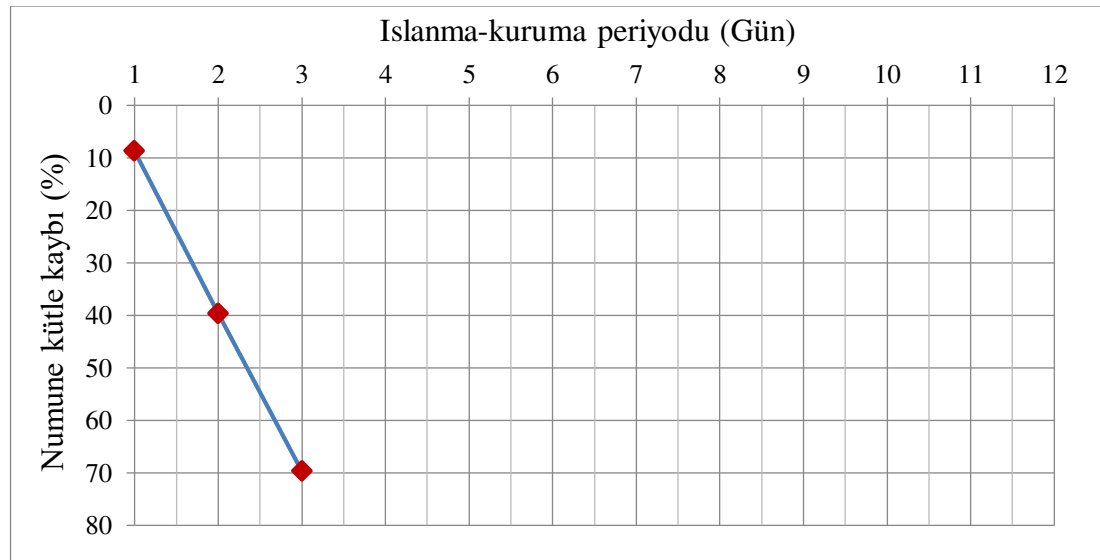
Öğütülmüş kireçte; SGL2 numunesi volumetrik stabilitesini 1 gün, SGL4 numunesi 4 gün korumuştur. SGL6, SGL8 ve SGL10 numuneleri 12 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda dayanımını koruyarak ilgili standardın dayanıklılık şartlarını sağlamıştır.

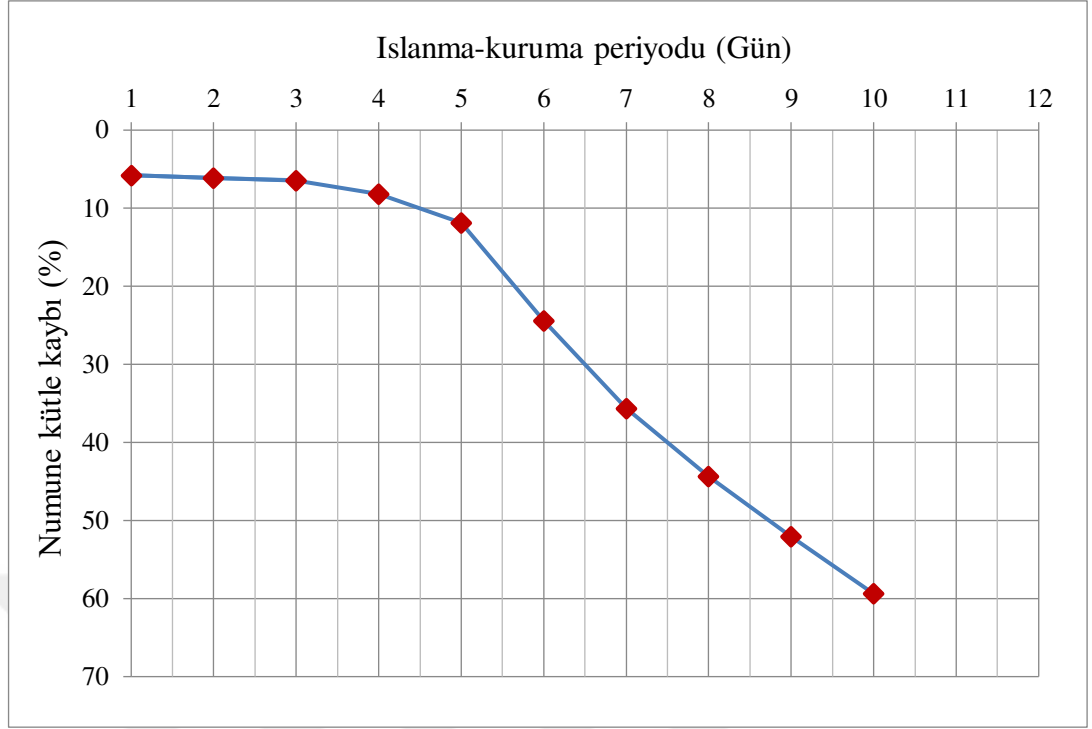
Elde edilen veriler ışığında, düşük plastisiteli killi zeminlerde kireç ile yapılacak zemin stabilizasyonunda ıslanma-kuruma döngüsüne karşı ilgili standartların sağlanabilmesi için minimum %8 kirecin veya %6 öğütülmüş kirecin kullanılmasının uygun olduğu söylenebilir. Çizelge 4.7’de ıslanma-kuruma periyodu deney numunelerinin her birinin kütle kaybı yüzdeleri verilmiştir.

**Çizelge 4.7** Islanma-kuruma periyodu deneyi kütle kaybı yüzdeleri

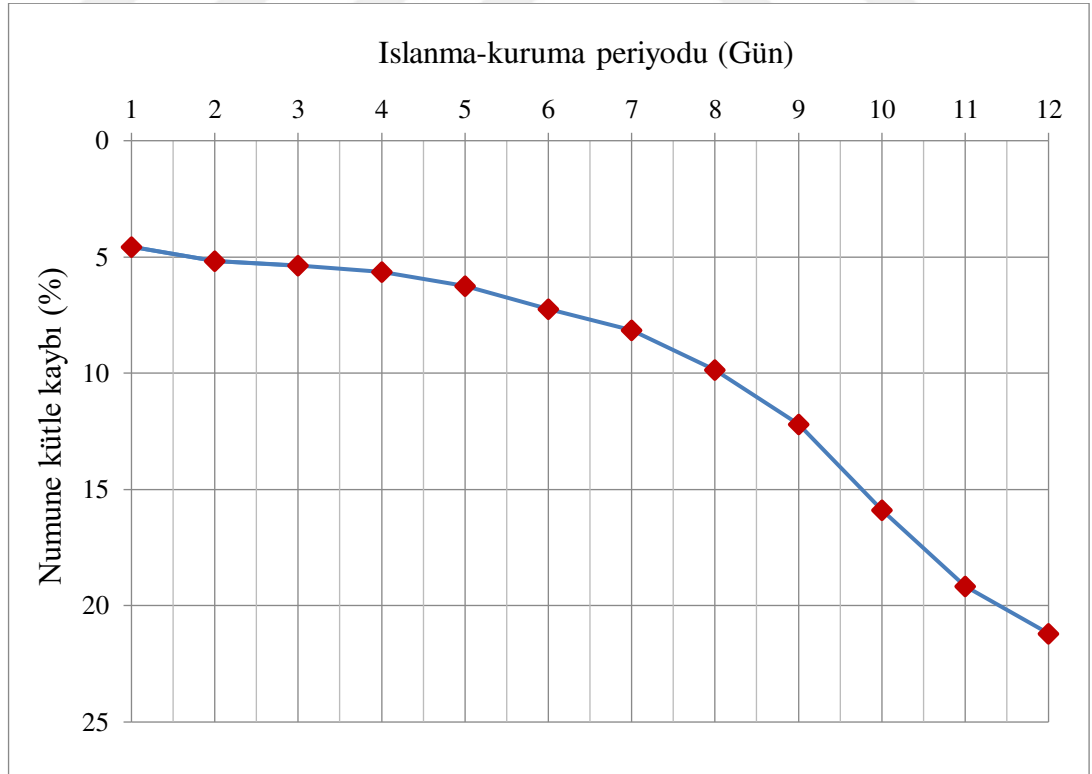
| Numune/Kayıplar<br>(Gün, %) | S   | SL2   | SL4   | SL6   | SL8  | SL10 | SGL2  | SGL4  | SGL6  | SGL8  | SGL10 |
|-----------------------------|-----|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| İlk Ağırlık (%)             | 100 | 100   | 100   | 100   | 100  | 100  | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |
| 1.Gün                       | -   | 8,73  | 5,77  | 4,56  | 2,74 | 0,49 | 9,99  | 5,08  | 5,70  | 3,95  | 2,49  |
| 2.Gün                       | -   | 39,68 | 6,12  | 5,18  | 3,49 | 0,55 | 35,70 | 7,07  | 6,54  | 4,23  | 2,57  |
| 3.Gün                       | -   | 69,69 | 6,42  | 5,38  | 4,38 | 0,60 | -     | 7,80  | 6,59  | 4,40  | 2,71  |
| 4.Gün                       | -   | -     | 8,15  | 5,64  | 4,85 | 0,63 | -     | 10,30 | 6,62  | 4,86  | 3,02  |
| 5.Gün                       | -   | -     | 11,88 | 6,26  | 5,01 | 0,66 | -     | 14,51 | 7,18  | 5,08  | 3,10  |
| 6.Gün                       | -   | -     | 24,42 | 7,24  | 6,01 | 0,69 | -     | 25,38 | 7,82  | 5,45  | 3,18  |
| 7.Gün                       | -   | -     | 35,68 | 8,14  | 6,18 | 0,82 | -     | 34,45 | 7,99  | 6,75  | 3,24  |
| 8.Gün                       | -   | -     | 44,37 | 9,86  | 6,23 | 0,91 | -     | 42,36 | 8,65  | 7,34  | 3,38  |
| 9.Gün                       | -   | -     | 52,08 | 12,20 | 6,26 | 1,02 | -     | 48,96 | 10,04 | 7,93  | 3,41  |
| 10.Gün                      | -   | -     | 59,39 | 15,89 | 8,20 | 1,10 | -     | 56,71 | 11,74 | 9,91  | 3,43  |
| 11.Gün                      | -   | -     | -     | 19,16 | 8,45 | 1,43 | -     | -     | 12,10 | 9,99  | 3,46  |
| 12.Gün                      | -   | -     | -     | 21,19 | 9,25 | 1,51 | -     | -     | 13,13 | 11,18 | 3,71  |

Islanma-kuruma periyoduna deneyi sonucunda bulunan kütle kaybı yüzdelerinin grafikleri Şekil 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 ve 4.38’de verilmiştir.

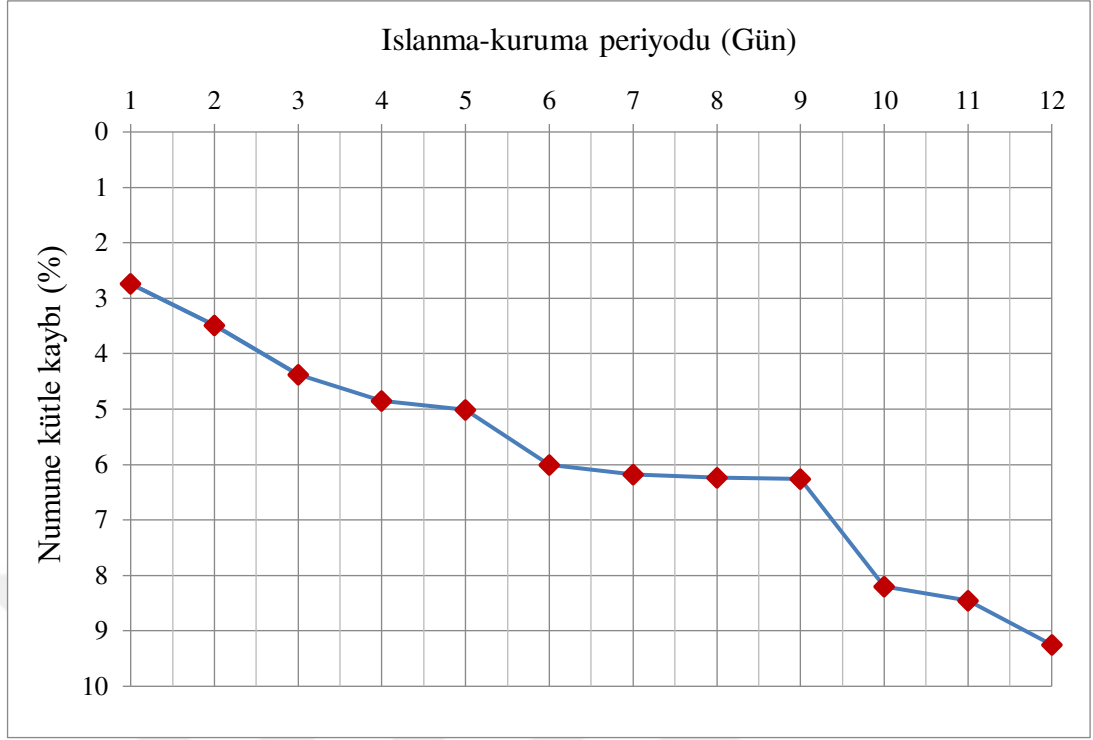
**Şekil 4.28** SL2 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



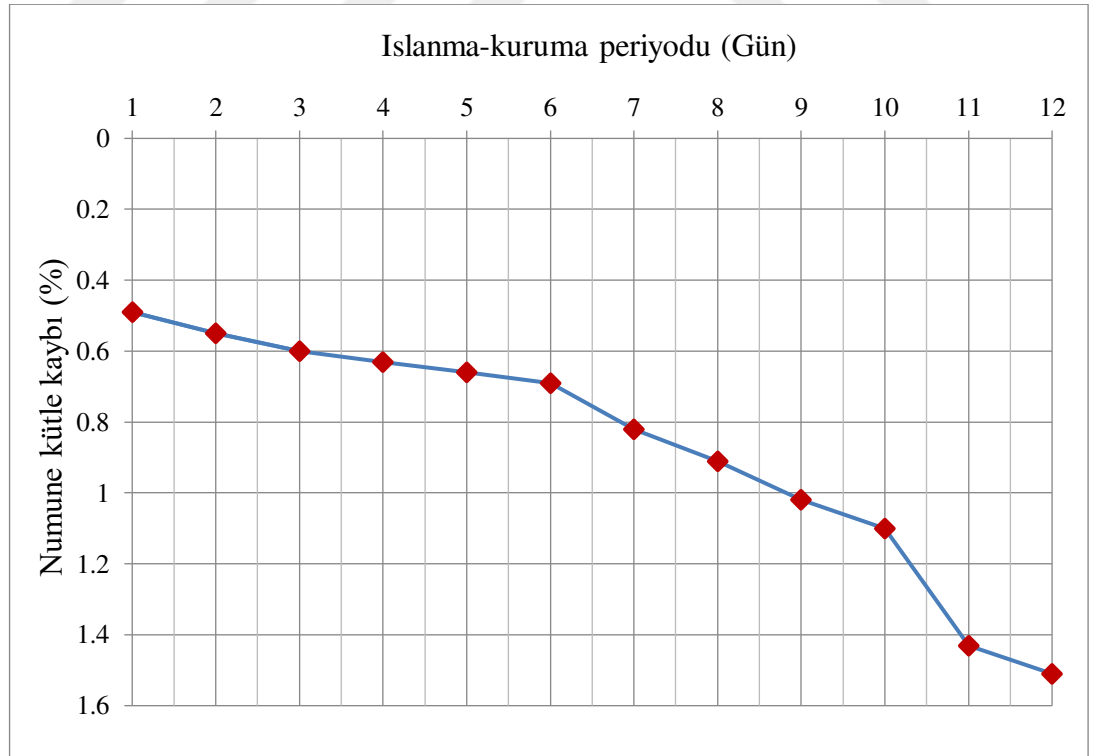
Şekil 4.29 SL4 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



