

**DOLGULARIN SIKIŞTIRILMASINDA ZEMİN CİNS VE  
ÖZELLİKLERİNE UYGUN SIKIŞTIRICININ SEÇİMİ**

**Hulusi KEÇETEPEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2007  
ANKARA**

Hulusi KEÇETEPEN tarafından hazırlanan DOLGULARIN SIKIŞTIRILMASINDA ZEMİN CİNS VE ÖZELLİKLERİNE UYGUN SIKIŞTIRICININ SEÇİMİ üzerine bir araştırma adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet ORHAN  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Recep KANIT

Üye : Doç. Dr. Mehmet ORHAN

Üye : Doç. Dr. Seyhan FIRAT

Tarih : 08 / 05 /2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hulusi KEÇETEPEN

**DOLGULARIN SIKIŞTIRILMASINDA ZEMİN CİNS VE  
ÖZELLİKLERİNE UYGUN SIKIŞTIRICININ SEÇİMİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hulusi KEÇETEPEN**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Mayıs 2007**

**ÖZET**

Üzerinde yaşadığımız yer kabuğu her türlü yapının temeli olduğu gibi, özelliklerinin iyileştirilmesi ile birlikte hava alanları, limanlar, su tutma yapıları, ulaşım yolları vb. yapıların inşa malzemesidir. Bu nedenle yerkabuğunu oluşturan zemin ve kayaların taşıma gücü, mukavemeti, hacimsel davranışlar, permeabilite ve dren kabiliyeti, don duyarlılığı, sıkışabilirliği vb. mühendislik özelliklerinin bilinmesi ve inşa edilecek yapı için aranan fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir.

İstenilen mühendislik özelliklerine sahip olmayan zeminler, çeşitli yöntem ve tekniklerle (kompaksiyon, drenaj, stabilizasyon teknikleri) ıslah edilerek yeterince stabil bir hale dönüştürülür. Zemin ıslah yöntemleri içerisinde kompaksiyon en kolay, en ucuz ve özellikle en etkin olanıdır.

Dolgu yapımında yeterli kompaksiyon sağlanmazsa, dolgu zamanla kendi ağırlığı üzerine gelen ölü ve hareketli yüklerin tesiri ile deformasyona uğrayarak kabul edilebilir oturmalarından daha fazla oturmaya neden olacaktır. Bu da o yapının proje ömrünü azalttığı gibi yollarda kaplamanın da bozulmasına sebep olarak konforu ve trafik güvenliğini bozacaktır.

**Zeminlerin sıkıştırılmasından önce; zeminin cins ve özelliğine uygun sıkıştırıcıların seçimi, tabaka kalınlığı, geçiş sayısı ve hızının doğru olarak belirlenmesi sıkıştırma veriminin artması için gereklidir. Aksi halde işin zamanında tamamlanamaması, yeterli kompaksiyonun elde edilememesi veya ekonomik olmayan geçiş sayıları gibi sonuçlar doğurur.**

**Bu tez kapsamında; dolgu yapımında kullanılacak zeminler ve özellikleri, statik ve dinamik enerji veren kompaksiyon ekipmanlarının özellikleri, sıkıştırma enerjileri, tabaka kalınlığı ile pas sayılarının belirlenmesi, sıkıştırma ekipmanlarının verimi, kompaksiyon metotları ve kompaksiyonda dikkat edilmesi gereken hususlar üzerine bilgiler sunulmuştur.**

**Bilim Kodu : 714.1.050**  
**Anahtar Kelimeler : Zeminlerin sıkıştırılması-zemin sıkıştırma makineleri**  
**Sayfa Adedi : 98**  
**Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Mehmet ORHAN**

**THE DECISION OF THE SUITABLE COMPACTION ACCORDING  
TO THE TYPE AND CHARACTERISTICS OF SOIL USED TO  
COMPACT THE FILLING  
(M.Sc. Thesis)**

**Hulusi KEÇETEPEN**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
May 2007**

**ABSTRACT**

Beside the fact that the earth which we dwell on is the base of any type construction, it is the building material of airports, ports, water holding constructions, transporting ways by making the features of earth better. Due to this fact, the engineering features of ground and rocks that constitute the earth such as carrying, capacity, durability, volume actions, permeability, dren capability, frost sensitivity, compactibility should be known and the physical features required for the building to be constructed should be improved.

The soils that haven't got desirable engineering features should be made better via various methods and techniques (compaction, drainage, stabilization techniques) by conforming them to a sufficient stable situation. Among the soil improvement techniques, compaction is the easiest, cheapest and especially the most effective one.

In making filling, if sufficient compaction isn't supplied; by being deformed because of its own weight, the effect of dead and active load on it, filling will cause settling more than the acceptable degree. Beside the fact that it shortens

the project's life causing the deformation of the covering on the ways, it will spoil the comfort and traffic safety and won't be economical.

Also, before soils compactions; it's required to choose the compactors which are suitable for filled soils type and feature, determine the layer thickness, passing frequency and velocity in order to increase the efficiency of compactions. Otherwise, it results in not being able to get enough compaction or uneconomical passing frequency numbers.

In the inclusion of this, thesis, the soils and their features to be used in making fillings, static and dynamic energy compaction equipments' features, compaction energies, layer thickness and determination of passing numbers, efficiency of compaction equipments, compaction methods and the points that entail great attention in compaction are presented.

**Science Code : 714.1.050**

**Key Words : Soiling compaction – compaction equipment**

**Page Number: 98**

**Adviser : Assoc. Prof. Dr. Mehmet ORHAN**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Mehmet ORHAN'a , çalışmalarından ve tecrübelerinden yararlandığım İnşaat Mühendisi Hamdi İkiler'e ve DSİ XII. Bölge Müdürlüğü Mühendislerine, manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                             | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                  | iv           |
| ABSTRACT .....                                              | vi           |
| TEŞEKKÜR .....                                              | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....                                           | ix           |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                  | xii          |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                    | xiii         |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                    | xv           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                               | xvi          |
| 1. GİRİŞ .....                                              | 1            |
| 2. ZEMİNLERİN KOMPAKSİYONU .....                            | 3            |
| 2.1. Kompaksiyon .....                                      | 3            |
| 2.2. Kompaksiyonun Zemin Özelliklerine Etkisi .....         | 4            |
| 2.3. Zeminlerin Kompaksiyonuna Etki Eden Faktörler .....    | 6            |
| 2.3.1. Su içeriği .....                                     | 6            |
| 2.3.2. Zemin cinsi .....                                    | 8            |
| 2.3.3. Kompaksiyon miktarı .....                            | 14           |
| 2.4. Genleşen Zeminlerin Kompaksiyonu .....                 | 18           |
| 2.5. Donma Olaylarının Kompaksiyon İle İlişkisi .....       | 19           |
| 2.6. Hava Koşulları ve Kompaksiyon .....                    | 19           |
| 2.7. Farklı Zeminlerin Kompaksiyon Özellikleri .....        | 20           |
| 2.7.1. Kohezyonlu zeminlerin kompaksiyon özellikleri .....  | 20           |
| 2.7.2. Kohezyonsuz zeminlerin kompaksiyon özellikleri ..... | 22           |

**Sayfa**

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3. ZEMİN SIKIŞTIRMA MAKİNALARI .....                                                                                        | 24 |
| 3.1. Statik Silindirler .....                                                                                               | 24 |
| 3.1.1. Çelik bandajlı silindirler .....                                                                                     | 24 |
| 3.1.2. Keçi ayak ve küt ayak silindirler .....                                                                              | 27 |
| 3.1.3. Lastik tekerlekli silindirler .....                                                                                  | 34 |
| 3.1.4. Kafesli (Grid) silindirler .....                                                                                     | 50 |
| 3.2. Dinamik Silindirler .....                                                                                              | 51 |
| 3.2.1. Vibrasyonlu silindirler .....                                                                                        | 51 |
| 3.2.2. Plakalı vibratörler .....                                                                                            | 60 |
| 3.2.3. Dahili vibratörler .....                                                                                             | 62 |
| 3.2.4. Elle çekilir vibrasyonlu silindirler .....                                                                           | 62 |
| 3.3. Tokmaklar .....                                                                                                        | 63 |
| 3.3.1. Sıçrayan tokmaklar .....                                                                                             | 63 |
| 3.3.2. Kren tokmakları .....                                                                                                | 65 |
| 4. DOLGU ZEMİNİN SIKIŞTIRILMASINDA ZEMİNİN CİNS VE<br>ÖZELLİKLERİNE UYGUN SIKIŞTIRICININ CİNS VE AĞIRLIĞININ<br>SEÇİMİ..... | 66 |
| 4.1. Sıkıştırıcının Cinsinin Seçimi .....                                                                                   | 66 |
| 4.2. Sıkıştırıcının Ağırlığının Seçimi .....                                                                                | 69 |
| 4.3. Uygun Tabaka Kalınlığı, Sıkıştırıcı Geçiş Sayısı ve Hızının Belirlenmesi .....                                         | 71 |
| 4.4. Sıkıştırma Kapasitelerinin Belirlenmesi.....                                                                           | 72 |
| 5. KOMPAKSİYON METODLARI .....                                                                                              | 74 |
| 5.1. Kaya Dolgularda Kompaksiyon .....                                                                                      | 74 |
| 5.2. Granüler Zeminlerde Kompaksiyon .....                                                                                  | 77 |

|                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|
| 5.3. Siltli Zeminlerde Kompaksiyon .....                            | 78           |
| 5.4. Killi Zeminlerde Kompaksiyon .....                             | 79           |
| 6. ARAZİ ÇALIŞMASI ÖRNEĞİ VE KRİTERLERİN<br>DEĞERLENDİRİLMESİ ..... | 81           |
| 6.1. Arazi Çalışması Örneği (Yahyasaray Barajı Deney Dolgusu) ..... | 81           |
| 6.2.Farklı Kriterlerin Değerlendirilmesi.....                       | 84           |
| 6.2.1.Geçiş sayıların hesabı .....                                  | 84           |
| 6.2.2.Verim hesabı .....                                            | 87           |
| 6.3.Deney Dolgusu Sonuçları ve Analitik Bulgular .....              | 89           |
| 7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                          | 93           |
| KAYNAKLAR .....                                                     | 95           |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                       | 98           |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. İnce malzeme etkisi.....                                                                                                                         | 11    |
| Çizelge 2.2. AASHTO Sınıflandırmasına göre zeminlerin kompaksiyon karakteristikleri .....                                                                     | 13    |
| Çizelge 2.3. USCS Sınıflandırmasına göre zeminlerin kompaksiyon karakteristikleri .....                                                                       | 14    |
| Çizelge 3.1. Siltli killerin lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılmasından elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim ağırlıkların özeti..... | 40    |
| Çizelge 3.2. Vibrasyon değerleri.....                                                                                                                         | 54    |
| Çizelge 4.1. Türlü zemin grupları için uygun sıkıştırma ekipmanı .....                                                                                        | 67    |
| Çizelge 4.2. Derinliğe bağlı gerilim .....                                                                                                                    | 69    |
| Çizelge 6.1. Deney dolgusunda kullanılan malzemenin laboratuar sonuçları.....                                                                                 | 83    |
| Çizelge 6.2. Sıkıştırma ekipmanlarının karakteristik özellikleri.....                                                                                         | 84    |
| Çizelge 6.3. Proctor deneyi ile kontrol edilen deney dolgusunun laboratuar ve arazi sonuçları .....                                                           | 90    |
| Çizelge 6.4. Sıkıştırma ekipmanlarına ait pas sayıları ve verim.....                                                                                          | 92    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Sabit kompaksiyon enerjisi için kuru birim hacim ağırlığı ile su içeriği arasındaki bağıntı.....                                                                                                             | 7     |
| Şekil 2.2. Artan su içeriği $w$ - $\gamma$ ilişkisi .....                                                                                                                                                               | 8     |
| Şekil 2.3. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde kuru birim ağırlık ve su içeriği ilişkisi .....                                                                                                                         | 10    |
| Şekil 2.4. Tipik kompaksiyon artış eğrisi .....                                                                                                                                                                         | 15    |
| Şekil 2.5. Sıkıştırma enerjisinin max $\gamma_k$ ve $w_{opt}$ üzerine etkisi .....                                                                                                                                      | 17    |
| Şekil 3.1. Ayak biçimleri.....                                                                                                                                                                                          | 29    |
| Şekil 3.2. Keçi ayaklı silindirin sıkıştırma tesiri.....                                                                                                                                                                | 31    |
| Şekil 3.3. Lastik tekerlekli silindirin alttan görünüşü .....                                                                                                                                                           | 36    |
| Şekil 3.4. Lastik tekerlekli silindirde, zemine tesir eden basıncın zemin içerisinde yayılışı.....                                                                                                                      | 39    |
| Şekil 3.5. Değişken teker basınçlarına sahip lastik tekerlekli silindirlerle 8 pas sıkıştırılan siltli kil üzerinde yapılan arazi birim ağırlıkları deneyinden elde edilen su içeriği kuru birim ağırlık eğrileri ..... | 46    |
| Şekil 3.6. Teker basıncı ve geçiş sayısının siltli killerin kuru birim ağırlıkları üzerine tesirleri .....                                                                                                              | 47    |
| Şekil 3.7. $17\text{kg/cm}^3$ teker basıncına sahip keçi ayaklı silindirle sıkıştırılan siltli kile ait su içeriği-kuru birim ağırlık ilişkisi .....                                                                    | 48    |
| Şekil 3.8. Siltli kilden yapılmış dolgu üzerine keçi ayağı ve geçiş sayısının tesirleri.....                                                                                                                            | 48    |
| Şekil 3.9. Siltli kil dolgu üzerinde yapılan deneylerden elde edilen keçi ayaklı ve lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırma mukayeseleri .....                                                                       | 49    |
| Şekil 3.10. Vibrasyon halinde bulunan kütlerin zeminle çarpışmasından meydana gelen darbe kuvveti.....                                                                                                                  | 52    |
| Şekil 3.11. Tipik toprak-kütle vibratör rezonansı .....                                                                                                                                                                 | 54    |

| <b>Şekil</b>                                                                             | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 3.12. Vibrasyonlu silindirlerde genliğin etkisi.....                               | 55           |
| Şekil 3.13. Silindirli vibratör ile sıkıştırma esnasında zemindeki titreşim durumu ..... | 57           |
| Şekil 3.14. Plakalı vibratörlerin tek ve çift eksantrik kütleli tipi.....                | 60           |
| Şekil 3.15. Plakalı vibratör ile sıkıştırma esnasında zemindeki titreşim durumu .....    | 61           |
| Şekil 4.1. Farklı sıkıştırıcılarla zemin arasındaki etkileşim .....                      | 68           |
| Şekil 4.2. Derinliğe bağlı gerilim .....                                                 | 69           |
| Şekil 4.3. Geçiş sayısı – Kuru birim ağırlık grafiği .....                               | 71           |
| Şekil 5.1. Kaya dolguların serimi .....                                                  | 75           |
| Şekil 5.2. Kaya dolgu kompaksiyonuna etki eden faktörler .....                           | 76           |
| Şekil 5.3. Yüksek dolgularda sandviç tabaka uygulaması.....                              | 80           |
| Şekil 6.1. Deney dolgusu geçiş ve tabaka sayısı.....                                     | 81           |
| Şekil 6.2. Her tabakadan alınan numune sayıları.....                                     | 82           |
| Şekil 6.3. Geçiş sayılarına bağlı sıkışmaların grafiği.....                              | 91           |

**RESİMLERİN LİSTESİ**

| <b>Resim</b>                                                               | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 3.1. Düz silindir .....                                              | 24           |
| Resim 3.2. Küt ayak silindir .....                                         | 28           |
| Resim 3.3. Lastik tekerlekli silindirin iki dizili tipi .....              | 35           |
| Resim 3.4. Lastik tekerlekli silindir .....                                | 37           |
| Resim 3.5. Kafesli silindir .....                                          | 50           |
| Resim 3.6. Tek ve çift bandajlı elle çekilir vibrasyonlu silindirler ..... | 63           |
| Resim 3.7. Vibrasyonlu tokmaklar .....                                     | 64           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler    | Açıklama                        |
|-------------|---------------------------------|
| $S$         | Zeminlerin kayma direnci        |
| $\sigma_e$  | Efektif basınç                  |
| $C$         | Kohezyon                        |
| $\emptyset$ | İçsel sürtünme açısı            |
| $\gamma$    | Birim ağırlık                   |
| $\gamma_k$  | Kuru birim ağırlık              |
| $e$         | Boşluk oranı                    |
| $w_{opt}$   | Optimum su içeriği              |
| $S_E$       | Arazi kompaksiyon enerjisi      |
| $C_E$       | Laboratuar kompaksiyon enerjisi |
| $Z$         | Yapılan iş                      |
| $n$         | Geçiş sayısı                    |
| $F_d$       | Dinamik kuvvet                  |
| $Q$         | Verim                           |
| $m$         | Kütle                           |
| $V$         | Hız                             |
| $\omega$    | Açısal hız                      |
| $f$         | Frekans                         |
| $r$         | Genlik                          |

| Kısaltmalar | Açıklama                     |
|-------------|------------------------------|
| KFŞ         | Karayolları Fenni Şartnamesi |

## 1. GİRİŞ

Tüm yapılar zemin üzerinde, zemin içerisinde, ya da bunlarla birlikte zeminin malzeme olarak kullanılması ile yapılmaktadır. Bina ve benzeri yapılar temelleri ile yükleri zemine aktarırken, tünel, yeraltı ulaşımı gibi yapılar zemin veya kaya içinde yapılmaktadır. Çoğu zamanda zeminler baraj ve yol dolgularında malzeme olarak kullanılmaktadır.

Karayolları ve hava limanlarının tasarımında bu yapıların altındaki zeminlerin dayanımı, taşıma gücü ve bunların kaplama dayanımına etkisi çok büyüktür. Aynı şekilde toprak dolgu barajların inşasında da zemine ait geçirimsizlik, dayanım, oturma gibi özelliklerin iyi bilinmesi gerekir [1].

İnşaat sahasında karşılaşılan zeminler her zaman istenilen nitelikte olmadığından zemin özelliklerinin iyileştirilmesi ya da mevcut zeminin yerinden kaldırılarak yerine sıkıştırılmış zemin dolgular inşası, oldukça yaygın tercih edilen yöntemdir [2].

Tekniğine uygun olarak sıkıştırılmış zeminler kısaca şu özelliklere sahip olmalıdır:

- Kendi ağırlığını ve uygulanan dış yükleri emniyetle taşımaya yeterli mukavemete sahip olmalı,
- Yük altında oturma ve deformasyonları kabul edilebilir sınırlar içinde kalmalı,
- Aşırı şişme ve büzülme göstermemeli,
- Mukavemet ve sıkışabilirlik özelliklerini koruyabilmeli,
- Fonksiyona uygun permeabilite ve drenaj özelliklerine sahip olmalıdır [3].

