

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAŞ KOLONLARIN SONLU ELEMANLARA DAYALI DAVRANIŞ ANALİZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NESLİHAN ALTUN**

**OCAK 2020**

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAŞ KOLONLARIN SONLU ELEMANLARA DAYALI DAVRANIŞ ANALİZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Neslihan ALTUN**

**DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER**

**ZONGULDAK**

**Ocak 2020**

## KABUL:

Neslihan ALTUN tarafından hazırlanan “ Taş Kolonların Sonlu Elemanlara Dayalı Davranış Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. .../.../2020

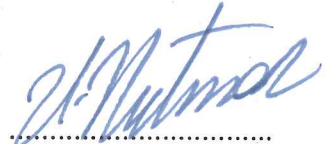
**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Doç. Dr. Utkan MUTMAN

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Tuna ÜLGER

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



---

## ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../2020



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Neslihan ALTUN

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **TAŞ KOLONLARIN SONLU ELEMANLARA DAYALI DAVRANIŞ ANALİZİ**

**Neslihan ALTUN**

**Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER**

**Ocak 2020, 61 Sayfa**

Sanayileşme ve nüfus artışları yerleşim alanlarını zayıf zemin şartlarının bulunduğu parsellere doğru kaydırmaktadır. Bunun sonucu olarak kötü zemin şartlarında güvenli yapılar inşa etmek için zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan zemin iyileştirme yöntemi olan taş kolonlar, 1830'lu yıllarda Fransa'da, 1950'den sonra Avrupa'da, 1972'den sonra ise Amerika'da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde ise son 10 yıldır, öncelikle taşıma gücünü artırmak ve oturmaları azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışmada olduğu gibi 1999 depreminde Sakarya bölgesinde meydana gelen sıvılaşma problemine karşın sıvılaşma riskini azaltmak amacıyla da kullanılmıştır.

Taş kolonlar sonlu elemanlara dayalı Plaxis 2D programında modellenerek analiz edilmiştir. Taş kolonlar uygulanmış parsel zemini için meydana gelen toplam ve yatay yer değiştirme miktarları incelenmiştir.

## ÖZET (devam ediyor)

Analiz sonuç grafiklerini görmek için model üzerindeki düğüm noktalarından biri için oturma zaman eğrisi çizilerek; belirlenen referans noktasında arazideki doğal durum ve iyileştirilmiş durum karşılaştırılmıştır. Zeminde iyileştirme öncesi ve sonrası kıyaslanarak yer değiştirmeler gözlemlenmiş ve iyileştirme sonrası yer değiştirmelerin azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin İyileştirme Yöntemleri, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Taş kolon Uygulaması, Zemin Sıvılaşması.

**Bilim Kodu:** 624.01.00



## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **BEHAVIOR ANALYSIS OF STONE COLUMNS BASED ON FINITE ELEMENTS**

**Neslihan ALTUN**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER**

**January 2020, 61 pages**

Industrialization and population increases are shifting the settlements towards the parcels with poor round conditions. As a result, soil improvement methods are used to build safe structures in poor soil conditions.

Stone columns, which are the method of soil improvement used in this study, were widelyused in France in the 1830s, in Europe after 1950 and in America after 1972. In our country, for the last 10 years, it has been used primarily for increasing the carrying capacity and reducing the settlements. As in this study, it was used to reduce the liquefaction risk and despite the liquefaction problem occurin in Sakarya region in 1999 earthquake.

Stone columns were modeled in Plaxis 2D proram based on finite elements and analyzed. Total and horizontal displacement amounts for the parcel floor where stone columns were applied were examined.

## **ABSTRACT (continued)**

In order to see the analysis result graphs, the sitting time curve is drawn for one of the nodes on the model; the natural state and the improved state in the diel were compared at the determined reference point. Displacements were observed by comparing the ground before and after the improvement and it was observed that the displacements decreased after the improvement.

**Key Words:** Soil Improvement Methods, Finite Element Method, Stone Column Application, Soil Liquefaction.

**Science Code:** 624.01.00





## TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca bana yardımlarını esirgemeyen, yapıcı öneri ve eleőtirileri ile tezime yapmış olduğu tüm değerli katkılarından dolayı değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER'e çok teşekkür ederim.

Aldığım kararların arkasında duran ve hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam Erdoğan ALTUN'a, annem Hatice ALTUN'a ve sevgili kardeőlerim Oğuzhan ALTUN ile Ela Nur ALTUN'a teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| KABUL .....   | ii           |
| ÖZET .....  | iii          |
| ABSTRACT .....  | v            |
| TEŞEKKÜR .....  | vii          |
| İÇİNDEKİLER.....  | ix           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | xiii         |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                     | xv           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                         | xvii         |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 1 GİRİŞ .....   | 1            |
| 1.1 KONUNUN ÖNEMİ.....                                      | 1            |
| 1.2 TEZİN AMACI VE KAPSAMI .....                            | 2            |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 2 KONUYLA İLGİLİ GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR.....               | 3            |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 3 İNCELEME ALANI VE PROJE TANITIMI .....              | 7            |
| 3.1 ÇEVRESEL BİLGİLER.....                                  | 7            |
| 3.2 TOPOĞRAFYA VE JEOLJİ.....                               | 8            |
| 3.3 SAKARYA İLİ'NİN DEPREMSELLİĞİ .....                     | 8            |
| 3.4 SIVILAŞMA .....   | 9            |
| 3.4.1 Spt Verilerine Göre Sıvılaşma Potansiyel Analizi..... | 10           |
| 3.5 GEOTEKNİK DEĞERLENDİRME .....                           | 11           |
| 3.6 İNCELEME ALANI JEOLJİK ÖZELLİKLERİ.....                 | 11           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| BÖLÜM 4 TAŞ KOLONLAR.....                                      | 15           |
| 4.1 TAŞ KOLON İMALAT YÖNTEMLERİ.....                           | 15           |
| 4.1.1 Vibrokompaksiyon Yöntemi ile Taş Kolon İmalatı.....      | 16           |
| 4.1.1.1 Vibro Yer Değiştirme Yöntemi (Islak Yöntem) .....      | 17           |
| 4.1.1.2 Vibro Öteleme Yöntemi (Kuru Yöntem) .....              | 17           |
| 4.1.2 Darbeli Yöntem (Tokmaklama).....                         | 18           |
| 4.2 TAŞ KOLON İMALAT YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI .....     | 19           |
| 4.3 TAŞ KOLONLARIN ÖZELLİKLERİ.....                            | 20           |
| 4.3.1 Taş Kolonun Çapı .....                                   | 20           |
| 4.3.2 Taş Kolonun Boyu .....                                   | 20           |
| 4.3.3 Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı .....          | 21           |
| 4.3.4 Taş Kolon İçsel Sürtünme Açısı .....                     | 21           |
| 4.3.5 Taş Kolon Yerleşim Aralıkları.....                       | 21           |
| 4.4 TAŞ KOLONLAR İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR VE BAĞINTILAR..... | 22           |
| 4.4.1 Eşdeğer Çap .....  | 22           |
| 4.4.2 Alan Değişim Oranı .....                                 | 22           |
| 4.4.3 Gerilme Konsantrasyon Oranı .....                        | 24           |
| 4.4.4 Oturma Azaltım Oranı .....                               | 25           |
| 4.5 TAŞ KOLONLARIN YÜK TRANSFER MEKANİZMALARI.....             | 26           |
| 4.5.1 Uç Mukavemetli Taş Kolon.....                            | 26           |
| 4.5.2 Yüzen Taş Kolon .....                                    | 26           |
| 4.6 TAŞ KOLONLARIN GÖÇME MEKANİZMASI.....                      | 27           |
| 4.6.1 Tekil Taş Kolon Göçme Mekanizması .....                  | 27           |
| 4.6.2 Grup Taş Kolon Göçme Mekanizması .....                   | 28           |
| 4.7 TAŞ KOLON TAŞIMA GÜCÜ .....                                | 29           |
| 4.7.1 Tekil Taş Kolonların Taşıma Gücü.....                    | 29           |
| 4.7.2 Kısa Taş Kolonların Taşıma Gücü.....                     | 33           |
| 4.7.3 Grup Taş Kolonların Taşıma Gücü.....                     | 34           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| BÖLÜM 5 ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....                                   | 37           |
| 5.1 DİNAMİK KOMPAKSİYON.....  | 38           |
| 5.2 SIKIŞTIRMA KAZIKLARI.....   | 38           |
| 5.3 ÖN YÜKLEME METODU.....  | 38           |
| 5.4 TAŞ KOLONLAR.....   | 39           |
| 5.5 ENJEKSİYON.....   | 39           |
| 5.6 DERİN KARIŞTIRMA.....   | 40           |
| 5.7 ZEMİNİN DONDURULMASI.....   | 40           |
| BÖLÜM 6 MODEL VE ANALİZ.....  | 41           |
| 6.1 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....  | 41           |
| 6.2 PLAXİS SONLU ELEMANLAR PROGRAMININ TANIMI.....                          | 44           |
| 6.2.1 Geometrik Modelin Oluşturulması.....                                  | 44           |
| 6.2.2 Zemin Eleman Tipleri.....   | 45           |
| 6.2.3 Mesh (Ağ).....  | 46           |
| 6.2.4 Zemin Davranışının Modellenmesi.....                                  | 47           |
| 6.2.4.1 LinerElastic Zemin Modeli.....                                      | 47           |
| 6.2.4.2 Mohr - Coulomb (MC) Zemin Modeli.....                               | 47           |
| 6.2.4.3 Hardening-Soil (HS) Modeli.....                                     | 47           |
| 6.2.4.4 Soft Soil Zemin Modeli.....   | 48           |
| 6.2.4.5 Soft Soil Creep Zemin Modeli.....                                   | 48           |
| 6.2.4.6 Jointed - Rock Modeli (JR).....                                     | 48           |
| 6.3 SAYISAL MODEL.....  | 49           |
| 6.3.1 Doğal Durum için Sonlu Elemanlar Analizi.....                         | 50           |
| 6.3.2 İyileştirilmiş Zemin İçin Sonlu Elemanlar Analizi.....                | 51           |
| 6.3.2.1 Taş Kolon Yerleşimi.....  | 51           |
| 6.3.3 İyileşme Öncesi ve Sonrası Yer Değiştirmelerin Karşılaştırılması..... | 53           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|                       | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------|--------------|
| BÖLÜM 7 SONUÇLAR..... | 55           |
| KAYNAKLAR.....        | 57           |
| ÖZGEÇMİŞ .....        | 61           |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>No</u>  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 3.1 Sakarya ili haritası.....  | 7            |
| Şekil 3.2 İnceleme Alanı Google Earth Uydu Ölçeksiz Görüntüsü.....   | 8            |
| Şekil 3.3 17 Ağustos 1999 İzmit depreminde Sakarya’da sıvılaşmaya bağlı olarak meydana gelen hasarlar.....           | 9            |
| Şekil 4.1 Vibroflotun önemli bölümleri.....  | 16           |
| Şekil 4.2 Vibro yer değiştirme yöntemi ile taş kolon imalatı.....  | 17           |
| Şekil 4.3 Vibro öteleme yöntemi ile taş kolon imalatı.....   | 18           |
| Şekil 4.4 Darbeli yöntem ile taş kolon imalatı.....  | 19           |
| Şekil 4.5 Zemin mukavemetinin teorik kolon çapına etkisi.....  | 20           |
| Şekil 4.6 Taş kolon yerleşim aralıkları detaylı gösterimi.....   | 22           |
| Şekil 4.7 Tekil taş kolonun (yüzen taş kolon) göçme mekanizması.....   | 27           |
| Şekil 4.8 Tabakalı bir zeminde taş kolon göçme mekanizması.....  | 28           |
| Şekil 4.9 Birim hücre modelinin gösterimi.....   | 29           |
| Şekil 4.10 Yükleme sonrası tekil taş kolon kabarma davranışı.....  | 30           |
| Şekil 4.11 Silindirik boşluk genişleme faktörleri.....   | 32           |
| Şekil 4.12 Kısa Taş Kolonların Taşıma Gücü Katsayıları.....  | 34           |
| Şekil 4.13 Grup Taş Kolonlarda Taşıma Gücü Kapasitesi.....   | 35           |
| Şekil 6.1 Analiz metotları.....  | 41           |
| Şekil 6.2 Sonlu elemanlar yöntemi çalışma mekanizmasından bir görünüm.....   | 42           |
| Şekil 6.3 Tipik 2 boyutlu elemanların gösterimi.....   | 43           |
| Şekil 6.4 a) Planestrain model örneği (düzlem şekil değiştirme), b) Axisymmetry model örneği (eksenel simetrik)..... | 45           |
| Şekil 6.5 6 ve 15 Düğüm noktalı elemanlar için gerilme ve düğüm noktaları.....                                       | 46           |
| Şekil 6.6 Doğal zeminin yatay deformasyonu.....  | 51           |
| Şekil 6.7 Doğal zeminin yatay deformasyonu.....  | 51           |
| Şekil 6.8 Doğal zemine yerleştirilen taş kolonlar.....   | 52           |
| Şekil 6.9 Taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde düşey deformasyon.....   | 52           |
| Şekil 6.10 Taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde yatay deformasyon.....  | 53           |
| Şekil 6.11 Modelde seçilen referans noktası “A”.....   | 53           |
| Şekil 6.12 Doğal zeminin oturma-zaman grafiği.....   | 54           |
| Şekil 6.13 İyileştirilmiş zeminin oturma-zaman grafiği.....  | 54           |





## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>No</u>  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Çizelge 3.1 SK1 deney verileri. ....                                     | 10           |
| Çizelge 3.2 SK1’de zemin türleri. ....                                   | 12           |
| Çizelge 3.3 Sondaj logu tablosu. ....                                    | 13           |
| Çizelge 3.4 SK1 laboratuvar deneyleri sonuç formu. ....                  | 14           |
| Çizelge 4.1 Taş kolonlarda gözlemlenen gerilme yoğunluğu faktörleri .... | 25           |
| Çizelge 6.1 Tane büyüklüğü faktörü, nc değerleri. ....                   | 47           |
| Çizelge 6.2 Mhor-Coulomb zemin modeli için gerekli parametreler ....     | 50           |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|               |   |
|---------------|---|
| $F_s$         | : Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı   |
| CSR           | : Gerilme oranı   |
| $R_d$         | : Derinlik azaltma faktörü  |
| $\sigma_e$    | : Zemin emniyet gerilmesi   |
| $q_u$         | : Tek eksenli sıkışma dayanımı:   |
| C             | : Drenajsız makaslama dayanımı  |
| $A_o$         | : Etkin yer ivme katsayısı  |
| $\gamma_n$    | : Doğal Birim Hacim Ağırlık   |
| w             | : Zeminin Su İçeriği  |
| $\nu$         | : Poisson oranı   |
| A             | : Taş kolon alanı   |
| ah            | : İvme. (depremin neden olduğu zemin yüzeyindeki yatay ivme) (m/sn <sup>2</sup> ) |
| ac            | : Alan değişim oranı  |
| D             | : Sıkıştırılmış taş kolonun çapı  |
| s             | : Taş kolonlar merkezleri arası mesafe  |
| C1            | : Taş kolonların dizilimine bağlı olarak belirlenen sabit bir katsayı.            |
| $\sigma_c$    | : Zemin içerisinde oluşan gerilme,  |
| $\sigma_s$    | : Taş kolon içerisinde oluşan gerilme   |
| S             | : İyileştirilmiş zeminin oturması   |
| S'            | : İyileştirilmemiş zeminin oturması   |
| $\sigma_3$    | : Nihai Drenajsız Yanal Gerilme   |
| $\sigma_{r0}$ | : Kolon İmalatından Sonraki Toplam Radyal Gerilme                                 |
| cu            | : Drenajsız Kohezyon  |
| $E_s$         | : Zeminin elastisite modülü   |
| $\nu$         | : Poisson oranı   |
| q             | : Hesabın yapıldığı derinlikte oluşan ortalama gerilme                            |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|                   |   |
|-------------------|---|
| $F'_c$ ve $F'_q$  | : Boşluk genişleme katsayıları                              |
| $\phi_c$          | : Zeminin Kayma Mukavemeti Açısı                            |
| $c$               | : Zeminin Kohezyonu   |
| $q$               | : Göçme Bölgesindeki Ortalama Normal Gerilme                |
| $\tan \phi_{ort}$ | : Kompozit İçsel Sürtünme Açısının Tanjantı                 |
| $n$               | : Taş Kolon İçin Gerilme Konsantrasyon Faktörü              |
| $ac$              | : Alan Değişim Oranı  |
| $c_{ort}$         | : Temelin Altındaki Kesme Yüzeyinin Kompozit Kohezyonu      |
| $\sigma_3$        | : Ortalama Yanal Çevre Basıncı                              |
| $\gamma_s$        | : Kohezyonlu Zeminin Doygun veya Islak Birim Hacim Ağırlığı |
| $B$               | : Temel Genişliği   |
| $\alpha$          | : Göçme Yüzeyinin Eğimi                                     |
| $nc$              | : Tane büyüklüğü faktörü                                    |

## KISALTMALAR

|                |                                  |
|----------------|----------------------------------|
| <b>KAF</b>     | : Kuzey Anadolu Fay Hattı        |
| <b>YASS</b>    | : Yer altı su seviyesi           |
| <b>SK1</b>     | : Sondaj kuyusu 1                |
| <b>SPT</b>     | : Standart Penetrasyon Deneyi    |
| <b>LE</b>      | : Lineer elastic zemin modeli    |
| <b>MC</b>      | : Mohr-Coulomb zemin modeli      |
| <b>SSC</b>     | : Soft Soil Creep modeli         |
| <b>HSsmall</b> | : Hardeninig zemin modeli        |
| <b>MCC</b>     | : Modified Cam-clay zemin modeli |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1 KONUNUN ÖNEMİ

Türkiye'nin 2/3'ü 1. ve 2. derece deprem bölgesindedir. Günümüze kadar meydana gelen depremler ile birlikte bir çok insan hayatını kaybetmiş ve bir çok konut kullanılamaz hale gelmiştir. Depremlerin yarattığı hasarların çoğu yapısal eksiklikler ve malzeme kalitesizliğinden kaynaklanmaktadır. Ancak zemin özelliklerinin kontrol edilmemesi ve bilinmemesi hasarların belki de en büyük sebebidir.

Ülkemizde doğudan batıya uzanan ve tektonik açıdan aktif olan Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda yer alan Sakarya'da, 17 ağustos 1999 yılında 7,4 büyüklüğünde şiddetli bir deprem meydana gelmiştir. Sakarya'nın zayıf bir zemine sahip olması meydana gelen depremlerden büyük hasarlarla çıkmasına yol açmıştır. Deprem sonucunda Sakarya'da önemli can ve mal kaybı yaşanmıştır.

Sakarya'nın jeolojik ve tektonik özellikleri, deprem sırasında sıvılaşma potansiyelini de beraberinde getirmiştir. Deprem esnasında meydana gelen sıvılaşma olayı, suya doygun durumdaki daneli zeminlerin taşıma kapasitelerini kaybederek sıvı gibi davranış göstermesine sebep olur.

Sıvılaşma olayının kötü sonuçlara yol açmasını engellemek için zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir. İyileştirme uygulamalarından biri olan taş kolonlar sıvılaşan zeminlerde iyileşme sağlamaktadır. Taş kolon uygulamasında, zeminde granüler malzemelerin sıkıştırılarak yerleştirilmesi ile rijit, dayanımı yüksek kolonlar elde edilir.

Bu çalışmada taş kolonlar sıvılaşma olayına maruz kalan zeminde uygulanmıştır. Taş kolon uygulamasının zeminin sıvılaşma olasılığını azaltan etkisini göstermek için nümerik analizler yapılmıştır.

Nümerik analizlerde Plaxis 2D (2016) sonlu elemanlar programında modellenerek toplam oturma ve yer değiştirme analizleri yapılmıştır.

## 1.2 TEZİN AMACI VE KAPSAMI

Sakarya depreminde hasar gören bir konutun zemin iyileştirmesi, daha sonra oluşabilecek depremlerden en az hasarla kurtulması amacıyla çalışma yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında; Sakarya ili Merkez ilçesi Kurtuluş mahallesinde bulunan B+4 katlı binanın zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Konut 1. derece deprem bölgesindedir ve 1999 depreminden sonraki zemin incelemelerinde sıvılaşma olayına rastlanılmıştır. Zemin iyileştirmesine taş kolon uygulaması ile gidilmiştir. Zemin iyileştirmesi yapılacak alandaki zemin etüt raporunu düzenleyen firma 1 adet derin sondaj çalışması yapmıştır. Zeminin sayısal analizleri arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle ile korele edilerek uygulama alanı farklı senaryolar altında sonlu elemanlara dayalı bir programda sayısal modellenerek değerlendirilmiştir. Zeminde deprem sonrası 10 cm oturma ve sıvılaşma gözlenmiştir. Oturma ve sıvılaşmayı engellemek adına zemin iyileştirilmesine gidilmiş ve taş kolon uygulanmıştır. Taş kolonlar, zeminde granüler malzemelerin sıkıştırılması ile oluşan rijit, yüksek dayanımlı; oturmaya ve sıvılaşma potansiyelini önemli ölçüde azaltan kolonlardır.