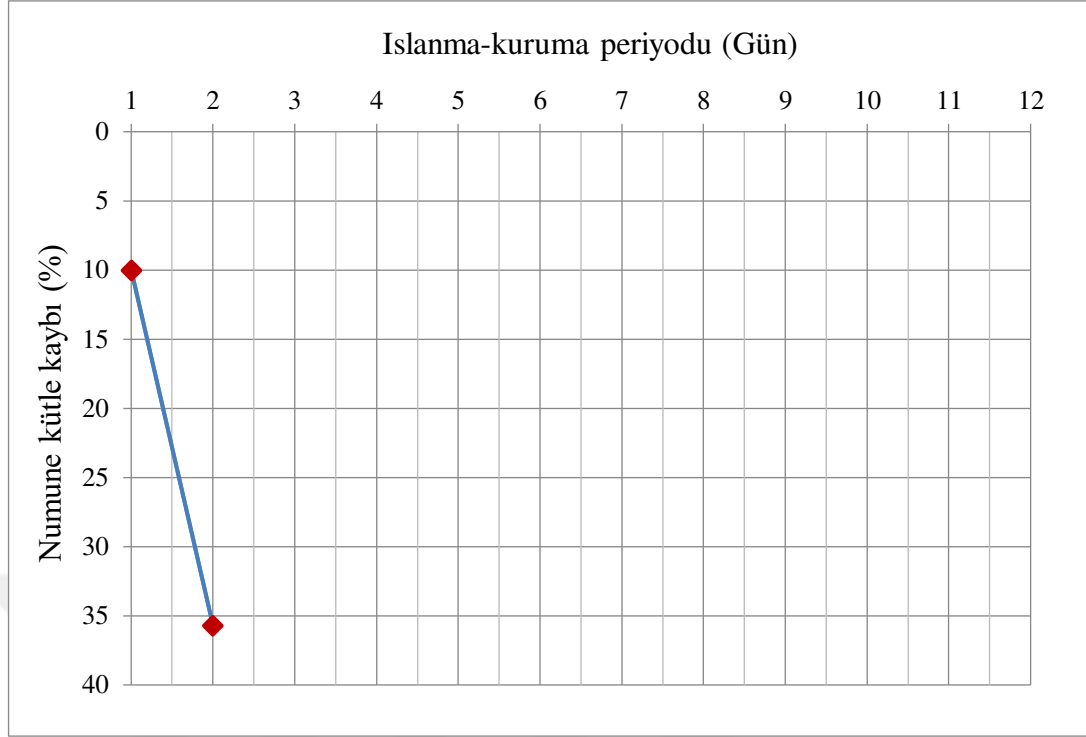
Şekil 4.30 SL6 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



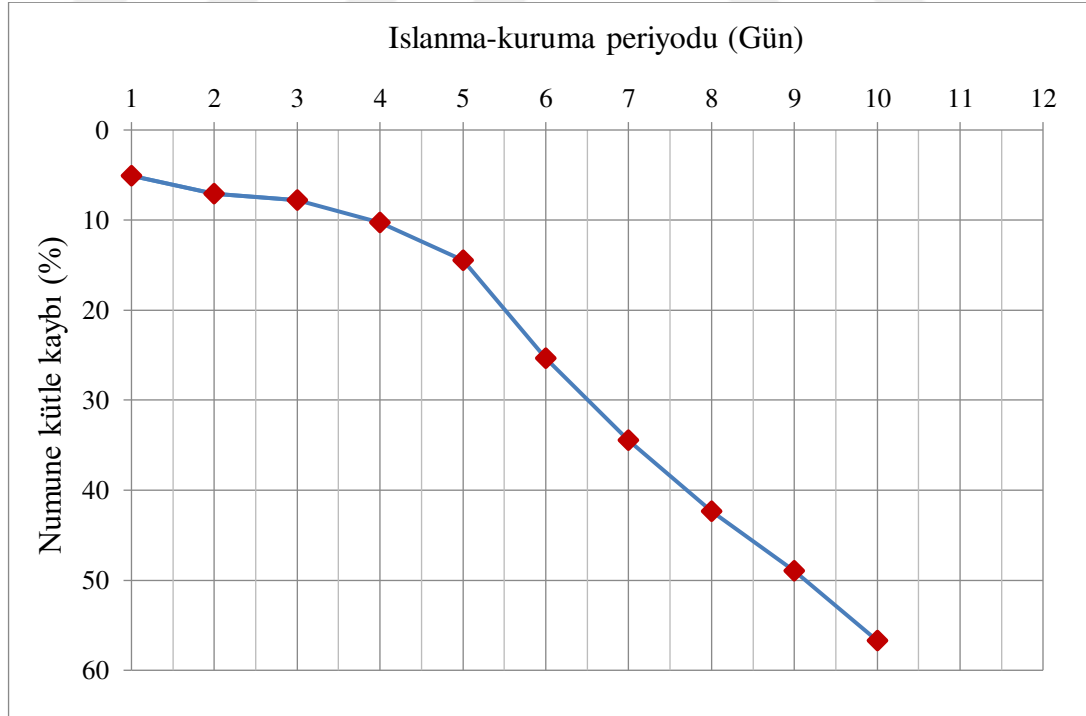
Şekil 4.31 SL8 karışımının ısıanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



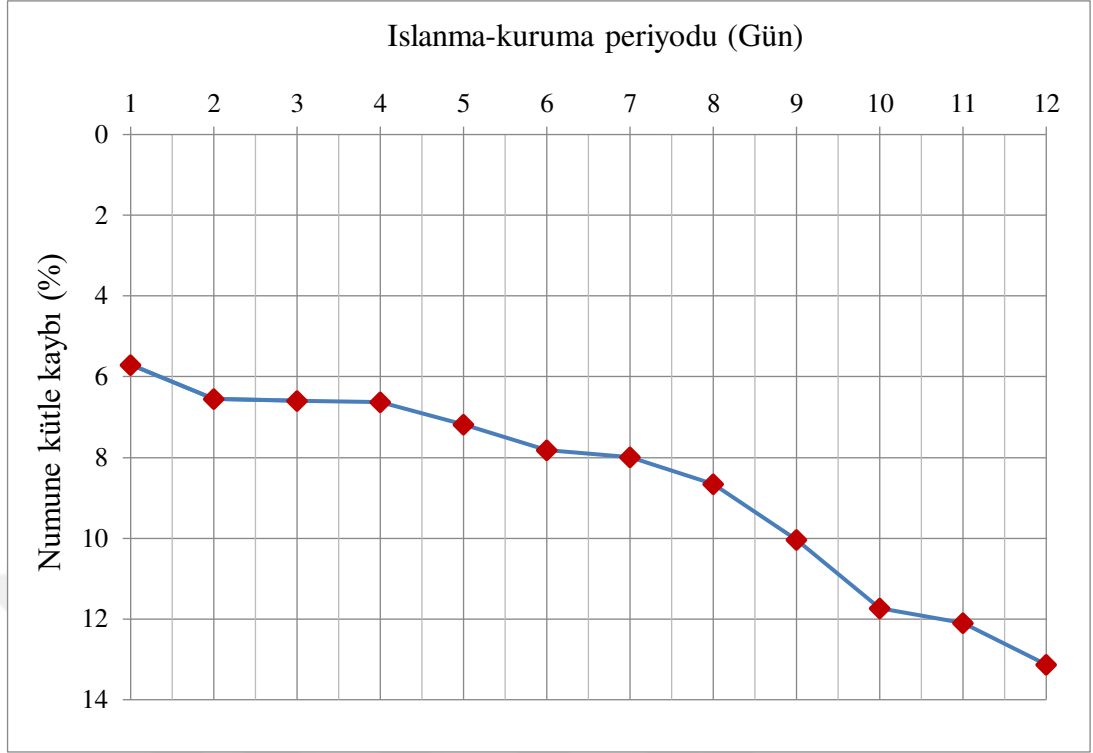
Şekil 4.32 SL10 karışımının ısıanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



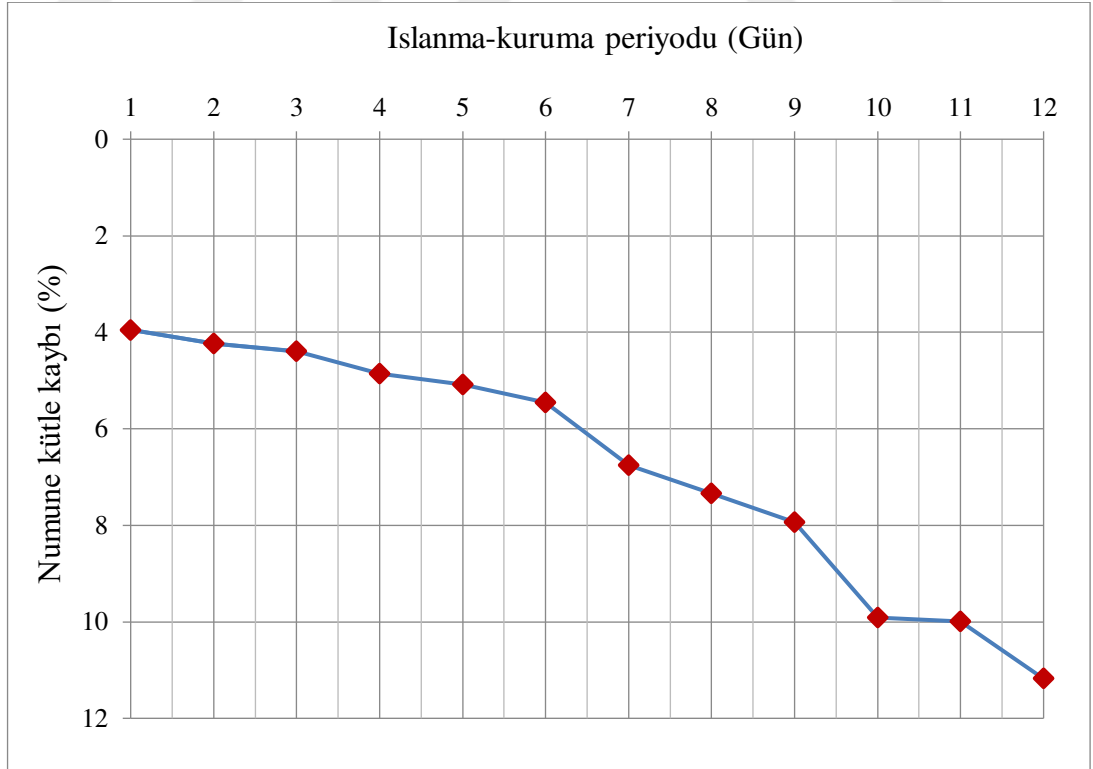
Şekil 4.33 SGL2 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



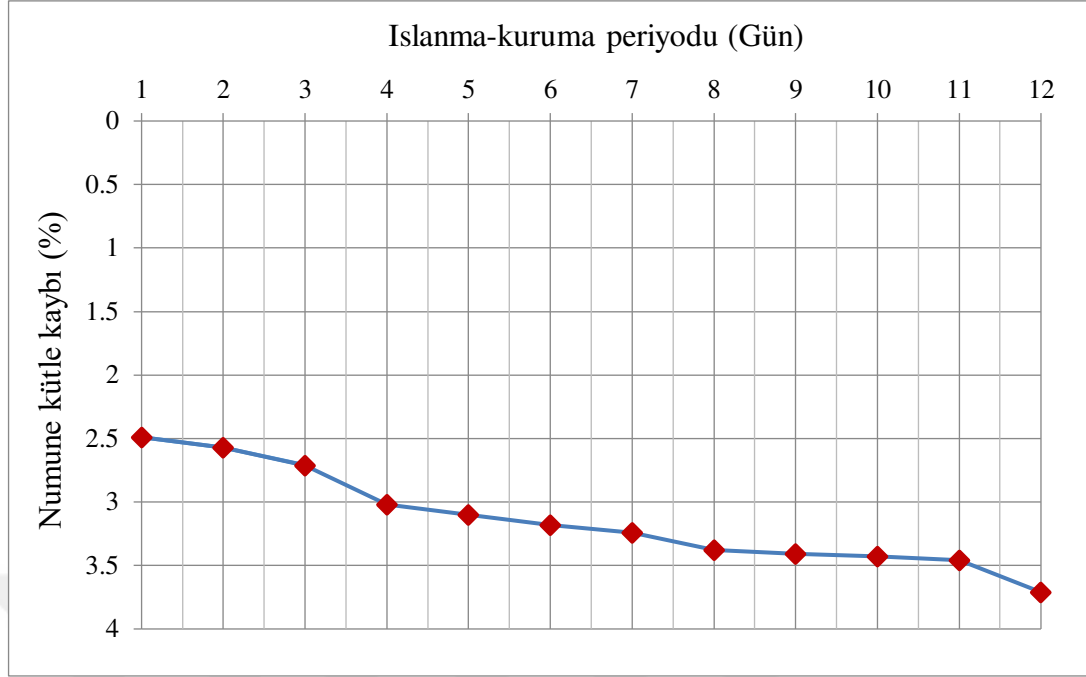
Şekil 4.34 SGL4 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