Kimi zaman sıkıştırma maliyetinin toplam proje maliyetindeki payı %5 seviyesinde kalmasına karşılık, dolgudan beklenen performans elde edilemediğinde ileride ortaya çıkacak hasarların telafisi çok zor ve bazen imkansızdır. Bu da ekonomik olmayan sonuçlar doğurur.

Dolguların yapımı sırasında; sıkıştırıcı ekipmanın kullanılacak zeminin özelliğine uygun tip ve ağırlıkta seçimi, geçiş sayısı ile tabaka kalınlığının belirlenmesi çok önemlidir. Mühendislik tecrübesi ve test dolguları ile doğru yapılacak seçimle işin zamanında ve ekonomik olarak bitirilmesi ana hedeftir.

Bu araştırmada; dolguların kompaksiyonu, kompaksiyonun zeminler üzerine etkileri, kompaksiyon makinelerinin özellikleri ve seçimi, kompaksiyon metotları ile kompaksiyonda dikkat edilecek hususlar ele alınmıştır.

## **2. ZEMİNLERİN KOMPAKSİYONU**

### **2.1. Kompaksiyon**

Zeminlere sıkıştırma enerjisi tatbik edilerek zemin içindeki hava boşluklarını azaltmak, zeminin katı danelerini birbirleri içerisinde daha sıkı olacak şekilde yeniden yerleşmelerini sağlamak ve zeminin hacmini azaltmak yani yoğunluğu artırmak için yapılan işleme zemin kompaksiyonu denilir [4].

Genellikle dolgunun amacı bina ve yol yapımı için yüzey, barajlarda ise yapıyı sağlamaktır. Oturma miktarını, temel zeminin kalınlığı ve yükleme sonucu dolgunun sıkışabilirliği belirler. Oturma hızının ilerleyişini temel zeminin geçirgenliğinin yanı sıra yer altı drenaj verimi belirler. Uzun zamanda meydana gelen büyük oturmalar inşa edilmiş yapıların yüzeyine zarar verebilir [5].

Zeminin sıkıştırılması sonucu birim hacim ağırlığı artmakta ve buna bağlı olarak mühendislik özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır. Danelerin birbirine yaklaşabilmesi ve sıkışmanın sağlanabilmesi ancak uygulanan statik veya dinamik yükler altında danelerin birbirlerine göre hareket edebilmeleri ile sağlanabilir. Danelerin birbirine göre hareket edebilme yetenekleri ise, uygulanan yüklerin şiddeti (kompaksiyon enerjisi) yanında zemin içindeki su miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Zemin içindeki su miktarının (su içeriği) kompaksiyon üzerinde iki değişik etkisi söz konusudur. Zemin içindeki su miktarı zeminin suya doygunluk derecesinin danelerin birbirine yaklaşmasına engel olacak derecede yüksek olmasına yol açacak mertebede ise kompaksiyonun sağlanması güçleşecektir. Zeminin su içeriği yükseldikçe, boşluklardaki havanın bir kısmı hapsedilmekte ve dışarı çıkma imkanı bulamamaktadır. Bunun sonucu olarak sıkışan bu hava hacimlerinde basınç artışları meydana gelmekte ve kompaksiyon zorlaşmaktadır. Zeminin tamamen suya doygun olması, yani bütün boşlukların suyla dolu olması durumunda ise kompaksiyon mümkün değildir. Çünkü bu durumda uygulanan yükler altında boşluk suyunda basınç artışları meydana gelecek ve bu hidrostatik basınç danelerin birbirine yaklaşmasına karşı koyacaktır.

Diğer taraftan zemin içindeki su miktarı aynı zamanda danelerin birbirine göre hareket edebilmelerini de etkilemektedir. Zemin içinde yeterinden fazla miktarda su bulunduğu zaman (optimum su içeriğinden fazla) daneler arasındaki sürtünme azalmakta, aynı zamanda kapiler gerilmeler de azalmakta ve daneler arası elektriksel itki kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Zemin içinde yeterinden az su bulunduğu zaman ise (düşük su içeriğinde) daneler arası sürtünme ve kapiler gerilmeler artmakta, elektriksel kuvvetlerin net etkisi ise çekim kuvvetlerine dönüşmektedir. Görüldüğü üzere, zemin içindeki su miktarının kompaksiyon üzerindeki iki etkisi birbiri ile çelişkilidir. Şöyle ki, su miktarı arttıkça danelerin birbirine göre hareketi kolaylaşmakta, buna karşılık birbirine yaklaşması zorlaşmaktadır. Buna göre, her iki etkinin bir arada düşünülmesi ile, en iyi sıkışmanın ancak zemin içinde yeterli miktarda su bulunması (ne çok az, ne de çok fazla) durumunda sağlanabileceği sonucuna varılmaktadır. Zeminin en iyi ve en kolay sıkışabileceği bu su miktarına optimum su içeriği adı verilmektedir. Optimum su içeriği değişik zeminler için birbirinden farklı olduğu gibi, aynı zemin için de kompaksiyon yöntemine ve uygulanan kompaksiyon enerjisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir [2].

## **2.2. Kompaksiyonun Zemin Özelliklerine Etkisi**

Kompaksiyon zemin içinden havanın çıkarılması ve danelerin birbirine yaklaştırılması, boşluk oranı ( $e$ )'nin düşürülmesi amacı ile yapılan bir işlemdir. Yollarda zeminlerden istenen yararlı özellikler vardır.

- a - Kayma direncinde ve taşıma gücünde yeterlik
  - b - Düşük permeabilite ve düşük su emme
  - c - Yüklerin tekrarlanması altında limitleri aşmayan kompresif deformasyon
- Bu özellikler ile zeminin kompaktlık durumu arasında yakın ilişkiler vardır.

### Kompaksiyon ile kayma direnci ve taşıma gücü artar

Kompaksiyon ile zemin daneleri birbirine yaklaşır ve birbirine olabildiğince temas ederler. Böylece temas yüzeyleri artar. Bunun sonucu olarak sürtünmeyen daneler ve

yüzeyler sürtünürler. Aralarındaki sürtünme direnci büyür. Öte yandan yüzey temaslarının artışı ile kohezyonlu zeminlerde daneler arasında devreye giren kohezyon ile kohezyon kuvveti büyür.

Coulomb zeminlerin kayma gerilmelerine karşı gösterdiği direnç gerilmesini (S) ile göstererek buna şöyle bir bağıntı vermiştir.

$$S = C + \sigma_e \cdot \tan \phi \quad (2.1)$$

Burada;

S = Zeminlerin kayma direnci

$\sigma_e$  = Efektif gerilme

C = Kohezyon

$\phi$  = İçsel sürtünme açısı

Kompaksiyon sonucu boşluk oranı da düşecektir. Boşluk oranı (e) düştükçe doyumluk durumunda bile su içeriğinin düşeceği bilinen bir noktadır. Su içeriği düştükçe kohezyon ve içsel sürtünme artacaktır. Boşluk suyu içeriği ve boşluk suyu basıncı düşüşü ile zemin daneleri arasındaki efektif basınç ( $\sigma_e$ ) artmaktadır. Öte yandan su çıkışının sonucu olarak su içeriği düşecektir. C ve  $\phi$  artacak, S bunların artışı ile artacaktır.

Coulomb eşitliğinden görüleceği gibi zeminin kayma direnci ve bunun sonucu ile taşıma gücü artar.

#### Kompaksiyon ile zeminde permeabilite ve su emme azalır

Permeabilite dışarıdan zemin içine su girmesine olanak veren bir özelliktir. Zeminin mühendislik bakımından önemli olan iyi özellikleri bulunduğu üzere su içeriğinin artışı ile azalır. Permeabilitenin az olması, su girişini ve bu iyi özelliklerin azalmasını önler.

Boşluk oranı düşükse yani zemin ne kadar sıkışıkça permeabilite kat sayısı da o kadar düşüktür. Zeminin sıkılığı arttıkça permeabilitenin düşmesine karşılık boşluklar küçüldüğü için kılcallık artabilir. Sonra buna bağlı sakıncalı sonuçlar olabilir. Ancak yeraltı su düzeyi düşürülerek kılcallıktan ileri gelen kötü sonuçlar önlenabilir.

### Kompaksiyon ile kompresif deformasyon düşer

Belirli bir yük ve enerji uygulanarak oluşturulmuş zemin boşluk oranları, uygulanmış bu yüklerden daha az yüklerde, zemin boşluk oranı değişmeyecektir. Zeminin hacimsel değişme oranını boşluk oranının ilk ve son değerlerine bağlı alarak şöyle ifade edilebilir.

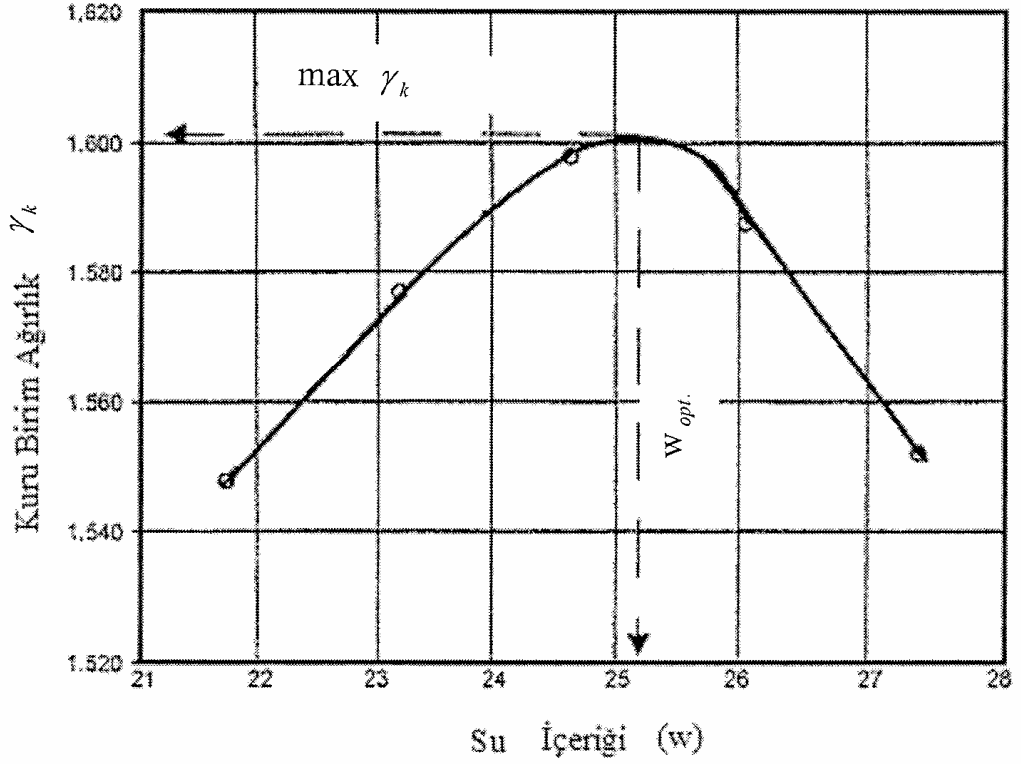
$$\text{Hacimsel Değişme Oranı} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \quad (2.2)$$

Yükler boşluk oranında bir değişme yapamadığı zaman  $\Delta e = e_1 - e_2 = 0$  olacaktır. Dolayısı ile hacimsel değişme olmaz. O halde sıkışma ne kadar yüksek ise ve ne kadar büyük bir yük ve enerji ile yapılmış ise sonradan oluşacak deformasyonlar da o kadar az olacaktır [6].

## **2.3. Zeminlerin Kompaksiyonuna Etki Eden Faktörler**

### **2.3.1. Su içeriği**

Kompaksiyon sebebiyle bir zeminin kuru birim hacim ağırlığında meydana gelen artış başlıca, zeminin su içeriğine ve uygulanan kompaksiyon enerjisine bağlıdır. Her zemin için belirli bir kompaksiyon enerjisine tekabül eden ve Şekil 2.1.'de gösterildiği üzere, kuru birim hacim ağırlığını maksimum yapan bir "optimum su içeriği" vardır [7].

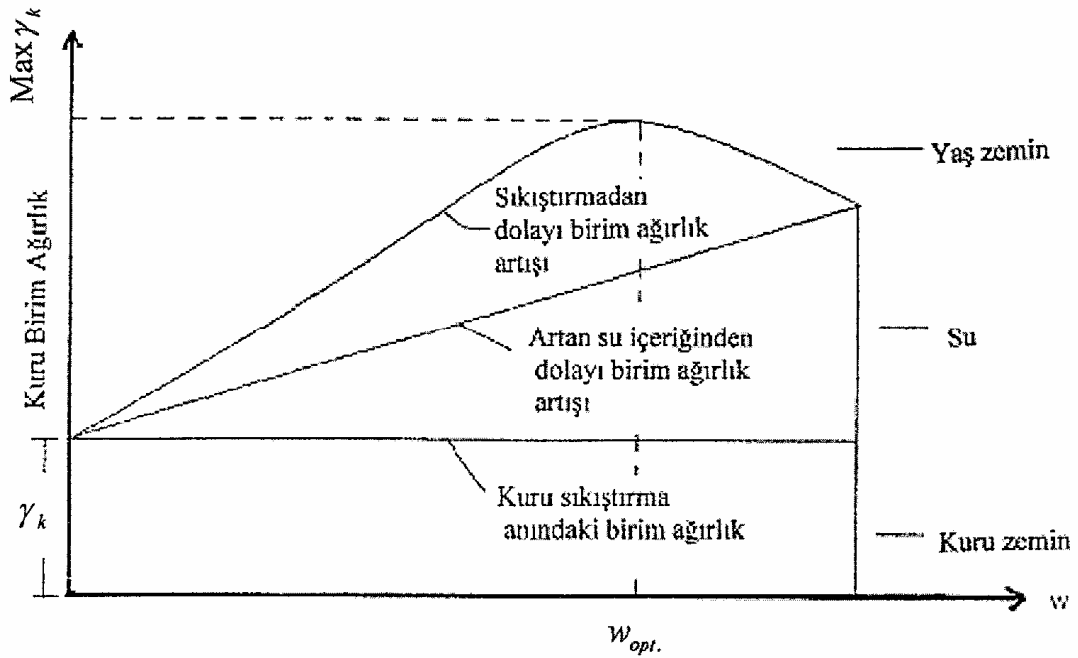


Şekil 2.1. Sabit kompaksiyon enerjisi için kuru birim hacim ağırlığı ile su içeriği arasındaki bağıntı

Artan su içeriği ile kuru birim ağırlık maksimuma kadar artmakta ve daha sonra azalmaktadır. Çünkü başlangıçta kuru olan zemin daneleri ıslandıkça yağlanma etkisi ile birbirleri üzerinde kayarak daha yoğun olacak şekilde sıkışır. Eğrinin maksimum birim ağırlığa eriştiği nokta teorik olarak tüm hava boşluklarının suyla doymuş hale geldiği yoğunluktur. Ancak pratikte, özellikle ince daneli zeminler çok az miktarda olsa da hapsedilmiş hava ihtiva ederler. Su içeriği optimumdan daha fazla arttıkça kuru birim ağırlık da azalır. Çünkü kuru birim ağırlıktaki zemin boşlukları teorik olarak tamamen suyla doymuş halde iken artan su miktarı zemin danelerini iterek doymuş su hacmini de artırmakta ve dolayısıyla zeminin birim ağırlığını azaltmaktadır. Zira su hem sıkışmayan bir malzeme olup hem de özgül ağırlığı zemine nazaran çok daha azdır.

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi kuru zemin birim ağırlığı su içeriğinden bağımsız olarak sabit bir değerdir. Yani  $w=0$  iken sabit bir sıkıştırma enerjisinde  $\gamma_k$  sabittir. Kuru

zemine su katıldıkça yani su içeriği yavaş yavaş arttırıldıkça aynı sıkıştırma enerjisinde zeminin birim ağırlığında yavaş yavaş artış olacaktır. Ancak bu birim ağırlık artışı bir maksimum noktadan sonra yavaş yavaş azalacaktır. Bu maksimum noktada zeminin boşlukları hemen hemen suyla dolu iken bu noktadan sonra boşluklarındaki su miktarı hacimce daha fazla artacak ve zemin danelerini iterek hacim artışına neden olacaktır. Fakat suyun özgül ağırlığı zeminin özgül ağırlığından daha az olduğundan dolayı bu hacim artışı ile birim ağırlıkta azalacaktır [4].



Şekil 2.2. Artan su muhtevasında w-  $\gamma$  ilişkisi

### 2.3.2. Zemin cinsi

Zeminin cinsi, zeminin kompaksiyonuna etki eden en önemli faktördür. Zeminin cinsi ve sahip olduğu özelliklere göre zeminlerin kompaksiyonu için aşağıdaki hususlar daima göz önünde tutulmalıdır.

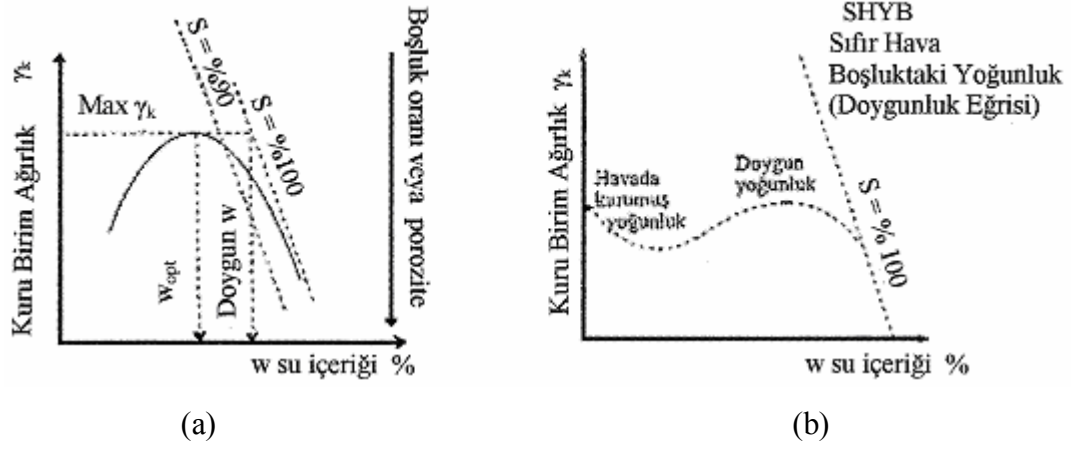
- Kohezyonlu zeminlerde Şekil 2.3’de görülen tipik  $\gamma_k$ -w eğrisinden daima  $w_{opt.}$ ’da  $\max \gamma_k$  elde edilir. Bu maksimum kuru birim ağırlıkta dahi hala belirli bir hava boşluğu zemin kitlesi içerisinde hapsolmuştur. Pratikte sıfır hava boşluğunda bir

kompaksiyon elde edilemez. Ancak pratikte maksimum yoğunluktaki sıkışma için zemin boşluklarının tamamen suyla dolu olduğu kabul edilir.