Taş kolonlar Plaxis 2D (2016) sonlu elemanlar programında modellenip analizleri yapılarak sonuçlar saptanmıştır. Toplam oturma ve yer değiştirme analizleri yapılmıştır. Taş kolon ile zemin iyileştirmesi uygulanmadan ve uygulandıktan sonraki geoteknik parametreler karşılaştırılarak, yer değiştirme değerlerinin, iyileştirme sonrası azaldığı görülmüştür. Zemine uygulanan taş kolonlar zemindeki oturma ve sıvılaşma potansiyelini azaltmıştır.

## BÖLÜM 2

### KONUyla İLGİLİ GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Deprem gibi dinamik yük etkisi altında kalan taş kolonların davranış biçimlerini içeren az sayıda çalışma olmasından dolayı taş kolonlarının deprem performansları kesin olarak anlaşılmamaktadır. Aşağıda taş kolonlarının deprem performanslarına ilişkin detaylar yer almaktadır.

Durgunoğlu vd. Türkiye’de ilk defa büyük ölçekte taş kolonlar ile zemin iyileştirmesi yöntemini kullanmışlardır. Gemlik’te bulunan Borçelik soğuk hadde fabrikası zemininin iyileştirilmesinde taş kolon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deniz kenarında yer alan bu fabrika alanı genellikle bazı yerlerinde kaya parçalarının olması yanında aşırı konsolide killerden oluşmaktadır. Taş kolonlar ile zeminde ne kadar bir iyileştirme sağlandığını belirleyebilmek için zemin ıslahı öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen statik penetrasyon deneyleri (CPT) ve bölge yükleme deneyleri ile iyileştirme derecesi tahkik edilmeye çalışılmıştır. Taş kolonlar ile zemin sıvılaşması, aşırı oturma ve taşıma kapasitesi sorunu olan zeminlerin verimli bir şekilde ıslah edilebileceği yapılan arazi deneyleri ile gösterilmiştir [1].

Ambily ve Shailesh (2000) taşkolonların davranışını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. Yaptıkları çalışma kapsamında 100 mm çapında taş kolon imal edilerek, çevredeki yumuşak kil zemin farklı yoğunluklarda hazırlanmıştır. Sayısal analizlerde PLAXIS programı kullanılmıştır. Mohr-Columb zemin modeli ile taş kolon ve kil zemin davranışı modellenmiştir. Sayısal analiz ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve aralarında kabul edilir uyumlar elde edilmiştir.

Hughes vd. (1975) tekil olarak kullanılan taş kolonların sınır koşullarının grup halinde kullanıldığı takdirde farklılık gösterdiğini belirlemişlerdir. Grup taşkolonların sınır koşulları birim hücre kullanılarak belirlenmiştir. Uygulanan yükün miktarına bağlı olarak taş kolonun denge durumuna geçebileceği tespit edilmiştir [2].

Lee ve Pande (1994) kullanılan taş kolon malzemesi için homojen bir yapı oluşturarak, Mohr-Coulomb modeli aracılığıyla zemin için kritik durum modeline ilave yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda elde edilen verileri Stewart ve Wu (1993)'nun yaptıkları çalışmanın sonuçları ile kıyaslamışlardır [3].

Mithcell ve Wentz. (1971) 1989 LomaPrieta depreminden sonra 12 farklı bölge üzerinde taş kolon uygulaması yaparak iyileştirme çalışmasının verimliliğini değerlendirilmişlerdir. Bu 12 alan üzerinde kullanılan iyileştirme teknikleri vibrokompaksiyon, çimentolama ve dinamik kompaksiyon yöntemleridir. Bu alanda altı adet yer belirlendikten sonra taş kolonlar ile iyileştirme gerçekleştirilmiştir. Deprem esnasında açığa çıkan maksimum yer ivmesi SantaCruz yakınlarında 0.45 g olarak belirlenmiştir. Bu rakam Marina Körfezi'nde 0.11 g'dir. Çalışma sonucunda bölge içinde iyileştirme uygulanmayan yerlerde oturular, sıvılaşma başlangıcı (kum konileri) yüzeylerde çatlaklar ve kırılmalar olduğu saptanmıştır. Taş kolon ile yapılan iyileştirme sonucunda ise belirlenen alanlarda zemin problemi saptanmamıştır [4]. 1994 Northridge Depremi öncesinde bazı alanlara taş kolon uygulaması yapılmıştır. İyileştirme yapılan birinci alan merkez üstüne 2.42 km uzaklıktadır ne cuta bu alanda ölçülen maksimum yer ivmesi 0.7 g dir. Deprem sonrası kontrollerde bu alanlarda da herhangi bir problem saptanmamıştır. Bir diğer taşı kolon iyileştirmesi tren ray hattı çevresinde yapılmıştır. Bu alan ise deprem merkez üssü ne 48.3 km uzaklıktadır. Zeminin makaslama ve kesme dayanıklılığını arttırmak için 5.5 metrelik derinliğe taşı kolon uygulaması yapılmıştır. Yine deprem sonrası kontrollerde bu alanlarda problem saptanmamıştır [5].

Japonya'da birden fazla depremin meydana gelmesinden dolayı Mitchell, Munson ve Baxter (1995) taşı kolonlar ve diğer çalışma yöntemleriyle ilgili bir çalışma raporu hazırlamışlardır. Bu raporlarda deprem meydana geldikten sonra taşı kolon yöntemiyle iyileştirme gerçekleştirilen yerlerde iyi sonuçlar alındığını ve bölgede hasar kaydına rastlanmadığı gözlemlenmiştir [6].

2009 yılında ise Arman ve ark Hazırladıkları bir raporda Adapazarında zeminin derin alüvyon olduğu bölgede sıvılaşmanın önüne geçmek için taş kolon iyileştirmesi sonucunda verimliliğin araştırıldığı bir dosya oluşturmuşlardır. Rapor sonuçları incelendiğinde taşı kolonların deplasmana dayalı olarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre taş kolunun düşey bir dren gibi çalışmasıyla deprem sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncını absorbe ettiği görülmüştür. Bu durum deprem bölgelerinden sıvılaşma sorunlarının yaşandığı bölgelerde



uygulanabilirliğini göstermiştir. Selçuk (2009) yılında yaptığı doktora. Çalışmasında, zemin sıvılaşmasının önlenmesi için uygulanan taş kolon sonlu elemanlar modellemesini kapsamaktadır. Bu çalışma sonucunda taş kolonlar düşey drenajı sağlarken taş kolon imalatı ile zemin üzerindeki rölatif sıklaşma yükseldiği saptanmıştır. Buna bağlı olarak dinamik yük etkisi sonucunda oluşan aşırı boşluk suyun basıncını absorbe eder bu sayede sıvılaşmaya bağlı hasar önlenmiş olur [7].

Moayed ve ark 2010 yılında yaptıkları çalışmadan sarsma tablası sayesinde taş kolonla iyileştirilmiş model zemine dinamik yük uygulaması yapmışlardır. Bunun sonucunda dinamik yük etkisine maruz kalan taş kolonlar kil tabakalarında kayma deformasyonlarını büyük oranda etkilemiştir [8]. Dinamik yük etkisi altında olan taş kolonlu ve taş kolonsuz zemin karşılaştırması yapıldığında zemindeki büyüme oranının azaldığı görülmüştür [9].



## BÖLÜM 3

### İNCELEME ALANI VE PROJE TANITIMI

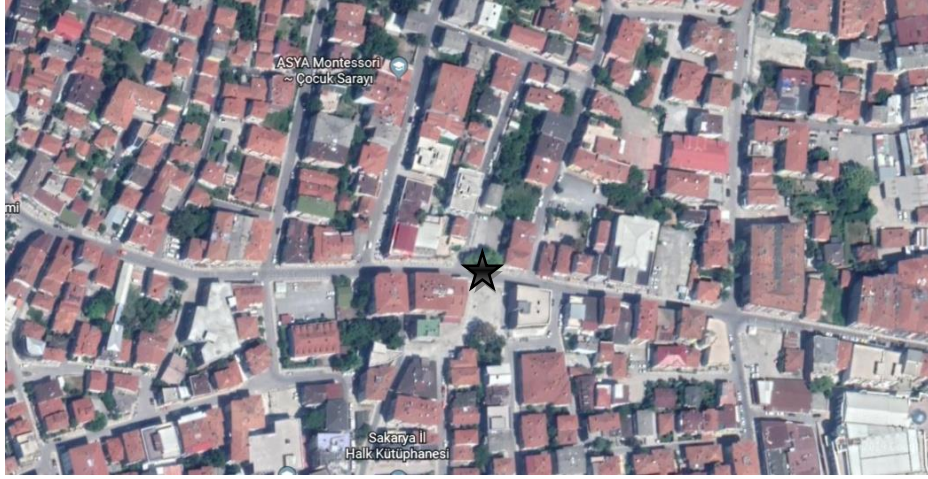
Bu bölümde, çalışma kapsamında incelenecek yapının inşaat alanına ait jeolojik, çevresel bilgiler ve inceleme alanının mühendislik jeolojisinin genel yapısı ve işin ön projesi anlatılmaktadır.

#### 3.1 ÇEVRESEL BİLGİLER

İnceleme alanı; Sakarya ilinin Merkez ilçesi Kurtuluş mahallesi Bahçivan sokakta yer alıyor. Çalışma alanının yer haritası Şekil 3.1’de, inceleme alanının Google Earth ölçeksiz görüntüsü 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Sakarya ili haritası.



Şekil 3.2 İnceleme Alanı Google Earth Uydu Ölçeksiz Görüntüsü.

### 3.2 TOPOĞRAFYA VE JEOLJİ

Sakarya kent bütünü Sakarya Nehri'nin oluşturduğu ovada yer almaktadır. Akova adı ile anılan bu düzlük, güneyden kuzeye doğru az bir eğimde alçalır. Kuzeyde ve Güneyde bulunan yükselmiş eski masifler arasında içeri doğru bükülme çanaklaşma eğilimi gösteren yeni türoplarla dolu faylı bir havza karakteri taşımaktadır.

Sakarya ili Karadeniz'e doğru eğimlidir. Sakarya Irmağı'nın batı anadolu platosundan taşıdığı malzemeler, il alanına yığılarak alüvyal ve kolüvyal ovalar oluşturmuştur.

Etüt alanı topoğrafik yapı ve morfolojik olarak düz bir alan konumundadır. Zeminin hakim litolojisi alüvyondan oluşmaktadır. Alüvyon killi silt ve siltli kumdan oluşmaktadır. İncelem alanından 0-0.30 m arasında dolgu malzemesine, 0.30-10.00 m arasında killi silte, 10.00-15.00 m arasında ise siltli kuma rastlanılmıştır.

Yer altı su seviyesi 2.00 m'dir. Bu yer altı su seviyesinin mevsim şartlarına göre değişebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.3 SAKARYA İLİ'NİN DEPREMSELLİĞİ

Sakarya doğudan batıya uzanan tektonik açıdan aktif olan Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattı üzerindedir. KAF sisteminin ana kolları Karapürçek-Sapanca alt fay zonu, Eşme alt fay zonu, Karadere-Kaynaşlı-Mengen alt fay zonu, Hendek-Yığılca alt fay zonu, Acısu fayı, Arifiye

fayı ve Kazımıye faylarından oluşmaktadır. Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) 7.5-8.0 büyüklüğünden deprem üretme potansiyelli olduğu göz önünde bulundurulursa, yörede yapılaşma esnasında ne kadar dikkatli olunması gerektiği ortaya çıkar.

Kentin kalın bir alüvyon dolgu yani zayıf bir zeminde bulunmasından dolayı çeşitli tarihlerde meydana gelmiş şiddetli depremlerden büyük hasar görmüştür. Jeolojik ve tektonik özelliklerinden dolayı deprem esnasında sıvılaşma potansiyeli açısından da büyük kaygı uyandırmaktadır.

Birinci derece deprem bölgesinde bulunan Sakarya'da, 17 Ağustos 1999 tarihinde M=7.4 büyüklüğündeki ve oluşan diğer depremlerin tamamından şiddetli bir deprem meydana gelmiştir. Deprem sonucunda Sakarya'da önemli can ve mal kaybı yaşanmıştır.



**Şekil 3.3** 17 Ağustos 1999 İzmit depreminde Sakarya'da sıvılaşmaya bağlı olarak meydana gelen hasarlar.

### 3.4 SIVILAŞMA

Sıvılaşma; depremin oluşturduğu titreşimlerin etkisiyle gevşek, suya doymun durumdaki taneli zeminlerin taşıma kapasitelerini kaybederek sıvı gibi davranış göstermesine denir. Sıvılaşma

olayı; halk arasında kum fişkırması ve kum kaynaması olarak bilinmektedir.  $F_s > 1$  ise sıvılaşma olmaz.

CSR: Gerilme oranı

Rd: Derinlik azaltma faktörü

$\sigma_o$  ve  $\sigma_o'$  YASS ve yoğunluğa göre hesaplanmıştır.

SPT deneylerinden elde edilen N değerleri efektif yük (Cn) düzeltmesine tabi tutulmuştur. Değerlendirmede düzeltilmiş N1 değerleri kullanılmaktadır. Türkiye’de  $M=7-7.5$  büyüklüğünde depremler için genel olarak  $a_{max}=0.40 \text{ gal}$  önerilmiştir.

### 3.4.1 Spt Verilerine Göre Sıvılaşma Potansiyel Analizi

**(Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri Yöntemine Göre):** Bu bölümde inceleme alanında yapılan sondaj ve elde edilen laboratuvar çalışmaları değerlendirilerek; B+4 katlı binanın oturduğu temel alanı sıvılaşma açısından değerlendirilecektir.

**Çizelge 3.1** SK1 deney verileri.

| Kuyu No | Derinlik (m) | YASS (m) | $\gamma_n$ ( $gr/cm^3$ ) | N30 | Cn   | N1    | CSR  | $\sigma_o$ | $\Sigma O'$ | Rd   | Amax (400 mgal) |      |
|---------|--------------|----------|--------------------------|-----|------|-------|------|------------|-------------|------|-----------------|------|
|         |              |          |                          |     |      |       |      |            |             |      | $T_o/\sigma_o'$ | Fs   |
| SK1     | 1,75         | 2        | 18,8                     | 11  | 1,60 | 17,60 | 0,19 | 32,9       | 35,35       | 0,97 | 0,24            | 0,79 |
| SK1     | 3,75         | 2        | 18,8                     | 13  | 1,36 | 17,74 | 0,19 | 70,5       | 53,33       | 0,94 | 0,33            | 0,57 |
| SK1     | 5,25         | 2        | 18,8                     | 15  | 1,22 | 18,44 | 0,20 | 98,7       | 66,81       | 0,72 | 0,36            | 0,55 |
| SK1     | 6,75         | 2        | 18,2                     | 26  | 1,14 | 29,89 | 0,35 | 122,85     | 76,25       | 0,89 | 0,38            | 0,31 |
| SK1     | 9,25         | 2        | 18,2                     | 32  | 1,00 | 32,14 | 0,36 | 168,35     | 97,22       | 0,86 | 0,39            | 0,90 |

Çalışma alanında yapılan sondajda elde edilen SPT darbe sayıları 6 m’ye kadar sıvılaşma açısından risk taşımaktadır. Daha sonraki seviyelerde gerek killi silt seviyelerinde gerekse siltli kum seviyelerinde SPT darbe sayıları yüksektir. Ancak siltli seviyelerde yapılan hidrometre deneyi analizlerinde kil oranının yeterli olduğu ortaya çıkmıştır. Kaldı ki bu siltli seviyeler Chinakriteri esas alınarak değerlendirildiği zaman genelde sıvılaşmayı

göstermektedir. Periyodik kayma kriterine göre yapılan sıvılaşma potansiyel analizinde  $F_s > 1$  dir. Yeraltı suyu yüzeye yakındır, yağışın fazla olduğu mevsimlerde yüzeye daha da yakın elde edilmektedir. Arazi gözlemlerinde binada bir miktar oturma gözlenmiştir. Bütün veriler değerlendirildiğinde B+4 katlı binanın oturduğu temel alanı sıvılaşma riski taşımaktadır.

### 3.5 GEOTEKNİK DEĞERLENDİRME

SPT darbe sayıları ile tek eksenli sıkışma dayanımının korelasyonu sonucu; Skempton yöntemi ile hesaplanmıştır.

|  |  |
|--|--|
| Tek eksenli sıkışma dayanımı           | : $q_u = 0,88 = 0,96 \text{ kg/cm}^2$<br>$1 \text{ kg/cm}^2 = 0,91 \text{ ton/ft}^2$ |
| Drenajsız makaslama dayanımı           | : $C = q_u/2 = 0,96/2 = 0,48 \text{ kg/cm}^2$<br>$\Phi = 0$ olduğunda $N_c=5,7$ dir. |
| Zemin emniyet gerilmesi ( $\sigma_e$ ) | : $N_c \cdot C/GS = 5,7 \cdot 0,48/3 = 0,91 \text{ kg/cm}^2$                         |
| Depremsellik parametreleri             | :  |
| Deprem bölgesi                         | : 1. Derece  |
| Bina önem katsayısı (I)                | : 1,0  |
| Etkin yer ivme katsayısı ( $A_0$ )     | : 0,40   |
| Zemin grubu                            | : D  |
| Yerel zemin sınıfı                     | : Z4   |
| Spektrum karakteristik periyotları     | : $T_A: 0,20 \text{ sn}$ $T_B: 0,90 \text{ sn}$                                      |
| Zemin hakim periyodu (ortalama)        | : 0,80   |
| Güvenlik katsayısı                     | : 3  |
| Temel yatak katsayısı                  | : $10900 \text{ kN/m}^3$   |

### 3.6 İNCELEME ALANI JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

Sakarya ili Kurtuluş mahallesi Bahçıvan sokakta bulunan B+4 katlı bina için yapılacak olan bu zemin iyileştirme çalışmasında, bina temel altında sıvılaşma etkilerini azaltmak amacıyla uygulanan taş kolon uygulaması incelenmiştir. Planlanan, sıvılaşmaya neden olan boşluk suyunun deprem esnasında meydana gelen titreşimler ile bu kolonlardan drene edilerek, boşluk suyu basıncı düşürülmesi, daneler arasındaki efektif gerilme artışı ile de temel taşıma gücü değerinde artış hedeflenmektedir.

Yapılan bu zemin etüdünde SK1 sondaj nosu ile numune alınan nokta, sondaj logunda 0-0.30 m arası dolgu, 0.30-10.00 m arası ML, 10.00-15.00 m arası SM'dir. Ortalama mevsimlik yer altı su seviyesi 2.00 m civarında bir kottadır.

**Çizelge 3.2** SK1'de zemin türleri.

| Derinlik    | Tanım      | Zemin Türü | SPT-N | C  | Ø | PI |
|-------------|------------|------------|-------|----|---|----|
| 0.30-10.00  | Killi-Silt | ML         | 20    | 35 | - | -  |
| 10.00-15.00 | Siltli-Kum | SM         | 38    | -  | - | -  |

Sondaj sırasında Standart Penetrasyon deneyleri yapılarak zeminin penetrasyon direnci belirlenmiştir. Aynı zamanda Shelby tüplerine UD (örselenmemiş) numuneler ve SPT (örselenmiş) numuneler alınmıştır. Delgi işlemi Auger'in zemine döndürülerek sokulması ile sağlanmıştır. Öte yandan numunelerden elek analizi yapılarak tane çapı dağılım grafikerli belirlenmiş, siltli seviyelerdeki numunelerin hidrometre deneyi analizleri yapılmıştır. UD 2 numunesinden tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. UD 1 numunesinde kil oranının düşük, silt oranının yüksek olması nedeniyle üç eksenli basınç deneyi yapılamamıştır.