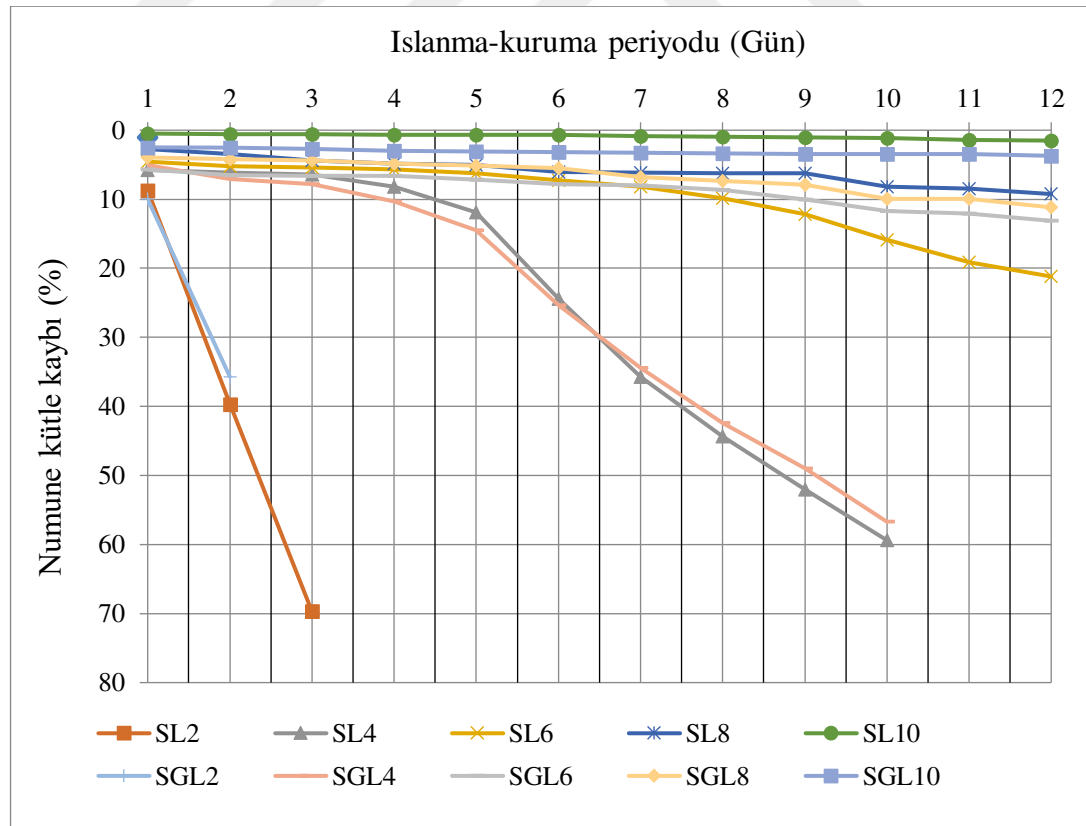
Şekil 4.35 SGL6 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.36 SGL8 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.37 SGL10 karışımının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi



Şekil 4.38 SL ve SGL karışımların ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrisi

#### 4.1.5.2 Donma-çözülme çevrimi

Soğuk yerlerde yapılacak stabilizasyon çalışması için donma-çözülme çevrimi son derece büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla, hazırlanan deney numunelerine ASTM D 560 standardına göre donma-çözülme çevrimi deneyi uygulanmıştır. 28 günlük kürden sonra ilgili standarda göre 7 çevrim olmak üzere donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Daha sonra donma-çözölmeye tabii tutulan numunelerin dayanımlarının belirlenmesi amacıyla tek eksenli serbest basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Öğütölmüş ve öğütölmemiş kireç ile hazırlanan 11 adet karışım için her birinden 3'er tane olmak kaydıyla toplamda 33 adet numune hazırlanmıştır ve tek eksenli serbest basınç deneylerinin ortalamaları hesaba katılmıştır.

Donma-çözölme çevrimi deneyi sonrasında tek eksenli serbest basınç dayanımı testi yapılan numunelerin dayanım sonuçları Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.8** SL karışımlarının donma-çözölme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

| Numune      | Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa) |
|-------------|-------------------------------------------|
| Doğal Zemin | 101,1                                     |
| SL2         | 268,6                                     |
| SL4         | 650,9                                     |
| SL6         | 1103,2                                    |
| SL8         | 1151,7                                    |
| SL10        | 1110,0                                    |

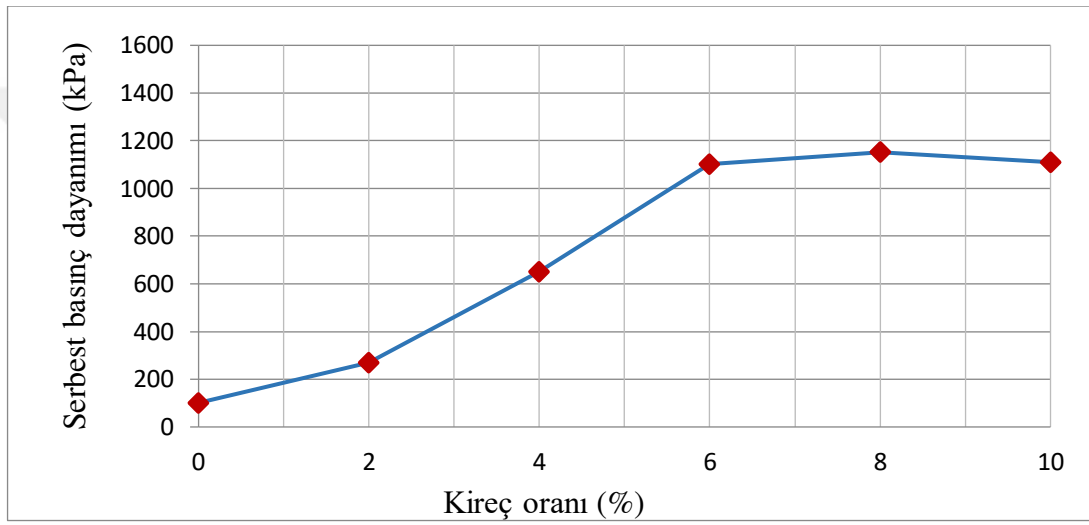
**Çizelge 4.9** SGL karışımlarının donma-çözölme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

| Numune      | Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa) |
|-------------|-------------------------------------------|
| Doğal Zemin | 101,1                                     |
| SGL2        | 272,6                                     |
| SGL4        | 747,0                                     |
| SGL6        | 1501,2                                    |
| SGL8        | 1443,8                                    |
| SGL10       | 1137,2                                    |

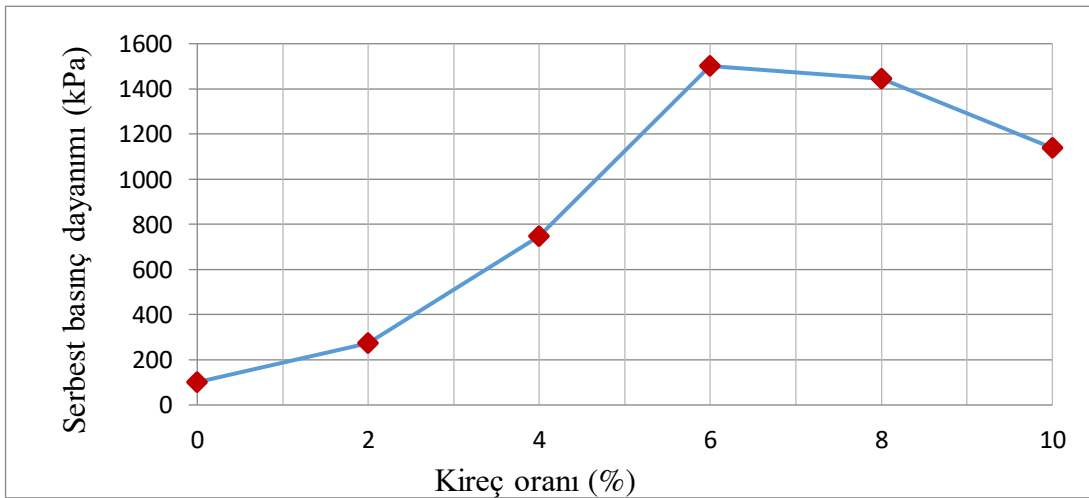
Öğütölmüş kirecin öğütölmemiş kirece nazaran donma-çözölme etkisine daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. %2 ve %10 katkı içeren numunelerin birbirlerine

yakın sonuçlar vermesine karşın, SGL4 numunesinin SL4 numunesine göre %15, SGL8 numunesinin SL8 numunesine göre %25 ve SGL6 numunesinin ise SL6 numunesine kıyasla %35 daha fazla dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

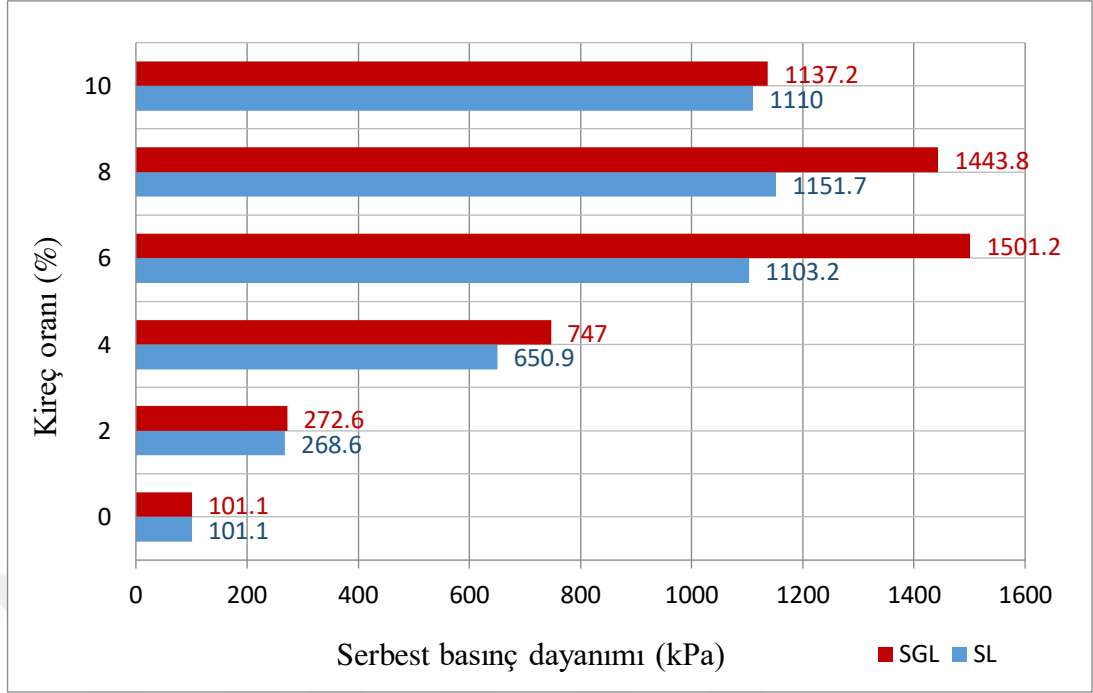
Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta SL ve SGL karışımlarına ait donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları ve Şekil 4.41'de ise SL ve SGL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanım değerleri grafiksel olarak verilmiştir.



**Şekil 4.39** SL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımları



**Şekil 4.40** SGL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı



**Şekil 4.41** SL ve SGL karışımlarının donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli serbest basınç değişimi

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Düşük plastisiteli killerin kireçle stabilizasyonunu konu alan bu yüksek lisans çalışmasında, kirecin öğütülebilirliği ve inceliğinin indeks, durabilite ve dayanım üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Öğütülmemiş kirecin %90'ı 48 mikron altı malzeme olmasına karşın 650 rpm'de 5 dakika öğütülen kirecin %90'ı 20 mikron altına inmiştir.
- Öğütme işleminde malzemenin karıştırılma hızı ve süresi arttıkça malzemenin boyutunda küçülmeler, özgül yüzey alanında ise artışlar gözlemlenmiştir. Ancak hız ve sürenin belirli bir seviyeden fazla artırılması malzemelerin birbirlerine yapışmasına ve boyutunun büyümesine neden olmuştur.
- Öğütülmemiş kirecin özgül yüzey alanı ortalama 266,5 cm<sup>2</sup>/gr iken bilyeli öğütücüde öğütülen kirecin özgül yüzey alanı ise 3135 cm<sup>2</sup>/gr olarak tespit edilmiştir. Özgül yüzey alanında 11 kattan fazla artış meydana gelmiştir.
- 250 rpm'de 5, 15 ve 30 dakikalık öğütme sonucunda ortalama 22 mikron altı ve özgül yüzey alanı 830 cm<sup>2</sup>/gr malzeme oluşurken, 45 dakikalık öğütme işleminde D<sub>90</sub> değeri 18 mikron gelmiş ve özgül yüzey alanı 2522 cm<sup>2</sup>/gr olarak yaklaşık 3 kat artmıştır.
- 500 rpm'de öğütülen malzemelerin öğütülme süreleri dikkate alındığında, dane boyutu olarak düzensiz davranış göstermiş ve özgül yüzey alanları 2650 cm<sup>2</sup>/gr olarak tespit edilmiştir.
- 650 rpm'de öğütülen malzemeler dane boyutu olarak düzensiz davranış göstermişler ancak özgül yüzey alanları süreyle ters orantılı olarak azalmıştır. En yüksek özgül yüzey alanı 5 dakika öğütme sonucunda 3135 cm<sup>2</sup>/gr iken 45 dakikalık öğütme işleminde bu değer 1543 cm<sup>2</sup>/gr olarak belirlenmiştir. Öğütülme süresi ve D<sub>90</sub> değerleri dikkate alındığında, 650 rpm'de 5 dakikalık öğütme işlemi daha akılcı ve ekonomiktir.

- Genel olarak normal kireç içeren SL karışımlarının likit limit değerleri öğütülmüş kireç içeren SGL karışımlarına oranla daha az, plastik limit değerlerinin ise daha fazla olduğu görülmüştür. Plastik limit en fazla %6 kireç-zemin karışımında çıkmış, plastisite indisi en düşük yine bu karışımda görülmüştür.
- Likit limit değeri en fazla SL2 numunesinde, en az SL10 ve SGL10 numunelerinde görülmüştür. Plastik limit değeri en fazla SL6 numunesinde çıkarken en az SGL8 numunesinde izlenmiştir. Plastisite indisi ise en fazla SGL8 numunesinde olurken en az SL6 numunesinde gözlemlenmiştir.
- SL ve SGL karışımlarında kireç yüzdesi arttıkça likit limit değerlerinde azalmalar olmuştur. Zemine kireç eklenmesiyle birlikte SL numunelerinde SL6 ya kadar artış olurken SL8 ve SL10 numunelerinin plastik limit değerleri azalmıştır.
- Doğal zemine kireç ilavesiyle birlikte optimum su içeriğinde artışlar olurken maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise azalmalar olmuştur ve zemine eklenen öğütülmüş ve normal kireçle yapılan numuneler arasında yakın değerler çıktığı gözlemlenmiştir.
- En düşük maksimum kuru yoğunluk değeri  $1,59 \text{ mg/m}^3$  ile SL10 numunesinde görülürken,  $1,64 \text{ mg/m}^3$  ile SL2, SGL2 ve SGL4 numunelerinde en yüksek değerini almıştır.
- Optimum su muhtevası %19,5-22,5 arasında değişkenlik gösterip öğütme işlemi sonucunda belirgin bir fark oluşturmadığı kanaatine varılmıştır.
- Doğal zemine kireç eklenmesi sonucunda elde edilen numunelere 1 günlük kür süresinin ardından yapılan serbest basınç dayanım testi sonuçlarına göre numunelerdeki dayanım yaklaşık üç kat artmıştır. SL6 numunelerinin dayanımları en yüksek seviyeye gelmiş ve doğal zemine oranla 4 kat daha fazla dayanıma ulaşmıştır. Öğütülmüş kireç katılarak yapılan numunelerin 1 günlük kür sonrası yapılan serbest basınç dayanımlarında ise en yüksek değere SL8 numunesi ulaşmış ve doğal zeminin yaklaşık 4 katı kadar olmuştur.
- Desikatörde 7 gün kür yapılan numunelerin serbest basınç dayanımları incelendiğinde SGL6 numunesi,  $1490 \text{ kPa}$  değerine ulaşarak 10 kat artış göstermiştir. Böylece incelik etkisi 7. günden itibaren belirgin hale gelmiştir.
- 28 günlük kür sonunda doğal zemine nazaran 18 kat artan SGL6 numunesi, yapılan tek eksenli serbest basınç dayanımı testine göre  $2562,3 \text{ kPa}$  dayanıma ulaşmıştır.