- Genel olarak kohezyonlu zeminlerin maksimum kuru birim ağırlığı kohezyonsuz zeminlere nazaran daha az ve bünyesindeki boşluk oranları daha fazladır. Dolayısıyla zamanla bir miktar daha sıkışma beklenmelidir.

- Kohezyonsuz zeminler (özellikle temiz kumlar) laboratuarda standart test metotları ile sıkıştırdıklarında Şekil 2.3'de görüldüğü gibi  $\gamma_k$ -w tipik eğrisi S şeklindedir. Sıkıştırma esnasında zemin kolayca drene olabildiğinden dolayı boşluk suyu basıncı oluşmaz. Düşük su içeriklerinde sıkıştırma esnasında sıkıştırma kuvvetlerine karşı zemin daneleri arasındaki sürtünme ile dirençler oluşur ve sıkışmaya karşı koyarak kitle içinde sıkışmadan hareket ederler. Su ilave edildikçe daneler arasındaki sürtünme kuvvetleri kapiler çekim kuvvetleri ile artarak sıkışmaya direnç gösterirler. Bu nedenle kuru birim ağırlıkları da azalır. Fakat su içeriği arttıkça kapiler çekim kuvvetleri azalır ve maksimum kuru birim ağırlık artar.

- Max  $\gamma_k$  değeri kuru haldeki yoğunluğa veya bir miktar fazlasına kadar artış gösterir. Max  $\gamma_k$  değerine tekabül eden su içeriği optimum değer olup yaklaşık olarak zeminin doygunluk derecesine erişilmiş olur. Daha fazla ilave edilen su kumun boşluklarından drene olurken kuru birim ağırlık da azalır.



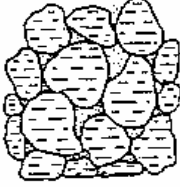
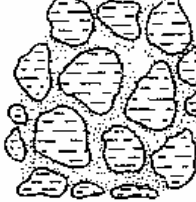
Şekil 2.3. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde kuru birim ağırlık ve su içeriği ilişkisi a) Kohezyonlu zeminler ; b) Kohezyonsuz zeminler

- Şekil 2.3'de görüleceği gibi kohezyonsuz zeminlerde aynı  $\gamma_k$  değeri için iki farklı  $w$  değeri vardır. Aynı kuru birim ağırlık değerinde, optimum durumdaki su içeriğinde ki boşluk oranı, doygun durumdaki su içeriğine nazaran daha fazladır. Zira suyla doygunluğu, doygun durumdaki su içeriğine göre daha azdır.

Genel olarak, optimum su içeriğinde kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) maksimum değerine ulaşır.

Zeminin ihtiva ettiği ince malzeme miktarı arttıkça yoğunluğu, sıkışabilirliği, boşluk oranı, permeabilitesi vb. özelliklerinde önemli değişiklikler olur. Bu değişiklikler Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. İnce malzeme etkisi [4]

|                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                            |                                                                                                                                          |                                                                                                    |
| <u>a-İnce malzeme yok veya çok az</u>                                                                                                                       | <u>b-Boşlukları dolduracak kadar ince malzeme var</u>                                                                                                                                                                     | <u>c-Aşırı ince malzeme var. (Kaba daneler yüzüyor)</u>                                                                                                                               |
| -Taneler arası temas iyi ile vasat arası<br>-Değişken yoğunluk<br>-Geçirgen<br>-Yüksek stabilite<br>-Çok zor sıkışır<br>-Dona duyarız<br>-Sudan etkilenmez. | -Deformasyona karşı direnç, taneler arası temasla artar.<br>-Yoğunluk artar<br>-Pratik olarak geçirgen değil<br>-Kohezyonla artan yüksek stabilite<br>-Orta derecede sıkışır<br>-Dona duyarlı<br>-Sudan çok az etkilenir. | -Taneler ince malzeme içinde yüzdüğünden temas yok<br>- Yoğunluk düşer<br>- Geçirgen değil<br>- Düşük stabilite<br>-Kolay sıkışır<br>-Dona çok duyarlı<br>-Sudan çok fazla etkilenir. |

• Kohezyonlu zeminler optimum su içeriğinden ne kadar fazla su içeriğinde ise o kadar fazla plastik ve yapışkan bir hal alır. Fakat su içeriği optimumdan ne kadar az ise sıkışmaya karşı o kadar fazla direnç göstererek kompaksiyon zorlaşır ve hatta  $\max \gamma_k$  elde edilmesi imkansızlaşır.

• Zeminin özgül ağırlığı arttıkça  $\gamma_k$  artarken, zeminin boşluk oranı arttıkça  $\gamma_k$  azalır. Zemin daneleri inceldikçe boşluk oranı artacağından dolayı  $\gamma_k$  azalmaktadır. Yani kil silten daha az  $\gamma_k$  değerine sahip olacaktır.

• Genel olarak iyi derecelenmiş zeminlerde  $\gamma_k$  - w eğrisi dikleşmekte iken üniform veya üniforma yakın derecelenmiş zeminlerde ise  $\gamma_k$  -w eğrisinde yatıklaşma görülür. Ayrıca eğri ne kadar yatıkça suya olan duyarlılığı da o kadar azalmaktadır.

• Zeminde ince malzeme miktarı arttıkça  $\max \gamma_k$  azalır. Ayrıca maksimum dane çapı arttıkça  $\max \gamma_k$  artar. Zeminin gradasyonu ne kadar iyi derecelenmiş ise o kadar iyi

sıkışma elde edilir. Özellikle granüler zeminlerde ve granüler temel ve alt temelde dane boyutu dağılımı ne kadar iyi derecelenmiş ise o kadar yüksek  $\gamma_k$  elde edilir. Ayrıca malzeme ne kadar çok çakıl ihtiva ediyorsa max  $\gamma_k$  o kadar yüksek olur.

- Serbest drene olabilen kötü derecelenmiş veya üniform derecelenmiş granüler malzemeler ince malzeme ihtiva etmiyorsa tipik  $\gamma_k$ -w ilişkisini göstermedikleri gibi suya az duyarlı bir eğriye sahiptirler. Eğer böyle bir malzeme kaplamada veya kaplamanın temelinde kullanılacak olursa tekerrür eden trafik yüklerinden ötürü oluşacak sonraki ilave sıkışmalardan dolayı meydana gelecek aşırı oturmalar kaplamanın bozulmasına neden olmaktadır. Prensip olarak granüler malzemelerle yapılan sıkıştırma işleminden sonra trafik yüklerinden dolayı ilave bir sıkışma olmamalıdır. Bundan dolayı kaplama altına don kabarmasını önlemek, zeminin istenilen mukavemette olmasını sağlamak, vb. nedenlerden ötürü konulacak seçme malzeme tabakalarının iyi derecelenmiş granüler malzeme ile yapılması zorunludur.

- Kohezyonlu zeminlerin kompaksiyonu ince malzemenin (kil ve silt) plastisite karakteristikleri ile doğrudan etkilenir. LL ve PI arttıkça  $\gamma_k$  azalmaktadır. Bunun nedeni zemin danelerini saran suyun sıkıştırma esnasında danelerden koparak uzaklaşmasının miktarı (yani kolay drene olabilme yeteneği) ile ilişkili olmasındandır.

- Sıkışmış zeminlerin doymuş su içeriği zeminin su emme kabiliyetinin de bir göstergesidir. Yani sıkışmış zemin ne kadar çok su emebiliyorsa o kadar çok boşluk ihtiva ediyor veya başka bir deyişle yeterince sıkışmamış demektir. Zeminin yoğunluğu ile özgül ağırlığı arasındaki fark ne kadar büyük olursa boşluk oranı da o kadar fazla yani sıkışması da o kadar az demektir. Kohezyonlu zeminler genellikle PL'den daha az su içeriğinde sıkıştırılırsa ileri ki yıllarda artan su içeriği ile doymuş hale gelerek taşıma güçlerinde önemli azalma gösterilebilecektir. Genel bir kaide olarak doymuş su içeriği PL'den ziyade LL'ye daha yakın ise kompaksiyon o kadar yetersiz demektir [4].

• Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'de değişik zemin grupları için kompaksiyon karakteristikleri verilmiştir. Çizelge 2.2'de zeminlerin AASHTO sınıflamasına göre sahip olabileceği  $\max \gamma_k$ ,  $w_{opt.}$  ve dolgu performansı verilmiştir. Çizelge 2.3'de ise birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre dolgu malzemelerinin ve taban zeminlerinin karakteristik özellikleri verilmiştir [8].

Çizelge 2.2. AASHTO Sınıflandırmasına göre zeminlerin kompaksiyon Karakteristikleri [8]

| Zemin Sınıfı                     | Karakteristik                 | Max. $\gamma_k$ (ton/m <sup>3</sup> ) | $w_{opt.}$ (%) | Dolgu Performansı                 |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| A-1-a<br>A-1-b                   | Granüler malzeme              | 1.84-2.27                             | 7-15           | İyiden mükemmele kadar değişik    |
| A-2-4<br>A-2-5<br>A-2-6<br>A-2-7 | Siltli-killi granüler malzeme | 1.76-2.16                             | 9-18           | Normalden mükemmele kadar değişik |
| A-3                              | İnce kum ve kum               | 1.76-1.84                             | 9-15           | Normalden iyiye kadar değişik     |
| A-4                              | Kumlu silt ve siltler         | 1.52-2.08                             | 10-20          | Kötüden iyiye kadar değişik       |
| A-5                              | Elastik siltler ve killer     | 1.36-1.60                             | 20-35          | Tatmin edici değil                |
| A-6                              | Silt -Kil                     | 1.52-1.92                             | 10-30          | Kötüden iyiye kadar değişik       |
| A-7-5                            | Elastik siltli kil            | 1.36-1.60                             | 20-35          | Tatmin edici değil                |
| A-7-6                            | Kil                           | 1.44-1.84                             | 15-30          | Kötüden normale kadar değişik     |

Zeminlerin sıkıştırılabilme derecesine etkiyen pek çok faktör vardır. Bunlardan zeminle ilgili olanlar; zeminin dane boyutu dağılışı yani granülometrisi ile zemin daneciklerinin biçim ve yüzey dokusudur. Her boydaki daneyi ihtiva edecek şekilde iyi derecelenmiş zeminler daha kolay ve iyi sıkışırlar. Buna karşılık keskin kenarlı ve köşeli ya da yassı daneleri fazla olan veya pürüzlü yüzeye sahip daneli zeminlerin sıkıştırılmaları zordur [9].

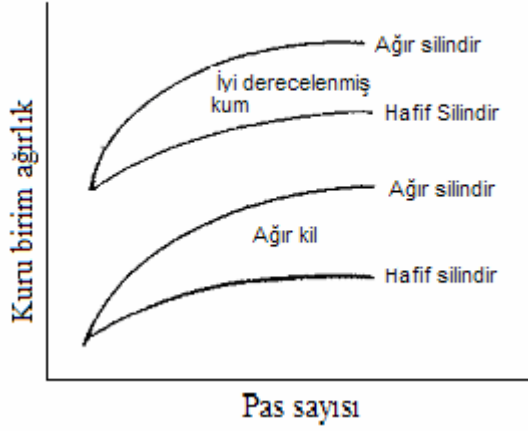
Çizelge 2.3. USCS Sınıflandırmasına göre zeminlerin kompaksiyon karakteristikleri [8]

| Sınıf | Max $\gamma_k$<br>(ton/m <sup>3</sup> ) | Kompaksiyondan<br>sonra sıkışabilirliği<br>ve şişme karakteri | Dolgu malzemesi<br>olarak değeri           | Taban zemini olarak değeri |
|-------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
| GW    | 2.00-2.16                               | Her zaman hiç                                                 | Çok stabil                                 | Mükemmel                   |
| GP    | 1.84-2.00                               | Her zaman hiç                                                 | Oldukça stabil                             | Mükemmel ile iyi arası     |
| GM    | 1.92-2.15                               | Çok çok az                                                    | Oldukça stabil                             | Mükemmel ile iyi arası     |
| GC    | 1.84-2.08                               | Çok çok az                                                    | Oldukça stabil                             | iyi                        |
| SW    | 1.76-2.08                               | Her zaman hiç                                                 | Çok stabil                                 | iyi                        |
| SP    | 1.60-1.92                               | Her zaman hiç                                                 | Yoğun olduğunda<br>oldukça stabil          | iyi ile normal arası       |
| SM    | 1.76-2.00                               | Çok çok az                                                    | Yoğun olduğunda<br>oldukça stabil          | iyi ile normal arası       |
| SC    | 1.68-2.00                               | Az ile orta                                                   | Oldukça stabil                             | iyi ile normal arası       |
| ML    | 1.52-1.92                               | Az ile orta                                                   | Kötü stabilite, yüksek<br>yoğunluk gerekli | Normal ile zayıf arası     |
| CL    | 1.52-1.92                               | Orta                                                          | iyi stabilite                              | Normal ile zayıf arası     |
| OL    | 1.28-1.60                               | Orta ile yüksek                                               | Stabil değil,<br>kullanılmamalı            | Zayıf                      |
| MH    | 1.12-1.52                               | Yüksek                                                        | Kötü stabilite,<br>kullanılmamalı          | Zayıf                      |
| CH    | 1.28-1.68                               | Çok yüksek                                                    | Kötü stabilite                             | Zayıf ile çok zayıf arası  |
| OH    | 1.04-1.60                               | Yüksek                                                        | Stabil değil                               | Çok zayıf                  |
| PT    | -                                       | Çok yüksek                                                    | Kullanılmamalı                             | Uygun değil                |

### 2.3.3.Kompaksiyon miktarı

Bütün zemin tipleri ve bütün kompaksiyon metotları için, kompaksiyon miktarının artması, yani zeminin birim ağırlığına uygulanan kompaksiyon enerjisinin artışı, maksimum kuru birim hacim ağırlığını arttırır ve optimum su içeriğini azaltır [7].

Zeminlerin arazideki kompaksiyonu sırasında silindir ağırlığı, zemin cinsi ile pas sayısı arasındaki ilişki Şekil 2.4'de görülmektedir. Ağır silindir ile kompaksiyonda başlangıçtaki sıkışma fazla iken hafif silindir ile kompaksiyonda ise, pas sayısına göre sıkışma artışı nispeten daha azdır [4].



Şekil 2.4. Tipik kompaksiyon artış eğrisi

Arazide kompaksiyon araçları ile yapılan sıkıştırmalarda kompaksiyon enerjisi Eş.2.3'den hesaplanmaktadır [1].

$$S_E = \frac{n.Z}{a.h} \quad (2.3)$$

Burada ;

$S_E$  = kompaksiyon enerjisi (kg m /m<sup>3</sup>)

$n$  = kompaksiyon aracının geçiş sayısı

$Z$  = yapılan iş (kg m)

$a$  = sıkıştırma aracının genişliğince 1 m lik yol uzunluğuna düşen alan (m<sup>2</sup>)

$h$  = sıkıştırılan zemin tabakasının kalınlığı (m) dir.

Sıkıştırma aracının 1 m lik yol uzunluğunca yaptığı iş (çekme kuvveti)  $Z$ , keçi ayağı silindir için şu şekilde hesaplanır.

$$Z = \sigma \times s \times a \times k \times 1,00 \quad (2.4)$$

Burada ;

$\sigma$  = birim basınç (kg/cm<sup>2</sup>)

s = bir sırada dizili ayak sayısı

a = ayak sıkıştırıcı alanı (cm<sup>2</sup>)

k = zayıflama katsayısı

Düz silindir için;

$$Z = S \times L \times k \times 1,00 \quad (2.5)$$

Burada;

S = Statik (çizgisel) yük (kg/cm)

L = silindirin uzunluğu ( cm )

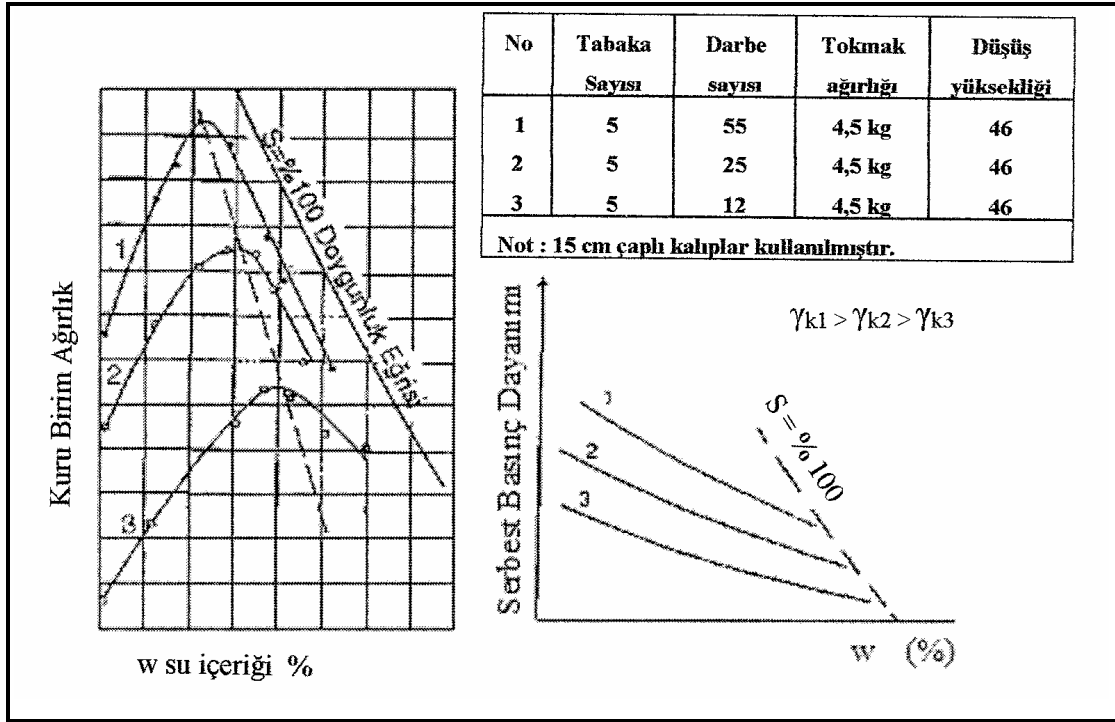
k = zayıflama katsayısı

*Zayıflama katsayısı (k) :* Zeminlerin, sıkıştırıcıların hareketine karşı koyma direncinden doğan kuvvettir. Sıkıştırıcılarda zayıflama sayısı zeminlerin cinslerine göre 0,25 ile 0,40 arasında değişir. O halde çekme kuvveti, zeminlerin cinsine göre sıkıştırıcı ağırlığının 0,25 ile 0,40 katı kadardır [10].

Boşluklardaki hava oranının ufak olduğu optimum su içeriğinin üstündeki su içeriklerinde, kompaksiyon enerjisinin artışı kuru birim hacim ağırlığına az tesir eder. Fakat hava oranının fazla olduğu su içeriklerinde yani optimum su içeriğinin altında, kompaksiyon enerjisindeki artışın tesiri büyüktür [7].