Çizelge 3.3 Sondaj logu tablosu.

| Derinlik<br>(m.) | Numune<br>Cinsi | Numune<br>Derinliği | STANDART PENETRASYON DENEYİ |         |         | GRAFİK |    |    |    |    | LİTOLOJİ | AÇIKLAMA             |
|------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|---------|---------|--------|----|----|----|----|----------|----------------------|
|                  |                 |                     | DARBE SAYISI                |         |         | 10     | 20 | 30 | 40 | 50 |          |                      |
|                  |                 |                     | 0-15cm                      | 15-30cm | 30-45cm |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          | 0-0,3 m. Dolgu matz. |
| 1                |                 | 1,5                 |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | SPT1            | 1,95                | 4                           | 5       | 6       |        |    |    |    |    |          |                      |
| 2                |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | UD1             | 3                   |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | SPT2            | 3,5                 | 4                           | 6       | 7       |        |    |    |    |    |          |                      |
| 3                |                 | 3,95                |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | SPT3            | 5                   | 6                           | 7       | 8       |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  |                 | 5,45                |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 4                |                 | 6                   |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | UD2             | 6,5                 |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | SPT4            | 6,95                | 9                           | 11      | 15      |        |    |    |    |    |          |                      |
| 5                |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | SPT5            | 9                   | 12                          | 13      | 19      |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  |                 | 9,5                 |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 6                |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | SPT6            | 10,5                | 13                          | 17      | 20      |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  |                 | 10,95               |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 7                |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  | SPT7            | 14,5                | 15                          | 19      | 23      |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  |                 | 14,95               |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 8                |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 9                |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 10               |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 11               |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 12               |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 13               |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 14               |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
| 15               |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          |                      |
|                  |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          | 10-15 m. siltli kum  |
|                  |                 |                     |                             |         |         |        |    |    |    |    |          | Kuyu Sonu:15 m.      |

**Çizelge 3.4 SK1 laboratuvar deneyleri sonuç formu.**

| LABORATUVAR DENEYLERİ SONUÇ FORMU |             |              |                                      |                  |              |                |                    |      |      |            |                       |              |
|-----------------------------------|-------------|--------------|--------------------------------------|------------------|--------------|----------------|--------------------|------|------|------------|-----------------------|--------------|
| Sondaj No                         | Numune Tipi | Derinlik (m) | Doğal B.H.A ( $\gamma_n$ ) $gr/cm^3$ | Su İçeriği (w) % | ElekAnalizi  |                | AtterbergLimitleri |      |      | Zemin Tipi | TekEksenliBasınç (UU) |              |
|                                   |             |              |                                      |                  | No.4 Kalan % | No.200 Geçen % | LL %               | PL % | PI % |            | cu $kg/cm^2$          | qu $kg/cm^2$ |
| SK1                               | SPT         | 1,5-1,95     |                                      | 34,14            | 0,18         | 98,14          | 34                 | 25   | 9    | ML         |                       |              |
| SK1                               | UD          | 3,0-3,5      | 1,88                                 | 35,19            | 0,00         | 97,71          | 42                 | 23   | 19   | ML         |                       |              |
| SK1                               | SPT         | 3,5-3,95     |                                      | 33,38            | 0,00         | 83,73          | 32                 | 24   | 8    | ML         |                       |              |
| SK1                               | SPT         | 5,0-5,45     |                                      | 35,21            | 0,21         | 98,29          | 35                 | 26   | 9    | ML         |                       |              |
| SK1                               | UD          | 6,0-6,5      | 1,82                                 | 11,86            | 0,00         | 76,69          | 33                 | 25   | 8    | ML         | 0,35                  | 0,18         |
| SK1                               | SPT         | 6,5-6,95     |                                      | 33,12            | 0,00         | 83,20          | 31                 | 23   | 8    | ML         |                       |              |
| SK1                               | SPT         | 9,0-9,45     |                                      | 34,57            | 0,00         | 98,21          | 36                 | 26   | 10   | ML         |                       |              |
| SK1                               | SPT         | 10,5-10,95   |                                      | 20,98            | 0,00         | 17,38          |                    |      |      | SM         |                       |              |
| SK1                               | SPT         | 14,5-14,95   |                                      | 21,37            | 0,00         | 18,11          |                    |      |      | SM         |                       |              |

## BÖLÜM 4

### TAŞ KOLONLAR

Taş kolonlar ile zemin iyileştirme yöntemi ilk olarak 1830'larda Fransa'da ortaya çıkmıştır. Sonrasında uzun bir süre dikkat çekmeyen taş kolon uygulaması 1939 yılında Almanya'da tekrar ortaya çıkmış, ardından 1950 yılından itibaren Avrupa'ya yayılmıştır. 1970'lerden bu yana Amerika'da da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde bir çok kullanım alanı olan taş kolon uygulaması, deprem anında oluşan sismik kuvvet etkisindeki davranış olan sıvılaşma problemine karşı başarı ile uygulanan bir tekniktir. Öte yandan, zeminde konsolidasyonu, şev stabilitesini ve taşıma kapasitesini arttırmak, oturmaları azaltmak için de taş kolon uygulamasına başvurulabilir. Taş kolonlar; gevşek, kohezyonsuz zeminler ve yumuşak, kohezyonlu zeminlerin iyileştirilmesi amacı ile farklı çap ve derinlikte uygulanmaktadır. Diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre uygulama süreci hızlı ve ekonomik olması tercih sebebidir.

#### 4.1 TAŞ KOLON İMALAT YÖNTEMLERİ

En basit hali ile taş kolon uygulaması şu şekilde açıklanabilir:

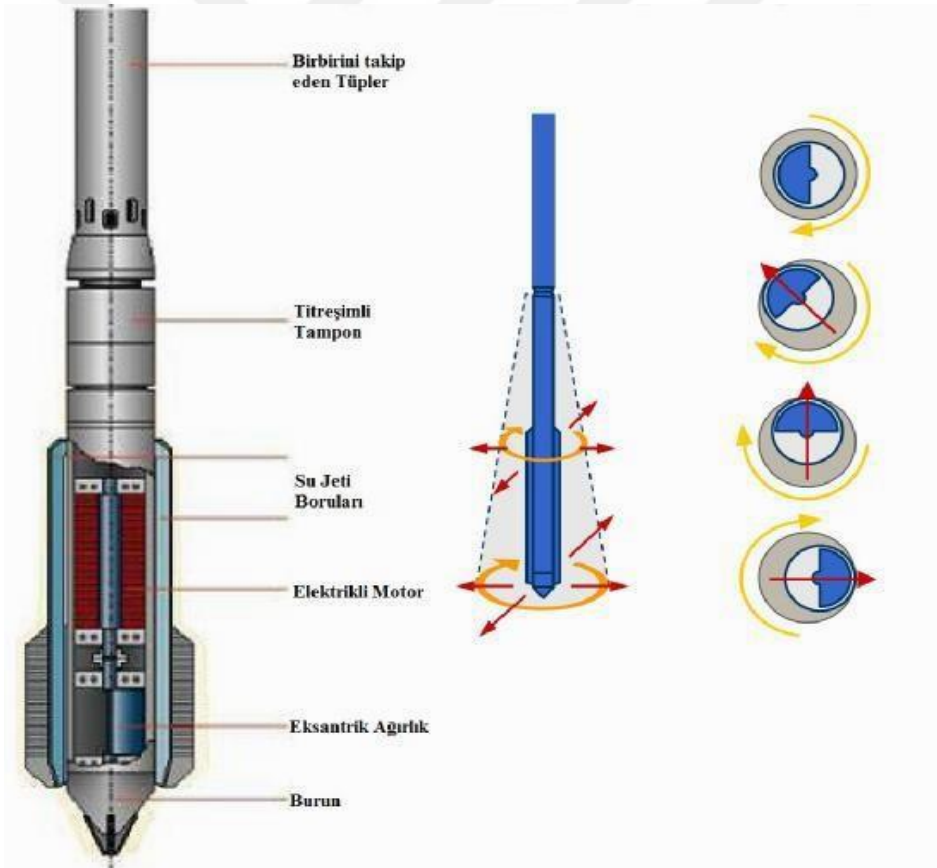
1. Zeminde bir şekilde belirli aralıklarla ve çaplarda delikler açılır.
2. Açılan deliklere kademe halinde belirli çaplardaki taş malzeme doldurulur.
3. Deliklere doldurulan malzeme vibrasyon veya darbe etkisi ile yatay ve düşey yönde sıkıştırılır.

Taş kolon uygulamasının imalat yöntemleri, zeminden beklenen iyileştirmeye ve uygulanacak zeminin özelliklerine göre seçilir. Taş kolon imalat yöntemleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Vibrokompaksiyon yöntemi ile taş kolon yapımı,
  - Vibro yer değiştirme yöntemi ile,
  - Vibro öteleme yöntemi ile,
2. Darbeli sıkıştırma (tokmıklama) metodu ile taş kolon yapımı.

#### 4.1.1 Vibrokompaksiyon Yöntemi ile Taş Kolon İmalatı

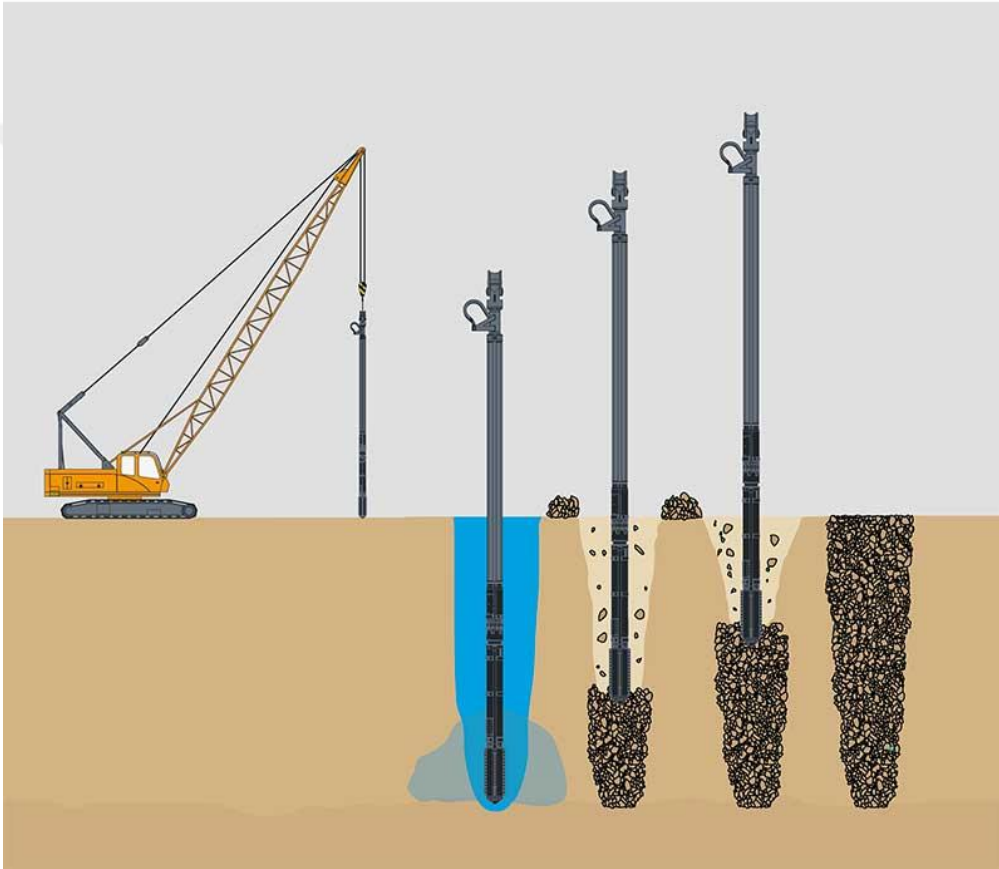
Aynı zamanda vibroflotasyon olarak da bilinen vibrokompaksiyon yönteminde şu zamana kadar sıkıştırılmış en uzun mesafe 58 metredir. Vibrokompaksiyon, ince dane oranı %10'dan az olan, kohezyona sahip olmayan zeminleri sıkıştırma işlemidir. Vibrokompaksiyonun yardımcı elemanları, uzun ve ince çelik bir tüp olan vibroflot borusu ile zemini sıkıştırmaya yarayan vibratördür. Vibroflotun en önemli parçası olan vibratör 300 ile 450 mm arasında çapa sahip, 2 ile 5 m arasında değişen içi boş çelik silindirden oluşur. Vibratör hava jetleri veya su aracılığı ile zeminde istenilen derinliğe indirildikten sonra belirli aralıklarla geri çekilir. Vibrokompaksiyon uygulaması yukarıdan veya yerinde yapılan geri dolgu ile biter. Bu uygulama ile zeminde %70-80 arasında rölatif sıklık elde edilir. Vibroflotun önemli parçaları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Vibroflotun önemli bölümleri.

#### 4.1.1.1 Vibro Yer Değiştirme Yöntemi (Islak Yöntem)

Vibro yer değiştirme yöntemi, istenilen sıklığın olmadığı karışık kohezyonlu ve tabakalı zeminlerde uygulanır. Şekil 4.2’de yer aldığı gibi önce sondanın kendi ağırlığı, titreşim ve yüksek basınçlı su jeti aracılığı ile istenilen derinlikte kuyu şeklinde delik açılır. Eğer zemin kendini tutamıyorsa kılıf geçirilir, taş kolon malzemesi 50-100 cm bölümler halinde kuyu içine dökülür. Ardından kuyu içine dökülen malzeme vibrasyon ile sıkıştırılır. Taş kolon imal edildikten sonra üst zemin silindir ile sıkıştırılarak düzeltilir.

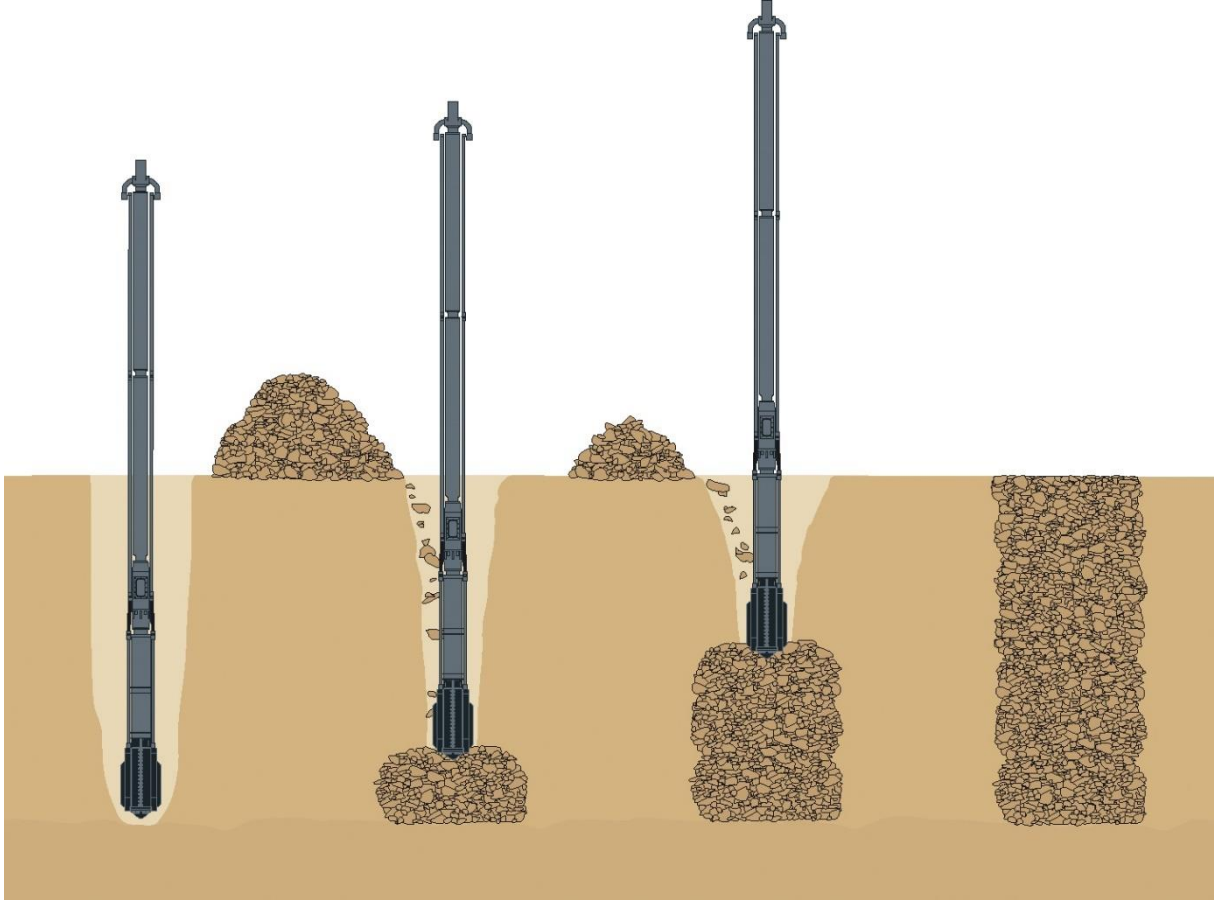


Şekil 4.2 Vibro yer değiştirme yöntemi ile taş kolon imalatı.

#### 4.1.1.2 Vibro Öteleme Yöntemi (Kuru Yöntem)

Bu yöntemde ıslak yöntem olan vibro yer değiştirme yönteminden farklı olarak su jeti yerine hava jeti kullanılır. Taş kolon uygulanacak zemin içerisine sondanın kendi ağırlığı, titreşim ve hava jeti yardımı ile istenilen derinlikte kuyu şeklinde delikler açılır. Vibro yer değiştirme yönteminde olduğu gibi açılan deliğe istenilen çaptaki malzemeler tabakalar halinde dökülür. Ardından malzemenin kuyu içinde sıkıştırabilmesi için sonda tekrar kuyu içine girer. Düşey

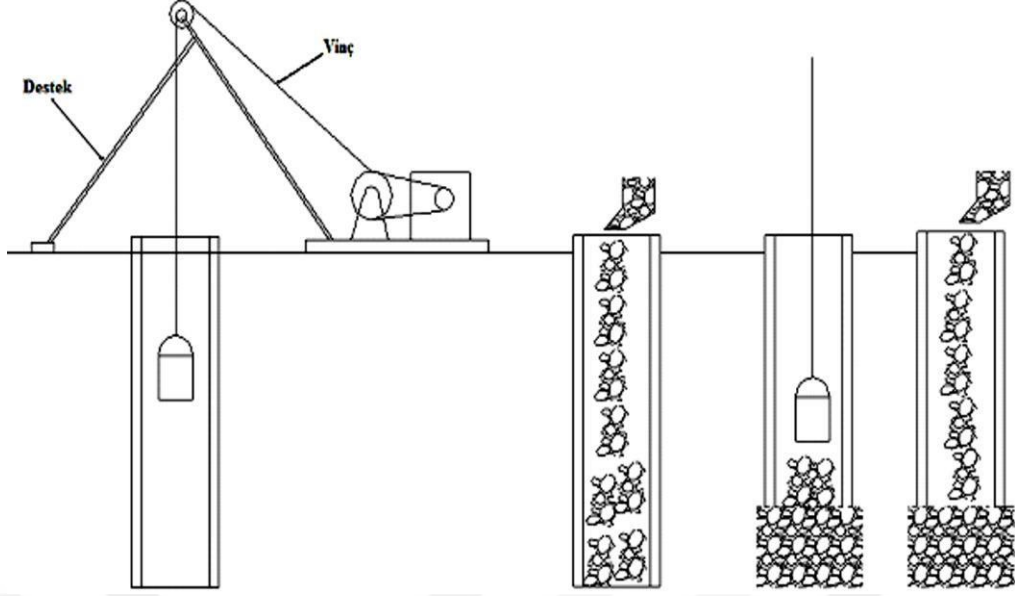
ve yatay yönde sıkıştırma sağlanır, böylece işlem tamamlanır. Bu yöntemde kuyu açılma yöntemi öteleme olduğu için dışarı yönde zemin tanelerinin çıkışı mümkün değildir. Şekil 4.3'te vibro öteleme yöntemi ile taş kolon imalatı gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Vibro öteleme yöntemi ile taş kolon imalatı.

#### 4.1.2 Darbeli Yöntem (Tokmaklama)

Darbeli yöntem ile taş kolon yapımına bir boru yardımı ile zeminde kuyu açılarak başlanır. Boru, kuyu kenarlarını kapattığından ötürü zeminin kendini tutamaması gibi bir durum söz konusu değildir. Açılan kuyuya diğer yöntemlerdeki gibi seçilen malzeme tabakalar halinde yerleştirilir. Ancak diğer yöntemlerden farklı olarak her dökülen malzeme tabakasının üstüne, zemin içindeki boru yavaşça çekilip tekrar düşürülerek zeminin sıkışması sağlanır. Bu sıkıştırma işlemine tokmaklama denir. Malzeme doldurmaların ardından yapılan darbeler ile malzemeler sıkıştırıldığında taş kolon işlemi tamamlanmış olur. Darbeli yöntem ile taş kolon imalatına Şekil 4.4'te yer verilmiştir.



Şekil 4.4 Darbeli yöntem ile taş kolon imalatı.