SGL6 numunesi SL6 numunesine göre %23,6 daha fazla dayanıma ulaşarak inceliğin dayanıma olan etkisini göstermiştir.

- Islanma-kuruma çevriminde SL numunesi ilk gününde hacimsel bütünlüğünü koruyamamış ve dağılmıştır. SL2 ve SGL2 numuneleri ikinci ıslanma-kuruma döngüsünden sonra volumetrik stabilitelerini kaybetmişlerdir. SGL4 ve SL4 numuneleri sırasıyla 4 ve 5 gün boyunca ıslanma-kuruma döngüsüne karşı dayanıklılık göstermişlerdir. SL6 numunesi 9. güne kadar dayanımını korumuştur.
- Islanma-kuruma çevrimi sonucunda öğütülmemiş kireç içeren SL8 ve SL10 numuneleri izin verilebilir aralıkta kalırken, öğütülmüş kireç içeren karışımlarda SGL6, SGL8 ve SGL10 numuneleri izin verilebilir aralıkta kalmıştır.
- Öğütülmüş kireç içeren karışımların normal kireç içeren karışımlara nazaran donma-çözülme etkisine daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. SGL4 numunesinin SL4 numunesine göre %15, SGL8 numunesinin SL8 numunesine göre %25 ve SGL6 numunesinin ise SL6 numunesine oranla %35 daha fazla dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmıştır.
- Bu deneysel çalışmadan elde edilen veriler ışığında, kirecin inceltilecek düşük plastisiteli killerin stabilizasyonunda kullanılmasının dayanım ve durabilite davranışında olumlu etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.

Bu konu ile ilgili yapılabilecek doktora ve yüksek lisans çalışmalarına yol göstermesi amacıyla verilebilecek öneriler şunlardır:

- Bu çalışmada USCS sınıflandırma sistemine göre kullanılan malzeme CL sınıfı malzemedir. Farklı tip zeminler kullanılarak kirecin inceliğinin bu zeminlere etkisi ve stabilizasyonda kullanılabilirliği incelenebilir.
- Tek başına kullanımında iyileştirmeye etkisi araştırılan kirecin farklı malzemelerle ve farklı oranlardaki kombinasyonunun etkisi incelenebilir.
- Laboratuvar koşullarında yapılmış olan bu deneylerin saha ortamında yapılan çalışmalarla desteklenmesi sağlanabilir.
- Zemin iyileştirme konusunda katkı maddesi olarak kullanılan diğer malzemelerin incelik etkisi araştırılıp mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlere uygulanmasının etkisi araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- Adailer, K. (1996). *Mitigation of Earthquake-Induced Liquefaction Hazards*, **PhD Thesis**, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- Aksoy, İ. H. (1992). *Uçucu Külün Geoteknikte Kullanımı*, **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi**, İstanbul.
- Altun, S. (2010). *Zemin İyileştirme Yöntemleri, Derin Temeller ve Uygulama Örnekleri Sunumu*, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir.
- Arman, A. ve Moonfish, G. A. (1972). *Lime Stabilization of Organic Soils*, **Research Record No. 381, Highway Research Record**, Washington, 37-45.
- ASCE (1997) *Soil Improvement and Geosynthetics Commitee Report, Ground Improvement –Ground Reinforcemen*, 17-19 Temmuz 1997, GSP No:69, 1-371, Utah.
- ASTM C 618, (2002). Annual Book of ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 422, (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 559, (2003). Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 560, (1996). Standard Test Mehthods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 698, (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 854, (2010). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2166, (2006). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2487, (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM, Pennsylvania.

- ASTM D 2974, (2007). Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- Atanur, A. (1972). *Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi olarak kullanılması*, Ankara: T.C. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 219.
- Atterberg, A. (1911). The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity, *Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift*, 50/2, 132-158.
- Ayan, E. (2009). *Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aytekin, M. (2004). **Deneysel Zemin Mekaniği**, (2. Baskı). Ankara: Teknik Yayınevi, 217-218.
- Bagherinia, M.(2013). *Killerin Derin Karıştırma Yöntemi ile İyileştirilmesinde Doymamış Polyesterin Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bhattacharjee, U. ve Kandpal, T. C. (2002). Potential Fly Ash Utilisation in India, *Energy*, 27/2, 151-166.
- Braja, M. D. (1999). Principles of Foundation Engineering 4th Edition, PWS Publishing, USA.
- Briaud, J. L. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 998.
- Bruce, D. A. ve Bruce, M. E. C. (2003). *The Practitioner's Guide to Deep Mixing, 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment*, Louisiana.
- Cedergren, H. R. (1989). **Seepage, Drainage, and Flow Nets (3.Baskı)**. Florida: John Wiley and Sons Inc., 232-255.
- Çakır, M. (2001). *Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakıroğlu, İ.(2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Çalık, Ü.(2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireçle Birlikte Zemin*

*Stabilizasyonunda Kullanımı, Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon

Çetin, A. Y. (2011).*Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Çetin, H. (2006). Zemin Islah Yöntemleri, Ders Notları Sunum, <https://docplayer.biz.tr/47697721-Zemin-islak-yontemleri-prof-dr-hasan-cetin.html>, 10.10.2018.

Çetin, M.(2003).*Değişik Çevresel Koşullar Altında Şişen Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Das, B. M. (2002). **Principles of Geotechnical Engineering**. Stamford: Cengage Learning.

Demir, H.(2007).*Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirmesi, Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Demiröz, A. ve Karaduman M. (2009). *Zemin İyileştirme Metodları, Selçuk-Teknik Dergisi*, Cilt 8, Sayı:3.

Doru, H. M.(2014).*Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi*, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Durgunoğlu, H. T., Kulaç, F. H., İkiz, S. ve Karadayılar, T. (1992). *Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine bir Uygulama, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İstanbul.

Eades, J. L. ve Grim, R. E. (1966). *A Quick Test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization, Bulletin No. 139, Highway Research Board*, 61-72.

Edil, T. B., Benson, C. H., Bin-Shafique, M. S., Kim, W., Tanyu, B. F., ve Senol, A. (2002). *Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway over Soft Subgrade, Record No. 1786, Transportation Research Board*, Washington, 36-48.

ENPC-LCPC, 1977. **International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics**, Paris.

Ergun, U. (1996). *Bir Önyüklem Uygulaması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, Ankara.

Erkan, İ. H.(2007).*Yumuşak Killi Zeminlerin Kireç Kolonlarıyla Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen

Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Fang, H. Y. (1991). **Foundation Engineering Handbook** (2. Baskı), Londra: Van Nostrand Reinhold Publishing.

FHWA, 1998. Ground Improvement Technical Summaries Final Draft, FHWA Demonstration Project No.116 Contact No. DTFH61-93-R-00145 by Elias V., Welsh J., Warren J., Lukas R., USA.

Fidan, D.(2016). *Killerin Stabilizasyonunda Doğal Puzolanik Katkı Maddesi İnceliğinin Dayanım ve Durabiliteye Etkisi*, **Yüksek Lisans Tezi**, Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri, Bayburt.

Ghabaee, S.(2015). *Kireç ile Stabilize Edilmiş Bentonitin Kür Süresinin Mukavemet Üzerindeki Etkisi*, **Yüksek Lisans Tezi**, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gücek, S. (2011). *Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı*, **Yüksek Lisans Tezi**, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Handy, R. L. ve Williams, N. W. (1967). **Chemical Stabilization of an Active Landslide**, Iowa, 37 (8),62-65.

Hausmann, M. R., (1990). **Engineering Principles of Ground Modification**, McGraw-Hill, New York, 632.

Hayward, B. (1996). *Ground Modification Seminar Notes*, Odenton.

Horne, M. R. (1964). *The Consolidation of a Stratified Soil with Vertical and Horizontal Drainage*, **International Journal of Mechanical Sciences Vol: 6**, 187-197.

Hughes J. M. O. ve Withers N. J. (1974). *Reinforcing of Soft Cohesive Soils With Stone Columns*, **Ground Engineering**, 42-49.

Hunt, R. E. (1986). **Geotechnical Engineering Techniques and Practices**, McGraw Hill, USA.

Hunt, R. E. (1994). **Geotechnical Engineering Investigation Manual**, McGraw Hill, USA.

Hunter, D. (1988). *Lime Induced Heave in Sulfate Bearing Clays*, **Journal of Geotechnical Engineering**, 114/2, 150-167.

İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., (2001). *Asfalt ve*

*Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları*, No:1, 280.

Karol, R. H. (2003). **Chemical Grouting and Soil Stabilization** (3. Baskı). Recised and Expanded, Rutgers University, New Jersey.

Kavak A. (1996). *The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading*, **Doktora Tezi**, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kavak A. ve Akyarlı A. (2007). *A Field Application for Lime Stabilization*, **Enviromental Geology**, Volume 51.number 6, 987-997.

Kavak, A. Güngör, A. G. Avşar, C. ve Atbaş, B. (2008). *Kireç ile Zemin Stabilizasyonu*, **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi**, Konya.

Kayabalı, K. (2010). **Geoteknik Mühendisliğine Giriş**, Ankara: Gazi Kitapevi, 636.

Kayabalı, K. ve Mollamahmutoğlu, M. (2004). **Geoteknik Mühendisliği Elkitabı**, *McGraw- Hill El Kitapları, Robert W. Day*. Ankara: Gazi Kitabevi.

Kett, I. (1998). **Asphalt Materials and Mix Design Manual**, New Jersey: Noyes Publications.

Kılıç, G. (2008). *Çimento ile Zemin Stabilizasyonu*, **Yüksek Lisans Tezi**, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Kızılcıkelik, M.(2010). *Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu*, **Yüksek Lisans Tezi**, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Lambe, P. C., Khosla, N. P., ve Jayaratne, N. N. (1990). *Soil Stabilization in Pavement Structures*, **Report No. 232411-88-1, Transportation Studies Research**, Sacramento, 545-589.

Ledbetter, R. H. (1985). *Improvement of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures*, **Technical Report No. REMR-GT-2**, Dept. of the Army, Washington.

Leonards, G. A., Gutter, W. A., ve Holts, R. D., (1980). *Dynamic Compaction of Granuler Soils*, **Jounal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE, Vol. 106, 35-44.

Little, N. D. (1987). *Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime*, National Lime Association, No. 232, Arlington, 19-20.

Littlejohn, G. S. (1982). *Design of Cement Based Grouts-Grouting in Geotechnical Engineering*, **In Proc. of an ASCE Conference**, New York.

Loos, W. (1936). *Comparative Studies of the Effectiveness of Different Methods for*

*Compacting, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Massachusetts.

Lunardi P. (1997). *Ground Improvement by Means of Jet-Grouting. Ground Improvement*, ISSMFE Thomas Telford, 1/2, 65 - 86.

Maag, E. (1938), *Über Die Verfestigung und Dichtung des Baugrundes*, **Lecture to Federal Technical University**, Zurich.

Mehta, P. K. (1986). **Concrete-Structure, Properties and Materials**, New Jersey: Prentice-Hall, 350-400.

Melegari C. and Garassino A. L. (1997), *Seminar on Jet Grouting*, CI-Premier Pte Ltd, Singapore.

Menard, L. ve Boise, Y. (1975). *Theoretical and Practical Aspects of Dynamics Consolidation*, Geot, Vol. 25, No: 1, Londra, 3- 18.

Menard, L. (1977). *The Dynamic Consolidation of Foundation Soils*. Report by Techniques Louis Menard, Paris.

Mitchell, J. K. (1986). *Practical Problems from Surprising Soil Behavior*, **Journal of Geotechnical Engineering**, 112, 3, 259-289.

Nelson, J D. ve Miller D. J. (1992). **Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering**, Londra: John Willey and Sons Inc., 259-261.

Nikbakhtan B. ve 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 & Mining Sciences**, 46, 498-505.

Okay S. (1987). *Yüksek Basıncılı Enjeksiyon*. Rapor, BAUER Spezialtiefbau GmbH, İstanbul.

Öksüz, K. (2006). *Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda kullanımı*, **Yüksek Lisans Tezi**, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana

Önalp, A. (1983). **İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi** (Cilt 2). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın No: 3. 1225s.

Öntürk, K. (2011). *Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı*, **Yüksek Lisans Tezi**, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Sakarya

- Özaydın, K. (1989). **Zemin Mekaniği**, İstanbul: Birsen Yayınevi, 261.
- Özaydın, K. (2012). *Zemin İyileştirme Teknikleri*, **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi**, Isparta.
- Özdemir, A. ve Özdemir, M. (2007). *Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri*, **Sondaj Dünyası**, Sayı 3.
- Özer, M. ve Orhan, M. (2007). *Lazer Kırınım Yöntemiyle Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Belirlenmesi: Genel İlkeler ve Örnek Hazırlama Yöntemi*, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**. 22/ 2, 217-226.
- Öztoprak, S. (2016). *Zeminlerin İyileştirilmesi: Yöntemlere Genel Bir Bakış*, **İMO İstanbul Karaköy Şb**, Kasım 2016, İstanbul.
- Pektaş, C.(2012). *Muhtelif Katkı Maddeleri ve/veya Donatı Kullanımı ileYapılan Zemin İyileştirme(Stabilizasyon) Yöntemlerinin Teorik ve Deneysel Olarak Ayrıntılı Bir İrdeleme ve Değerlendirilmesi*, **Yüksek Lisans Tezi**, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Petry, T. M. ve Little, D. N. (1992). *Update on Sulfate Induced Heave in Treated Clays: Problematic Sulfate Levels*, **Transportation Research Board, Record No. 1362**, Washington.
- Porbaha, A. (1998). *State of the Art in Deep Mixing Technology: Part 1. Basic Concepts and Overview*, **Ground Improvement**, 2(2), 81–92.
- Raj, P.P. (1995). **Geotechnical engineering**, New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Sağlam, A. (1985). *Zemin Islah Metotları*, **Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri**, DSİ Genel Müdürlüğü, Adana.
- Sağlam, A. (2011). *Zemin iyileştirme yöntemleri*, ZM11 Sunum Notları, Trabzon,
- Trb, (1987). **State of the Art Report 5**, Transportation Research Board, Washington.
- TS 639, (1975). *Uçucu Küller*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tumluer, G. (2006). *Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti*, **Yüksek Lisans Tezi**, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Tunç, A. (2001). **Yol Malzemeleri ve Uygulamaları**, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım. 325.
- Tunç, A. (2002). **Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları**, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 912.