Ayrıca su içeriği arttıkça kompaksiyon enerjisinin yoğunluk üzerindeki etkisi de azalmaktadır. Bir başka deyişle düşük kompaksiyon enerjisinde maksimum yoğunluk için daha yüksek su içeriğine ihtiyaç vardır. Ancak laboratuvar ve arazi etütleri göstermiştir ki laboratuvarda tespit edilen optimum su içeriği arazide gerekli optimum su içeriğinden bir miktar daha fazladır.

Bilindiği gibi laboratuarda belirli bir sıkıştırma enerjisi altında kuru birim ağırlık-su içeriği ilişkisinden bir  $\max \gamma_k$  ve buna tekabül eden  $w_{opt.}$  elde edilir. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi sıkıştırma enerjisi arttıkça  $\max \gamma_k$  artarken  $w_{opt.}$  azalmaktadır [4].



Şekil 2.5. Sıkıştırma enerjisinin  $\max \gamma_k$  ve  $w_{opt.}$  üzerindeki etkisi

Standart kompaksiyon deneyinde sıkıştırılan zemine verilen kompaksiyon enerjisi  $C_E$ , Eş.2.6'dan hesaplanabilir [1].

$$C_E = \frac{nNHM}{V} \quad (2.6)$$

Burada ;

$n$  = tabaka sayısı

$N$  = vuruş sayısı

$H$  = düşüş yüksekliği (m)

$M$  = tokmak kütlesi (kg)

$V$  = sıkıştırma kabının hacmi ( $m^3$ )

#### 2.4. Genleşen Zeminlerin Kompaksiyonu

Genleşebilir zeminlerde hacim değişimleri kompaksiyon sırasında yapılacak yeterli bir “ su içeriği ve yoğunluk kontrolü” ile oldukça azaltılabilir. Yüksek derecede genleşen zeminlerde hacim değişimlerini düşürmekte optimum su içeriğinin %1-3 üzerinde sıkıştırmak önemli rol oynar. AASHTO-99’ a göre dolgunun önemli ölçüde yüksek olduğu yerlerde, kompaksiyon su içeriği dolgunun alçak düzeylerinde optimumun biraz altında tutulabilir. Üst tabakalarda 30-90 cm.lik derinliklerdeki düzeylerde ise optimum üzerinde olarak hafifçe artırılabilir.

Araştırmalar doğrulamıştır ki bir çok plastik zeminler için genleşme, AASHTO-99’un gösterdiği optimum su içeriğini aşan bir içerikte sıkıştırma yapıldığında büyük ölçüde azalır. Optimumun biraz üzerindeki su içerikleri için genleşme pek önemli değildir.

Laboratuvar araştırmaları göstermiştir ki optimumdan biraz daha yüksek su içeriğinde sıkıştırılan genleşen zeminler sonra az genleşir. Fakat az bir su emerek ıslanınca yüksek dirence erişir.

Genleşen zeminlerin daha düşük optimum su içeriğinde kompaksiyonu, ilerde aşırı şişmeler doğurur ki sonuçta kaplamada dalgalanmalar olur.

Arazi deneyleri genleşen zeminler için kullanılacak en iyi kompaksiyon su içeriğini gösterir. Plastik limitine yakın su içeren üniform plastik zeminler üzerine yerleştirilen kaplamalarda zararlı bozulmalar görülmemiştir. Öte yandan düşük su içerikli genleşen zeminler üzerine yerleştirilen kaplamalarda eğilme ve çökme görülmüştür [6].

## 2.5. Donma Olaylarının Kompaksiyon ile İlişkisi

Donma ve don kabarması ile zemin kabarır. Yol gövdesi ve özellikle üstyapı altında deformasyonlar oluşur. Üstyapı üst düzeyi dalgalı bir duruma girer. Suların yapı içine girmesine olanak veren çatlaklar belirir.

Deformasyonların oluşturduğu genişleme sonunda zeminin kompaktlığı, yoğunluğu düşer. Donmanın çözülmesi ile beliren aşırı su içeriği yol gövdesindeki ve üst yapıdaki taşıma gücü düşüklüğüne yol açar [11].

AASHTO-99'un gösterdiği optimum su içeriğinin biraz üstünde bir su içeriği ile ince taneli zeminler sıkıştırıldıklarında permeabiliteleri düşürülebilir. Bu düşüş donma bölgelerine su yükselmesini geciktirir. Bu gecikme don mevsiminin ötesine geçerse don olmayabilir. Don kabarması azalabilir. Araştırmalar daha az don kabarmasının optimum su içeriğinden daha ıslak koşullarda olduğunu onaylamıştır [6].

## 2.6. Hava Koşulları ve Kompaksiyon

İnşaat süresince çalışılan günler bakımından iklimin önemi büyüktür. Yağışlı ve soğuk havalarda kil dolgu önemli ölçüde yapılamaz. Bu ise inşaatın geç bitmesine neden olmaktadır. Yağışlı havalarda geçirimli ve kaya dolgular yağışsız mevsimlerdeki gibi yapılabilmektedir [12].

Donmuş bir zemin donmamış durumda olduğu kadar sıkıştırılamaz. Geçirimsiz kil malzemeler, bünyelerinde bulunan su zerreciklerinin donması halinde sıkıştırılması mümkün olmayan yeni bir yapıya kavuşmaktadırlar.

İklim şartlarından en çok etkilenen dolgu malzemeleri yarı geçirimli ve geçirimsiz malzemelerdir. Bu tür malzemeler kurak iklim şartlarında bünyelerindeki suyu kaybeder. Doğal su içerikleri çok düşük değerlere varır. Dolguda kullanılabilmesi için su içeriklerinin, optimum değerlere hatta % 2-3 fazlasına kadar yükseltilmeleri gerekmektedir [13].

Dolgunun yapımı sırasında yağmur yağışı olasılığı varsa ince daneli zeminlerden oluşturulan dolgularda zeminin serilmesinden hemen sonra sıkıştırılması yapılmalıdır. Böylece gereğinden çok su alması önlenmiş olur. Eğer düz yüzeyli vibrasyonlu ya da statik bir silindir ile yüzey silindirlerse yağışın etkisi olduğunca azaltılır. Yağıştan ileri gelen yüzey üstü akışı sırasında düzgün olan bir üst yüzeyden içeriye az su işler. Titreşimli sıkıştırıcılar zemin yüzünü dışarıdan su girmesini önleyecek ince bir tabaka ile sıvayarak adeta yalıtır. Bu sıvama yağmur suyu girişini olduğunca önler ve yağıştan hemen sonra çalışmaya olanak verir.

Dolgu üstünde kar ve bünyede buzlanma olması kompaksiyon için elverişsiz koşullardır. Kışın yapılan kaya dolgular yazın yapılanlardan daha çok oturmaya uğrarlar. Kışın, kazı ile donmamış zemin sağlamak olanaklıdır. Ancak soğuk hava zeminin üzerinde çabucak donmuş bir tabaka oluşturabilir. Bunun için kışın dolgu yapımında yapılan kazı, serme ve sıkıştırmada koşullar ve durum çok iyi kontrol edilmelidir. Kışın orta ağırlıktaki yada yüksek ağırlıktaki vibrasyonlu silindirler, vibrasyonlu keçi ayakları düz bandajlı silindirler donmuş zemin topraklarını ufalamaları nedeni ile yararlı olurlar. Kışın kompaksiyon hiçbir zeminde yazın ki derecede sağlanamaz ve kışın yapılan dolgularda oturma hem daha olasıdır, hem de daha büyük boyuttadır. Program ve ekonomi koşulları kışında dolgu yapılmasını gerektirebilir. Bu durumda düşük kaliteli bir yapımı kabul etmek gerekir [6].

## **2.7. Farklı Zeminlerin Kompaksiyon Özellikleri**

### **2.7.1. Kohezyonlu zeminlerin kompaksiyon özellikleri**

Kohezyonlu zeminlerin yoğunlaştırılması aşağıdakileri de içeren birçok faktörden etkilenir [14].

- Zemin yapısı, içerdiği kil miktarı ve plastikliği,
- Su içeriği ve doygunluk derecesi,
- Sıkıştırma kuvvetinin büyüklüğü,
- Zemin tabakasının kalınlığı,
- Kompaksiyon ekipmanlarının karakteristiği.

Belirli bir kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan kohezyonlu zeminlerde su içeriği artarken permeabilitesi düşmektedir. Permeabilitenin düşüşü optimum su içeriğine kadar sürmekte daha sonra permeabilite çok az bir artış göstermektedir. Ayrıca kompaksiyon enerjisi artırılırsa boşluk oranı azalacağından dolayı permeabilite azalacaktır. Dolayısıyla kohezyonlu zeminlerin daha az geçirgen olması için mümkün olduğunca optimumdan yüksek su içeriğinde ve yüksek kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılması gerekir [4].

Zeminin optimum su içeriğinden daha kuru halde sıkıştırılması durumundaki geçirgenliği, optimum su içeriğinden daha ıslak halde sıkıştırılmış durumdakine göre yaklaşık on kat daha büyüktür.

Optimum su içeriğinden daha kuru sıkıştırılmış killerde şişme potansiyeli daha büyüktür. Çünkü bu zeminlerde su ihtiyacı fazla ve dolayısıyla su emme eğilimi de fazladır. Optimum su içeriğinden daha ıslak sıkıştırılmış kohezyonlu zeminler su kaybederek kuruma durumunda daha fazla hacim azalmasına (büzülmeye) uğramaktadır [15].

Şişme potansiyeli fazla olan killi zeminler optimum su içeriğinden %1 ila %3 daha fazla su içeriğinde sıkıştırıldıklarında zamana bağlı şişme (kabarma) miktarı ve basıncı azalmakta, suyla temas ettiklerinde daha az su emme eğilimi ile daha yüksek mukavemet göstermektedir [4].

Kohezyonlu zeminlerde, kohezyon ve içsel sürtünme açısı su içeriğinin artması ile azalır. Bu nedenle en büyük kuru birim ağırlık değerine, en büyük kohezyon ve en büyük içsel sürtünme açısı karşılık gelmez.

Optimumdan çok düşük bir su içeriğinde sıkıştırılmış bir zeminin kayma direnci oldukça artar, ancak bu yanıltıcıdır. Zamanla dolgu su içeriğinin artması ile kayma direncinde büyük ölçüde azalma olur. Optimumun üstünde bir su içeriğinde sıkıştırılmış bir zeminde ise, kohezyon ve içsel sürtünme açısı su içeriği ile ters orantılı olduğundan, istenen kayma direnci sağlanamaz [16].

Organik zeminler sahip oldukları olumsuz özelliklerden dolayı yol gövdesi altında veya dolgularında kesinlikle kullanılmamalıdır. Ancak ekonomik olmak kaydıyla az miktarda organik madde içeren zeminler (yani OL ve OH) çok iyi sıkıştırıldıklarında kullanılabilir. Ancak organik madde miktarı %10'dan fazla ise mukavemetlerinin çok düşük olması nedeniyle kullanılmaları sakıncalıdır [4].

Optimumdan daha düşük su içeriğinde sıkıştırılmış zeminlerde kompaksiyon enerjisinin artması ile mukavemette belirli bir artış meydana gelirken, optimumun üstünde bir su içeriğinde sıkıştırılmış zeminlerin mukavemeti kompaksiyon enerjisinden oldukça bağımsız görülmektedir. Dolayısıyla, optimumun üstünde bir su içeriğinde sıkıştırılan kohezyonlu zeminlerde daha ağır kompaksiyon makineleri kullanmanın veya daha fazla geçiş yapmanın pek faydalı bir etkisi olmamaktadır. Tam tersine, bu durumlarda arazi sıkıştırması sırasında aşırı kompaksiyon enerjisi uygulanmasının boşluk suyu basıncı artışlarına ve mukavemet azalmalarına yol açabileceği unutulmamalıdır [2].

### **2.7.2. Kohezyonsuz zeminlerin kompaksiyon özellikleri**

Granüler zeminler sıkıştırıldıklarında dahi kohezyonlu zeminlere nazaran daha geçirgen olduklarından dolayı kompaksiyon sırasında su içeriklerinden dolayı pek fazla etkilenmezler. Özellikle temiz kum ve çakıllar belirli bir kompaksiyon enerjisinde tamamen kuru iken yüksek kuru birim ağırlık elde edilebildiği gibi doygun su içeriğinde de yüksek kuru birim ağırlık elde edilebilmekte ve dolayısıyla birden fazla  $\max \gamma_k$  görülmektedir [4].

Kompaksiyon sonucu daneli zeminlerin sıklık derecesi artmakta, bunun sonucu olarak da kayma mukavemetinde artışlar, yük altında sıkışmada (kompresibilitede) ise azalmalar meydana gelmektedir. Böylece daneli zeminler kompaksiyon sonucu daha yüksek taşıma gücüne sahip olmakta ve daha az oturmaya uğramaktadır [2].

Kohezyonsuz granüler malzemelere az plastisiteli ince malzeme karıştırıldığında, ince malzeme miktarı arttıkça maksimum kuru birim ağırlık artmakta ve daha sonra azalmaktadır. Optimum su içeriği ise artan ince malzeme yüzdesi ile azalmakta ve daha sonra artmaktadır. İnce malzemenin özelliklerine bağlı olarak yaklaşık %15 ila %35 oranında ince malzemenin granüler zemine ilave edilmesiyle maksimum kuru birim ağırlık ve kohezyon artmakta fakat karışımın içsel sürtünme açısı ve özellikle drene kabiliyeti azalmaktadır [8].

### 3.ZEMİN SIKIŞTIRMA MAKİNALARI

#### 3.1. Statik Silindirler

##### 3.1.1. Çelik bandajlı silindirler

Dolgu malzemesini yukarıdan aşağıya sıkıştıran çelik bandajlı silindirler tek bandajlı, tandem (çift bandajlı) ve üç bandajlı olmak üzere üç tip olarak 1.5 tondan 18 tona kadar değişen ağırlığa sahiptirler. Resim 3.1’de sıkıştırma yapan tek çelik bandajlı silindir görülmektedir.



Resim 3.1. Düz silindir

Çelik bandajlı silindirler ağırlıklarından ziyade çizgisel yüke göre sınıflandırılırlar. Çizgisel yük statik ağırlığının silindir genişliğine bölünmesiyle elde edilir.

Buna göre çelik bandajlı silindirler;

- 15-25 kg/cm statik çizgisel yük
- 25-35 kg/cm statik çizgisel yük
- 35-45 kg/cm statik çizgisel yük
- >45 kg/cm statik çizgisel yük olarak sınıflandırılmaktadırlar [4].

Çelik bandajlı silindirlerde bir hizada iki yada üç çelik tambur vardır. Bu tamburların içi boştur. Ağırlıklarını artırmak için içleri kum yada balast ile doldurulabilir.

Üç tamburlu silindirlerin ağırlığı iki tamburlularınkinden az ise de üç tamburlular da tamburların bastığı alan daha küçük olduğu için tabana yaptıkları basınç daha büyüktür [6].

### Özellikleri ve Kullanıldığı Yerler

- Statik ağırlığı sayesinde, daneleri arasında sürtünmenin büyüklüğü dolayısıyla rölatif kayma hızı küçük olan kırma taş malzemenin sıkıştırılmasını mümkün kılar.
- Pürüzsüz ve sıkı bir satıl meydana getirir [17].
- Granüler, kum-çakıl-kil karışımı ve kaya dolgularda en iyi sonucu verirler [8].
- Sıkıştırma kalınlığı 20-30 cm dir. Bu sıkıştırıcılar ile çok düzgün yüzeyler elde edilebilmektedir. Bu nedenle sıkıştırmada son işlemin çelik bandajlı araçlarla yapılması uygun olur [18].
- Bu silindirler toprak işlerinde sıkıştırmadan başka stabilize ve asfalt tesviye işlerinde geniş ölçüde kullanılmaktadır [19].
- Düz yüzeyli silindirler en çok ağır killer için uygundur [20].

### *Sakıncaları*

- Bu silindirleri zemin sıkıştırmasında kullanmamalıdır. Bunlar üniform bir yük verirler ve bu tip bir sıkıştırmaya uygun değildirler, onları daha çok malzemenin sıkıştırılmasında kullanmalıdır [21].
- Tabakaları yukarıdan aşağıya doğru sıkıştırdıklarından dolayı killi ve siltli zeminlerde yukarıdan aşağıya doğru sıkışan tabakanın üst kısmı kemerlenme etkisi yaparak tabakanın alt kısmının sıkışmasına mani olmaktadır [4].
- Silindirilen malzemenin önce üst kısmında sıkı bir tabaka teşekkül ettiği ve bu yüzden alt kısımdaki fazla suyun ve havanın kaçması zorlaştığı için tesir derinliği az ve dolayısıyla sıkıştırabileceği tabaka kalınlığı küçüktür.

- Granülometrisi uygun olmayan daneli zeminlerde kesme mukavemetinin yetersizliği ve su içeriği fazla olan kohezyonlu zeminlerde de taşıma kabiliyetinin yetersizliği dolayısıyla ilerleyemez.
- İlerleme kuvveti küçük olduğu için ancak yatay veya az eğimli yataylar üzerinde çalışabilir. Dik yerlerde, yamaç kenarlarında bu tip silindirlerin çalışması güvenli değildir [17].
- Çelik bandajlı silindirler plastik malzemenin sıkıştırılması sırasında önlerinde dalgalanmalara, arkalarında ise kabarmalara neden olurlar.
- Gevşek kumlar sıkıştırılırken ağır silindirleri pek taşıyamaz. Tamburlar altından yana kaçabilirler. Öte yandan bir çelik bandajlı silindirin sıkıştırma etkisi zeminde kil oranı arttıkça düşer.
- Bu sıkıştırıcılar ile, sıkışmasını büyük ölçüde almış yüzeyler çok düzgün duruma getirildiği için keçi ayağı, vibrasyonlu ya da lastik tekerlekli silindirler ile yapılan sıkıştırmayı tamamlamada kullanılırlar. Yüzeyde bulunan pürüz ve buruşuklukları ütü gibi bastırırlar [6].

#### *İşletilmesi:*

Bu silindirlerin seçilmesi ve işletilmesi ile ilgili olarak göz önünde tutulması gereken önemli hususlar aşağıda sıralanmıştır.

- a. Düz silindirler ile sıkıştırılmak üzere yerleştirilen malzemelerin tabaka kalınlığı 10~15 cm den fazla olmamalı ve tesviyesi iyi yapılmalıdır.
- b. Yerleştirilip tesviye edilen tabakanın bozulmadan sıkıştırılabilmesi için tekerleklerin çok batmaması ve silindirin patinaj yapmadan ilerlemesi gerekir. Bunun için de tekerleklerin spesifik basıncı (tekerlek genişliğinin 1 cm'sine gelen ağırlık), zeminin cinsine ve tekerleğin çapına tabi olmak üzere, belirli bir değerden büyük olmamalıdır. Bu itibarla bilhassa ilk geçişler ilave ağırlık koymadan yapılmalıdır; zemin kısmen sıkıştıktan sonra sıkıştırma tesirini artırmak maksadıyla tekerleklerle su veya kum doldurarak yahut balast takarak silindir ağırlaştırılabilir.
- c. Gerekli geçiş sayısı zeminin cinsini, tabaka kalınlığına ve silindirin tipine uygun olarak yukarıda belirtilen şekilde tespit edilmelidir.