## 4.2 TAŞ KOLON İMALAT YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

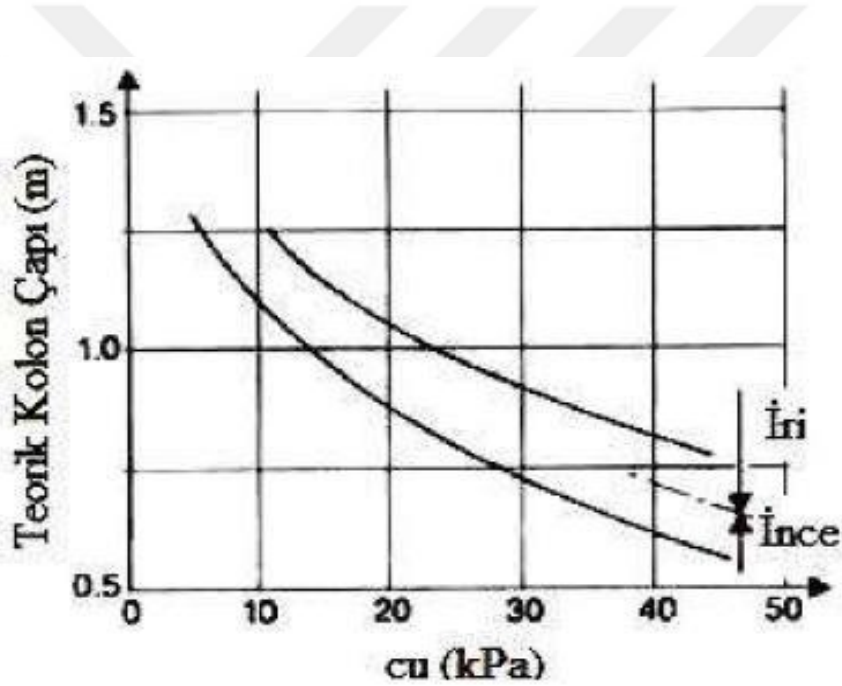
Detaylarına yer verilen taş kolon imalat yöntemleri, avantajlarına ve dezavantajlarına göre karşılaştırılıp, sonuçlara aşağıda yer verilmiştir.

- ✓ Vibro yer değiştirme yöntemi killi ve siltli zeminler için uygundur.
- ✓ Vibrokompaksiyon yöntemi kumlu ve siltli kumlu zeminler için uygundur.
- ✓ Kendini tutabilen, kılıfa ihtiyaç duymayan zeminlerde uygulanan vibro yer değiştirme yönteminin imalatı darbeli yöntemle göre daha hızlıdır.
- ✓ Genel olarak kuru yöntem ıslak yöntemle göre daha ekonomiktir.
- ✓ Vibro yer değiştirme yönteminde fazla su kullanılması, imalat sonrasında suyu uzaklaştırmayı gerektirir.
- ✓ Vibro öteleme ile taş kolon imalatı, vibro yer değiştirme ile taş kolon imalatından daha temiz ve ekonomik bir yöntemdir.
- ✓ Vibro öteleme ile taş kolon imalatı, kuyu stabilitesini sağlamak için yeraltı suyunun derinlerde olduğu ve kendini tutabilen zemin koşullarının bulunduğu bölgelerde kullanılmaktadır.
- ✓ Darbeli yöntem ile taş kolon imalatı, işçilik maliyetlerinin uygun olması nedeniyle işsizlik oranının fazla olduğu yerlerde daha uygundur.
- ✓ Gelişmiş ülkelerde yaygın şekilde kullanılan darbeli yöntem ile taş kolon imalatı, vibroflatasyon metotlarına göre birçok avantaja sahiptir.

## 4.3 TAŞ KOLONLARIN ÖZELLİKLERİ

### 4.3.1 Taş Kolonun Çapı

Taş kolon imalatında taş kolonun çapı, kuyu açılacak olan zeminin kayma mukavemetine, sıkılık ve gevşeklik durumuna, imalat yöntemine ve taş kolon imalatında kullanılacak malzemenin sıkıştırma enerjisine bağlı değişkenlik gösterir. Vibro yer değiştirme ve vibro öteleme yöntemlerinin imalatında belirlenen çap genel olarak 100 cm'in üzerinde değildir. Darbeli yöntem ile taş kolon imalatında ise çap yaklaşık olarak 80 cm'dir. Geçmişten günümüze yapılan araştırmalar sonucu zeminin mukavemeti ile kolon çapı arasındaki ilişki Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Zemin mukavemetinin teorik kolon çapına etkisi [10].

### 4.3.2 Taş Kolonun Boyu

Taş kolonlar yardımı ile zemin iyileştirme yönteminde, zeminin taşıma gücünün artırılarak oturmaların azaltılması istenmektedir. Zeminin istenilen durumları sağlaması için de kolon boyunun sert, sağlam zemine kadar uzatılması gerekir. Bu durumu sağlayacak en ekonomik taş kolon boyu ise 6 ile 10 m arasında değişmektedir.



Eğer sağlam zemin taş kolonun erişemeyeceği kadar derinde ise taş kolonlar sağlam zemine ulaşmadan sonlandırılır. Bu şekilde bitirilen taş kolonlar uç mukavemetine sahip olmadığından ötürü yüzen kolon davranışına sahiptir [10].

#### **4.3.3 Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı**

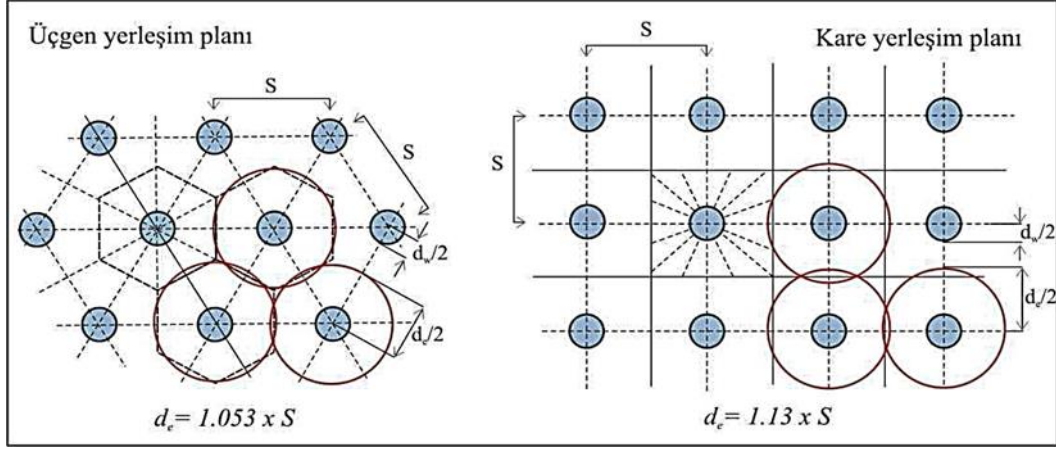
Taş kolonda kullanılan malzemelerinin (çakıl veya taş) üniform olması arzu edilen bir durum değildir. Dolayısıyla taş kolonun imalatı için kullanılan malzemenin iyi derecelenmiş olması istenmektedir. Geçmişten günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde taş kolonda malzeme çapının 1.3-1.7 cm arasında bir değer aldığı görülmüştür. Çin'deki standarda göre üst sınır 8,0 cm, Greenwood'un belirlediği standarda göre 7,0 cm ve Terzaghi ve arkadaşlarının belirlediği standarda göre ise 15,0 cm'ye kadar değer alabileceği görülmüştür. Fakat dünya genelindeki uygulamalar incelendiğinde taş kolon malzeme çapı 100 cm'yi pek geçmemiştir [11].

#### **4.3.4 Taş Kolon İçsel Sürtünme Açısı**

İçsel sürtünme açısı taş kolonlar için kullanılan malzemeye göre değişmekte olup genel olarak 40° ile 45° arasında değişmektedir. Uygulama açısından bakıldığında güvenlik faktörü de dikkate alındığından 38° olarak kullanılması tavsiye edilmektedir [10].

#### **4.3.5 Taş Kolon Yerleşim Aralıkları**

Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan taş kolon uygulamaları eşkenar üçgen yerleşimi ve dikdörtgen yerleşim olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bu yerleşim şekillerinden dikdörtgen yerleşim daha çok kullanılmaktadır. Dikdörtgen ve eşkenar üçgen yerleşiminin detaylı olarak gösterimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Taş kolon yerleşim aralıkları detaylı gösterimi.

#### 4.4 TAŞ KOLONLAR İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR VE BAĞINTILAR

##### 4.4.1 Eşdeğer Çap

Zemin iyileştirme yöntemi olan taş kolonların analizleri yapılırken, oluşturulan taş kolonun etrafında yer alan zemin de düşünülmelidir. Taş kolonun çevresindeki alan bir altıgenin alanı ile eşdeğer kabul edilir. Buna bağlı olarak eşkenar üçgen yerleşimde olan taş kolonlar için efektif daire çapı:

$$D_e = 1.05 s \quad (4.1)$$

kare yerleşimde ise bu çap;

$$D_e = 1.13 s \quad (4.2)$$

şeklindedir. Burada s değeri, yan yana bulunan iki taş kolonun merkezleri arasındaki mesafeyi gösterir. De ise birim hücre modelinin çapını gösterir.

##### 4.4.2 Alan Değişim Oranı

Taş kolon uygulaması ile iyileştirilmiş bir zeminin performansını, taş kolon ile yer değiştirilen zeminin hacmi önemli ölçüde etkilemektedir. Genellikle alan değişim oranının %20-%30 arasında bir değer aldığı gözlemlenmektedir [11].

Taş kolon ile yer değiştirilen zemin miktarını belirlemek için, alan değişim oranı,  $a_c$ ;

$$a_c = A_c/A \quad (4.3)$$

şeklinde bulunur. Burada;

A: Taş kolon alanı

$A_c$ : Birim hücre alanı

Olarak tanımlanır. Zemin alan oranı ise,

$$a_s = A_s/A \quad (4.4)$$

$$a_c = 1 - a_s \quad (4.5)$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Alan değişim oranı ayrıca;

$$a_c = C1(D/s)^2 \quad (4.6)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada;

D : Sıkıştırılmış taş kolonun çapı

s : Taş kolonlar merkezleri arası mesafe

C1 : Taş kolonların dizilimine bağlı olarak belirlenen sabit bir katsayı.

C1 katsayısı, eşkenar üçgen dizilimi için 0.907, kare dizilim için 0.785 olarak alınır [11].

Buna göre kare dizilimine göre  $a_c$ ;

$$a_c = 0.785 (D/s) \quad (4.7)$$

Eşkenar üçgen dizilimine göre ise  $a_c$ ;

$$a_c = 0.907 (D/s)^2 \quad (4.8)$$

olarak alınır [2].

#### 4.4.3 Gerilme Konsantrasyon Oranı

Taş kolon uygulaması ile iyileştirilen zeminlerin üzerine yapı inşası veya dolgu yapıldığında, taş kolonlarda gerilme artışı oluşur. Buna bağlı olarak taş kolonun çevresindeki zeminin gerilme miktarında ters oranda azalma oluşur. Oluşan bu ters orantının sebebi ise taş kolonun etrafındaki zeminden daha rijit bir yapıda olmasıdır. Birim hücre kavramına uygun genişlikte, belirli bir üniform yük altında, eşkenar üçgen veya dikdörtgen-kare yerleşimli grup taş kolonun gerilme konsantrasyonu oranı ( $n$ ), aşağıdaki şekilde ifade edilir [10,11].

Bu kapsamda grup halinde bulunan taş kolonlar ele alındığında, gerilme konsantrasyonu ( $n$ ) aşağıdaki bağıntı ile belirlenebilir.

$$n = \sigma_s / \sigma_c \quad (4.9)$$

Bu ifadede;

$\sigma_c$  : Zemin içerisinde oluşan gerilme,

$\sigma_s$  : Taş kolon içerisinde oluşan gerilme

şeklinde tanımlanmaktadır. Bağıntıyı açacak olursak, temel yükünün ve dolgu yükünün altında kalan bir taş kolonla, kolonun çevresinde yer alan zeminin gerilme oranları, gerilme konsantrasyon oranı olan  $n$ 'yi verir. Arazi ölçümleri yapan Barksdale ve Bachus (1983), ölçümlerden elde ettikleri verilerden yola çıkarak, gerilme konsantrasyonu ile ilgili bir çizelge ortaya çıkarmışlardır. 12 farklı bölgede, 4 adedi 3 ile 15 m derinlikte olan ölçümler yapmışlardır. Konsolidasyon için geçen 15 haftalık sürecin ardından, elde edilen veriler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir [11].

**Çizelge 4.1** Taş kolonlarda gözlemlenen gerilme yoğunluğu faktörleri [12].

| Deney Tipi     | Yerleşim Biçimi  | Gerilme Oranı, n                        | Zaman Değişim         | Taş Kolon Uzunluğu | Zemin Durumu                                 |
|----------------|--|---|-----------------------|--------------------|--|
| Dolgu          | Kare<br>$s = 1.7 m$<br>$D = 0.9 m$<br>$a_s = 0.25$       | 2.8<br>(Ortalama)                       | Sabite Yakın          | 6.7-7.9            | Yumuşak kil                                  |
| Yükleme Deneyi | Eşkenar Ü.<br>$s = 1.8 m$<br>$D = 1.2 m$<br>$a_s = 0.43$ | 3.0<br>(Başlangıç)                      | 2.6 (Son)<br>Azalıyor | 6.3                | Çok yumuşak ve yumuşak kumlu silt ve kil     |
| Dolgu          | Eşkenar Ü.<br>$s = 2 m$<br>$D = 1.1 m$<br>$a_s = 0.26$   | 2.6-2.4<br>(Başlangıç)<br>4.0-4.5 (Son) | Artıyor               | 20                 | Organik malzemeli çok yumuşak kil, silt, kum |
| Deneme Dolgusu | $a_s = 0.1 - 0.3$  | 4.9<br>(Ortalama)                       | Artıyor               | Değişken           | Çok yumuşak ve yumuşak çökeltiler            |
| Model Deney    | $D = 0.03 m$<br>$a_s = 0.07 - 0.4$                       | 1.5 - 5                                 | Sabit                 | Değişken           | Yumuşak kil                                  |

Birim hücre modeli içinde, belli bir derinlikte yer alan ortalama gerilme miktarı, düşey kuvvetlerin dengelenmesi için belirtilen alan değişim oranı kullanılarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$\sigma = \sigma_s a_c + \sigma_c (1 - a_c) \quad (4.10)$$

Bu bağlantıya göre, taş kolonda ve zeminde oluşan gerilmeler, gerilme konsantrasyon faktörü (n) yardımıyla;

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{(1+(n-1)a_c)} = \mu_s \sigma \quad (4.11)$$

$$\sigma_c = \frac{n\sigma}{(1+(n-1)a_c)} = \mu_c \sigma \quad (4.12)$$

Bağıntıları kullanılarak elde edilebilir. Bu bağıntılarda  $\mu_s$  ve  $\mu_c$  taş kolonda ve zeminde oluşan gerilmelerin oranıdır.

#### 4.4.4 Oturma Azaltım Oranı

Taş kolon uygulaması ile iyileştirilmesi amaçlanmış zeminde oturmaların azalması istenmektedir. Buna bağlı olarak taş kolon bir zeminde uygulanırken oturmaları azaltması da

amaçlanmaktadır. Amaçlanan bu durum oturma azaltım faktörü ( $\beta'$ ) ile bulunur. Oturma azaltım faktörü ( $\beta'$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [11].

$$\beta' = S/S' \quad (4.13)$$

S: İyileştirilmiş zeminin oturması,

S': İyileştirilmemiş zeminin oturması olarak ifade edilebilir.

Bağlantı 4.13'te, oturma azaltım faktörü ( $\beta'$ ) aynı yükleme koşulları altında iyileştirilmiş zeminin oturmasının, iyileştirilmemiş zeminin oturmasına oranı olarak açıklanabilir.

## 4.5 TAŞ KOLONLARIN YÜK TRANSFER MEKANİZMALARI

### 4.5.1 Uç Mukavemetli Taş Kolon

Zeminin sert, sağlam tabakasına ulaşan taş kolonlar genellikle uç mukavemetli taş kolonlar olarak isimlendirilir. Uç mukavemetine sahip taş kolonlar, zemin ile taş kolon arasında gerilmelere, radyal yönde basınçlara ve ara kesit sürtünmelerine sahiptir. Uç mukavemetine sahip tekil taş kolonlarla grup halindeki taş kolonların çalışma sistemi aynıdır ancak taşıma güçleri ile sınır koşulları birbirlerinden farklıdır. Grup taş kolonların çevresinde yer alan zeminin sahip olduğu çevre basıncı, tekil taş kolonun çevresinde yer alan çevre basıncından fazladır. Bu duruma bağlı olarak grup taş kolonların taşıma gücü tekil taş kolonun taşıma gücünden daha fazladır [13].

### 4.5.2 Yüzen Taş Kolon

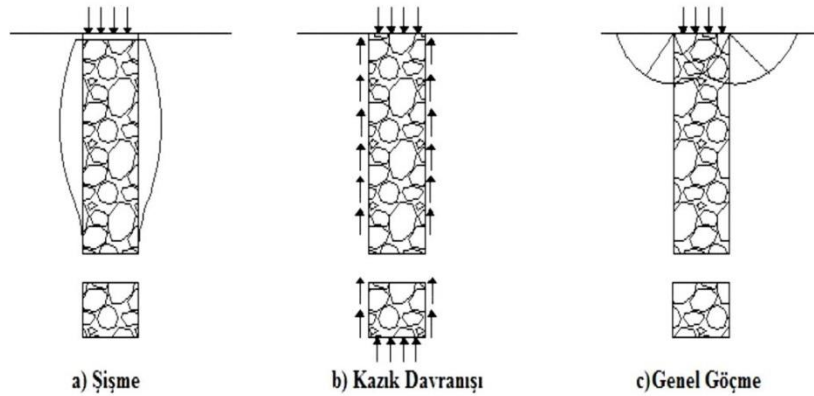
Taş kolon uygulaması ile iyileştirilecek zeminin özellikleri çok önemlidir. Taş kolonun uygulanacağı zeminin sağlam, sert tabakası çok derinde (taş kolonun ulaşamayacağı derinlikte) ise taş kolonun yapımına son verilir. Bu şekilde yarım kalan, sağlam zemine ulaşmadan bitirilen taş kolonlar, yüzen taş kolonlar olarak isimlendirilir. Bu tür taş kolonların çalışma mekanizmaları yüzen kazıklara benzetilmektedir. Genel itibarıyla yüzen taş kolonların çalışma şekli, yükleme sonunda kolonun yanal yönde genişleyerek oturması ile taş kolon ile zemin arasındaki kayma gerilmelerinin ve pasif basınçların oluşması ile açıklanabilir. Yüzen taş kolonlar sağlam zemine ulaşmadan durdurulduğu için uç

mukavemetleri çok düşüktür. Bu neden ile yüzen taş kolonların mukavemetinin çoğunluğunu yan yüzeylerden alması beklenir. Yüzen taş kolonların derinliği çapın 3-4 katından fazladır zira bu derinliğin altında bir yüzen taş kolon sisteminin çalışması beklenemez [11]. Yüzen taş kolonların çalışma mekanizması açıkladığımız gibi kolay gözükse bile oldukça karmaşıktır.

## 4.6 TAŞ KOLONLARIN GÖÇME MEKANİZMASI

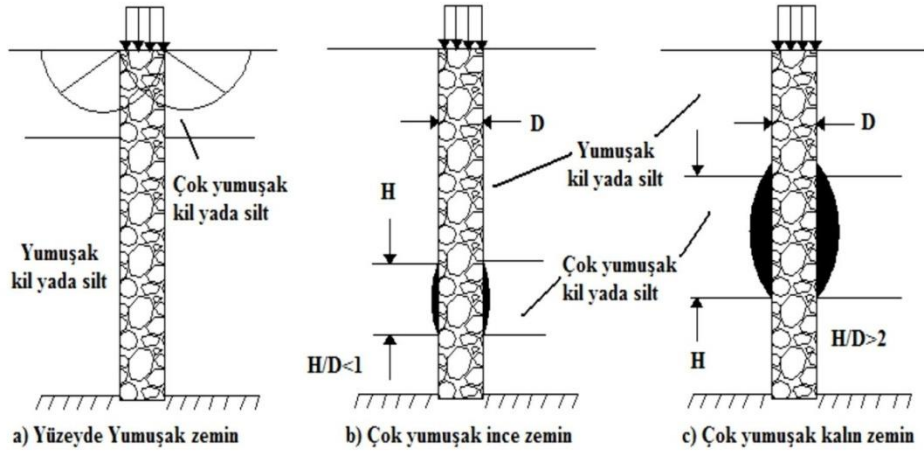
### 4.6.1 Tekil Taş Kolon Göçme Mekanizması

Yüzen taş kolonların çalışma siteminden yola çıkarak, kaolin kili içerisinde bir örnek model hazırlayan Hughes ve Withers, yüzen kolonun boyunun, çapının üç ya da dört kat fazlası olması durumunda, Şekil 4.7-a'daki gibi kolonun aşırı yanıl genişleme yapıp, ardından göçtüğünü, Şekil 4.7-b'deki gibi kolonun yüzen boyunun, çapının yaklaşık iki veya üç katı olması durumunda kolonun alt ucunda taşıma gücünün aşıldığını, şekil 4.7-c'deki gibi sağlam zemine ulaşan kısa taş kolonların göçme mekanizmalarının ise, göçme yüzeyine yakın kesimde taşıma gücünün aşılması sonucunda yerel ya da genel göçme olabileceğini belirtmiştir [14].