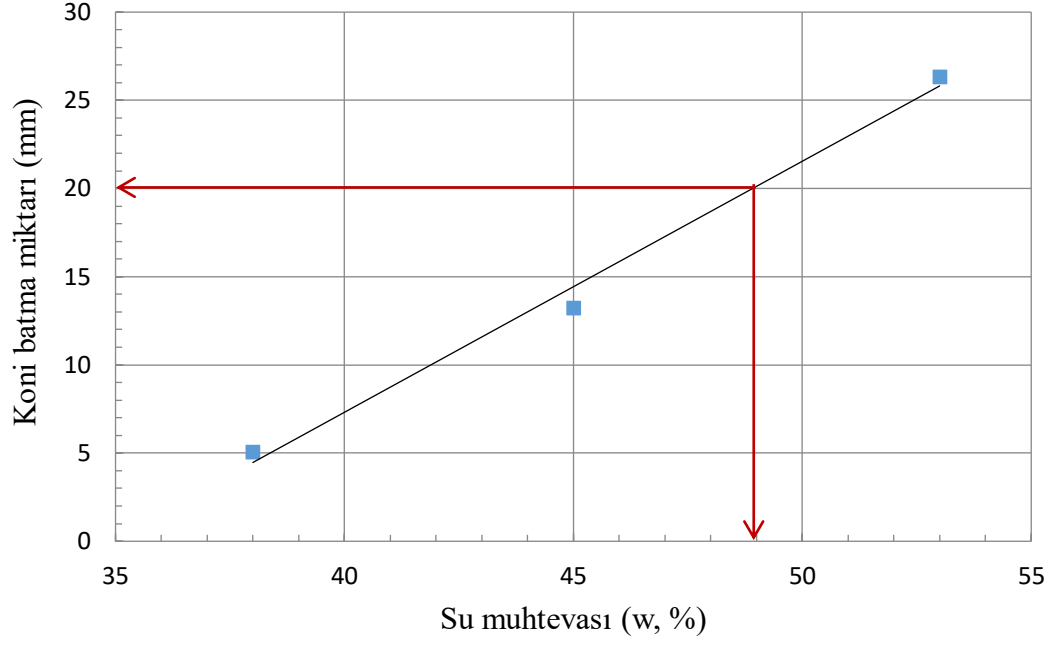
- Tülek, M. (2007). *Kimyasal Atık Alçıların Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, **Yüksek Lisans Tezi**, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Tystovich, N. A., Abelev, M. Y., ve Takhirov, I. G. (1971). *Compacting Saturated Loeses Soils by Means of Lime Piles*, **Proceedings of the 4th Conference on Soil Mechanics**, Budapest.
- U. S. Army Corps. of Eng. (2003). *Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities*, **Research No. 20314-1000**, Dept of the Army, Washington.
- Uzuner, B.A. (2000). **Temel Mühendisliğine Giriş** (2.Baskı). Trabzon: Derya Kitabevi, 245-270.
- Uzuner, B. A. (2006). **Temel Mühendisliğine Giriş** (3.Baskı). Trabzon: Derya Kitabevi, 310-360.
- Uzuner, B. A. (2013). **Temel Mühendisliğine Giriş** (5.Baskı). Trabzon: Derya Kitabevi, 342-359.
- Van Impe, W. F. (1989). **Soil Improvement Techniques and Their Evolution**, Rotterdam: A.A. Balkema, 125.
- Vekli, M.(2009). *Taş Kolon ile Şev İyileştirmesinin DeneySEL ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, **Doktora Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Welsh, J.P., Rubright, R.M. ve Coomber, D.B. (1986). *Jet Grouting for Support of Structures Session*. **ASCE Spring Convention**, Seattle.
- Winterkorn, H. F. ve Fang, H. Y. (1975). **Foundation Engineering Handbook**, Londra: VanNostrand Reinhold Publication, 176.
- Yang, D.S. (1997). *In Situ Ground Improvement, Reinforcement and Treatment: A Twenty Year Update and a Vision for the 21st Century*, **Ground Reinforcement Committee, American Society of Civil Engineers Geo-Institute Conference**, Logan.
- Yıldırım, S. (2002). **Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı**, İstanbul: Birsan Yayınevi, 466.
- Yılmaz, F.(2015). *Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği ile Araştırılması*, **Doktora Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon

## **EKLER**

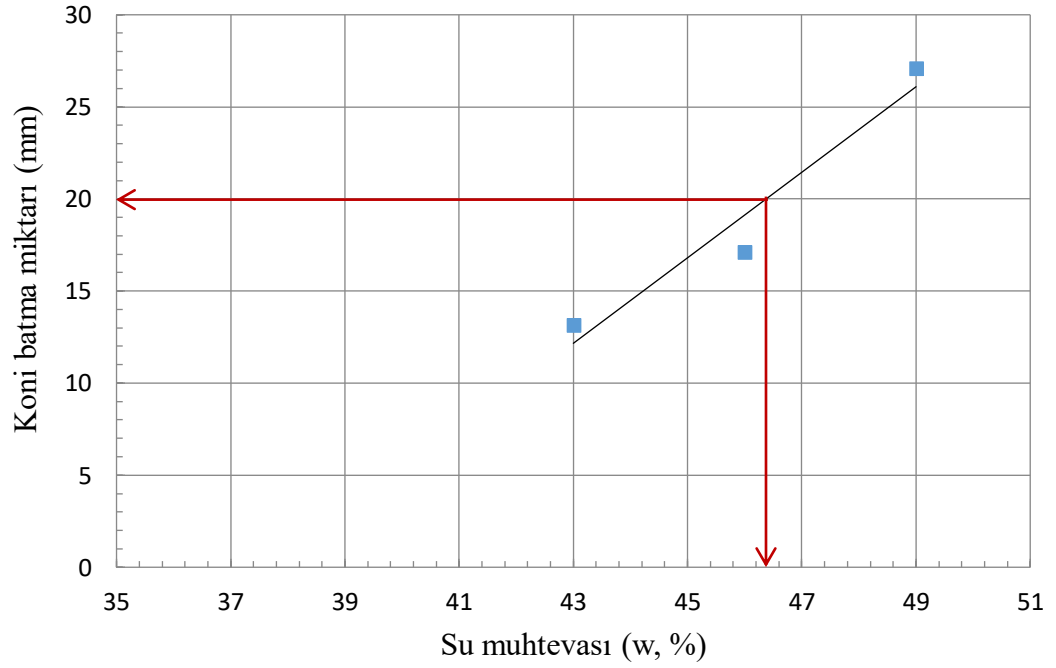
**Ek 1:** Koni Penetrasyon Deney Sonuçları

**Ek 2:** Kompaksiyon Deney Sonuçları

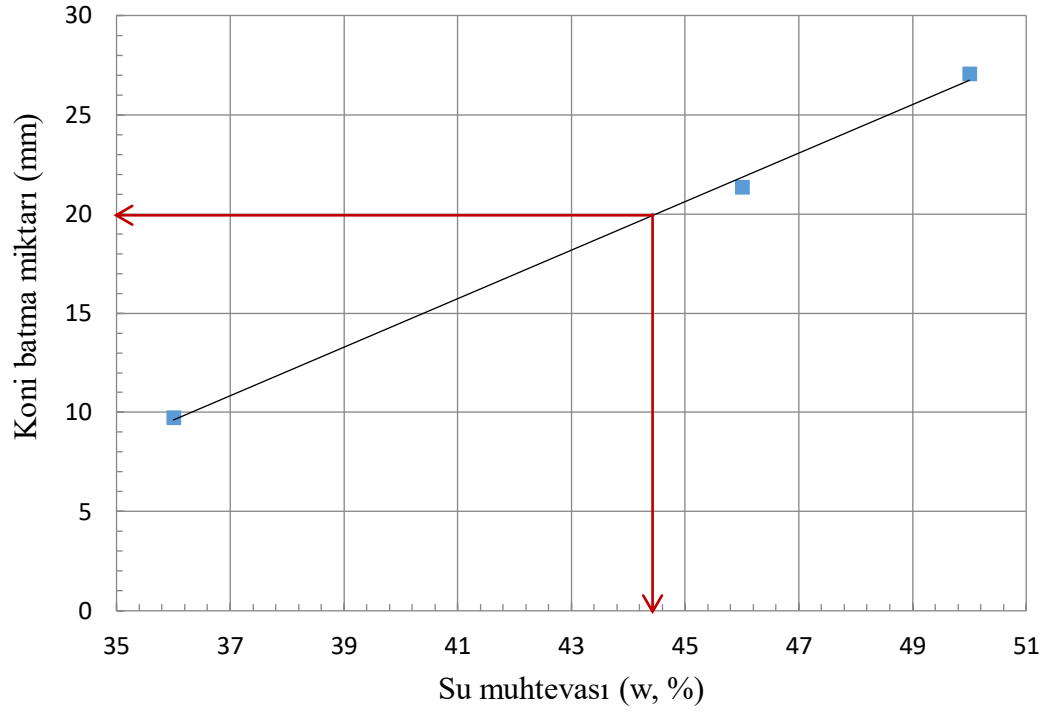
### Ek-1 Koni penetrasyon deneyi sonuçları



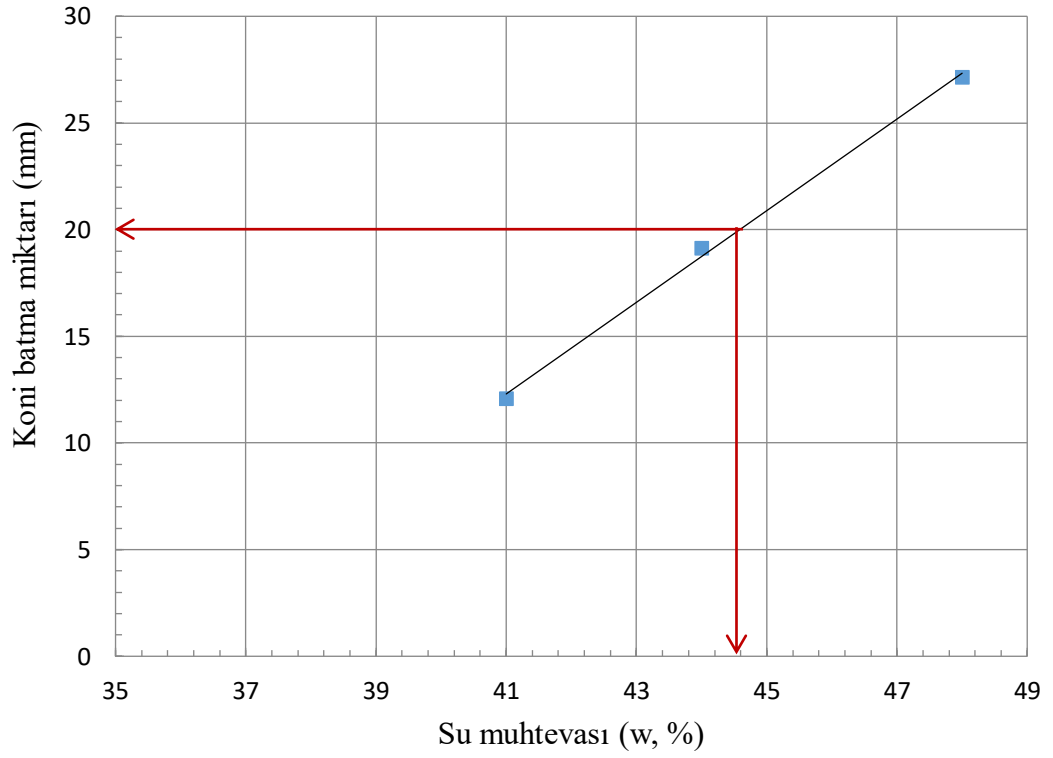
### Ek-1 Şekil 1.1 Doğal zeminin düşen koni penetrasyon grafiği



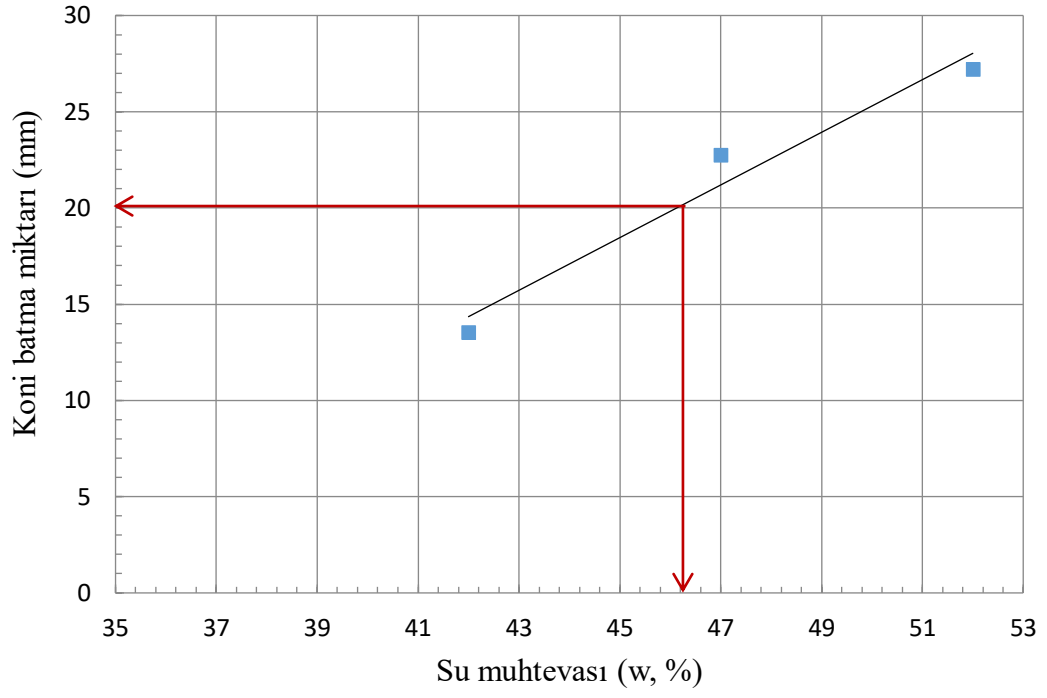
### Ek-1 Şekil 1.2 SL2 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi



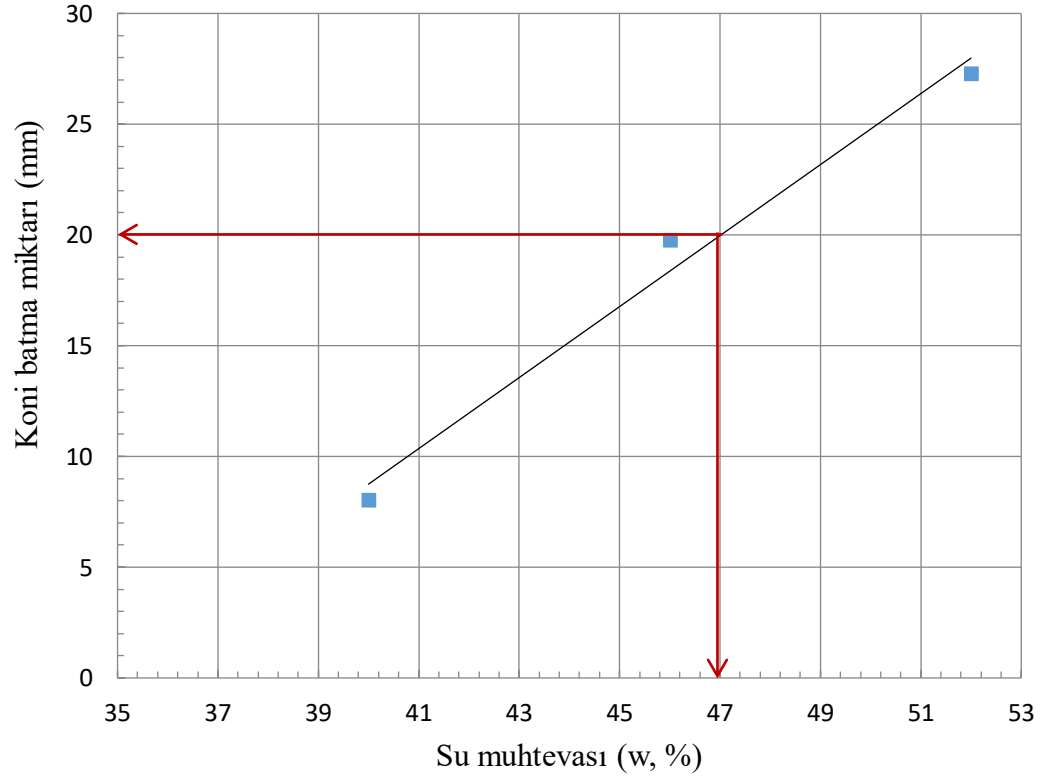
Ek-1 Şekil 1.3 SL4 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi



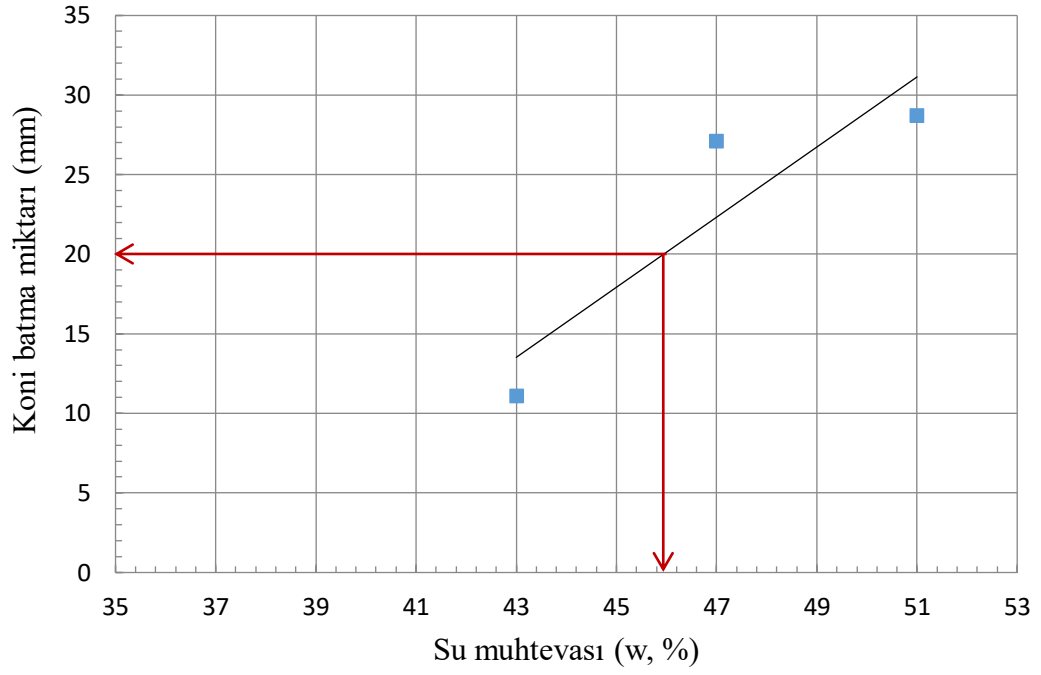
Ek-1 Şekil 1.4 SL6 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi



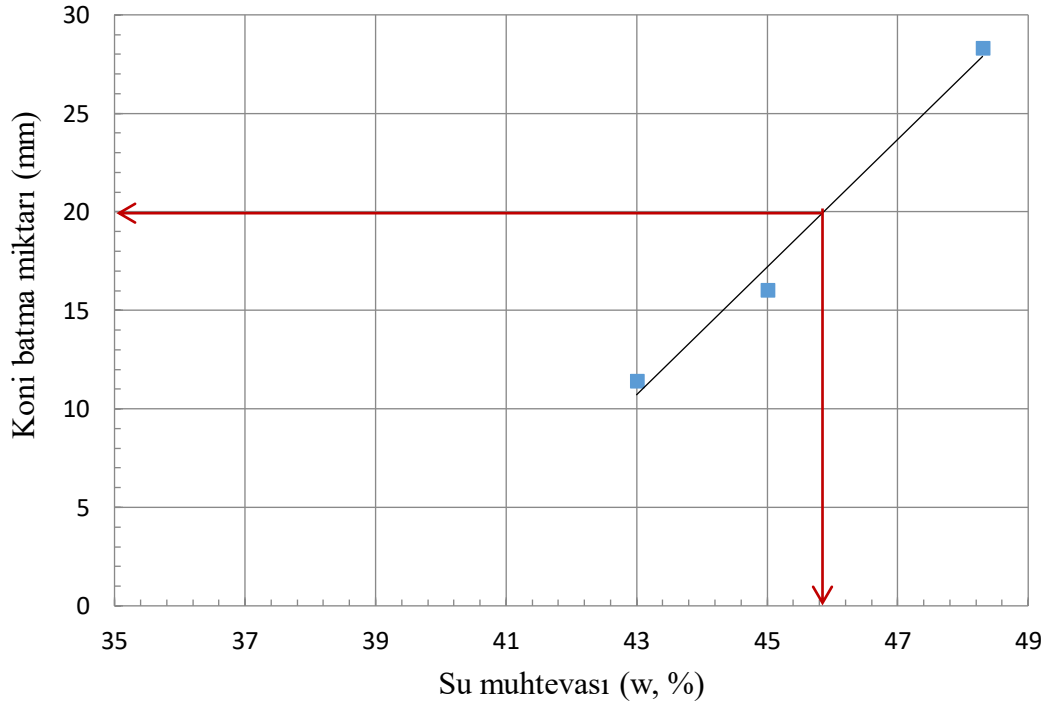
**Ek-1 Şekil 1.5** SL8 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi



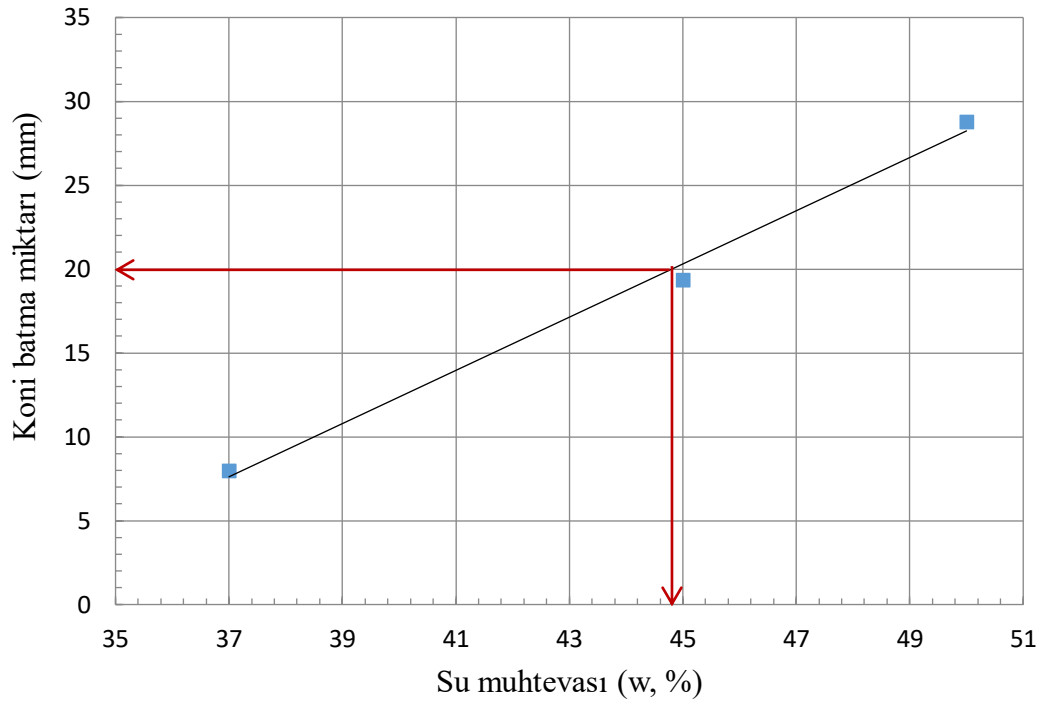
**Ek-1 Şekil 1.6** SL10 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi



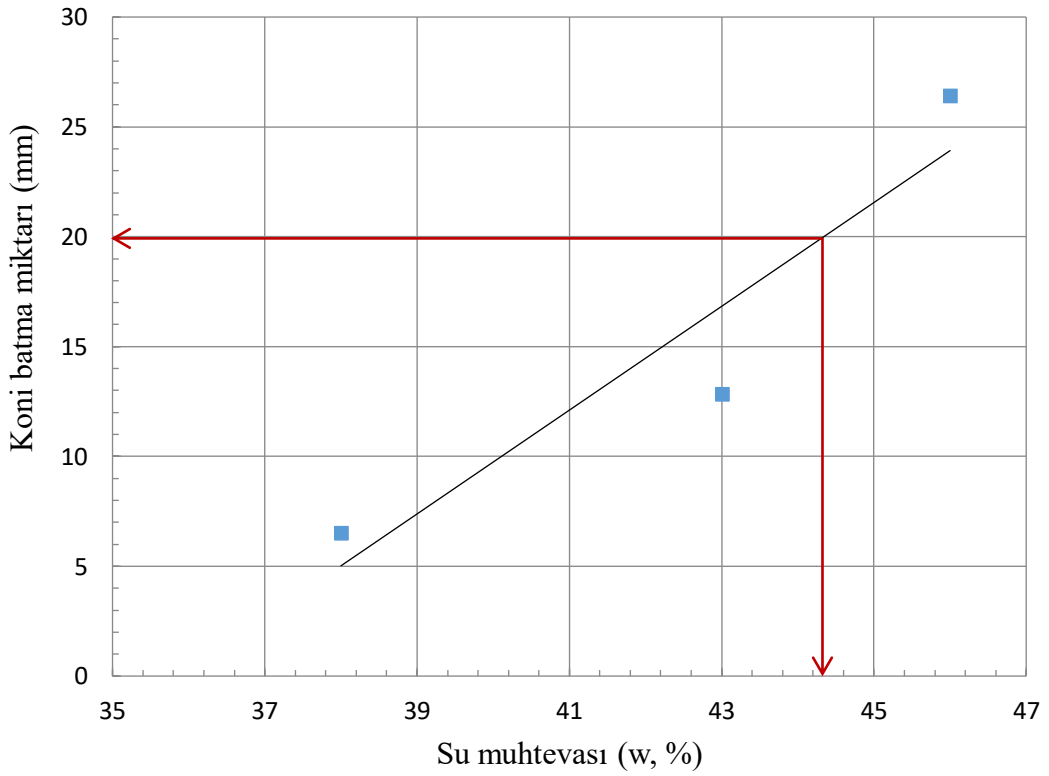
**Ek-1 Şekil 1.7** SGL2 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi



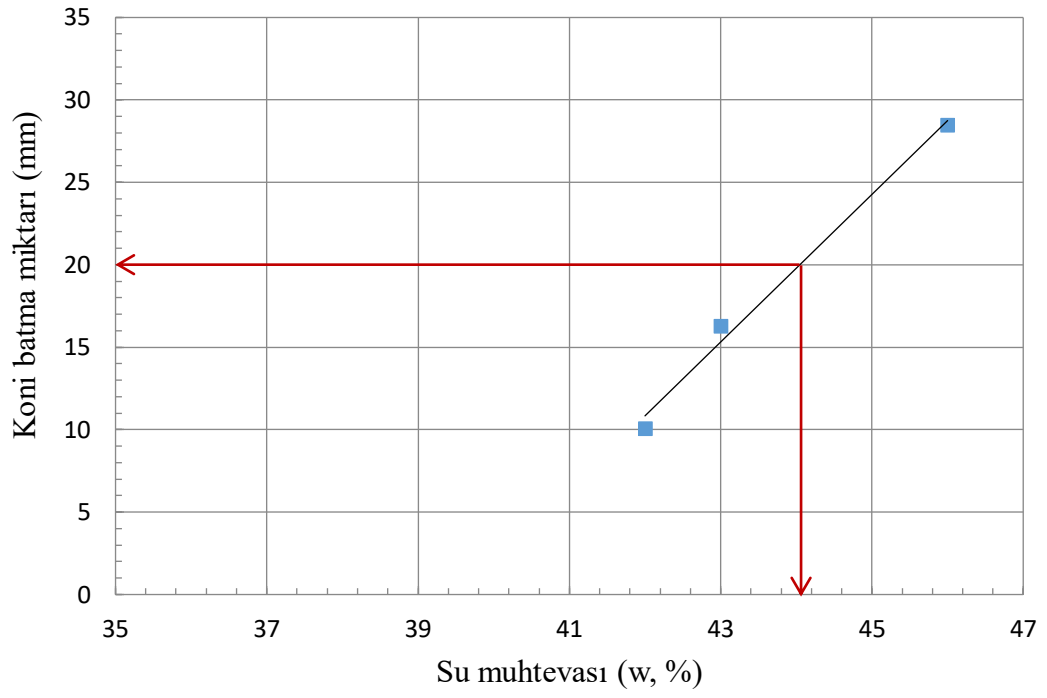
**Ek-1 Şekil 1.8** SGL4 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi



Ek-1 Şekil 1.9 SGL6 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi

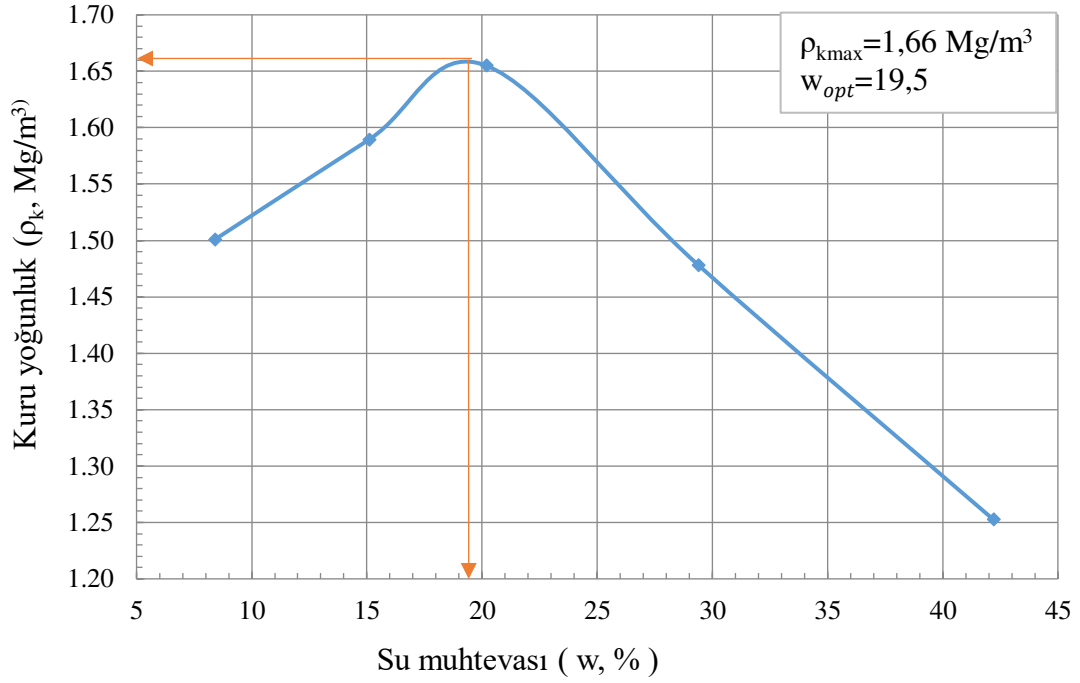


Ek-1 Şekil 1.10 SGL8 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi

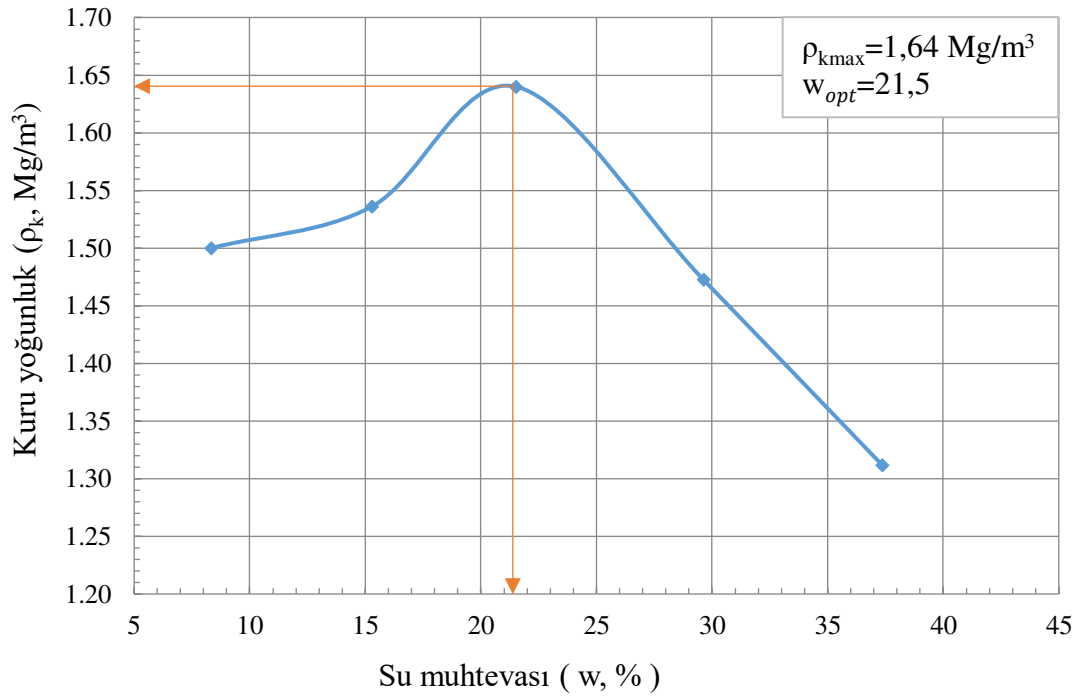


**Ek-1 Şekil 1.11** SGL10 karışımının düşen koni penetrasyon deneyi

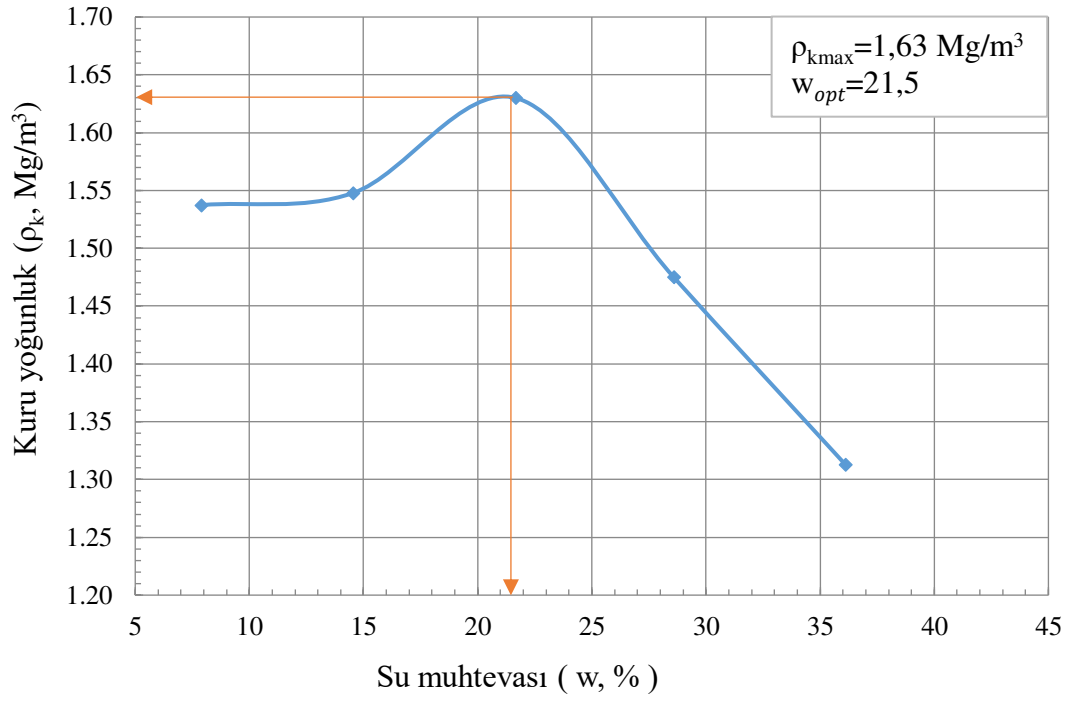
### Ek-2 Kompaksiyon deneyi sonuçları



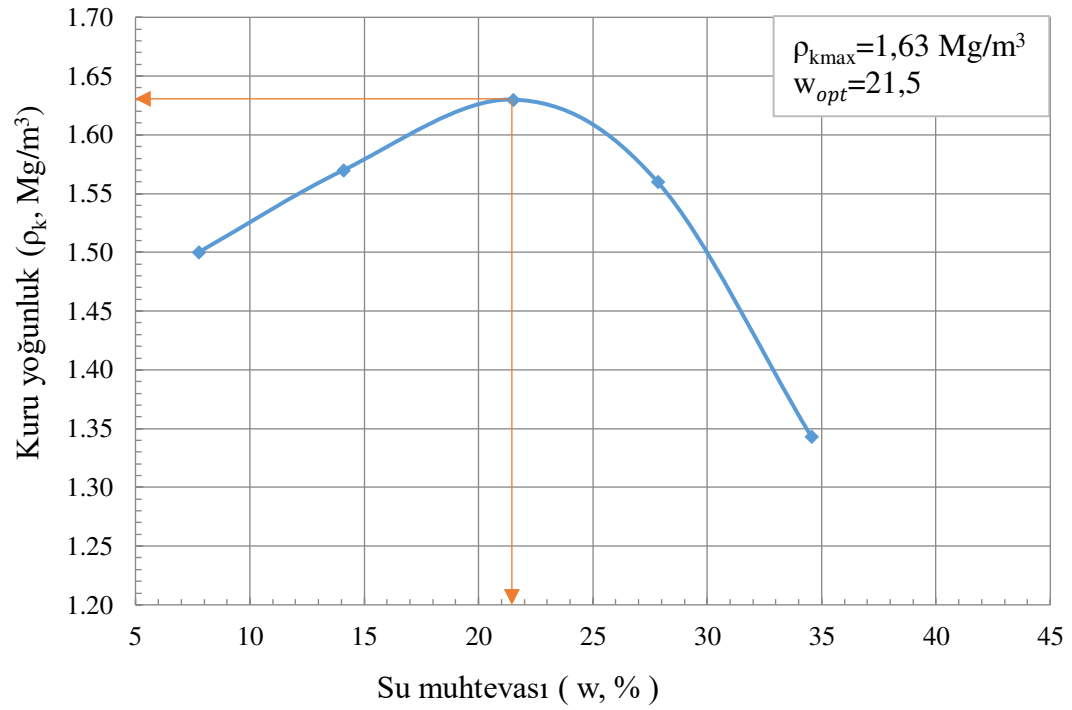
Ek-2 Şekil 2.1 Doğal zeminin kompaksiyon eğrisi



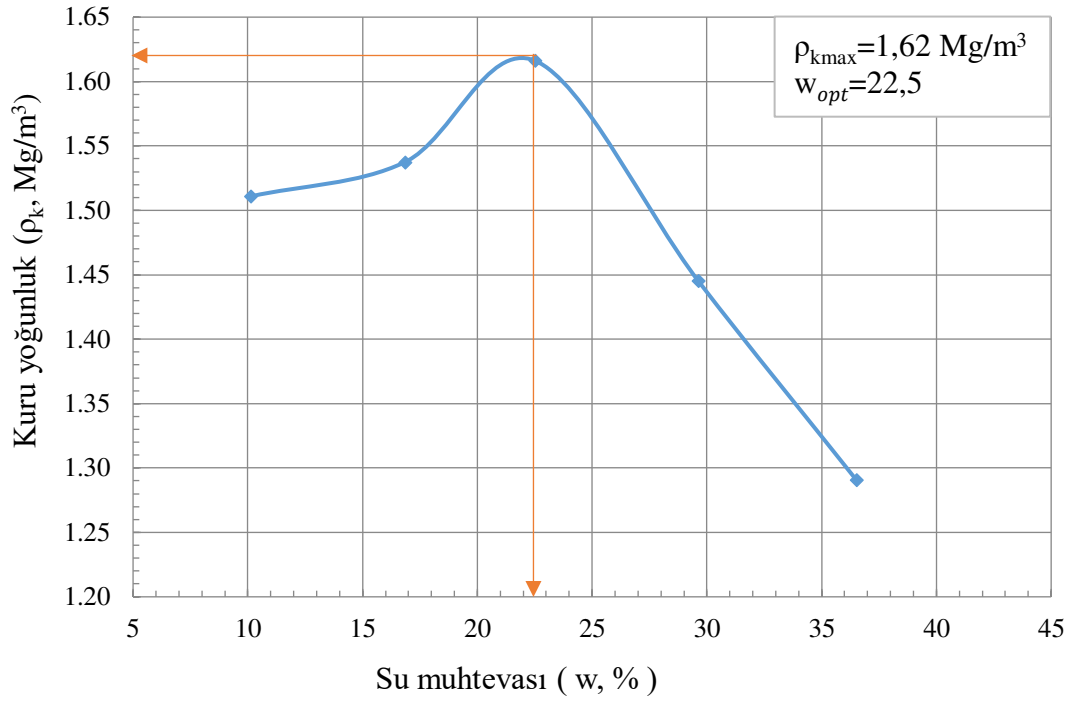
Ek-2 Şekil 2.2 SL2 karışımının kompaksiyon eğrisi



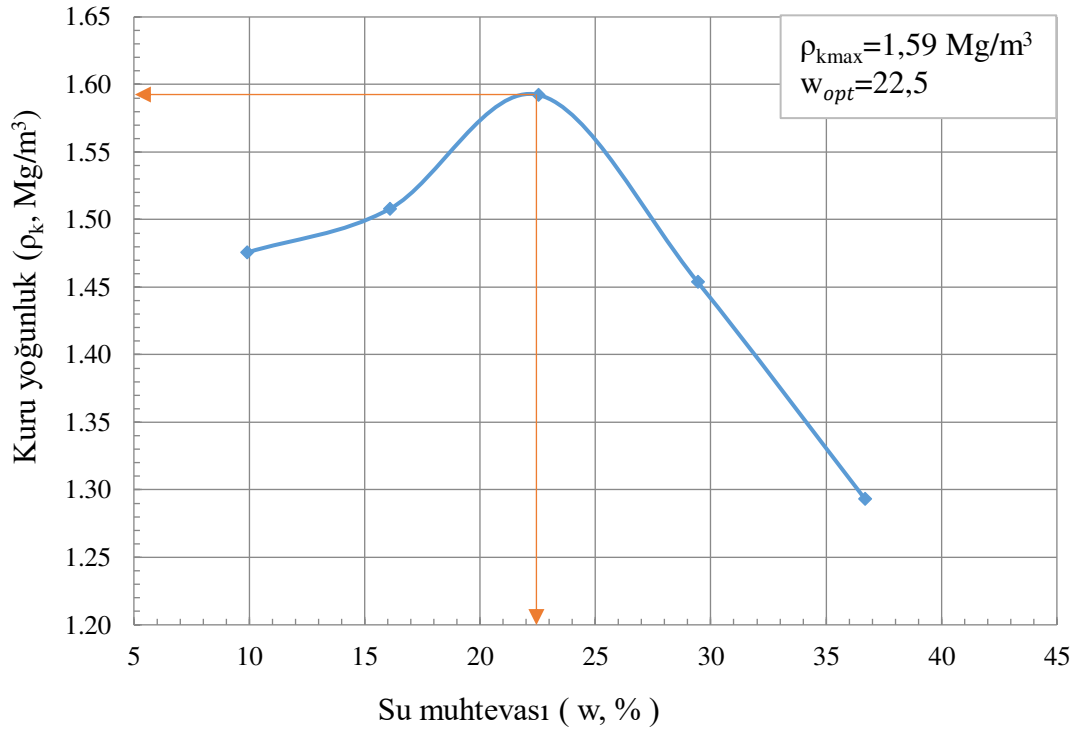
Ek-2 Şekil 2.3 SL4 karışımının kompaksiyon eğrisi