- d.Silindirilen tabaka yüzeyinin bozulmaması için silindir harekete geçirilirken kavrama yavaş kapatılmalı ve durdurulurken ani fren yapılmamalıdır.
- e.Üniform bir sıkıştırma temini için silindirin yön değiştirmek maksadı ile durdurulup tekrar harekete geçirilişleri hep aynı yere isabet ettirilmemelidir.
- f.Kurblar ileri gidiş esnasında çizilmeli ve geri gidişler doğrusal olmalıdır [17].
- g.Sıkıştırmaya kenar şeritlerden başlanmalı ve en son orta şerit sıkıştırılmalıdır.
- h.Yan yana bulunan şeritler birbirine 30 cm bindirilmelidir.
- ı.İleri gidişten geri gidişe ve geri gidişten ileri gidişte geçişler (yön değiştirmeler) hep aynı noktalara rastlamamalı ve ani olmamalıdır [22].

#### Karakteristik Özellikleri

- Ağırlığı :3~15 ton
- Motor gücü :10-50 PS
- Tekerlek çapı :75-120 cm
- Şerit genişliği :100-210 cm
- İleri vites sayısı :2-4 adet
- Geri vites sayısı :2-4 adet
- Yürüme hızı :1-5 km/sa

#### **3.1.2.Keçi ayak ve küt ayak silindirler**

Bu tip silindirlerin tamburu üzerine çıkıntılar (veya ayaklar) ilave edilmiştir. Statik çizgisel yük yerine ayakların uçları ile zemini sıkıştırırlar. Ayaklarının yuvarlak çaplı ve uzun olanlarına keçi ayağı silindir, dikdörtgen veya kare kesitli ama daha geniş alanlı ve kısa olanlarına küt ayak silindir (Resim 3.2) denilir [4].



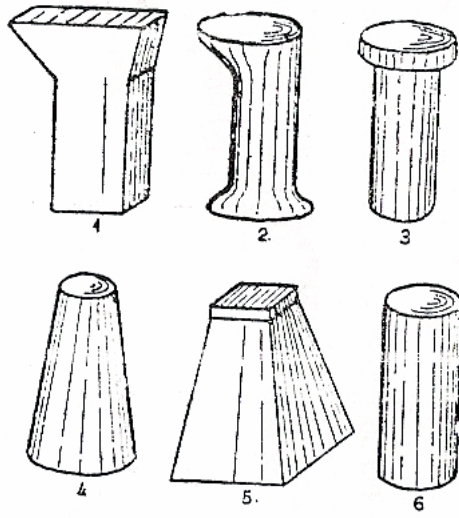
Resim 3.2. Küt ayak silindir

19.yy da yapılan toprak barajların inşaatı sırasında zemin tabakalarının sıkıştırılması için at ile çekilen ağır düz silindirler kullanılmaktaydı. Çekilen silindire nazaran silindiri çeken atların ayakları vasıtasıyla daha tesirli bir sıkıştırma yaptığı müşahede edilerek sıkıştırılacak olan tabakalar üzerinde hayvan sürülerinin dolaştırılması yoluna gidilmiş ve aynı tesiri mekanik şekilde elde edebilmek için yapılan keçi ayaklı silindirlerin kullanılmasına başlanmıştır [17].

Tipik keçi ayağı silindirlerin tamburları vardır. Bunlar silindir biçimindedir.İçleri boş tur. Tamburları 100-180 cm çapında olabilirler. 2,5 metre çaplı olanları da vardır. Dolu ağırlıkları 2,5-25 ton arasında değişir. Bir traktör ile çekilirler [6].

Bir traktör gücüne göre 1~ 4 keçi ayaklı silindir çekebilir. Çeşitli tipte yapılabilen ayaklar silindirinin çevresine şaşırtmalı sıralar halinde ve genellikle teker teker kaynak suretiyle tespit edilir.

Silindir yüzeyinde ayakların dağıtım tarzı öyle olmalıdır ki, bir çizgi boyuna rastlayan ayak sayısı az olsun. Bundan başka ayaklar arası kafi derecede büyük olmalıdır. Çok sık ayak ise iyi bir sıkılamaya zarar verebilir. Çoğunlukla yüzeyin metrekaresi başına 10-12 ayak yeterli görülmektedir. Ayaklar değişik şekillerde olabilir. Hangi şekilde olursa olsun bu ayaklar, çıkarken zemini koparmayacak şekilde olmalıdır. Bu hususu temin eden ve çoğunlukla kullanılan ayak biçimleri Şekil 3.1’de görülmektedir [23].



Şekil 3.1. Ayak biçimleri

Silindirlerin üzerindeki ayaklar eğilebilir ve sıkıştırmanın başlangıcında bir keçi ayağı gibi, sonunda ise yiv açan bir silindir gibi sıkıştırmayı sağlar. 20 cm.lik ilk serilen tabakadan başlayarak dolgu bitene kadar  $(10-20) \text{ kg/cm}^2$ ’lik basınç sağlayarak ve tabakaların yüzeyinde gezerek sıkıştırmayı tamamlar. Keçi ayağı, saatte normal 6 km.lik bir hızla çalıştırılır [21].

Genellikle keçi ayaklarını hafif, orta ve ağır olmak üzere üç grupta değerlendirmek mümkündür. Orta boyda olanlarının silindir çapları 1m, boyları 1,20 m, ayak boyları 0,18 m ve hizmet ağırlıkları 2 - 4 tondur. Ağır olanlarının ise silindir çapları 1,50 m, boyları 1,50 m, ayak boyları 0,23 m ve hizmet ağırlıkları da 8 - 14 tondur. Her bir ayağın tabanı  $40 \text{ cm}^2$  civarında olup zemine naklettiği basınç  $17 \text{ kg/cm}^2$ , ilave yük

ile 41 kg/cm<sup>2</sup>'ye varmakta ve bazı özel keçi ayaklarında 50-58 kg/cm<sup>2</sup>'yi bulmaktadır [23].

Keçi ayakları ile sıkıştırma yapmak için önce zemin belirli kalınlıkta bir tabaka halinde serilir. Serilen zemin tabakası kalınlığı yaklaşık olarak, keçi ayağı yüzeyindeki ayak boylarına eşit seçilmeli ve hiçbir zaman iş bu boylardan %20'den fazla büyük olmamalıdır.

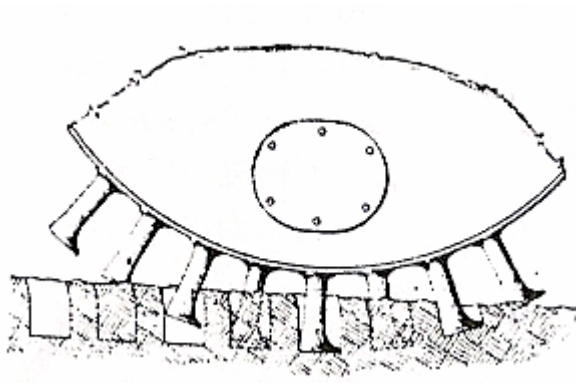
Bu hazırlıktan sonra boyutu ve tertip şekli seçilmiş bulunan keçi ayağı grubu, zemini sıkıştırmak üzere geçirilmeğe başlanır. Muhakkaktır ki zeminin sıkıştırılması için belirli bir şeritten, keçi ayağı grubunun birkaç defa geçirilmesi gerekecektir. Her geçişten sonra kuru birim ağırlık ölçülmek suretiyle yapılan sistematik deneyler göstermiştir ki kuru birim ağırlıklar muntazaman artmakta, fakat zeminin ve keçi ayağının karakteristiklerine bağlı olarak sonuçta bir sınır değere ulaşmaktadır [17].

Sıkıştırıcı ayağın, toprakla temasta yaptığı basınç, keçi ayaklı silindirler ile temin edilecek olan kompaksiyonun miktarını tayin eder [19].

Kompaksiyon miktarı önemli ölçüde silindirin ağırlığına ve metal ayakların temas alanına bağlıdır. Zeminle temas halindeki alan ne kadar küçük olursa, buna yüklenen gerilme o derece fazla olur [24].

Sıkıştırılmak üzere yerleştirilen tabakanın taşıma kabiliyeti zayıf olduğu için başlangıçta ayaklar iyice batır ve silindirin çevresi zemine oturur. Bu durumda temas yüzeyi büyük olduğu için spesifik basınç küçüktür.

Tabaka sıkıştıkça ayaklar daha az batır, temas yüzeyi küçülür, spesifik basınç artar ve nihayet silindirin çevresi zemine hiç temas etmez olur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Keçi ayaklı silindirin sıkıştırma tesiri

Bu durumda silindirin tüm ağırlığı sadece birkaç ayağın taban alanı vasıtasıyla tabakanın alt kısmına bindiği için bu kısım iyice sıkıştırılır. Geçiş sayısı arttıkça daha az batan ayaklar nihayet tabakanın üzerinde yuvarlanır, tabakanın en üst kısmının iyice sıkıştırılması mümkün olmaz ise de müteakip tabaka silindirlerken önce bu kısım sıkışır. İyi bir sıkıştırma yapabilmek için tabaka kalınlığının ayak uzunluğundan fazla olmaması gerekir, ayaklar ise 21 cm.den daha uzun yapılamamaktadır. Ayak uzunluğunun daha fazla olması halinde ayaklar girdikleri delikten çıkarken arkaya takılarak zeminin gevşemesine sebep olur [17].

Bu tip silindirlerin en büyük özelliği, serilen tabakaları aşağıdan yukarıya doğru sıkıştırmalarıdır. Serilen gevşek zemin malzemesine silindirin ayakları batarak önce malzemenin altındaki tabakayı sıkıştırır. Her pas da malzemenin sıkışması artacağından batma miktarı da gitgide azalarak tabaka kalınlığınca aşağıdan yukarıya doğru homojen bir sıkışma elde edilir [8].

Ayakların tabaka içine girmesi ve onu içeriden sıkıştırması ile zemin zerreleri her yönden etkilenmiş olur. Zerrelerin yana kaçma olasılığı azdır. Silindir, tamburun zemin yüzüne değmesine gerek yoktur. Tüm yük ayaklarla zemine aktarılır. Bu aktarma sırasında küçük değme alanlarında büyük gerilmeler oluşur.

Bazı durumlarda keçi ayağı silindir üst tabakalarda kemerlenme yapar ise de bu, birkaç geçişten sonra kalmaz. Bu silindirler sıkıştırma sırasında zeminin hava ile

temas eden yüzünü artırır ve dolayısı ile zemini havalandırır. Ayrıca ufalar, yoğururlar [6].

Killi zeminler için keçi ayak ve siltli zeminler için küt ayak silindir daha uygundur. Granüler zeminler için bu tip silindirler uygun değildir. Çünkü sıkıştırma sırasında ayakların altına gelen granüler daneler kayarak sıkışmaya karşı koymaktadır. Kuru kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılması bu tip silindirler ile mümkün ise de optimum su içeriğinde en iyi neticeyi verirler. Ancak kalın tabakaların sıkıştırılması için çok fazla pas sayısına ihtiyaç gösterirler. Serilen tabaka kalınlığı ayak yüksekliğine eşit ise en ideal sıkışma elde edilmektedir[8].

Keçi ayağı silindirler kohezyonlu zeminlerde kullanılır. Zemini yoğurma ve basınç etkisi ile sıkıştırırlar. 25-30 cm arasındaki tabaka kalınlıklarında çok etkilidirler. Öte yandan keçi ayakları granülometrik agrega ya da taş tabanlar üzerinde çalıştırılmamalıdır. Bu zeminler üzerinde segregasyona “ayrışmaya” neden olurlar [4].

Keçi ayaklarının verimine gelince bunu aracın hızı, geçiş sayısı, silindir boyu ve grubu ile tabaka kalınlığına göre hesaplamak mümkündür. Saatte 6 km hız, 25 cm tabaka kalınlığı, 120 cm boyunda 4 silindir ve 10-12 geçiş için iş bu verimin kabaca yol alt yapı gövdelerinin 190 m<sup>3</sup>/sa ve toprak barajlarda da 110 m<sup>3</sup>/sa civarında bulunduğu kabul edilebilir [23].

### Özellikleri ve kullanıldığı yerler

#### *Üstünlükleri*

-Ayakların zemin içerisine girmesinden dolayı ard arda gelen zemin tabakaları arasında mükemmel birleşme sağlanır. Bu su tutan zemin yapılar için önemli bir gereksinimdir [25].

-Sıkışma aşağıdan başladığı için tabakanın alt kısmındaki fazla su ve hava kolaylıkla dışarıya çıkabilir ve tekml tabakanın iyice sıkışması mümkün olur.

#### *Mahzurları*

-Ayak uzunluğunun 21 cm.den fazla yapılamayışı ve tabaka kalınlığının da ayak uzunluğundan fazla alınamayışı dolayısıyla sıkıştırılabilecek tabaka kalınlığı sınırlıdır.

-Yuvarlanma direncinin fazla oluşu dolayısıyla büyük güçlü traktöre ihtiyaç gösterir.

-Üniform bir sıkıştırma elde edilebilmesi için gerekli geçiş sayısı fazladır.

-Tabakanın üst kısmı tamamen sıkıştırılmaz ve ayak izlerinden dolayı yüzeyde çukurlar kalır. Birden fazla tabaka halinde yapılan sıkıştırmalarda bu husus alt tabakalar için değil fakat üst tabaka için bir mahzur teşkil edilebilir.

-Manevra kabiliyeti az olduğu için dar sahalı sıkıştırma işlerine elverişli değildir.

-Spesifik basıncın büyüklüğü dolayısıyla, daneleri ayakların altından sağa sola kaçabilen kum, çakıl ve kırma taş gibi kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılamaz [17].

-Rutubet derecesi bakımından hassastır [22].

#### *Kullanıldığı yerler*

-Keçi ayaklı silindirler esas itibarı ile yol, hava alanı ve toprak baraj inşaatlarında plastik haldeki orta kohezyonlu zeminler ile teşkil edilecek olan dolguların tabaka tabaka sıkıştırılmasında kullanılır [23].

-Keçi ayağı silindirler genelde siltli ve killi yani ince, kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılır [18].

-Bu silindirler killi zeminleri sıkıştırmada en etkilidirler [26].

#### Seçilmesi ve işletilmesi

Keçi ayaklı silindirlerin seçilmesi ve işletilmesi ile ilgili olarak göz önünde tutulması gereken önemli hususlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

1. Sıkıştırılacak zemin, ayak uzunluğundan fazla olmamak üzere, üniform kalınlıktaki bir tabaka halinde yayılıp greyder ile tesviye edilmelidir.
2. Seçilen silindirin ağırlığı ve spesifik basıncı zeminin cinsine uygun ise başlangıçta ayaklar zemine tamamen batır ve birkaç geçişten sonra ayakların batış miktarı azalır. Başlangıçta ayaklar zemine tamamen batmıyorsa, içerisine su veya kum doldurmak yahut çerçeveye ilave ağırlık koymak suretiyle silindir ağırlığı artırılmalıdır. Başlangıçta ayaklar zemine tamamen batıyor fakat birkaç geçişten sonra batış miktarı azalmıyorsa silindirin ağırlığını azaltmak veya daha hafif silindir kullanmak gerekir.
3. Yuvarlanma direncinin büyüklüğü dolayısı ile başlangıçta geçiş hızının küçük tutulması gerekir; fakat zemin sıkıştıkça yuvarlanma direnci azaldığı için, iş verimini artırmak maksadı ile hız büyütülmelidir.
4. Zeminin gevşemesine sebep oluşundan dolayı, kurlar sıkıştırılacak sahanın dışında çizilmelidir.
5. Keçi ayaklı silindir kullanılması halinde en üst tabakanın yüzeyinde çukurlar kalır ve üst kısmı tam sıkışmaz. Bu itibarla gereken hallerde ya en üst tabaka başka bir makine ile, mesela lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılmalı yahut en üst tabakanın çukurlar ihtiva eden ve iyice sıkıştırılmamış olan kısmı greyderler ile uzaklaştırılmalıdır [17].
6. Toprak gövdelerinin sıkıştırılmasında kenarlardan başlayarak ortaya doğru gelmeli ve her yeni bir şeritte geçişe başlarken bir evvelki yan şeride bindirmelidir [23].

### 3.1.3. Lastik tekerlekli silindirler

Kendi yürür yada çekilerek yürüyen tipleri vardır. Çekiciler daha çok eski tiplerde kullanılır. Hafif, orta, ağır olmak üzere üç boyu vardır [6].

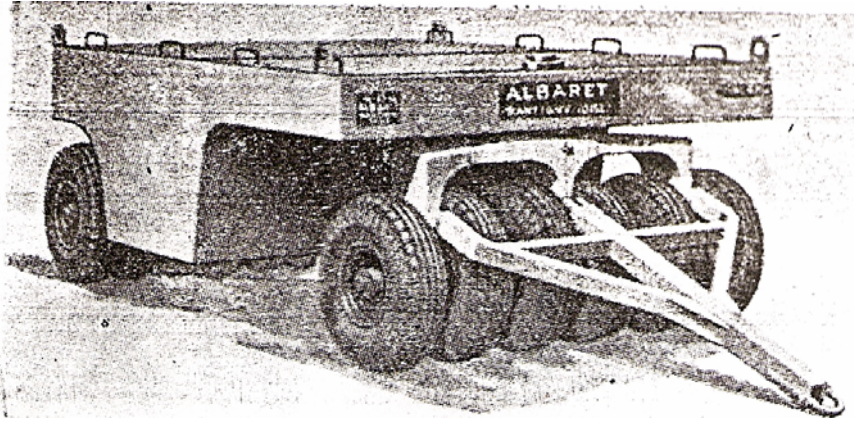
Hafif olanların ağırlıkları 5-15 tondur. Tekerlekleri 5 arkada 4 önde veya 7 arkada 6 öndedir. Hava bandajları 7,5×15 cm boyutundadır. Bunlar daha çok yol alt yapılarının sıkıştırılmasında kullanılır.

Orta ağırlıkta olanların boş ağırlıkları 13-25 ton, dolu ağırlıkları 45-50 tondur. 4, 7, 9, 11 tekerlekli olanları vardır. Hava bandajları 28×24 cm boyutundadır. Bu araçlar

daha çok büyük meydanların alt yapıları ile toprak baraj ve seddelerin sıkıştırılmasında kullanılır.