Şekil 4.7 Tekil taş kolonun (yüzen taş kolon) göçme mekanizması [15].

Tabakalı bir zeminde taş kolon göçme mekanizması Şekil 4.8'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Zemin tabakalı ve tabakalar arasındaki malzemede kil var ise killi tabaka zemindeki diğer tabakalardan çok daha farklı davranış sergileyebilmektedir. Ayrıca zeminde her tabaka arasında farklı davranışlar süregelmektedir. Bu durum da kil malzemenin bulunduğu yumuşak tabakada yer alan taş kolonun yanıl yönde genişleyerek göçmesine neden olabilir.



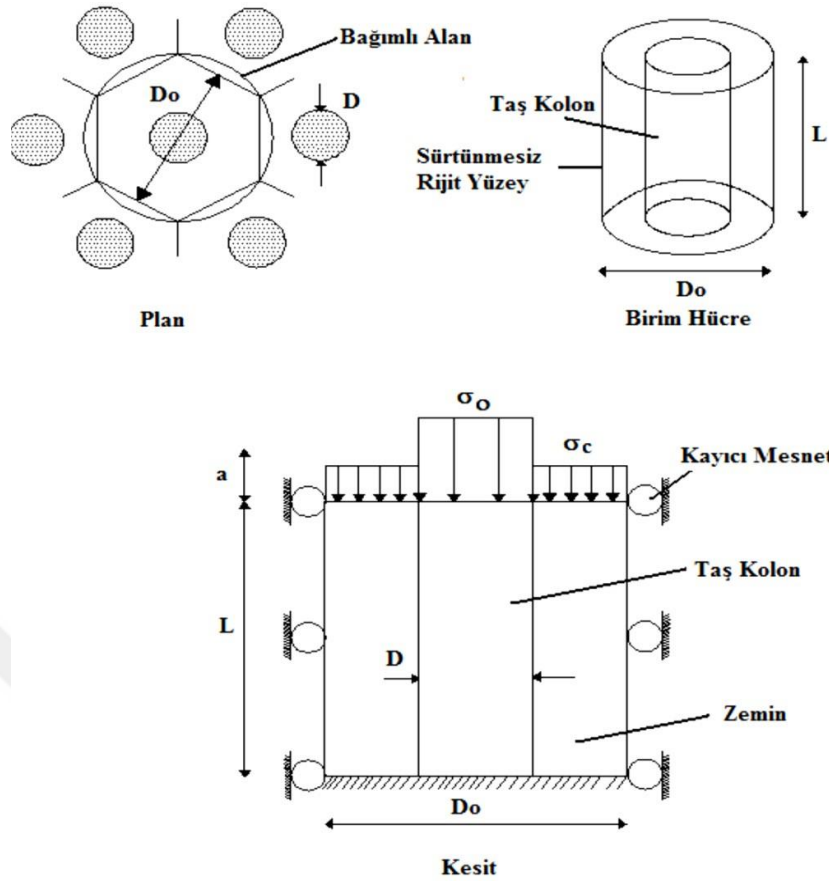
Şekil 4.8 Tabakalı bir zeminde taş kolon göçme mekanizması [16].

#### 4.6.2 Grup Taş Kolon Göçme Mekanizması

Grup şeklinde uygulanmış taş kolonların içerisinde bir tanesinin taşıma gücü, tekil olarak uygulanmış taş kolondan daha fazladır.

Yine aynı düşünceden hareketle, grup şeklinde uygulanmış olan taş kolonların oturma yük durumunun incelenmesi için grup içerisindeki taş kolonların hepsinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Grup taş kolonların oturma yük durumunun incelenmesi için yapılmış çalışmaya birim hücre modeli denilebilir (Şekil 4.9).





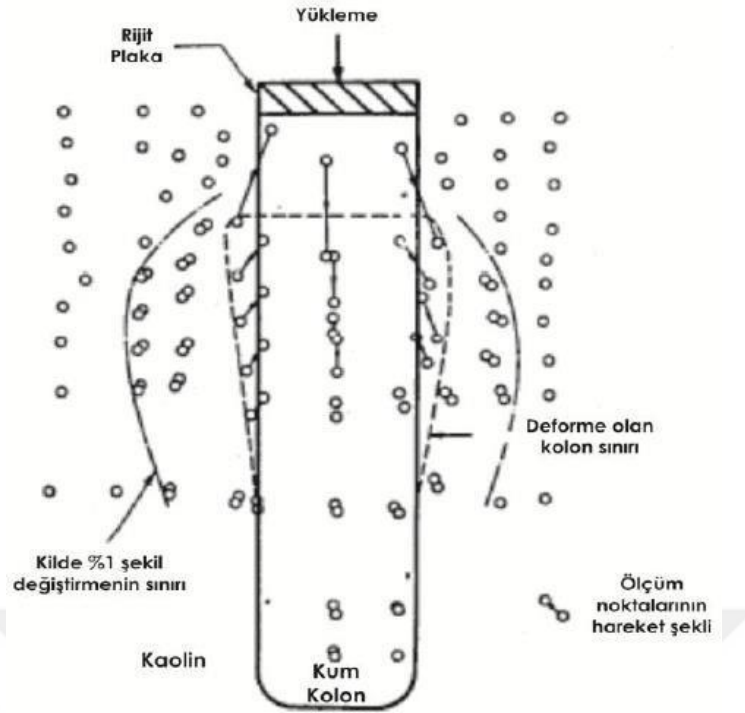
Şekil 4.9 Birim hücre modelinin gösterimi [16].

Birim hücre modeli çalışmasında, yanal yöndeki yer değiştirmeler komşu hücreleri etkilemez. Aynı zamanda birim hücre modeli dışındaki kayma gerilmesi sıfıra eşit olmalıdır. Grup taş kolonda, her kolon bir diğer kolondan farklı davranış sergiler. Bu sebeple, taş kolonlar birbirlerini etkilemezler.

## 4.7 TAŞ KOLON TAŞIMA GÜCÜ

### 4.7.1 Tekil Taş Kolonların Taşıma Gücü

Taş kolonların üstünde genellikle yük bulunur. Eğer uygulanan taş kolonun derinliği, kolonun çapının 6 katı veya 6 katından büyük ise kolonda dışa doğru genişleme de denilen göçme, kabarma görülür. Taş kolonun bu göçme davranışı Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



**Şekil 4.10** Yükleme sonrası tekil taş kolon kabarma davranışı [12].

Hughes ve Withers (1974), 19.1kPa kayma mukavemetli kil numunesi ile ortaya bir model çıkararak, modelin üzerinde yükleme deneyleri yapmışlardır. Deneyin sonunda, taş kolonun iki veya 3 katı kadar derinliğinde göçme meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca yükleme deneyi sonunda taş kolonda aşağı yönde hareket ve dışa doğru kabarma gözlemlemişlerdir [17].

Taş kolonun göçmesi halinde, maksimum asal düşey gerilme  $\sigma_1$ , minimum asal yanıl gerilme ise  $\sigma_3$  olarak alındığında, pasif itki katsayısı  $K_p$  ile bu gerilmeler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = K_p = \frac{1 + \sin \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \quad (4.14)$$

Burada  $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$  gerilmelerin oranı,  $\varphi_s$  ise içsel sürtünme açısıdır.

Hughes ve Withers (1974), kolonun etrafında yer alan zeminde oluşan basıncı bu bağıntı sayesinde gözlemlemişlerdir. Ayrıca pressiyometre deneyi sırasında ortaya çıkan boşluk ile yükleme sonrası ortaya çıkan, tekil taş kolondaki genişlemenin benzediğini düşünmüşlerdir

[17]. Bu kapsamda geliştirilmiş sürtünme olmaksızın sonsuz genişleme niteliğine sahip silindirik şeklindeki boşluk için düşülen elastoplastik teori, taş kolonun etrafındaki zeminde meydana gelecek drenajsız nihai yanal gerilme miktarını hesaplamak amacıyla kullanılabilir.

$$\sigma_3 = \sigma_{r_0} + c_u \left[ 1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right] \quad (4.15)$$

Bağıntıda;

$\sigma_3$  : Nihai Drenajsız Yanal Gerilme

$\sigma_{r_0}$  : Kolon İmalatından Sonraki Toplam Radyal Gerilme

$c_u$  : Drenajsız Kohezyon

$E_s$  : Zeminin elastisite modülü

$\nu$  : Poisson oranı

şeklinde tanımlanmaktadır. Taş kolon etrafında yer alan zeminde oluşan gerilme değeri ve  $q_{ult} = \sigma_1$  kabul edilerek şu bağlantı elde edilir.

$$q_{ult} = \sigma_{r_0} + c_u \left[ 1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right] \frac{1+\sin\phi_s}{1-\sin\phi_s} \quad (4.16)$$

Yumuşak killi zeminlerde drenajsız elastisite modülü ile drenajsız kesme dayanımı emen hemen birbirine eşit olarak kabul edilebilir. Buna dayanarak 4.16 ifadesi;

$$q_{ult} = (\sigma_{r_0} + 4c_u) K_p \quad (4.17)$$

olarak yazılabilir.

Vesic (1972), taş kolonlar için uygulanabilir silindirik boşluk genişleme teorisini detanlandırmış, kohezyonlu zeminleri ve sürtünmeli zeminleri de kapsayacak hale getirmiştir. Bu kapsamda Vesic (1972) tarafından aşağıdaki bağlantı oluşturulmuştur [18].

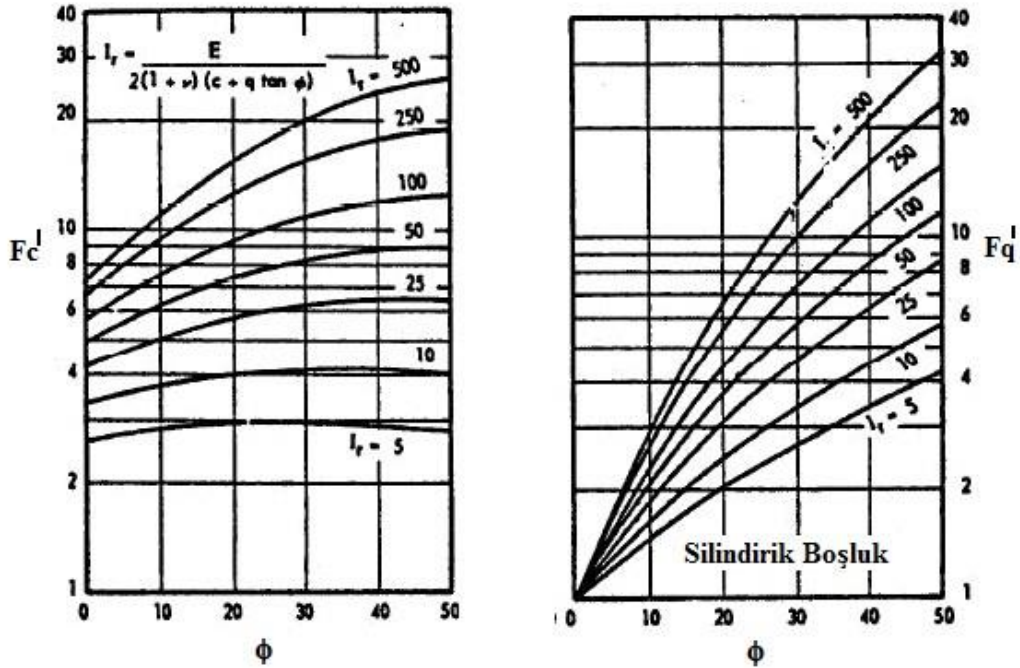
$$\sigma_3 = c_u F'_c + q F'_q \quad (4.18)$$

Bağıntıda,

$q$ : Hesabın yapıldığı derinlikte oluşan ortalama gerilme,

$F'_c$  ve  $F'_q$ : Boşluk genişleme katsayıları

şeklindedir. Bu değerler Şekil 4.11'deki abaktan seçilmektedir.



Şekil 4.11 Silindirik boşluk genişleme faktörleri [18].

$F'_c$  ve  $F'_q$  katsayıları rijitlik indeksi ile içsel sürtünme açısına bağlı olarak değişmektedir.

Rijitlik indeksi ise aşağıda yer alan bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$I_r = \frac{E_s}{2(1+\nu)(c+q \tan \phi)} \quad (4.19)$$

Burada;

$E_s$  : Zeminin Elastisite Modülü ,

$\phi$  : Zeminin Kayma Mukavemeti Açısı,

$c$  : Zeminin Kohezyonu,

$\nu$  : Zeminin Poisson Oranı,

$q$  : Göçme Bölgesindeki Ortalama Normal Gerilme

olarak ifade edilmektedir. Diğer bağıntılardan da yararlanılarak nihai gerilme;

$$q_{ult} = \left[ \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right] [F'_c * c_u + F'_q * q] \quad (4.20)$$

olarak bulunur.

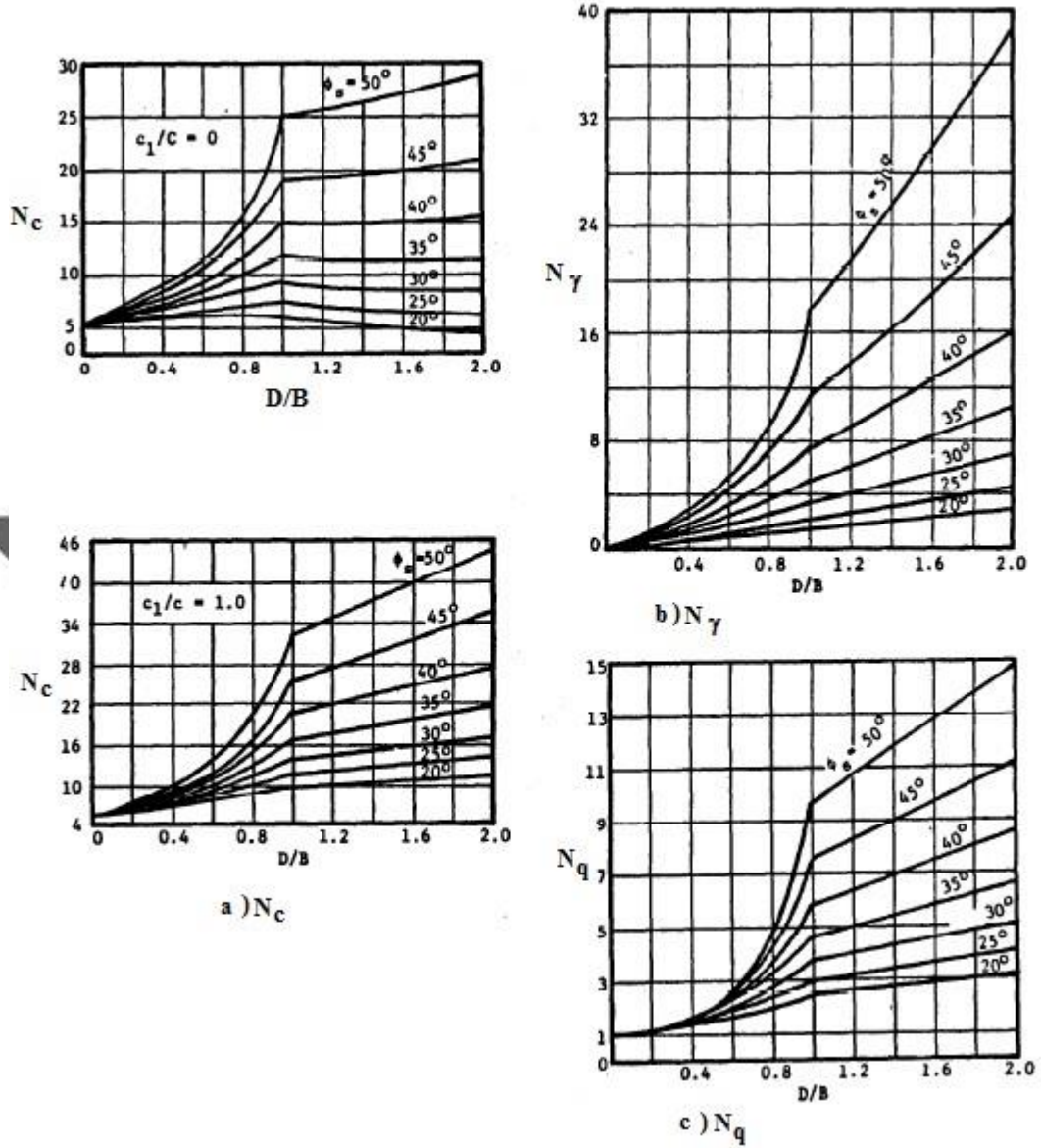
#### 4.7.2 Kısa Taş Kolonların Taşıma Gücü

Bir taş kolonda, kolon çapının boyundan 2 ya da 3 kat daha fazla olduğunda göçme meydana gelebilir. Taş kolondaki göçmeler, kolonun etrafındaki zeminin belirli bir bölgesinde veya tamamında gerçekleşebilir. Zımbalama olarak isimlendirilen bir başka göçme çeşidi vardır. Bu göçme çeşidinde, klasik kazık tasarım yöntemlerindeki gibi yanall çevre sürtünmesi ve taş kolonun uç taşıma gücü düşünülerek hesap yapılır ve sonuca gidilir.

Örtülü sürşarj yükünün en küçük varsayıldığı yüzeyde ise genel göçme oluşur. Madhav ve Vitkar (1978), sürtünmesi olmayan zeminde taş kolonlar için bir düzlem şekil değiştirme çözümü üretmişlerdir. Burada yük, yanlardaki yumuşak zemine ya da direkt olarak taş kolona uygulanabilir. Bu durum düşünüldüğünde şerit bir yükleme için taşıma gücü;

$$q_{ult} = (\gamma_c * B/2) * N_\gamma + c_u * N_c + \gamma_c * D_f * N_q \quad (4.21)$$

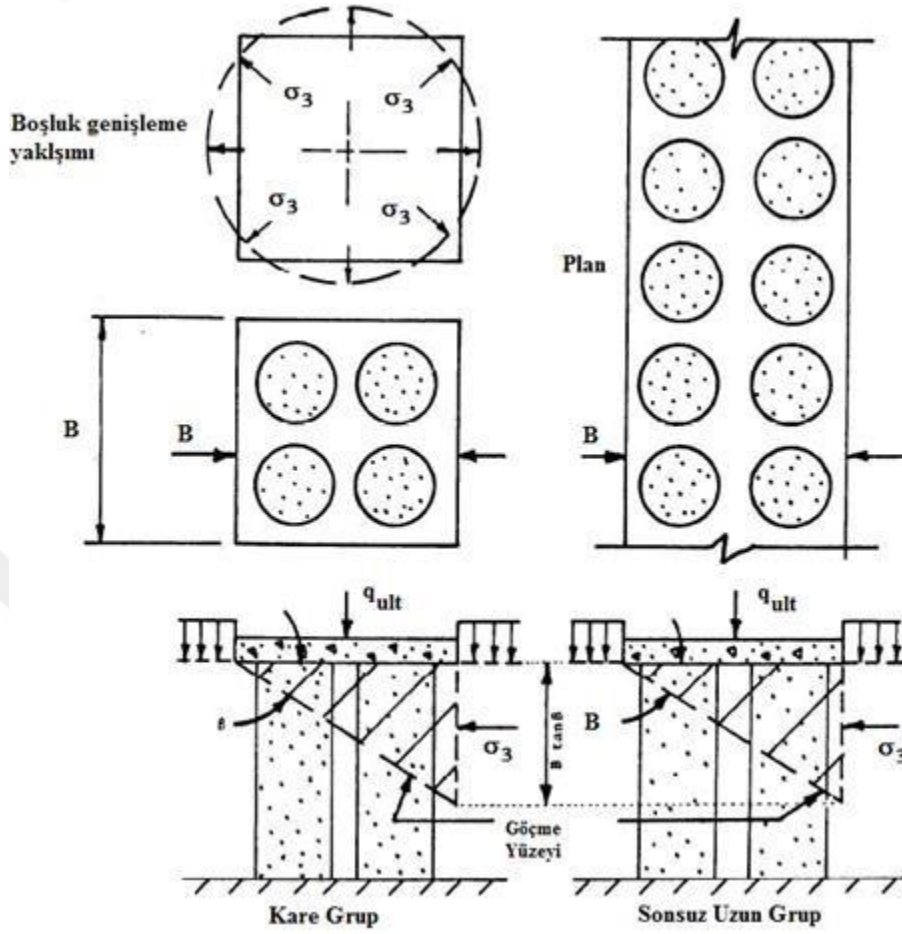
olarak ifade edilir. Burada  $N_\gamma$ ,  $N_c$  ve  $N_q$  Şekil 4.12'den okunabilecek taşıma gücü katsayılarını ifade etmektedir.



Şekil 4.12 Kısa Taş Kolonların Taşıma Gücü Katsayıları [19].