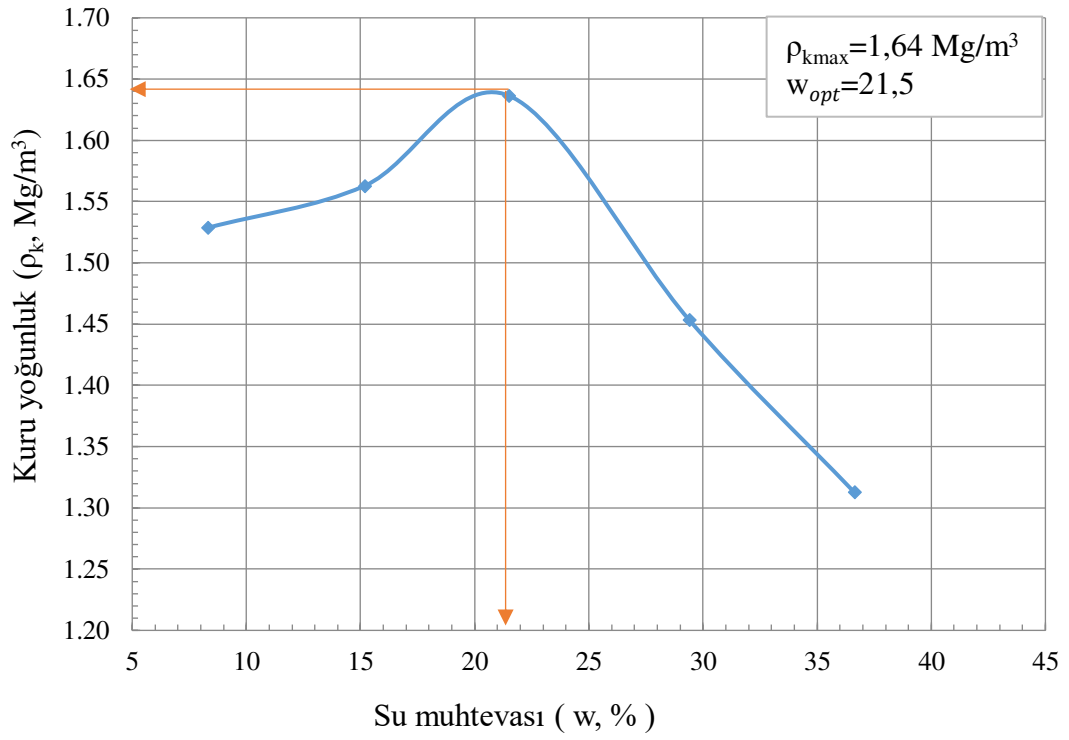
Ek-2 Şekil 2.4 SL6 karışımının kompaksiyon eğrisi



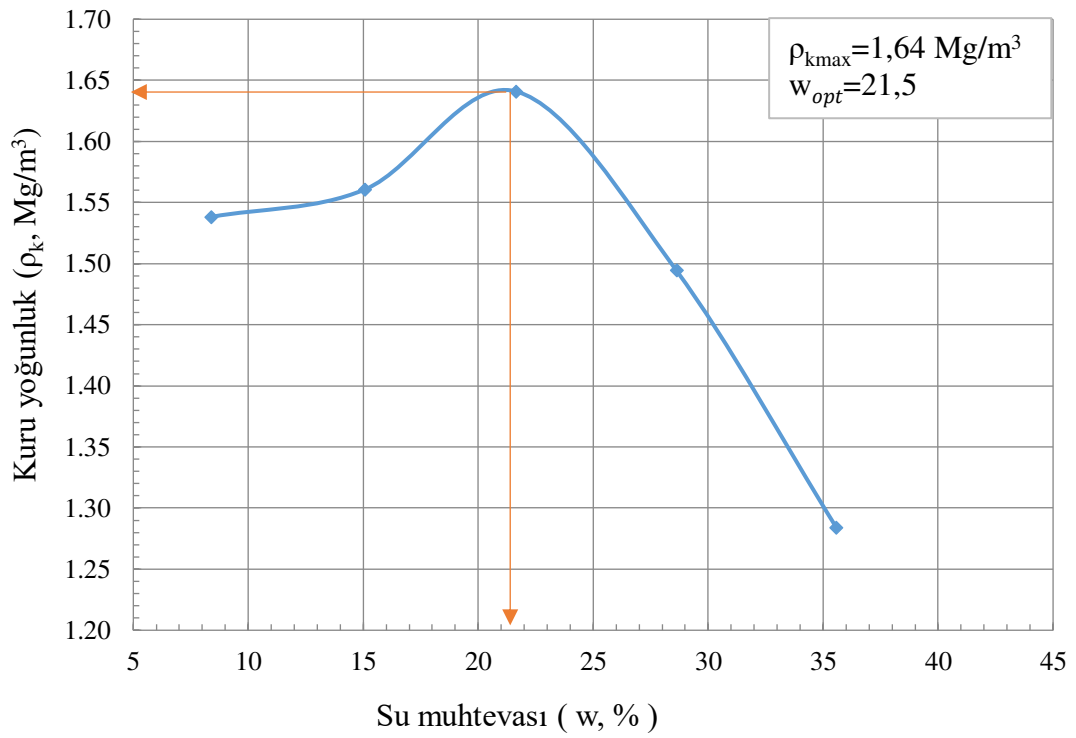
Ek-2 Şekil 2.5 SL8 karışımının kompaksiyon eğrisi



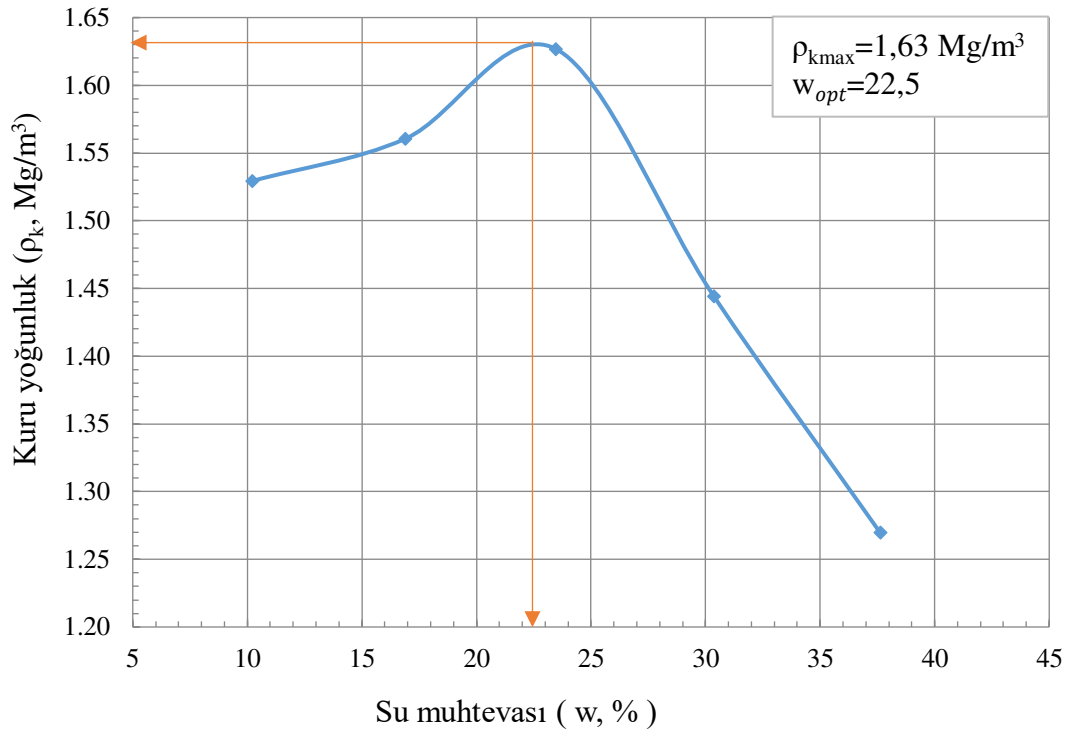
Ek-2 Şekil 2.6 SL10 karışımının kompaksiyon eğrisi



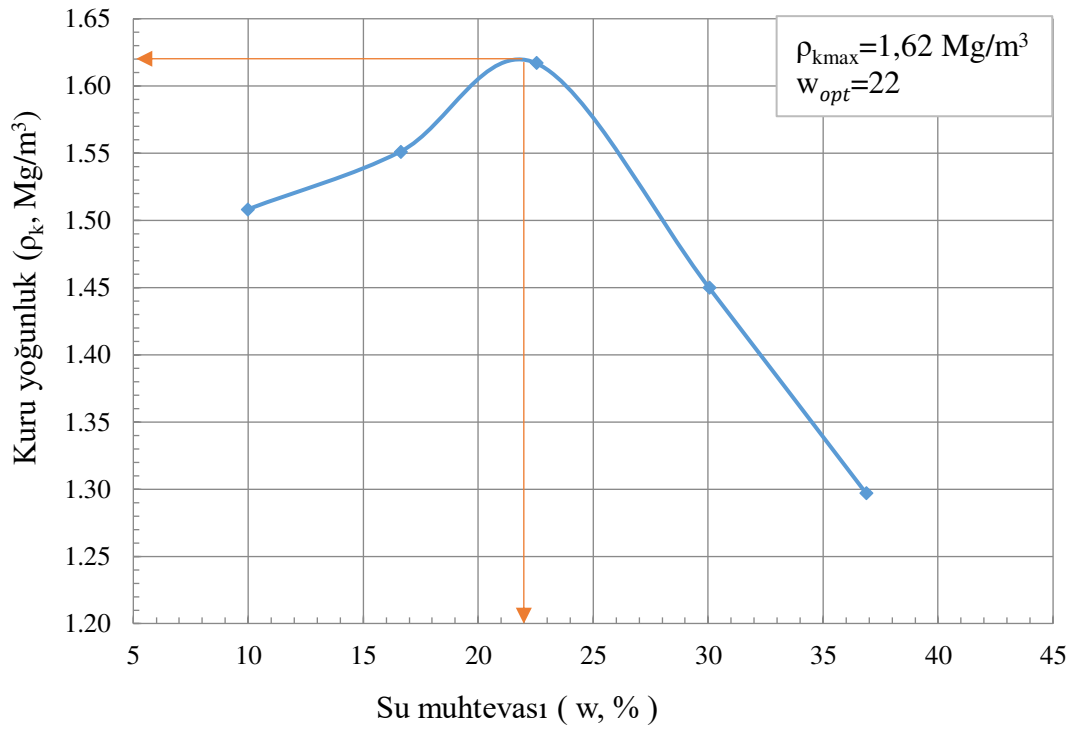
Ek-2 Şekil 2.7 SGL2 karışımının kompaksiyon eğrisi



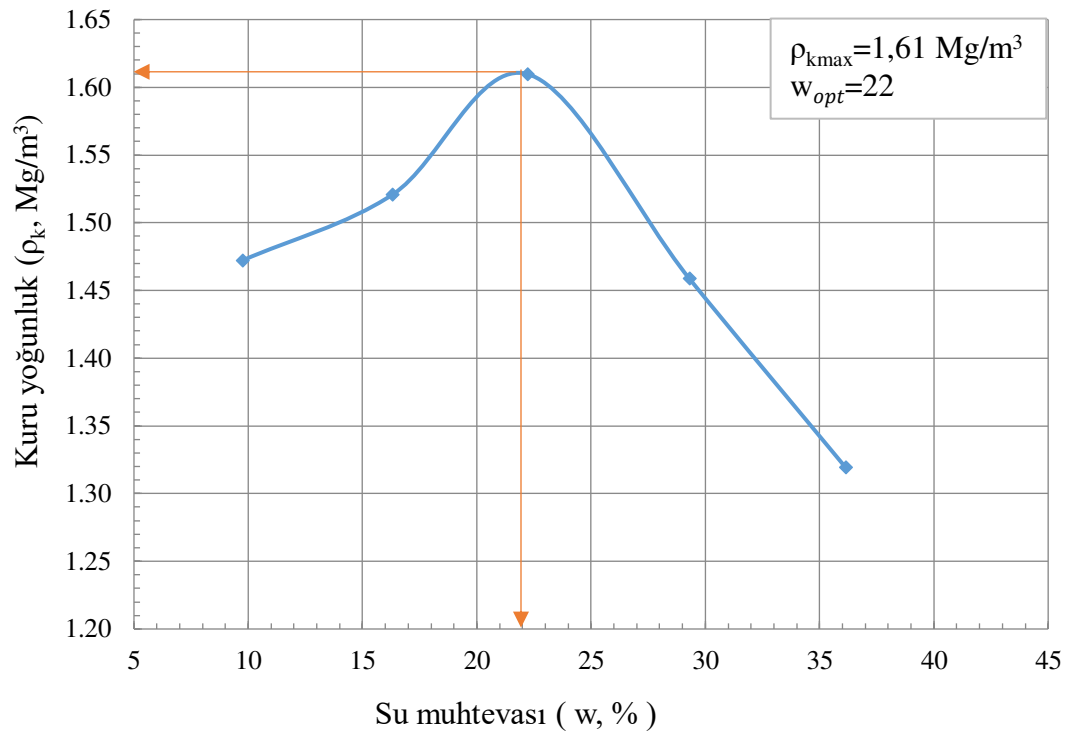
Ek-2 Şekil 2.8 SGL4 karışımının kompaksiyon eğrisi



Ek-2 Şekil 2.9 SGL6 karışımının kompaksiyon eğrisi

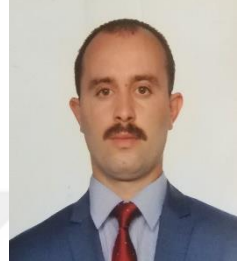


Ek-2 Şekil 2.10 SGL8 karışımının kompaksiyon eğrisi



**Ek-2 Şekil 2.11** SGL10 karışımının kompaksiyon eğrisi

## ÖZGEÇMİŞ



### Sefa KOCABEY

Sefa KOCABEY, 1989 yılında Bayburt'ta doğdu. İlköğrenimini Bayburt Şehit Nevzat Kaya İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Bayburt Rekabet Kurumu Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı ve 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazanıp lisans eğitimini burada tamamladı. Eğitimini bitirdikten sonra Bayburt'ta ulaşım alanında faaliyet gösteren özel bir firmada işe başlayıp saha mühendisliği yaptı. Askerlik görevini yerine getirdikten sonra Ankara'da özel bir firmada üstyapı projelerinde saha mühendisi, kesin hesap mühendisi ve şantiye şefliği gibi görevler aldı. 2015 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü'nde inşaat mühendisi olarak hizmetine devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilen KOCABEY, evli ve bir çocuk babasıdır.