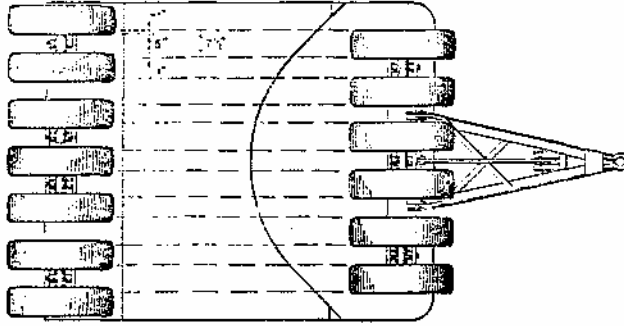
Ağır tipleri 25-200 ton ağırlığı bulan dev araçlardır. 7 ve 4 tekerleklidir. Bunlar son zamanlarda büyük hava meydanları inşasında kullanılmak üzere tasarlanmıştır [23].

Resim 3.3’de lastik tekerlekli silindirlerin römork şeklinde çekilen iki dizili tipini göstermektedir. Her iki dizideki tekerlekler sabit birer aks üzerine takılmış olmayıp ikişer ikişer mafsallı olarak şasinin altına tespit edilmiştir. Bu sayede hem yüzeydeki düzgünlüklere rağmen her tekerleğin eşit yük ile zemine oturması sağlanmış ve hem de sıkıştırma bakımından faydalı bir yoğurma tesiri yapan yalpa hareketleri elde edilmiş olur.



Resim 3.3. Lastik tekerlekli silindirin iki dizili tipi

Sayısı arka dizideki tekerlek sayısından bir eksik olan ön dizideki tekerlekler, arka dizideki tekerlekler tarafından sıkıştırılacak olan şeritlerin aralarını sıkıştıracak şekilde tertiplenmiştir (Şekil 3.3).

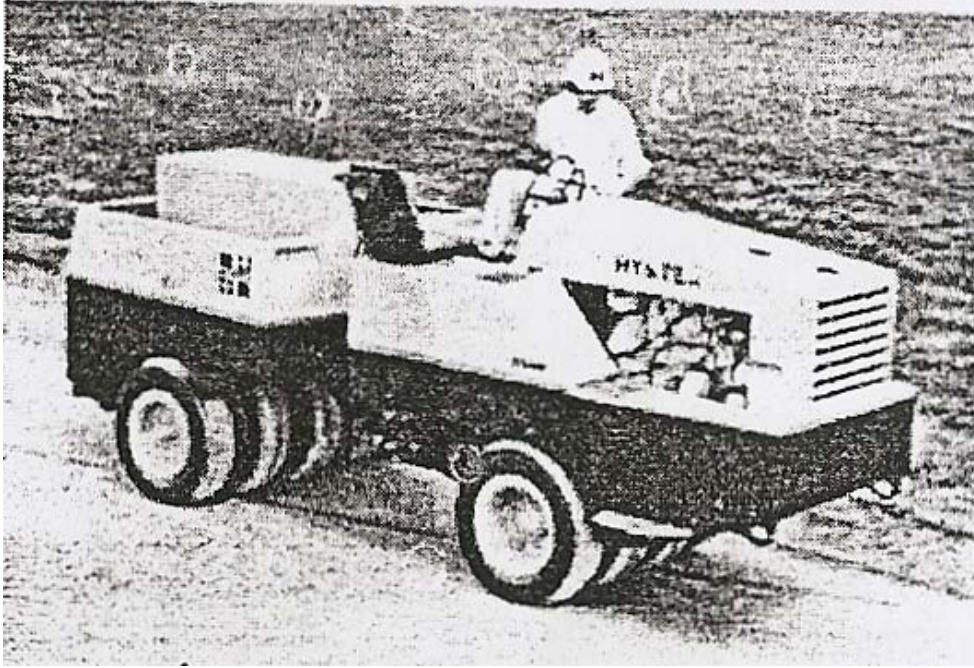


Şekil 3.3. Lastik tekerlekli silindirin alttan görünüşü

Ağırlığın artırılması için şaside su veya kum doldurulabilecek boşluklar bulunduğu gibi şasi üzerine ilave ağırlık da konabilir. Bilhassa ilk geçişlerde zemine batmaması için lastik tekerlekler büyük çaplı ve alçak basınçlıdır. Ağırlığın iki dizi üzerinde bulunan çok sayıdaki tekerleğe üniform olarak dağıtılmasındaki ve ön diziye direksiyon doğrultusunun verilmesindeki güçlük dolayısı ile büyük tiplerin tekerlekleri tek dizi halinde tertiplenir [17].

Sıkıştırma yükünü temin için, bütün silindirlerin en ucuz malzemelerle doldurulabilecek “safra” sandıkları mevcuttur. Bu maksat için en çok su veya kum tercih edilir. Fakat dev silindirlerde maksimum yükü temin için ekseriya pik demirden istifade edilir [19].

Teker ile aks arasında küçük bir salınım olduğundan dolayı yoğurma etkisi ile sıkıştırma yapabilmektedir. Tekerlerin temas basıncına ilaveten yoğurma etkisinden dolayı homojen bir sıkışma elde edilebilmektedir. Ayrıca teker iç basıncını otomatik olarak veya elle değiştirmek mümkündür (Resim 3.4).



Resim 3.4. Lastik tekerlekli silindir

Böylece değişen teker iç basıncı ile lastik temas alanı da değiştirilebildiğinden dolayı temas basıncıda değiştirilebilmektedir. Böylece sıkışmaya direnç gösteren granüler malzemelerin sıkışması mümkün olacaktır [4].

Keçi ayağı silindirle sıkıştırma bir çeşit yoğurma etkisi ile sağlanırken lastik tekerlekli silindirler daneleri birbirine yaklaştırmak suretiyle sıkıştırma yaparlar. Lastik iç basıncı sıkıştırma bakımından önem taşır [18].

Bu silindirlerin şerit halindeki hareketlerinden ayrı olarak zikzak ve yoğurma hareketleri de mevcuttur ki, bunlar toprak taneciklerinin hava boşluklarına daha uygun bir şekilde yerleşmesine yardım edici kompaktif hareketlerdir[19].

Bu tip silindirler ile killi ve killi-kum zeminler için en iyi sıkışma elde edilmektedir. Granüler temel ve alt temel tabakalarının kompaksiyonunda lastik tekerlekli silindirler çok etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Bu tip silindirler asfalt kaplamalarda mutlak kullanılması gerekli iken son yıllarda yüksek hız ne manevra kabiliyetlerinden ötürü zeminlerin kompaksiyonunda da sıkça kullanılmaktadır.

Yapılan araştırmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yüksek yoğunlukların elde edilmesinde teker basıncının artması teker yükünün artmasından daha etkindir.
- Lastik basıncı sabit iken lastik genişliğı arttıkça sıkıştırma genişliğı ve miktarı artmaktadır.
- Teker temas alanı ve temas basıncı, teker yükü ve lastik basıncına bağıdır. Teker yükü ve lastik basıncı arttıkça sıkışma artmaktadır.
- Teker yükü ve lastik basıncı arttıkça kuru birim ağırlık artmakta ve optimum su içeriğı azalmaktadır.
- Teker yükü ve lastik basıncı arttıkça her derinlikte birim ağırlık artmaktadır. Fakat lastik basıncı arttıkça yüzeyde daha fazla sıkışma elde edilmektedir [4].

Lastik tekerler alçak noktaları atlamamak, yüksek kesimlerde kemerleşmelere neden olmamak amacı ile biraz aşağı yukarı hareket etme yeteneğı ile donatılırlar. Aynı zamanda eksen tarafından dıştaki tekerlere hafifçe binilir ve böylece tekerlek dizisine bir kemer durumu verilir. Tekerleklerin bu durumu olabilmesi ile silindirin biraz yoğurma yapması sağılanmış olur.

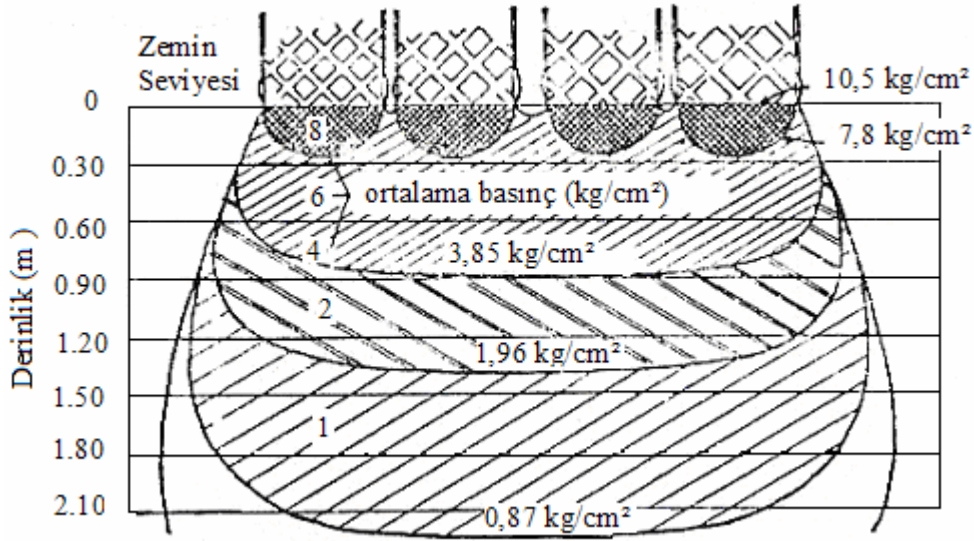
Küçük lastik tekerlekli sıkıştırıcılar sıkıştırılacak zemin üzerinde, büyük lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kadar basınç oluştururlar. Bunlar zemin topaklarının ezilmesini daha çok sağılar ve kitleye önlerinde bir öteleme vermezler. Ya da yanıl yer değıştirmelere neden olmazlar.

Geniş lastik tekerlekli silindirler her tür zeminde çalışabilir. Bunlar büyük bir basınç aktarma alanını içerirler. Bunun için dar lastik tekerleklere göre basınçları daha derinlere iner. Ancak ince tabaka kalınlıklarında yine de etkileri azdır. Tekerleklerin aralarında kalan çiğnenmemiş yerleri azaltmak için geniş yapılmaları gerekebilir [6].

Zemin üzerine etkiyen basınç yaklaşık olarak lastiğın hava basıncına eşittir. Bu basınç elips biçiminde bir temas yüzeyi üzerinde uygulanmaktadır. Yüzey alanı tekerlek üzerine binen yükün ve lastik hava basıncının fonksiyonudur.

Bu araçlarla etkili bir sıkıştırmanın yaklaşık olarak elipsin ortalama yarıçapına eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu etkinlik derinliği sıkıştırılabilir tabaka kalınlığını belirlemektedir. Sıkıştırma zemin danelerinin birbirlerine yaklaştırılması biçiminde sağlanmaktadır [27].

Bu basıncın zemin içerisine yayılmasına bir örnek olarak  $10,5 \text{ kg/cm}^2$  basınçlı hava bandajına haiz 100 tonluk bir aracı alırsak, bu yayılım Şekil 3.4’de olduğu gibi görülür. Buradan sıkıştırmanın, bandajın temas yüzeyini teşkil eden elipsin ortalama yarıçapından daha derine tam basınç ile tesir edemeyeceği görülür. Sonuç olarak Şekil 3.4’de ki şartlar altında iyice sıkıştırılabilen tabaka kalınlığının  $h=30 \text{ cm}$  olduğu görülmektedir [23].



Şekil 3.4. Lastik tekerlekli silindirde, zemine tesir eden basıncın zemin içerisinde yayılımı

Lastik tekerlekli silindirlerin sıkıştırma güçlerini ifade edebilen dört değer vardır.

- Boş ağırlığı
- Tekere ya da lastiğe gelen ağırlık
- Lastik genişliğinin cm’si başına düşen ağırlık
- Lastik şişme basıncı

Lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırmanın mekanizması biraz karışıktır. Çünkü lastik demir bandaj gibi değildir. Esnektir ve alçak hava basıncı tabanda bir eliptik değme yüzeyi oluşturur. Gelen yükün etkisi bu alana yayılarak azalır. Bu alan büyüklüğü yükten başka lastik iç basıncına, lastik büyüklüğüne, lastik katsayısına bağlıdır. Bazı durumlarda lastik basıncı silindir çalışır iken değişir. Bütün bunları göz önünde tutarak diyebiliriz ki tekerlek sayısı, lastik boyutları ve şişme basıncı bilinmeden salt ağırlık sıkıştırma gücü belirlemede bir anlam içermez [6].

Lastik tekerlekli silindir kuvveti zemin tabakası yüzeyine tatbik eder ve sıkıştırma birbirini takip eden silindir geçişleriyle basıncı tekrarlaması neticesinde temin edilir. Basınç her ne kadar ilk geçişlerde daha fazla görülmelerinden dolayı biraz düşük ise de bu fark ihmal edilip bütün geçişlerde aynı basıncın tatbik edildiği kabul edilebilir.

Tatbik edilen basınç aşağı yukarı tekerlek içerisindeki havanın silindir yüklü halde iken ki basıncına eşittir. Böylece hava basıncı dolgunun birim ağırlığına doğrudan doğruya tesir eder. Çizelge 3.1'e bakınız [28].

Çizelge 3.1. Siltli killerin lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılmasından elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim ağırlıkların özeti [28]

| Tekerleklerdeki<br>hava basıncı | 150 psi<br>10,5 kg/cm <sup>2</sup> |                                    | 90 psi<br>6,34 kg/cm <sup>2</sup> |                                    | 50 psi<br>3,52 kg/cm <sup>2</sup> |                                    |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|                                 | $w_{opt.}$<br>%                    | Max $\gamma_k$<br>t/m <sup>3</sup> | $w_{opt.}$<br>%                   | Max $\gamma_k$<br>t/m <sup>3</sup> | $w_{opt.}$<br>%                   | Max $\gamma_k$<br>t/m <sup>3</sup> |
| 4 geçiş                         | 16,0                               | 1,82                               | 17,7                              | 1,77                               | 19,7                              | 1,72                               |
| 8 geçiş                         | 15,3                               | 1,85                               | 17,2                              | 1,78                               | 19,0                              | 1,73                               |
| 16 geçiş                        | 14,7                               | 1,87                               | 17,0                              | 1,79                               | 18,8                              | 1,73                               |

Standart 45,4 tonluk lastik tekerlekli silindir. Zemin karakteristikleri: Likit limit = % 38, Plastisite indeksi = %13, Proctor optimum su içeriği = % 17,8, Standart proctor maksimum kuru birim ağırlığı = 1,72 t/m<sup>3</sup>

## Özellikleri ve kullanıldığı yerler

### *Üstünlükleri*

- Keçi ayaklı silindirlere nazaran daha az geçiş sayısı ile daha kalın tabakaların sıkıştırılmasını mümkün kılar.
- Keçi ayaklı silindirlere nazaran yuvarlanma direnci daha azdır.
- Yoğurma tesiri sayesinde malzeme daneleri boşlukları doldurmak üzere yan taraflara doğru da kaydırılabildiği için, iri topraklar ihtiva eden zeminlerinde sıkıştırılmasını mümkün kılar.
- Sıkıştırılan tabaka yüzeyi düzgündür [17].
- Rutubet derecesi bakımından çok hassas değildir [29].

### *Mahzurları*

- Sıkıştırma üstten yapılan tesir ile sağlandığı için tabakanın alt tarafında tam sıkışmamış kısımların kalması ihtimali mevcuttur.
- Manevra kabiliyetinin azlığı yüzünden dar sınırlı sahaların sıkıştırılmasında kullanılamaz [17].
- Serbest malzemelerdeki akıcılık,
- Çok yaş zeminde kendi kendine kayma hareketi,
- Sıkıştırıcının en çok yaklaşık 15 cm derinliğe kadar etkin olması,
- Yalnız üst tabakalarda yoğunluk oluşması,
- Zeminde kemerlenme olumsuzluklardandır [6].
- Pnömatik lastik tekerleklerin emsalsiz özellikleri sebebiyle, asfalt kaplamayı teşkil eden malzemeleri sıkıca birbirine birleştirerek küçücük hava boşluklarına mani olurlar ki, bunlar ileride ciddi kaplama bozukluklarına sebep olabilmektedirler.
- Bu sınıftaki silindirlerin avantajları 24 inç kalınlığa kadar ki tabakaları sıkıştırabilmeleri ve dolgu malzemesi içindeki hava boşluklarını elimine etmeleridir

ki bu hususlar halen kullanılmakta olan büyük ve ağır uçaklar için ciddi bir tehlike arz etmektedir [19].

#### *Kullanıldığı yerler*

Lastik tekerlekli silindirler her tür zeminde ve asfaltta sıkıştırma yaparlar [4].

Lastik tekerlekli silindir özellikle kohezyonu az daneli zeminlerin sıkıştırılması için kullanılmaktadır[27].

Lastik tekerlekli silindirler kumlu ve killi zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılabilir [26].

Kohezyonlu zeminler ve içerisinde iri daneleler bulunan kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılır [29].

Bağlantı yerlerinde ön sıkıştırma işlemleri, eğimlerde ön sıkıştırma işlemleri, hataların (çatlak gibi) düzeltilmesi ve yüzey işlemleri, ince tabaka sıkıştırılmalarında kullanılır [30].

Lastik tekerlekli silindirler killi ve tanecikli zeminler için kullanılabilir. Ayrıca, asfalt tabakası da ilk olarak bu silindirlerle ezilir ve sıkıştırılırlar. 40-50 tonluk daha geniş birimler 30 cm'lik zeminlerde etkili olabilirken zeminler veya duvar tabanları için etkili derinlik 15 cm'ye kadardır [31].

Hafif tipler yol inşaatında kalınlığı 25 cm'ye kadar olan tabakaların ve ağır tipler toprak baraj ve hava alanı inşaatlarında kalınlığı 60 cm'ye kadar olan tabakaların sıkıştırılmasında kullanılmaktadır [17].

### Seçilmesi ve işletilmesi

Lastik tekerlekli silindirler aşırı yüklenmemeli ve aşırı hızlı hareket ettirilmemelidir. Bu yarardan çok lastik aşınmasına neden olur [6].

Lastik tekerlekli silindirlerin hem ağırlığı hem de lastik basıncını değiştirmek suretiyle ayarlanabilen spesifik basıncı zeminin cinsine ve tabaka kalınlığına uygun olmalıdır [17].

### Keçi ayaklı ve lastik tekerlekli silindirlerin birbirlerine göre avantajları

Keçi ayaklı ve lastik tekerlekli silindirlerin birbirine göre avantajları halen münakaşa edilen bir konudur. Mühendislerin çoğu bazı tip zeminlerin keçi ayaklı silindirlerin tatbik ettikleri yüksek basınç ve karıştırma tesiri altında en iyi şekilde sıkıştırıldıklarında hem fikirdirler. Bununla beraber geçirimsiz zemin tiplerinin bir çoğunun sıkıştırılmasında lastik tekerlekli silindirler tercih edilmektedir. Lastik tekerlekli silindirler içerisinde iri bloklar ve kaya parçaları bulunan zeminlerin sıkıştırılmasında daha tesirlidir. Zira keçi ayaklı silindir dolgu üzerinden geçerken bloklar civardaki ayakların bloklar arasında bulunan kili sıkıştırmasına mani olurlar.