#### 4.7.3 Grup Taş Kolonların Taşıma Gücü

Taş kolon uygulaması ile iyileştirilmiş yumuşak ve gevşek bir zeminde, taş kolonların taşıma gücünün belirlenmesi için rijit temelin üstüne yükün hızla uygulanması gerekir. Bu hızlı yük uygulaması aracılığı ile, zeminin içinde drenajsız kesme olayının oluşması ve içsel sürtünme açısının göz önüne alınmaması söz konusudur. Böylece ortaya çıkan iki düz yırtılma hattı boyunca oluşturulan göçme yüzeyinin kabul edilmesi ile nihai taşıma gücü bulunabilmektedir. Bu kuram ilk kez Bell J. R. (1978) tarafından bulunmuştur [20]. Ardından Terzaghi ve Sowers (1979) tarafından geliştirilmiştir [21]. Zeminde oluşan düz göçme çizgisi ve taşıma gücü belirleme mekanizması Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Grup Taş Kolonlarda Taşıma Gücü Kapasitesi [12].

Şekil 3.13'teki model bloğun dengesi göz önüne alındığında ortalama kesme dayanımı değerleri;

$$\tan\phi_{ort} = n * a_c \tan\phi_c \quad (4.22)$$

$$c_{ort} = (1 - a_c)c \quad (4.23)$$

formülleri ile bulunur.

Burada;

$\tan\phi_{ort}$ : Kompozit İçsel Sürtünme Açısının Tanjantı,

$n$ : Taş Kolon İçin Gerilme Konsantrasyon Faktörü,

$a_c$ : Alan Değişim Oranı,

$c_{ort}$  : Temelin Altındaki Kesme Yüzeyinin Kompozit Kohezyonudur.

Temel yüzeyi ile göçme yüzeyi arasında  $\alpha$  açısı bulunur.

Kompozit zemin için  $\alpha$  açısı;

$$\alpha = 45 \frac{\phi_{ort}}{2} \quad (4.24)$$

olarak hesaplanabilir. Grup taş kolonların taşıma gücü değerinin bulunabilmesi için önce yanal gerilme  $\sigma_3$  değeri bilinmelidir. Yaygın olarak kullanılan toprak basıncı teorisinden yararlanılarak, suya doymun olan killerde ve sonsuz uzunluğa sahip bir temelde;

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_s B \tan \alpha}{2} + 2c \quad (4.25)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada;

$\sigma_3$ : Ortalama Yanal Çevre Basıncı

$\gamma_s$ : Kohezyonlu Zeminin Doymun veya Islak Birim Hacim Ağırlığı

B : Temel Genişliği

$\alpha$ : Göçme Yüzeyinin Eğimi

c : İyileştirilmemiş Zemindeki Drenajsız Kohezyondur.

Vesic tarafından bulunmuş olan boşluk genişleme teorisinden yararlanılarak kare temellerin yanal gerilmeleri bulunabilir. Buradan hareketle nihai yanal gerilme  $\sigma_3$  ve nihai düşey gerilme  $q_{ult}$  olarak düşünülürse, bloğun dengesi;

$$q_{ult} = \sigma_3 \tan^2 \alpha + 2c_{ort} \tan \alpha \quad (4.26)$$

olarak yazılabilir. Önerilen bu metotta taş kolonun etrafında yer alan zeminin kayma dayanımı ve rijitlikmodülü, taş kolon üzerine binen jeolojik gerilme, temel şekli ve boyutları, taş kolonun içsel sürtünme açısı dikkate alınmaktadır.



## BÖLÜM 5

### ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zeminlerin iyileştirilmesindeki amaç bina temellerinde deprem, heyelan, sıkılaşıma gibi etkilerden ötürü oluşan zararların azaltılması ve yetersiz zeminlerdeki taşıma gücünün artırılmasıdır.

Yetersiz veya sorunlu zemin ile karşılaşıldığında yapılabilecekler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Sorunlu zemin yerine sorunsuz zemin alanı seçilebilir.
- ✓ Zeminin yapıyı taşıyabilmesi için derin temeller tasarlanabilir.
- ✓ Zemine yapılmak istenen yapı zeminin taşıyabileceği bir şekilde tasarlanabilir.
- ✓ Sorunlu zemin, yerinde yapılan iyileştirme yöntemleri ile sorunsuz hale getirilebilir.

Zeminlerde oluşabilecek sorunlar ise şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Zeminin sıvılaşmaya maruz kalması veya potansiyeli olması.
- ✓ Zeminin taşıma gücünün-mukavemetinin yetersiz olması.
- ✓ Zeminin üzerine yapılan yapı sonrası fazla oturma potansiyeli.
- ✓ Zeminin donma, ıslanma gibi çevresel etkilerden olumsuz etkilenmesi.
- ✓ Kazı sonrası zemindeki kabarmalar.
- ✓ Zeminde permeabilite varlığı.
- ✓ Zeminin var olan problemleri veya yüzey bozulmaları.
- ✓ Zemindeki şev duraysızlığı.
- ✓ Zemindeki şişme-büzülme potansiyeli.

Zemin iyileştirme yöntemlerinin seçimindeki etkenler şu şekilde sıralanabilir:

Zeminin özellikleri, zemindeki yeraltı suyu durumu, istenilen iyileştirmenin büyüklüğü, iyileştirmenin maliyeti, iyileştirme süresi, iyileştirmenin mevcut veya yeni yapı ile etkileşimi, İstenilen performansın büyüklüğü, dayanıklılık ve durabilite, Çevre etkileri, sözleşme, politika.

## **5.1 DİNAMİK KOMPAKSİYON**

Dinamik kompaksiyon; zemin yüzeyine 10 ile 40 ton arasındaki kütlelerin, 10-40 m aralığındaki değişik yüksekliklerden tekrarlı olarak düşürülmesidir. Ağırlığın düşürülmesi ile ortaya çıkan dinamik etki sayesinde, belirli noktalara defalarca düşürülmesi ile zemin sıkıştırılmış olur. Granüler zeminler, dolgu alanlar ve karstik ortamlar için uygundur.

## **5.2 SIKIŞTIRMA KAZIKLARI**

Sıkıştırma kazıkları yönteminde, zemin içerisine alt ucunda menteşeli bir plaka yer alan çelik boru, titreşim ve baskı ile sokulur. Ardından içine kum doldurulur ve boru dışarı çıkartılırken içerisindeki kuma basınçlı hava uygulanır. Bu sayede borunun etrafındaki zemin sıkışır. Bu işlemin tekrarı ile sıkıştırılmış kum kazıkları oluşturulur ve etrafındaki zemin de sıkışmış olur. Bu yöntem yumuşak zeminler için uygundur.

## **5.3 ÖN YÜKLEME METODU**

Sıkışabilir bir zemin üzerine yapılan bir yapının konsolidasyon oturması çok uzun yıllar almaktadır. Bu süre kabul edilemez derecede uzun olduğu için proje sahasındaki zemin tabakaları üzerine, kalıcı yapı inşasından önce geçici bir yükleme yapılarak zeminin konsolide olması sağlanır. Bu işlemden sonra proje sahasına yapılacak yapının ağırlığından daha fazla yük zemine uygulanır. Bu sayede gerilme artışları ile zamana bağlı oturmalar hızlandırılır. Oturmalar istenilen düzeye geldiğinde zemin üzerindeki yük kaldırılır. Böylece proje sahasına yapılan yapının kullanıma başlamasından sonra ki oturma önceden sağlanmış olur.

Bu yöntem killi, yumuşak ve aşırı sıkışabilir zeminlerde başarılı sonuçlar vermektedir.

## 5.4 TAŞ KOLONLAR

Taş kolonların amacı zemin üzerindeki yükleri taş kolon ve zeminin birlikte taşımasıdır. Taşımanın yanı sıra oturmanın azaltılmasına yardımcı olur ve sıvılaşmaya karşı önerilir. Taş kolon imalatında zemine 0,60-1,0 m çapında ve en fazla 20 m derinliğinde çeşitli yöntemlerle kuyular açılır. Kuyuya tabanından itibaren belirli aralıklarla granüler malzeme yerleştirilir ve her seferinde sıkıştırılarak rijit kolonlar elde edilir.

Taş kolon yöntemi her türlü zeminde uygulanabilir. Bu çalışma kapsamında zeminde sıvılaşma potansiyeli gözlenen arazi için uygulanan zemin iyileştirme yöntemi olarak taş kolon uygulaması seçilmiş olup ayrıntılarına Bölüm 3'te yer verilmiştir.

## 5.5 ENJEKSİYON

Enjeksiyon yöntemi süspansiyon ve solüsyon halindeki akışkan malzemelerin basınç altında zeminin içinde yer alan boşluklara enjekte edilmesinden oluşur. Amaç, zeminin geçirgenliğinin azaltılarak kayma mukavemetini arttırmak ve zemin danelerinin kenetlenmesi ile şekil değiştirme direncini arttırmaktır.

Permeasyon Enjeksiyonu: Permeasyon enjeksiyonunun amacı zeminin özelliklerinde ve hacminde önemli bir değişiklik olmadan zemin içindeki boşlukların enjeksiyonla doldurulmasıdır. Enjekte edilen madde zemin içerisinde donar. Bu sayede zemin bir bütün olarak iyileştirilir.

Kompaksiyon Enjeksiyonu: Zemin içerisine püskürtülen maddenin, belirli basınçlar altında zemin danelerini yer değiştirmeye zorlamasıdır. Burada amaç zemindeki gevşekliği azaltarak sıkıştırmaktır.

Jet Enjeksiyonu: Bu yöntemde iyi karışmış çimento şerbeti, delme makinesi aracılığıyla zeminin içine çok yüksek basınçla enjekte edilir. Enjekte edilirken var olan zemin yırtılır ve çimento zemin içine karışır. Sonuç olarak zeminin taşıma gücü artar. Zeminin elastisite modülü artar, permeabilitesi azalır.

## **5.6 DERİN KARIŞTIRMA**

Derin karıştırma yöntemi; jet veya burgular gibi özel karıştırma aletleri kullanılarak zemin içine kireç veya çimentonun karıŐtırılmasından oluşur. Sıvılaşmanın önlenmesi, rıhtım yapıları, kazı çukurlarının desteklenmesi, geçirimsizlik perdeleri, tünel zemininin desteklenmesi, temel takviyesi gibi birçok uygulama alanı vardır. Derin sıkıŐtırmanın amacı ıslak veya kuru zeminlerde kayma mukavemetini arttırmak, permeabiliteyi azaltmak ve zeminin dayanıklılığını arttırmaktır.

## **5.7 ZEMİNİN DONDURULMASI**

Bu yöntemde akma veya göçme eğiliminde olan zeminlerdeki yapıların yapımının kolaylaştırılması amacı ile zemin içinde soğutulmuş tuzlu su veya sıvı nitrojen kullanılarak boşluk suyu dondurulur. Geçici olarak kazı kenarlarının desteklenmesi, tünel kazılarının etrafının geçici olarak desteklenmesi, su akıŐının önlenmesi gibi uygulama alanları vardır.

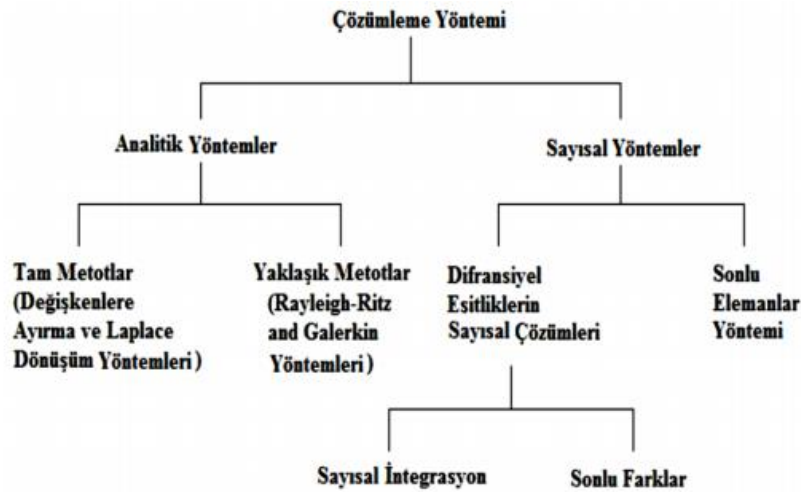
## BÖLÜM 6

### MODEL VE ANALİZ

#### 6.1 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Son yıllarda kuramsal ve deneysel biçimlerde zemin davranışlarının incelenmesi açısından sonlu elemanlar yöntemleri oldukça hız kazanmıştır. Şekil 6.1’de sonlu eleman programlarının işleyiş biçimlerini ayrıntılı bir şekilde görüyoruz [22].

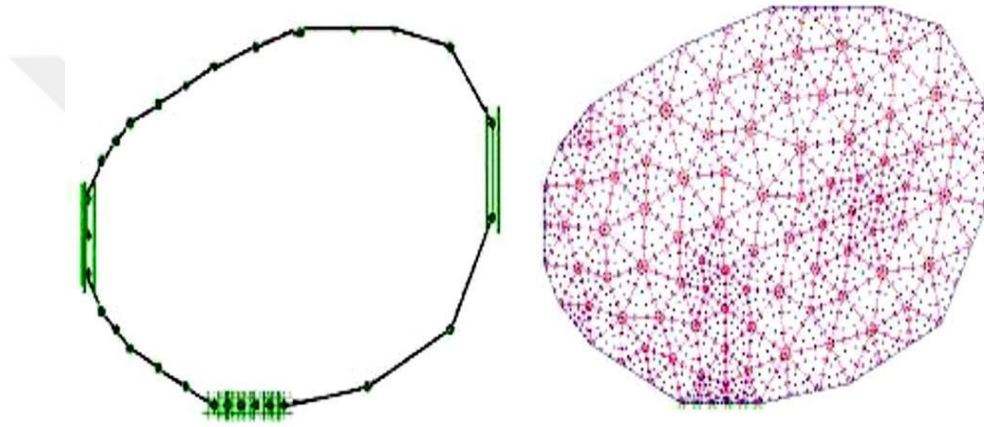
Sonlu elemanlar yönteminde lineer elastik hemfikir olarak kabul görmüştür [22]. Ancak bu yöntemle gerçekliğe yakın ve temiz sonuçlar elde etmek oldukça zordur. Bir diğer bakış açısıyla baktığımızda karmaşık yapıda olan (lineer olmayan heterojen yapıya sahip, ortama ve zamana bağlı davranış biçimi anizotropi) olduğundan sonuca ulaşmak oldukça zordur. Göz önüne alınan bu iki durum geoteknik mühendisliğine katkı sağlamıştır. Çözülmesi güç görünen problemlerde dahi çok basit bir şekilde çözüme ulaşılmaktadır. Bu çözüm yöntemleri, sayısal yöntemlerdir. Bu yöntemleri incelediğimizde sonlu elemanlar diğer yaklaşımlara göre daha ön plandadır [22].



Şekil 6.1 Analiz metotları.

Zeinkiewicz matematiksel olarak sonlu elemanlar yöntemini tanımlayarak sistemin veya yapının çözümünü tarif etmiştir.

Sürekli bir sistem veya yapı kendi içerisinde karmaşık olan noktaları daha basit olacak şekilde modellemek ve daha karmaşık olan sürekli diferansiyel denklemlerini daha kolay olan lineer denklem sistemine dönüştürmüştür [23]. Herhangi bir sonlu eleman yönteminde sistem veya yapı, birbiriyle ilintili olmak kaydıyla birden çok bölüme ayrılarak çözüme ulaşılmaktadır. Sistem veya yapı düzensiz ve farklı kalınlıkları sahip olabilir, bu yolla da çözüme ulaşılabilir. Şekil 6.2’de sonlu elemanlar yöntemi çalışma mekanizmalarına yer verilmiştir.



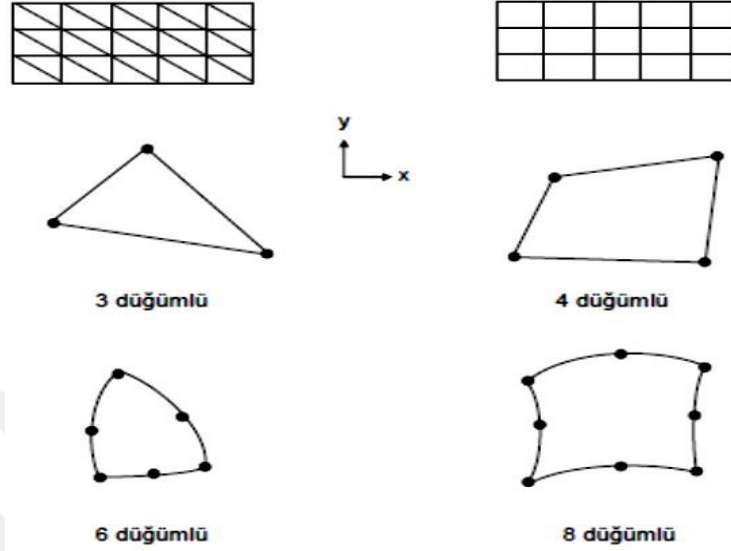
**Şekil 6.2** Sonlu elemanlar yöntemi çalışma mekanizmasından bir görünüm [25].

Bu sistemin içinde farklı yer değişimleri, dönmeler ve eğimler yer alabilir. Sistem veya yapıda sonsuz sayıda noktalar sonsuz sayıda gerilim yaratır. Bu gibi problemlerde serbestlik derecesi sonsuzdur [24].

Çözüm bölgesini oluşturan ilk adım elemanlarına ayırmaktır. Sonrasında sistem içerisindeki elemanlar eşdeğer sonlu elemanlar ağına dönüştürülür. Dönüştürülen elemanlar bir, iki ve üç boyutlu seçilip bilinmeyenleri de dikkate alınarak sonuca gidilmelidir. Aşağıda Şekil 6.3’te iki ve üç boyutlu problemlerin genelde üçgen ya da dörtgen olduğunu görüyoruz. “Node” adıyla birbirine bağlı düğüm noktaları vardır. Düğüm noktaları düz yüzeylerde eleman köşelerine yerleştirilir. Yüzeyin orta kısmına yerleştirilen düğümler ise eğrisel yüzeylerdedir [23, 26].

Bütün ağ modelinin oluşmasını sağlayan komşu elemanlar sonsuz sayıda nokta ile bağlıdırlar. Ancak sonlu elemanlar metodunda elemanlar düğüm noktalarıyla bağlanmışlardır. Bu sonuca

göre deplasmanların uygunluğu düğüm noktalarına bağlıdır. Karmaşık ve büyük sistemlerde daha net veriler elde etmek için daha çok elemanlara ihtiyaç duyulması dezavantaj gibi algılansa da bilgisayar sayesinde basit bir şekilde çözülmektedir.



Şekil 6.3 Tipik 2 boyutlu elemanların gösterimi [23].

Bir sonraki aşamada ise, bilinmeyen elemanların dağılım fonksiyonları tespit edilir. Düğüm noktaları sistem veya yapı bölgelerinde büyüklüğü bilinmeyen (şekil değişimi, deplasman vb.) gibi dizilimini saptamak için matematiksel bir işlevi bulmamızı sağlar [24, 27]. Sonlu elemanlar yaklaşımı ilk olarak 1966 tarihinde kullanılmıştır. Yine 1966 yılında Deene ve Reyes, bu yaklaşımını yer altında bulunan masif kaya kazılarında kullanmışlardır [11]. Sonra elemanlar yönteminde programların eksiksiz çalışması için zeminin fiziksel dayanımı ve özellikleri, zeminde oluşan gerilme ve şekil değiştirme gibi verilerin eksiksiz ve doğru girilmesi önem arz eder. Analiz sonucunun doğruluğu düzgün sonlu eleman ağı seçilimine bağlıdır. Yapılan analiz sonucunda yeraltı suyu akışı, boşluk suyu basınçları, oluşan gerilmeler düşey ve yanal hareketler zeminin umumi durumu hakkında bilgiler sunar [22, 23]. Sonlu eleman yaklaşımına bağlı yapılan bu çözümlemede Plaxis 2D programı kullanılmıştır. Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan problemlerin, iki ve üç boyutlu olacak şekilde Plaxis 2D programı aracılığıyla deformasyon ve stabilite çözümü yapılabilir. Taş kolonlar istenilen şekilde modellenebilir.

Aşağıda Plaxis 2D programının özellikleri detaylı biçimde anlatılmaktadır.

## **6.2 PLAXİS SONLU ELEMANLAR PROGRAMININ TANIMI**

Plaxis (Finite Element Code for Rock and Soil Analysis) farklı geoteknik sorunlarında, sonlu elemanlar yaklaşımından yararlanarak, deformasyon ve stabilite çözümleri yapan bilgisayar yazılımıdır.

İlk kez 1987 yılında Hollanda'da Delft teknik Üniversitesi'nde kullanılmış olup, yumuşak zemin üzerinde nehir dolgularının sonlu elemanlar yaklaşımından yararlanarak çözümlenebilmesi için planlanmış, zamanla Geoteknik mühendisliğinin karmaşık yapıdaki problemlerinin giderilmesi için geliştirilmiştir.

1993 yılında yazılım haline getirilmiştir. Windows sürümü ise 1998 yılında piyasaya sürülmüştür.

Plaxis programının son yıllardaki gelişmeleri sayesinde geoteknik mühendisliği alanındaki problemlerin yanı sıra, zemin-yapı etkileşimi, şekil-gerilme, değiştirme, konsolidasyon, deprem yükü altında zeminin tepkimesi, zeminin genel davranışları gibi maddelerin saptanmasında da kullanılmaktadır [11].

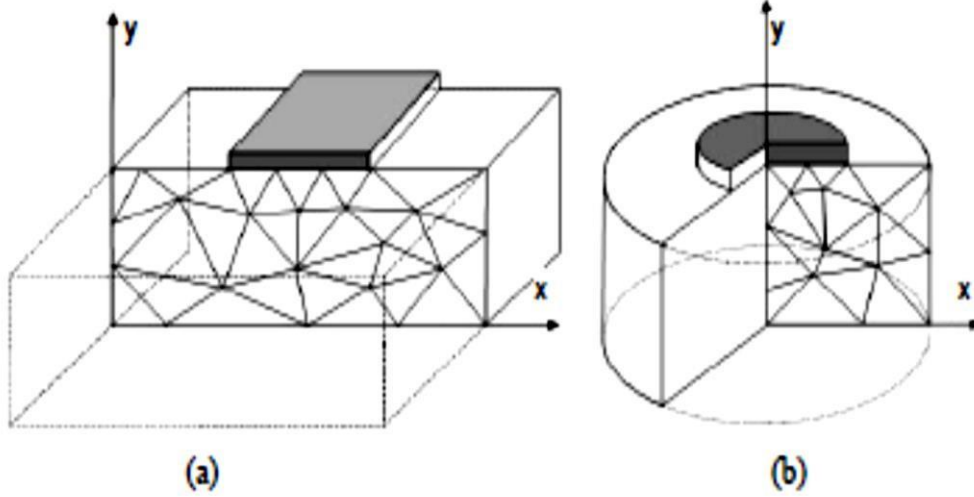
Bu program geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan herhangi bir problemde hangi adım ve yollar kullanılarak çözüme ulaşılabileceğini anlatmaktadır.

### **6.2.1 Geometrik Modelin Oluşturulması**

Özel bir grafik ortamı sayesinde programda zemin tabakaları, yapılar, kazı aşamaları, sınır ve yük şartlarının program girişi oluşturulur. Oluşturulan özel grafik sayesinde model tamamı ile gerçek pozisyona elverişli şekilde oluşturulmuş olur. Program iki adet modelleme seçeneği sunar.

Problem tipi baz alınarak düzlem şekil değişimi (Plane strain model) veya aksenal simetrik (Axisymmetry model) dediğimiz geometri şartlarından biri kullanılır (Şekil 6.4) [28].





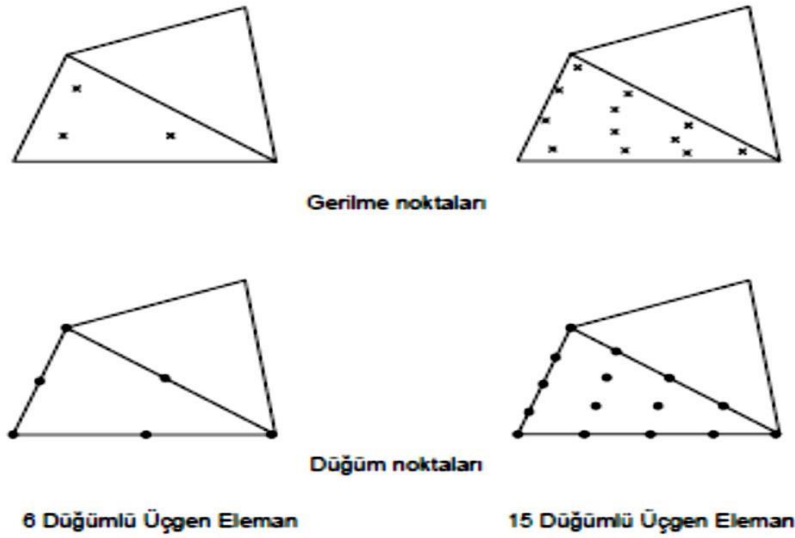
**Şekil 6.4** a) Planestrain model örneği (düzlem şekil değiştirme), b)Axisymmetry model örneği (eksenel simetrik) [28].

Yukarıdaki iki model X ve Y eksenleri iki serbestlik dereceli olarak çözümlenir. Sayısal modellerin belirlenip analiz edilmesinde PlaneStrain modeli kullanılır.

### 6.2.2 Zemin Eleman Tipleri

Zemin ortamı biçimlendirilmesi iki boyutlu üçgen öğeler ile açıklanır. İki farklı tipte üçgen öge kullanılır. Bu üçgen öğeler 6 ve 15 düğüm noktalıdır.

Aşağıda Şekil 6.5'te altı ve 15 düğüm noktalı öğeler için model görselleri verilmiştir. Düğüm noktalarında küçük çaplarda hesaplama yapılacaksa 6 düğüm noktalı, daha büyük çaplarda ve daha hızlı hesaplama yapılacaksa 15 düğüm noktalı öğelerin seçimi uygundur. Görüldüğü gibi sonlu eleman ağında 15 düğüm noktalı öğeler 6 düğüm noktalı öğelerden dahahassas çözümlere yapmaktadır [28].



**Şekil 6.5** 6 ve 15 Düğüm noktalı elemanlar için gerilme ve düğüm noktaları [28].

### 6.2.3 Mesh (Ağ)

Plaxis sonlu eleman programının ağ mantığı şu şekildedir. Model küçük öğelere ayrılır ve birbiriyle ilişkili olacak biçimde çözüme ulaştırılır. Sistemin kolay çözümlenmesi için bölünmüş alanlar üç kenarlıdır. Elde edilen analizlerin doğruluğu model üzerinde kurulan ağa göre değişkenlik göstermektedir. Ağ oluşturulmasında başka bir önemli nokta, gerilme yoğunluğunun artışı veya önem arz eden kısımlarda analizlerin doğruluk payı için ağın sıklık düzeyinin artırılmasıdır. Şevin eğim yüzeyi, geotekstil malzeme çevresi yükün etki ettiği yüzey ve temelin alt ağ sıklığının artırılması gereken yerlerdir. Ağ parametrelerinin ortalama boyu  $L_e$ 'dir.

Bu parametre model geometri ölçü ve büyüklük faktörüne ( $n_c$ ) sadık kalarak değişkenlik göstermektedir. Ortalama tane büyüklüğü, ortalama öge boyu ve ağ parametre değerleri ilişkisi aşağıdaki gibidir [29].

$$L_e = \sqrt{\frac{(x_{max}-x_{min})(y_{max}-y_{min})}{n_c}} \quad (6.1)$$

Burada  $y_{max}$ ,  $y_{min}$ ,  $x_{max}$ , ve  $x_{min}$  model geometrisinin dış uzunluklarıdır. Tane büyüklüğü faktörü  $n_c$  ise aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

**Çizelge 6.1** Tane büyüklüğü faktörü,  $n_c$  değerleri.

|               |             |                      |
|---------------|-------------|----------------------|
| Çoksık        | $n_c = 400$ | 1000 elemancivarında |
| Sık           | $n_c = 200$ | 500 elemancivarında  |
| Ortasıklık    | $n_c = 100$ | 250 elemancivarında  |
| Normal sıklık | $n_c = 50$  | 100 elemancivarında  |
| Azsıklık      | $n_c = 25$  | 50 elemancivarında   |

#### **6.2.4 Zemin Davranışının Modellenmesi**

Zeminin plaxis programında tanımlanması; lineer Elastic model (LE), Mohr-Coulomb modeli (MC), SoftSoilCreep modeli (SSC), HardeningSoil model with Small-StrainStiffness (HSsmall), Modified Cam-clay model (MCC) gibi modeller sayesinde gerçekleşir. Aşağıda detaylı açıklamaya yer verilmiştir [11].

##### **6.2.4.1 LinerElastic Zemin Modeli**

Kaya gibi sert zeminlerin modellenmesinde zemin 3 veya 5 düğüm noktalı olarak modellenir. Ayrıca Hooke yasasına sadık İzotropik lineer elastik malzeme olarak kabul edilmiştir. Modelleme sırasında elastisitemodülü (E) poisson oranı ( $\mu$ ) değerleri girilir.

##### **6.2.4.2 Mohr - Coulomb (MC) Zemin Modeli**

Elasto-tam plastik zemin davranışı modellenmesi Mohr- Coulomb (MC) modelinde yapılır. Zemin modelinin doğru çıkması için zemindeki yatay gerilime karşılık uygun olan K0 değeri girilmelidir. Elastisitemodülü (E), sürtünme açısı ( $\phi$ ), Poisson oranı ( $\mu$ ), dilatasyon açısı ( $\psi$ ) ve kohezyon (c) değerleri giriş parametresi olarak kullanılır.

##### **6.2.4.3 Hardening-Soil (HS) Modeli**

Bu Model farklı türlerdeki sert veya yumuşak zeminlerin davranışlarını modellemek için kullanılır. HS zemin modeli MC zemin modeline göre oldukça geliştirilmiştir. HS zemin modelinde gerilim sonucu rijitlikmodülü önem arz eder, çünkü zemin rijitliği basınçla hareket eder ve artış gösterir. MC modelde benzer şekilde gerilme seviyesi sürtünme açısı ( $\phi$ ), kohezyon (c) ve dilatasyon açısı ( $\psi$ ) ile belirlenir. Bu modelde çok fazla hesaplama adımı

olduğundan yapılan analiz sonuçları uzun zaman alır. Drenajlı üç eksenli basınç deneyi HS zemin modelinde saptanan eksenel deformasyon-deviator gerilme durumunun yaklaşık hiperbol şeklinde olmasına bağlıdır. HS small modelinde ise önceki yükleme durumu ve rolatifrijitlik matrisi hesapları da katarak çözüme ulaşılır. Fakat yumuşama ve gevşeme gibi sorunların meydana getirdiği durumlarda hesaba katılmayan tekrarlı yükler olduğu için kullanılması uygun değildir. Hesap adımları Hs modeline göre daha fazla olduğu için hesaplamaların sonuçlanması daha uzun sürmektedir.

#### **6.2.4.4 Soft Soil Zemin Modeli**

Zemin mekaniğine baktığımızda Killi siltler yumuşak zeminler ve turba zeminler normal konsolide killer olarak tarif edilir. Bu tarz zeminlerin diğer zeminlere oranla daha yüksek derecelere sahip sıkışabilirlik özelliği vardır. Bundan dolayı softsoil zemin modeli (SS) bu tür zeminlerde kullanılır. Modelde, içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), kohezyon (c), dilatasyon açısı ( $\psi$ ), modifiye şişme indeksi ( $K^*$ ) ve modifiye sıkışma indeksi ( $\lambda^*$ ) giriş parametreleri olarak kullanılır.

#### **6.2.4.5 Soft Soil Creep Zemin Modeli**

Diğer SS modelindeki gibi SSC modelinde de turba ve killi siltlerkonsolide gibi yumuşak zeminlerin zamana bağlı kalarak davranışları modellenir. Bu modelde dolgu ve temellerdeki zamanla ortaya çıkan oturma problemleri, tünel ve derin kazılar gibi zemin üzerindeki yük boşalma problemlerinin giderilmesi için kullanılmaktadır. Modelin giriş parametreleri; kohezyon (c), dilatasyon ( $\psi$ ), içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), modifiye şişme indeksi, modifiye sıkışma indeksi, modifiye sürtünme indeksi.

#### **6.2.4.6 Jointed - Rock Modeli (JR)**

Plastik kayma dediğimiz sadece sınırlı düzeyde sayıda kayma doğrultularında meydana gelen anizotropik elasto-plastik modelinin adıdır. Bu Model tabaka veya birleşik kaya davranışlarının modellenmesi için kullanılmaktadır. JR modelinin giriş parametreleri; elastisitemodülü (E), kohezyon (c), poisson oranı ( $\nu$ ), dilatasyon açısı ( $\psi$ ) ve içsel sürtünme açısıdır ( $\phi$ ).

### 6.3 SAYISAL MODEL

İnşaat sahası değerlendirme sonucuna göre; bina yüklerinden dolayı oluşan ve temel zeminine aktarılacak yükler ile gerilmeler altında, zeminin taşıma gücü, oturma değerleri ve özellikle potansiyel sıvılaşma risklerine karşı yetersiz olduğu belirtilmiştir.

Bu değerlendirmeye bağlı, taş kolon yöntemi kullanılarak yetersiz zemin özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Arazi için yapılan zemin etütleri ve geoteknik raporlardan parametreler elde edilmiştir.

Sayısal modelde düzlemsel şekil değiştirme (planestrain) esaslı, 15 düğüm noktalı üçgensel elemanlarla temsil edilmiştir.

Modelin sınır koşulları standart sınır koşulları kabul edilmiştir. Düşey yönde her iki doğrultuda deplasmanlar kısıtlanmış, yatay yönde ise düşer deformasyona izin verilmiştir.

Model tabanındaki düğüm noktaları sabit yani yatay ve düşey yönde hareketi engellenmiş olarak alınmıştır.

Programda zemin parametrelerini davranışları CL-ML, SM gibi zeminlerin davranışını modelleyen ve düzlem deformasyon şartlarının geçerli olduğu kabul eden Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Mohr-Coulomb modelinde beş parametreye ihtiyaç vardır; elastisitemodülü, poisson oranı, zeminin kayma direnci açısı, kohezyon ve genleşme açısı.

Gerekli zemin parametrelerini belirlemek amacıyla araziden alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan elek analizi ve kıvam limitleri deneylerinden ve SPT deney sonuçlarından yararlanılmıştır.

Bu çalışmada uygulama alanında planlanan yapının, zemin tarafından mevcut yapı yükleri etkisinde nasıl davranış göstereceği önceden belirlenmiş ve modelde mevcut yapı, arazideki temel derinliğinde imal edilmiş ve farklı kat adetlerinde yapı yükünü yansıtan yayılı yük tanımı altında düşey yer değiştirme değerleri tespit edilmiştir.

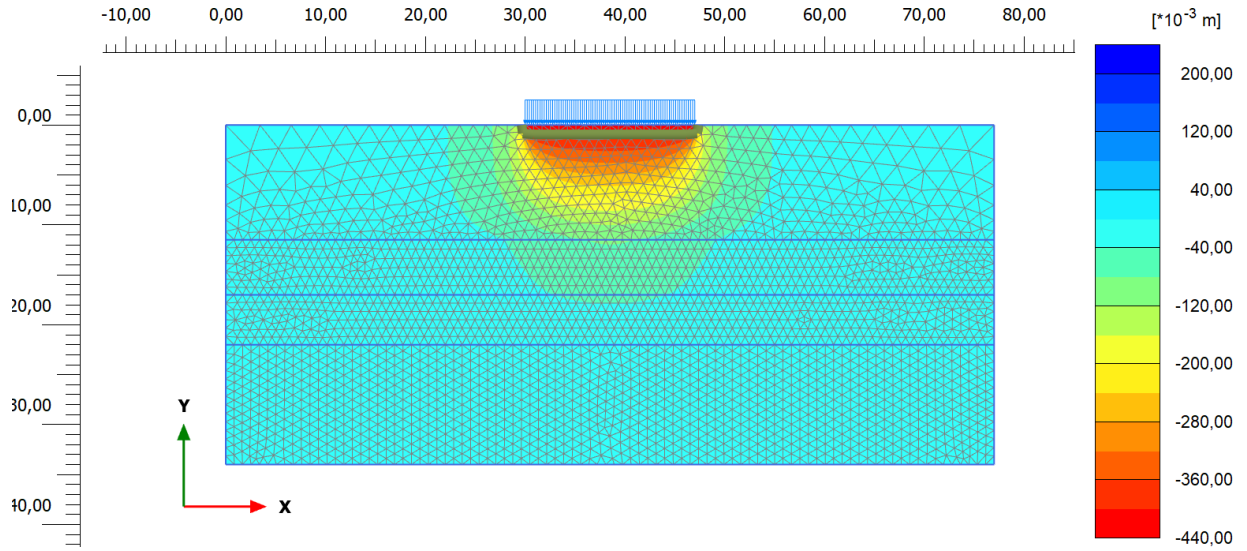
Programda zemin parametrelerini davranışları CL-ML, SM gibi zeminlerin davranışını modelleyen ve düzlem deformasyon şartlarının geçerli olduğu kabul eden **Mohr Coulomb zemin** modeli kullanılmıştır. Mohr-Coulomb modelinde beş parametreye ihtiyaç vardır; E Elastisite modülü, poisson oranı, zeminin kayma direnci açısı, kohezyon ve genişleme açısı. Bu değerler aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

**Çizelge 6.2** Mhor-Coulomb zemin modeli için gerekli parametreler.

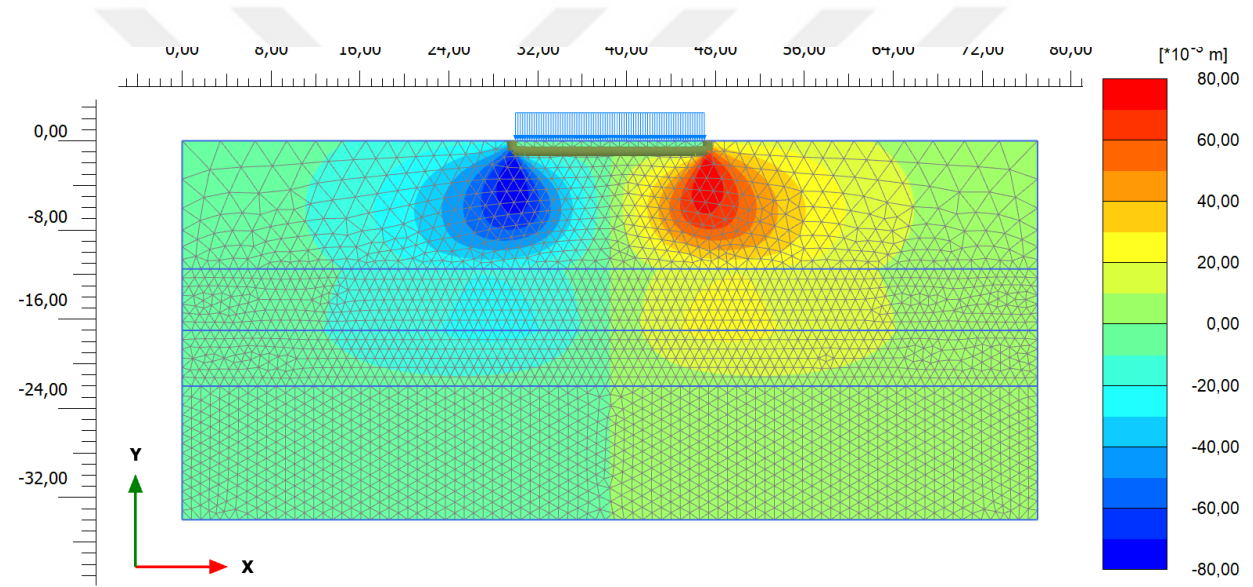
| Malzeme                      | model | kohezyon<br>( $c'$ )<br>kN/m <sup>2</sup> | ( $\varphi'$ ) | $E_{ref}$<br>kN/m <sup>2</sup> | $\gamma_{doygun}$<br>kN/m <sup>3</sup> | geçirimlilik<br>$k_x, k_y$ | Vs m/s | Vp m/s |
|------------------------------|-------|---|----------------|--------------------------------|--|----------------------------|--------|--------|
| <b>SİİTLİ MALZEME</b>        | MC    | 2   | 31             | 3*10 <sup>4</sup>              | 16                                     | 0.25                       | 83     | 165    |
| <b>Kumlu SİİTLİ zemin 1</b>  | MC    | 40  | 27             | 1.5*10 <sup>4</sup>            | 20                                     | 0.75                       | 101    | 138    |
| <b>Kumlu MALZEME zemin 2</b> | MC    | 30  | 27             | 1.5*10 <sup>4</sup>            | 20                                     | 0.75                       | 121    | 160    |
| <b>KUMLU Çakıllı malzeme</b> | MC    | 10  | 35             | 150*10 <sup>4</sup>            | 21                                     | 1.0                        | 161    | 335    |

### 6.3.1 Doğal Durum için Sonlu Elemanlar Analizi

Doğal yani iyileştirmesiz durum için; mevcut yapı yükleri yüklendiğinde modelde elde edilen maksimum oturmalar 26 cm civarında ve yapı temeli köşe noktalarında oluşmuştur. Bu değer izin verilebilir oturma değerlerinden fazladır. Dolayısıyla bu değerdeki bir oturmanın elde edildiği zemindeki boşluklu yapının uygun görülen zemin iyileştirme yöntemi ile sıkıştırılması hedeflenmiştir. Aşağıda doğal durumdaki zeminin yatay ve düşey deformasyonlarına yer verilmiştir.