İki tipin başlıca avantajları şöyledir.

#### *Keçi ayaklı silindirler*

1. Keçi ayaklı silindir üst 5-10 cm'lik kısmı gevşek bıraktığından üst üste gelen tabakalar devamlı bir dolgu meydana getirecek şekilde birbirine kaynarlar. Dolayısı ile keçi ayaklı silindirlerle sıkıştırılan dolgular daha üniform bir kuru birim ağırlığa sahip olurlar ve nadiren kaynaşmamış yatay tabaka ihtiva ederler.

Bunun aksine lastik tekerlekli silindirle sıkıştırılan dolgu tabakalarının yüzeyi sert ve pürüzsüzdür, yeni tabaka ile kaynaşmasını temin için pürüzlendirilmesi zorunludur.

2. Keçi ayaklı silindirler yumuşak kaya bloklarının parçalanmasında daha tesirlidir. Böylece yumuşak yapılı kayadan elde edilen çakıllı ve bloklu malzeme daha geçirimsiz ve daha iyi bir dolgu meydana getirir.

3. Keçi ayağı, karıştırma tesiri ile zemini karıştırır, kesekleri kırar ve harrow diski veya pullukla karıştırmaya daha az ihtiyaç gösterir. Ayrıca ıslak zeminlerin sıkıştırma sırasında kurutulabilecekleri gibi kuru zeminlere de sıkıştırma sırasında su püskürtülebilir. Bunun aksine lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılan dolgularda su içeriği sıkıştırmadan önce istenen değerde olmalıdır.

4. Başlangıçta basıncın az oluşu ve daha sonra zeminin keçi ayağı yükünü taşımaya kafi gelecek kadar mukavemet kazanırken mukavemet artışından dolayı, keçi ayaklı silindir lastik tekerlekli silindirle yapabileceğinden daha geniş su içeriği sınırları dahilinde sıkıştırma yapabilir.

#### *Lastik tekerlekli silindirler*

1. Lastik tekerlekli silindirlerin kullanılışının artmasına sebep bunların ekseri zemin tiplerini keçi ayaklı silindirlere göre daha ucuz ve daha hızlı sıkıştırmalarıdır. Lastik tekerlekli silindirler zemini daha kalın tabakalar halinde sıkıştırabilir böylece daha iri taneli çakıl ve blokları ihtiva eden zeminler dolguda kullanılabilir. Lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırmada keçi ayağı ile olandan daha az sayıda geçiş yapılması gerekir ve lastik tekerlekli silindirleri çeken traktörler ekseriyetle daha hızlı gidebilirler. Bu sebeplerden dolayı keçi ayaklı silindirlerden daha az sayıda lastik tekerlekli silindire ihtiyaç hasıl olur. Bu da inşaat sathının sıkıştırmacı ekipman tarafından daha az işgal edilmiş olmasından dolayı dolgu hızını artırır. Bütün bu avantajlara karşı su içeriğinin daha hassas bir şekilde ayarlanması ve iyi bir kaynaşmanın temini için tabaka sathının pürüzlendirilmesi mecburiyetlerinin doğurduğu zorluklar gibi dezavantajları vardır.

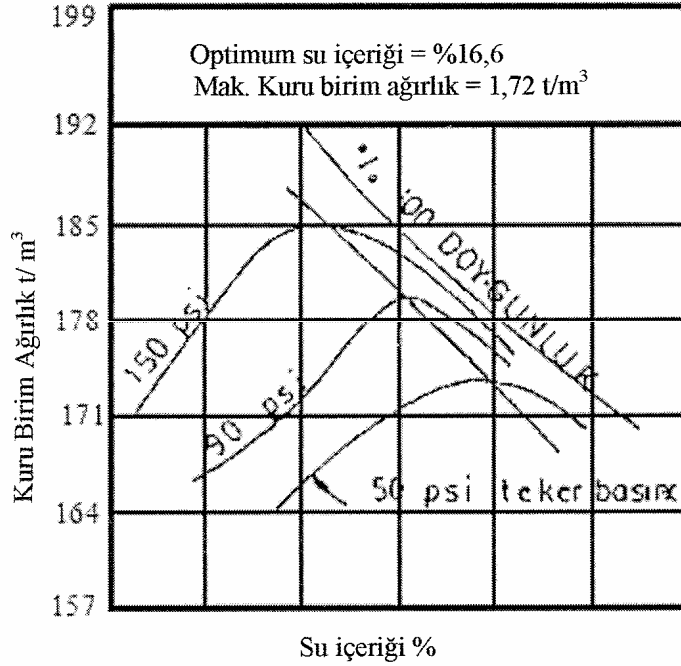
2. Bazı iri taneli zeminlerde keçi ayaklı silindirlerin ayakları çabucak eskir ve devamlı bakımı gerektirir. Bu tip zeminlerde tabaka üzerinden yürüyen lastik tekerlekli silindir daha yavaş hasara uğrayabilir ve daha ekonomik olabilir.
3. Yağmurlu mevsimde lastik tekerlekli silindirlerle yapılan dolgular daha hızlı ilerler çünkü tabakaya su nüfuzu problemi daha azdır. Keçi ayaklı silindirler daima tabaka sathında yağmurdan önce düz satırlı bir silindirle sıkıştırılmadığı taktirde yağmur suları ile doymun hale gelen gevşek bir kısmı bırakırlar. Tabaka yüzeyinin düz satırlı silindirlerle sıkıştırıldığı yerlerde daha ani sağnaklar dolguyu yüzey sıkıştırması yapılmadan ıslatır.
4. Lastik tekerlekli silindirler münferit tekerlere gelen büyük yükler sayesinde alttaki tabakalardaki yumuşak noktaların çökmesini temin ederek inşaat kontrolüne rehberlik ederler.
5. Lastik tekerlekli silindir sert kaya yamaçlarda, temel ve beton yapımlarla geçirimsiz çekirdek arasındaki temas yüzeylerinde keçi ayaklı silindirlere göre daha iyi sıkıştırma temin eder [28].

#### Vicksburg sıkıştırma araştırmaları

Lastik tekerli ve keçi ayaklı silindirlerle sıkıştırmaya tesir eden faktörler üzerinde yapılan en iyi etütlerden biri, Amerikan Ordu Vicksburg Waterways Deney Merkezi “US Army Vicksburg Waterways Experiment Station” tarafından yapılan araştırmalardır.

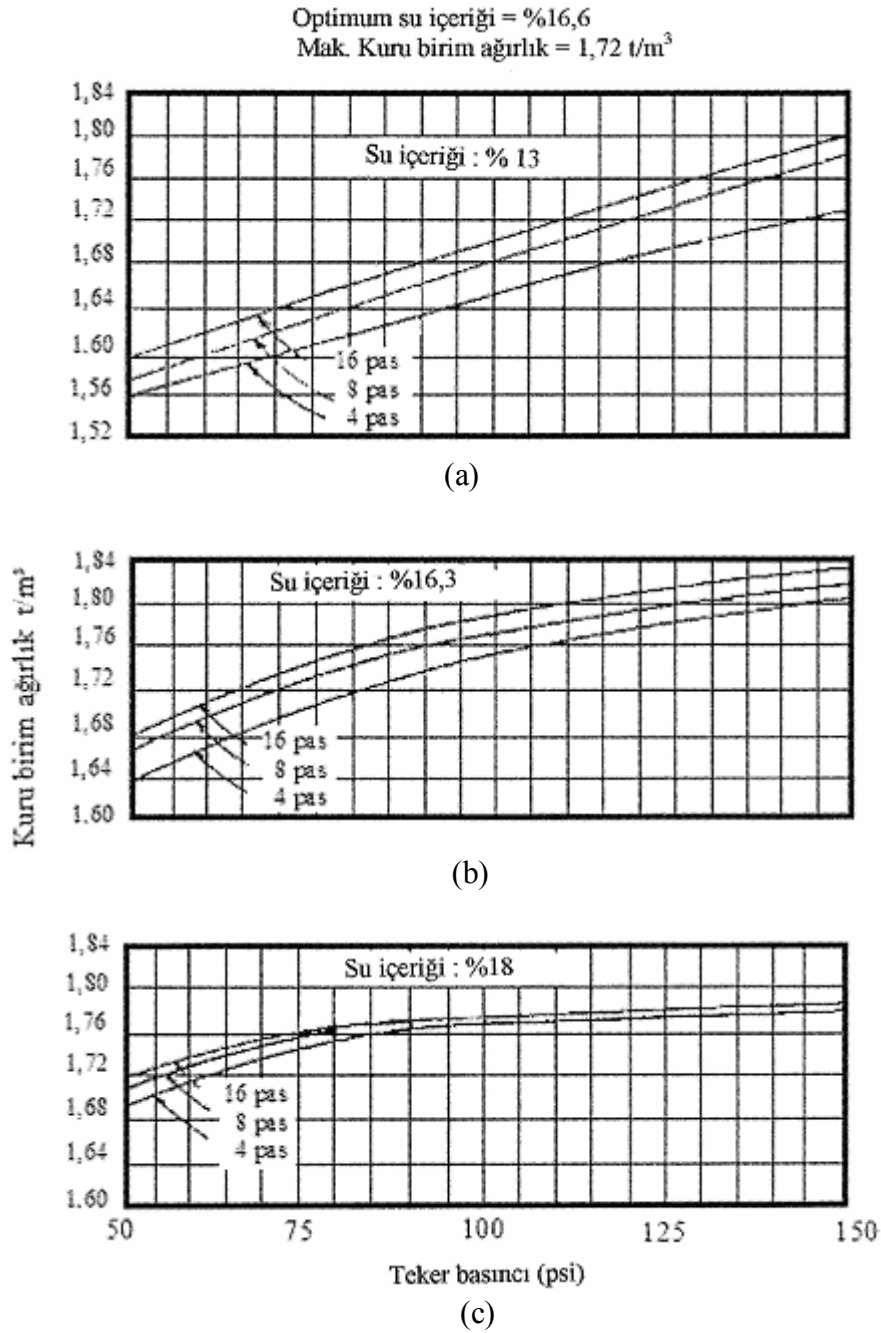
Çalışmaların büyük kısmı gayet üniform olan bir siltli kil üzerinde değişik su içeriklerinde, her iki sıkıştırıcı tipinden değişik toplam ağırlık ve basınca haiz silindirlerle, değişik sayıda geçişler yapılarak sıkıştırılan numune dolguları teşkil edilerek yapılmıştır.

Lastik tekerlekli silindirlerin tipik sonuçları (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6), tekerler içerisindeki hava basıncının kuru birim ağırlık üzerinde çok büyük tesirinin olduğunu ve bu tesirin su içeriğinin optimumdan az olduğu halde fazla olduğunu göstermiştir.



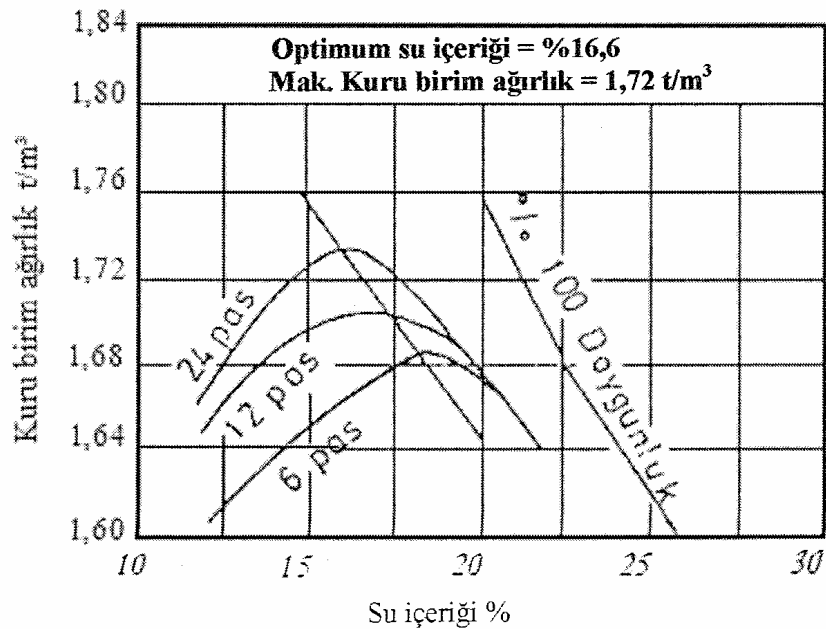
Şekil 3.5. Değişken teker basınçlarına sahip lastik tekerlekli silindirlerle 8 pas sıkıştırılan siltli kil üzerinde yapılan arazi birim ağırlık deneyinden elde edilen su içeriği kuru birim ağırlık eğrileri

Çizelge 3.1.'de görüldüğü gibi sıkıştırma enerjisi 10,50 kg/cm<sup>2</sup> (150 psi) teker basıncına sahip silindirin 16 pasından, 3,52 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi) teker basıncı olan silindirin 4 pasına düşerken, optimum su muhtevası %14,7'den %19,7'ye yükselmektedir. Aşağı yukarı 45,040 tonluk lastik tekerlekli silindire tekabül eden 6,34 kg/cm<sup>2</sup> (90 psi) teker basıncına sahip silindir için optimum su içeriği standart proctor optimum su içeriğinden biraz düşük fakat maksimum kuru birim ağırlık standart proctor maksimum kuru birim ağırlığından 0,5 t/m<sup>3</sup> kadar yüksektir.

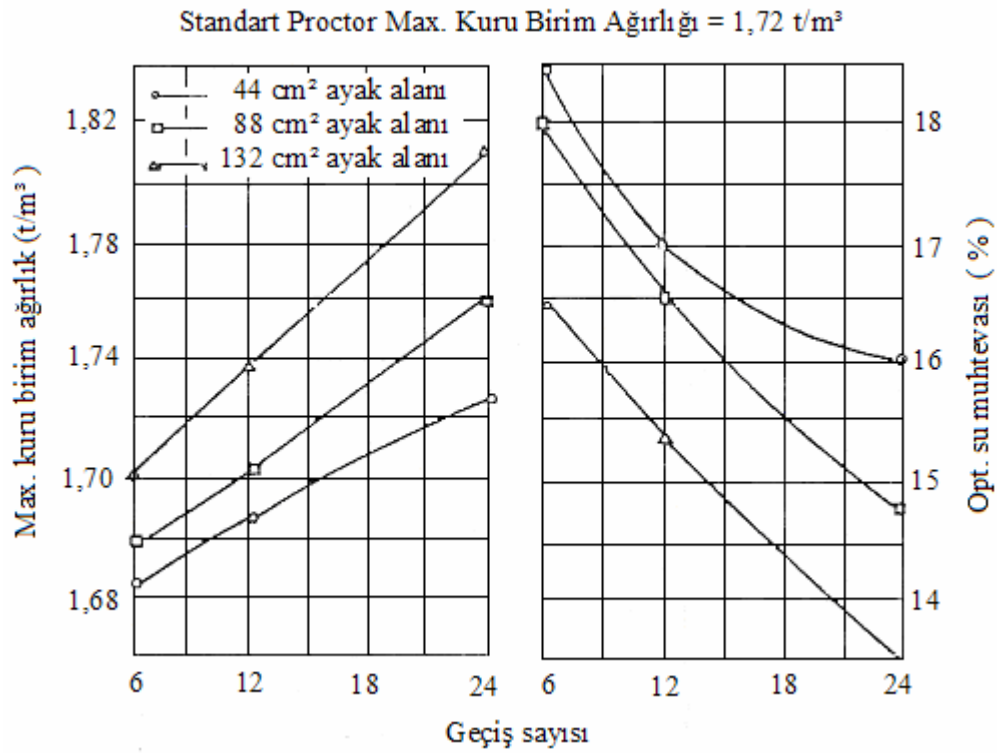


Şekil 3.6. Teker basıncı ve geçiş sayısının siltli killerin kuru birim ağırlıkları üzerine tesirleri a)  $w = \%13$  için; b)  $w = \%16,3$  için; c)  $w = \%18$  için

Etütlerde ayak taban alanı 45 cm<sup>2</sup>, 90 cm<sup>2</sup> ve 135 cm<sup>2</sup> olan ve 17,0 kg/cm<sup>2</sup> ayak basıncını temin edecek şekilde tertiplenmiş (toplam ağırlıklar 6,400 – 12,800 ve 19,200 ton) keçi ayaklı silindirler kullanılmıştır. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, dolgu optimum su içeriği azaldıkça maksimum kuru birim ağırlık artmaktadır.

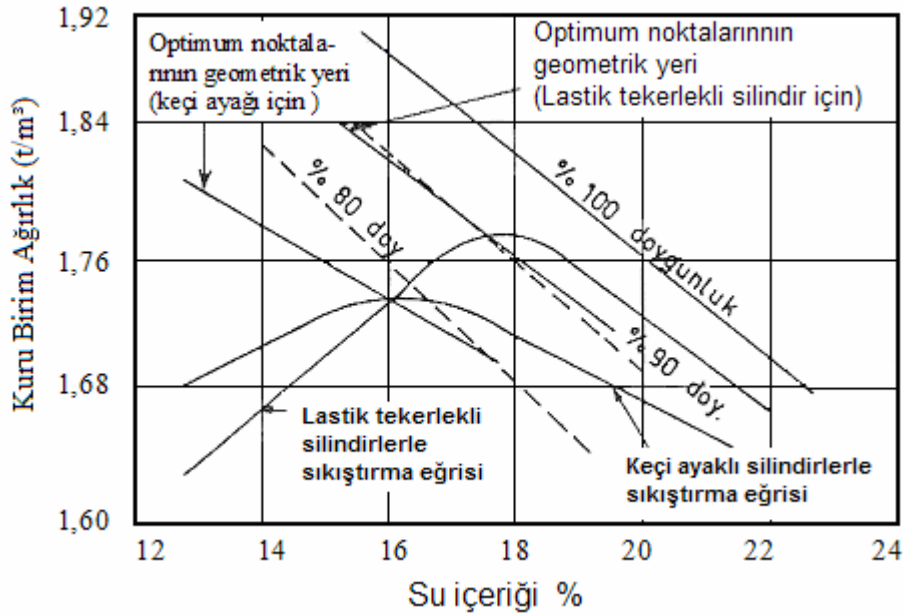


Şekil 3.7. 17 kg/cm<sup>2</sup> teker basıncına sahip keçi ayaklı silindirlerle sıkıştırılan siltli kile ait su içeriği-kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 3.8. Siltli kilden yapılmış dolgu üzerine keçi ayağı ve geçiş sayısının tesirleri

Vicksburg araştırmalarında varılan en ilginç sonuçlardan biri de keçi ayağının dolgu içerisinde lastik tekerlekli silindirlerden çok daha fazla hava bıraktığıdır. Şekil 3.9’da elde edilen çeşitli kuru birim ağırlıklar özetlenmekte, keçi ayaklı silindirin optimum şartlarının (optimum su içeriği ve maksimum kuru birim ağırlık) %80 doygunluktan daha düşük su içeriğinde olduğunu, lastik tekerlekli silindirinkinin ise aşağı yukarı %90 doygunluktaki su içeriğinde olduğunu göstermektedir.