Şekil 6.6 Doğal zeminin yatay deformasyonu.

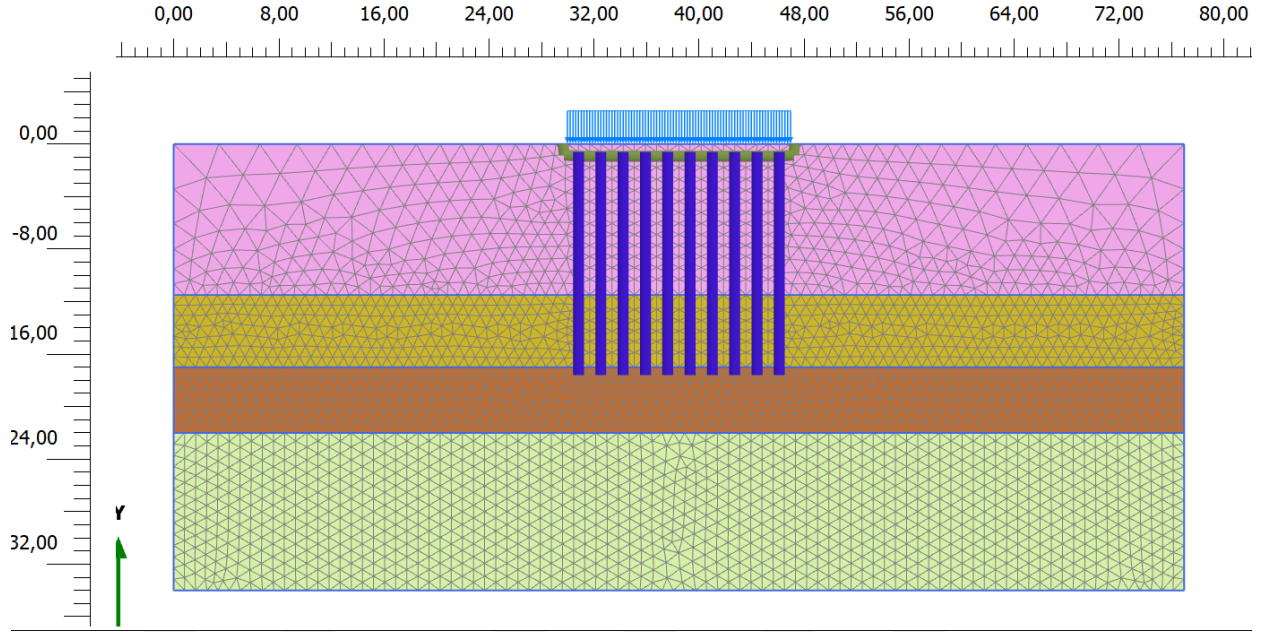


Şekil 6.7 Doğal zeminin yatay deformasyonu.

## 6.3.2 İyileştirilmiş Zemin İçin Sonlu Elemanlar Analizi

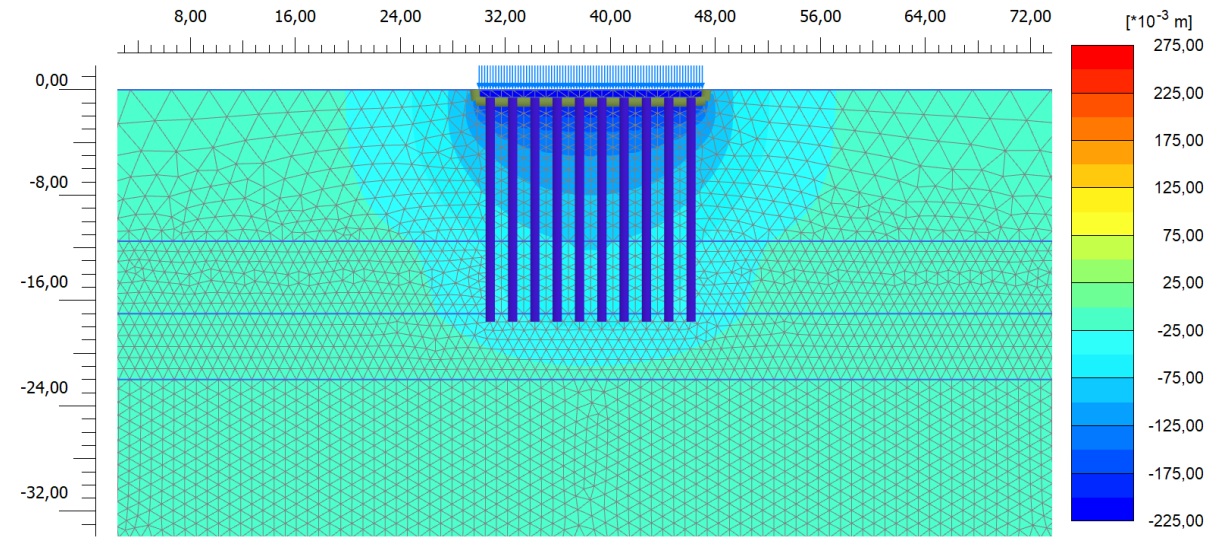
### 6.3.2.1 Taş Kolon Yerleşimi

Hasarlı yapı zemininin iyileştirilmesi için kullanılacak olan taş kolonlar; 3,0 m aralıklar ile yerleştirilmiş, 1,00 m çapında ve 20,0 m boyunda modellenmiştir. Aşağıda uygulanan taş kolonların yerleşimi gösterilmektedir.



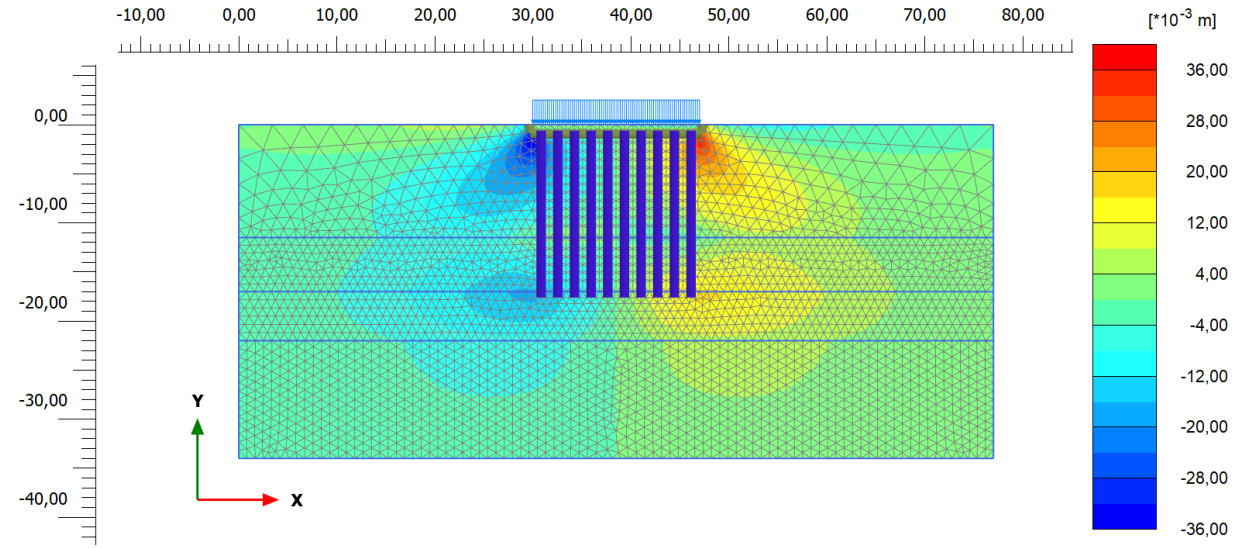
**Şekil 6.8** Doğal zemine yerleştirilen taş kolonlar.

Bu adımda doğal zemin üzerine modellenen taş kolonlar ilave edilmiştir. Zeminde iyileştirme yapılması durumunda yayılı yük tanımı altındaki durum değerlendirilmiştir. Bu durumda elde edilen oturma değeri 7.9 cm değerine gerilemiştir. Aşağıda iyileştirilmiş zeminin yatay ve düşey deformasyonları gösterilmiştir.



**Şekil 6.9** Taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde düşey deformasyon.





Şekil 6.10 Taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde yatay deformasyon.

### 6.3.3 İyileşme Öncesi ve Sonrası Yer Değişikliklerinin Karşılaştırılması

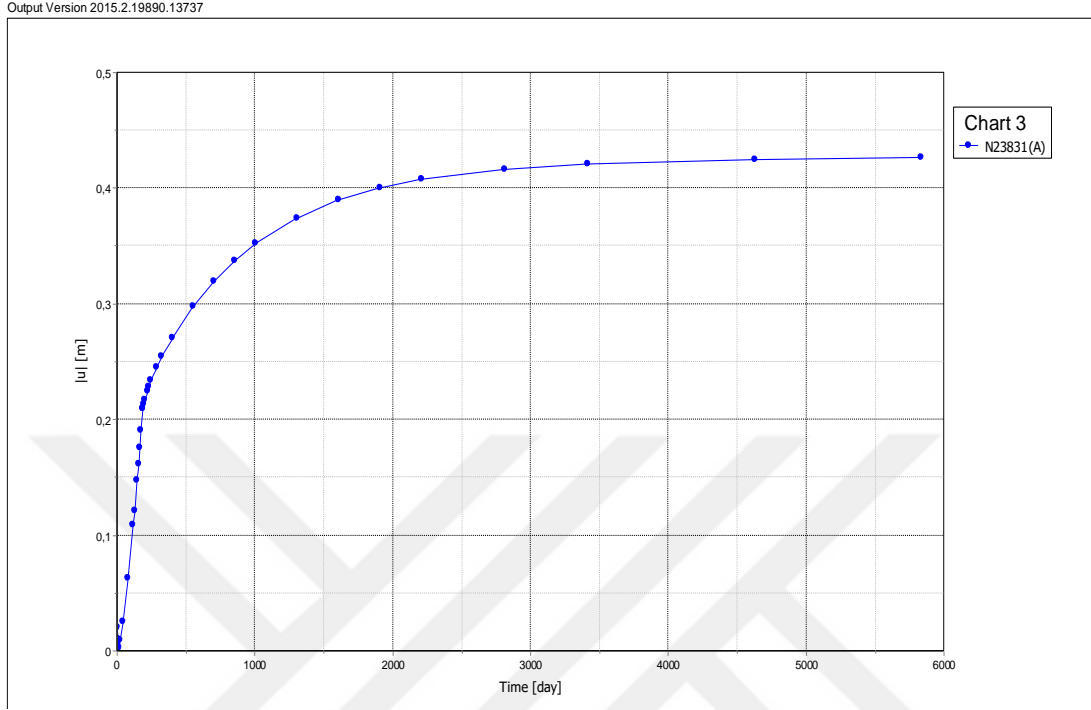
Analiz sonuç grafiklerini görmek için model üzerinde aşağıda gösterilen düğüm noktalarından A noktası için oturma zaman eğrisi çizilerek; belirlenen referans noktasında arazideki doğal durum ve iyileştirilmiş durum karşılaştırılmıştır.



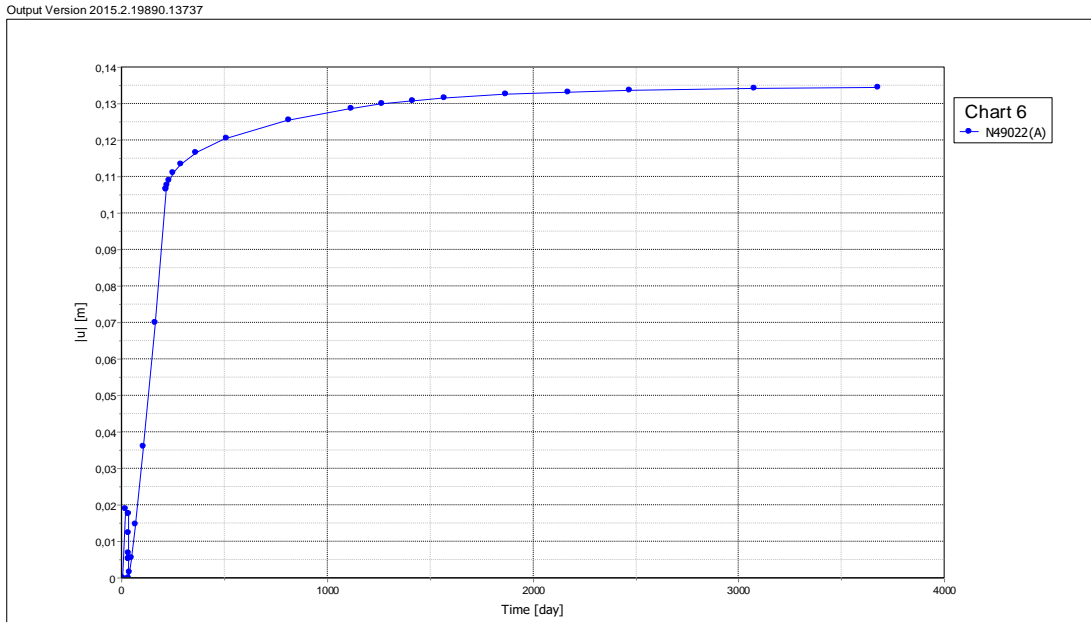
Şekil 6.11 Modelde seçilen referans noktası "A".

Sayısal model üzerinde seçilen A noktasında elde edilen toplam oturma zaman grafiğinde iyileştirmesiz durum için oturma değeri 0,46 cm olarak gözükmemektedir (Şekil 6.12). İyileştirilmiş model analiz edildiğinde ise oturma değeri 0,136 cm olarak elde edilmiştir (Şekil 6.13).

Sonuç olarak zeminde iyileştirme öncesi ve sonrası kıyaslanarak yer değiştirmeler gözlemlenmiş ve iyileştirme sonrası yer değiştirmelerin azaldığı görülmüştür.



şekil 6.12 Doğal zeminin oturma-zaman grafiği.



şekil 6.13 İyileştirilmiş zeminin oturma-zaman grafiği.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında; yapılaşmaya uygun olmayan, deprem riski taşıyan bir zeminde uygulanan zemin iyileştirme yönteminin uygulanabilirliği, gerçek parametreler ile sonlu elemanlara dayalı programda modellenerek analiz edilmiştir ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada uygulama alanında planlanan yapının, zemin tarafından mevcut yapı yükleri etkisinde nasıl davranış göstereceği önceden belirlenmiş ve modelde mevcut yapı, arazideki temel derinliğinde imal edilmiş ve farklı kat adetlerinde yapı yükünü yansıtan yayılı yük tanımı altında düşey yer değiştirme değerleri tespit edilmiştir.

Doğal iyileştirmesiz durum için; mevcut yapı yükleri yüklendiğinde modelde elde edilen maksimum oturmalar 26 cm civarında ve yapı temeli köşe noktalarında oluşmuştur. Bu değer izin verilebilir oturma değerlerinden fazladır. Dolayısıyla bu değerdeki bir oturmanın elde edildiği zemindeki boşluklu yapının uygun görülen zemin iyileştirme yöntemi ile sıkıştırılması hedeflenmiştir.

Aynı model bir sonraki adımda taş kolonlu zemin iyileştirmesi yapılması durumunda yayılı yük tanımı altındaki durumda değerlendirilmiştir. Bu durumda elde edilen oturma değeri 7,9 cm değerine gerilemiştir.

Belirtilen temel için boyuna kesit alındığında, bu kesitteki doğal durum ve iyileştirilmiş durumdaki yerdeğiştirme değerleri, zeminde meydana gelen toplam oturma miktarında azalmaya neden olmuştur.

Sonuç olarak, seçilmiş proje alanında sınırlı taşıyıcı potansiyeli taşıyan zeminin, iyileştirme yöntemlerinden biri olan taş kolon uygulanması durumunda nasıl davranış göstereceği arazi ve laboratuvar deneyleri ardından statik durum için sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek

analiz edilmiştir. Taş kolon uygulanan zeminin taşıma kapasitesinin arttığı, binada oturmaların azaldığı gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılması önerilen taş kolon uygulamasının bu özellikteki zemin parametrelerine sahip durumdaki zeminlerde kullanılabilirliği gösterilmiştir.

.



## KAYNAKLAR

- [1] **Durgunoğlu T** (1992) Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2: 2-4.
- [2] **Hughes J M O, Withers N J and Greenwood D A** (1975) A Field Trial of Reinforcing Effect of a Stone Column in Soil. *Geotechnique*, 25 (1): 31-34.
- [3] **Lee J S and Pande G N** (1994) Analysis of Stone Columns Reinforced Foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12: 1001-1020.
- [4] **Mitchell J K and Wentz F J** (1991) *Performance of improved ground during the Loma Prieta Earthquake*, University of California, Berkeley, UCB/EERC Report 91/12, 93 pp.
- [5] **Baez J I and Martin G R** (1995) Permeability and shear wave velocity of vibro replacement stone columns, Soil Improvement for Earthquake Hazard Mitigation. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 49: 66-81.
- [6] **Mitchell J K, Baxter C D P and Munson** (1995) T.C. Performance of improved ground during earthquakes, Soil improvement for earthquake hazard mitigation. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 49: 1-36.
- [7] **Selçuk L** (2009) Zemin Sıvılaşmasına Karşı Optimum Taş Kolon Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi, *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 175 s.
- [8] **Kim J Man, Son S W, Mahmood K and Ryu J H** (2012) Site Response and Shear Behavior of Stone Column-Improved Ground under Seismic Loading, *15 WCEE*, 24-28 September, Lisbon, Portugal.
- [9] **Ryu J H and Kim J M** (2013) Seismic Performance of Stone-Column- Reinforced Marine Soft Soil. *EJGE*, 18: 497-508.
- [10] **Kurt E** (2011) Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına Ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 152 s.
- [11] **Vekli M** (2009) Taş Kolon ile Şev İyileştirmesinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, *Doktora tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 199 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Barksdale R D and Bachus R C** (1983) Design and Construction of Stone Columns: Vol.1-2, Report No. FHWA/RD-83/026, *U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration*, 6-55.
- [13] **Ataman Ş** (2011) Darbeli Taş Kolonlar (Geopier) ile İyileştirilmiş Zeminlerin Model Deneylerle İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 130 s.
- [14] **Greenwood D A and Kirsch K** (1984) Specialist Ground Treatment by Vibratory and Dynamic Methods, *Satae of the Art Report, Pilling and Ground Treatment*, Thomas Telford, London, 17-45.
- [15] **Mathav M R and Vitkar P P** (1978) Strip footing on weak clay stabilized with a granular trench or pile. *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (4): 605-609.
- [16] **Barksdale R D and Bachus R C** (1983) Design and Construction of Stone Columns, *Federal Highway Administration*, Vol. 1, Washington, 194 pp.
- [17] **Hughes J M O and Withers N J** (1974) Reinforcing of Soft Cohesive Soils With Stone Columns. *Ground Engineering*, 7: 42-49.
- [18] **Vesic A S** (1972) Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98: 265- 290.
- [19] **Mathav M R and Vitkar P P** (1978) Strip footing on weak clay stabilized with a granular trench or pile. *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (4): 605-609.
- [20] **Bell J R** (1978) Future Advances in Soil Placement and Improvement. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104 (1): 1-10.
- [21] **Sowers G F** (1979) *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering*, 4th Edition, McMillian Publishing Co, New York.
- [22] **Rao S S** (2005) *The Finite Element Method in Engineering*, Pergamon Pres, Oxford, 625 pp.
- [23] **Zienkiewicz O C** (1977) *The Finite-Element Method*. 3rd ed, New York, McGrawHill Book Co, 787 pp.
- [24] **Frank L S** (1985) *Applied Finite Element Analysis for Engineers*, Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, Holt, 658 pp.
- [25] **Brinkgreve R** (2002) *PLAXIS Version 8*, finite element code for soil and rock analyses, A A Balkema, Netherlands.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [26] **Tekin A** (2011) Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Limit denge Yöntemi ile Şev Stabilite Analizleri, *Yüksek lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 154 s.
- [27] **Yavuz V S** (2012) Şev Stabilitesi Problemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İki ve Üç boyutlu Analizleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 147 s.
- [28] **Plaxis 2D (2AE)** (2006) *Finite Element Code For Soil Rock Analyses, User Manual*, Delf, 202 pp.
- [29] **Rathje E M and Bray J D** (2001) One and two dimensional seismic analysis of solid waste landfills. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (4): 850–862.





## ÖZGEÇMİŞ

Neslihan ALTUN 1992 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2011 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 2016 yılında mezun oldu. 2016-2019 yılları arasında 2 farklı şirkette kontrol mühendisi olarak çalıştı. 2017 bahar döneminde Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD (Geoteknik) yüksek lisans eğitimine başladı.

### **İLETİŞİM BİLGİLERİ:**

n.altun92@gmail.com