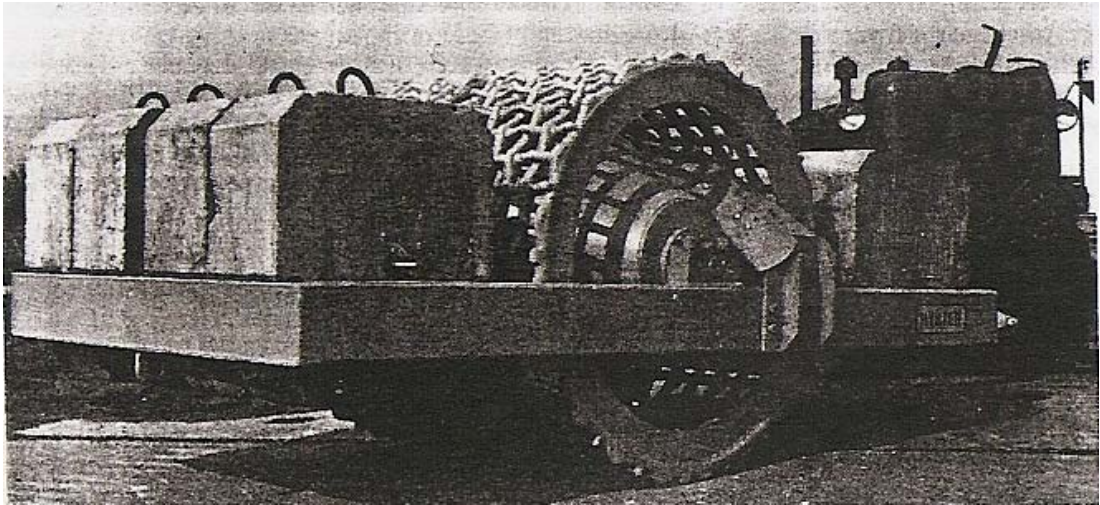
Şekil 3.9. Siltli kil dolgu üzerinde yapılan deneylerden elde edilen keçi ayaklı ve lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırma mukayeseleri

Vicksburg araştırmalarının Şekil 3.5’den Şekil 3.9’a kadar özetlenen neticeleri yalnızca bir siltli kil üzerinde yapılan deneylerden elde edilmiştir. Fakat bütün düşük ve orta yükseklikte plastisiteye sahip zeminler için genel bağıntının bu elde edilen neticelere benzemesi muhtemeldir. Her ne kadar çok az ve parçalar halinde bilgi yayınlanmışsa da toprak barajların geçirimsiz çekirdeklerinin inşa edileceği zeminlerin çok büyük bir ekseriyeti için standart keçi ayaklı silindir ve 45,040 tonluk lastik tekerli silindir için bulunan dolgu optimum su içeriğinin standart proctor optimum su içeriği ile aynı değerde olduğu görülmektedir [12].

### 3.1.4. Kafesli (Grid) silindirler

Bu makineler bir traktör tarafından itilmek için tasarlanmaktadır ve ağır çelikten yapılmış parça parça kare kalıplar içeren kompaksiyon silindir veya silindirlerine sahiptir (Resim 3.5). Bunlar, çelik kısmın bağlantı noktalarının altındaki yüksek uç gerilmeler ile parçacıkları ezme özelliğinden dolayı, özellikle yumuşak kaya tabakalarını sıkıştırmak için uygundur. Heterojen zeminlerin, özellikle ıslak ve kuru plastik zemin karışımlarının olduğu yerlerde, kafes zeminle tıkanma eğilimi gösterir ve potansiyel uç gerilmelerinin faydaları ortadan kalkabilir [32].

Genelde bir silindirin ağırlığı yaklaşık 5500 kg. dır ve 11000 kg. a ölü ağırlık konularak çıkarılabilir. Kafesli silindir ıslak kil ve alüvyonlu zeminler de dahil tüm zemin çeşitleri için uygundur [33].



Resim 3.5. Kafesli silindir

Kafesli silindirin en iyi sıkıştırma yaptığı zeminler kaya bloklı zeminler, çakıllar ve kumlardır. Ekipmanın yüksek çekme hızlarında zemin malzemesinin titreşmesi, ezilmesi ve çarpılması söz konusudur [15].

### 3.2.Dinamik Silindirler

#### 3.2.1. Vibrasyonlu silindirler

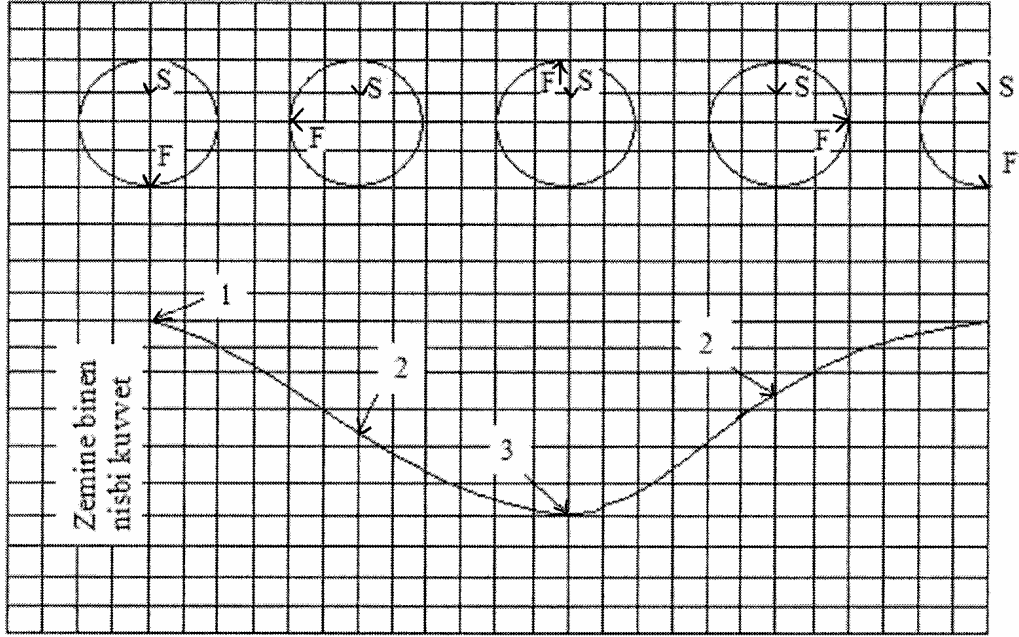
Lastik tekerlekli silindirler hariç tüm silindirlere vibrasyon etkisi kazandırılarak yol inşaatlarının her aşamasındaki kompaksiyon işlerinde daha etkili olarak kullanılmaktadır [8].

Vibrasyonlu silindirlerin oluşturduğu titreşimler, zemin taneciklerine iletilir ve yoğunluğunu artırır. Benzer sonuçları almada vibrasyonlu silindirlerle statik silindirler karşılaştırılırsa, daha ağır statik yüklü bir silindir gereklidir. Bugünün keçi ayağı ile düz yüzeyli silindirleri bir titreşim ünitesi ile yapılandırılır ki bunun frekansı kırılmış bir kayanın yoğunlaşmasını da içeren tüm zemin çeşitlerinin çoğuna uygun olan metotların etkin kılınmasında değişiklik gösterebilir [34].

Silindirli vibratörlerde eksantrik kütle zemin üzerinde yuvarlanan bir silindir tekerleğin ekseninden geçen mil üzerine tertiplenmiştir. Silindirin kendi ağırlığı genellikle eksantrik kütlenin meydana getirdiği santrifüj (merkezkaç) kuvvetten büyüktür. Santrifüj kuvvet aşağıya doğru yöneldikçe silindirin ağırlığını artırmış ve yukarı doğru yöneldikçe azaltmış olur. Titreşim tesiri silindirden zemine geçen kuvvetin değerindeki bu periyodik değişiklik sayesinde sağlanır. Santrifüj kuvvet silindirin ağırlığından büyük yapıldığı takdirde santrifüj kuvvetin her yukarı doğru yönelişinde silindir biraz sıçrayarak zemine darbe tesiri yapar [28].

Bazı vibrasyonlu silindirlerde bu vibrasyon tesiri herhangi bir dereceye kadar ayarlanabilir ki bu sayede daha büyük kompaktif yükler elde edilmiş olur. Prensip olarak, vibrasyonun doğurduğu kuvvetler toprağa her istikamette intikal ettirilmektedir. Bu şekilde toprak tanecikleri arasındaki sürtünme kuvveti azaltılmakta ve daha büyük derinliklerde tekrar ve daha sıkı bir şekilde yerleşmeleri imkanı sağlanmaktadır [19].

Vibrasyon halinde bulunan kütlenin zeminle çarpışmasında husule gelen perküsyon (darbe kuvveti ) vibrasyonun frekansı ve vibrasyonlu silindirin statik ağırlığı ile ilgilidir. Şekil 3.10’da statik ağırlığı ‘S’ dinamik kuvveti ‘F’ olan basit bir vibratör örnek olarak ele alınmıştır.



Şekil 3.10. Vibrasyon halinde bulunan kütlenin zeminle çarpışmasından meydana gelen darbe kuvveti

- 1 : Statik ve dinamik kuvvetler bir arada
- 2 : Yalnız statik kuvvet (dinamik kuvvet yere paralel )
- 3 : Statik ve dinamik kuvvetler zıt yönlerde

Kütlenin zeminle çarpışmasından meydana gelen darbe kuvveti “perküsyon” ile çarpışma anındaki hızı ( $V_{\epsilon}$ ) ve çarpışma süresi saniye olarak ( $t_{\epsilon}$ ) arasındaki ilişki, Eş.3.1’deki gibi ifade edilir [8].

$$\text{Darbe kuvveti : } F_d = m \times \frac{V_{\epsilon}}{t_{\epsilon}} \quad (3.1)$$

Burada ;

$F_d$  = darbe kuvveti (N)

$m$  = sıkıştırıcı ağırlığı (kg)

$V_{\epsilon}$  = çarpışma hızı (m/sn)

$t_c$  = çarpışma süresi (sn)

Düzgün dairesel hareket yapan bir noktanın hızı, her an daireye teğettir ve ;

$$V = \omega \times r \text{ dir.} \quad (3.2)$$

Burada;

$V$  = çizgisel hız

$\omega$  = açısal hız

$r$  = eksantrik moment kolu (amplitüd)

$$\text{Açısal hız ; } \omega = 2\pi / T \quad (3.3)$$

$T$  = periyot ve  $f$  = frekans olmak üzere  $T = 1/f$  dir [35].

Eş. 3.1 yeniden düzenlenirse;

$$F_d = m \times r \times 2\pi \times f^2 \quad (N) \quad (3.4)$$

elde edilir.

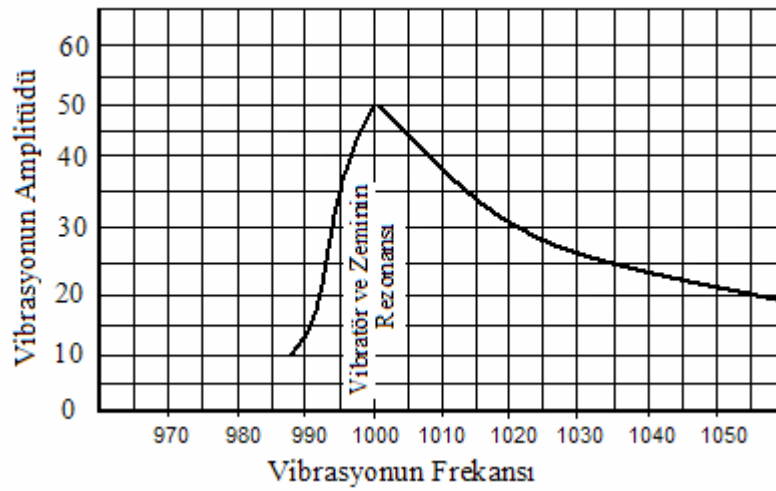
Burada;

$m$  = kütle (kg)

$r$  = amplitüd (m)

$f$  = frekans (devir/ 60 sn)

Bir vibrasyonlu sıkıştırıcının aynı toprak üzerinde sabit bir dinamik kuvvetle ve değişik frekanslarla çalıştırılması halinde toprak-vibratör sisteminin diğer frekanslardan daha kuvvetli etki edeceği bir frekans vardır. Buna rezonans frekansı denir. Şekil 3.11’de sıkıştırma aracının, rezonansta çalışmakla küçük frekanslarla büyük kuvvetler meydana getirdiği görülmektedir [8].



Şekil 3.11. Tipik toprak – kütle vibratör rezonansı.

Genel olarak vibrasyon etkisinin Çizelge 3.2’de verilen değerlerde olması halinde en iyi sonucu vermektedir [4].

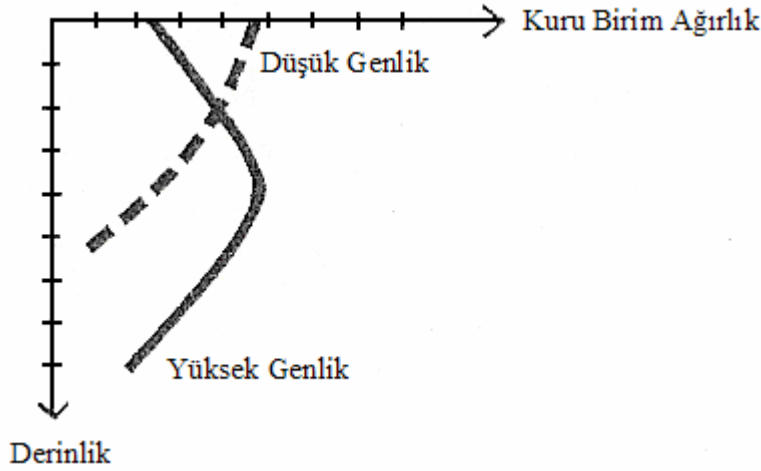
Çizelge 3.2. Vibrasyon değerleri [4]

| Sıkıştırma tabakaları | Frekans (v/dk)     | Genlik (mm) |
|-----------------------|--------------------|-------------|
| Zemin dolguları       | 25-50 (1500-3000 ) | 1,6 – 2,0   |
| Temel tabakaları      | 25-40 (1500-2400 ) | 0,8 – 2,0   |
| Asfalt kaplamaları    | 33-50 (2000-3000 ) | 0,4 – 0,8   |

Silindirin vibrasyonlu hareketi zemin altında uzun basınç dalgalarına neden olur. Vibrasyonlu silindirlerin ortaya çıkardığı kompaksiyonun sonucu şu etkenlere bağlıdır [36].

- Silindirin statik ağırlığı
- Toplam kütlenin silindirik kütleye oranı
- Silindirin çapı
- Frekans ve amplitüd
- Silindir hızı

Statik ağırlık ve çizgisel yük belirli bir değere kadar arttıkça sıkıştırma artmaktadır. Vibrasyonlu bandaj sayısı artarsa sıkışmanın artmasıyla silindraj pas sayısı da azalır. Ancak Şekil 3.12’de görüldüğü gibi yüksek ve düşük genliklerin etkisi sıkışma derinliği ile değişmektedir.



Şekil 3.12. Vibrasyonlu silindirlerde genliğin etkisi

Vibrasyonlu silindir hızının 3-5 km/saat olması halinde en az pas sayısında istenilen sıkışma elde edilebilir. Lastik tekerlekli silindir hızının 7-10 km/sa civarında olduğu göz önüne alınırsa vibrasyonlu veya statik demir bandajlı silindirlerin hızı daha az olmaktadır. Genel olarak tambur çapı ve genişliği arttıkça sıkıştırma derinliği azalmakta ancak yüzey düzgünlüğü artmaktadır. Tambur çapı küçüldükçe çatlamalar ve sıkıştırma esnasında tambur önünde yığılmalar (kabarma) oluşur. Nijbor bağıntısına göre sıkıştırma esnasında tambur önünde plastik malzeme yığılmasının önlenmesi için ;

$$N = \frac{\text{Statik Çizgisel Yük}}{\text{Tambur Genişliği x Tambur Çapı (cm x cm)}} < 0,25$$

katsayısı idealdir. Toplam ağırlık (statik + vibrasyon) arttıkça sıkıştırma enerjisi artsa da bunun bir üst sınırı vardır. Zira bu üst sınırın üzerinde vibrasyon etkisi azalmakta ve sıkıştırma çatlama, yığılma, vb. problemler oluşmaktadır [4].

### Özellikleri ve kullanıldığı yerler

İçerisinde az miktarda kohezyonlu kısım bulunan taneli zeminlerde ağır normal (vibrasyonsuz) silindirlerden daha etkili olmasına karşılık sırf kohezyonlu veya sırf taneli zeminler için elverişsizdir [22].

Kumlu zeminlerde özellikle etkilidirler, fakat ince taneli zeminlerde, onların iç stabilitelelerini bozarak kötü etki yaparlar [21].

Titreşimli küt ayağı silindirlerde zemin ile temas alanı yaklaşık olarak % 40 ve zemine uygulanan basınç da silindirin büyüklüğüne ve üzerine ağırlık ilave edilme durumuna göre 1400 ile 8400 kPa (200-1200 psi) arasında olabilmektedir. Titreşimli küt ayağı silindirin özel menteşeli ayakları zemine yoğurma şeklinde bir hareket uygular. Bu silindirler de keçi ayaklı olanlar gibi zemini sıkıştırır ve sıkıştırma tamamlandığında lift üzerinde yürürler. En iyi sıkıştırmayı ince taneli zeminlerde yaparlar[15].

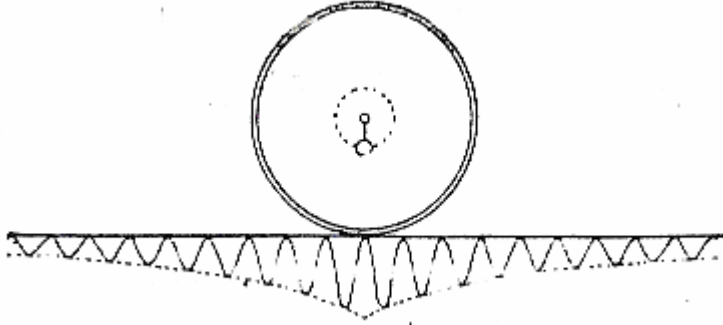
Kohezyonsuz veya kohezyonu pek az olan zeminlerde titreşim tesiriyle çalışan vibrasyonlu silindirler en elverişli olanlarıdır [23].

Yüzeysel kompaksiyonun etkisi aşağı doğru birkaç desimetreye yayılabileceğinden bu yöntem nispeten ince tabakalar halinde serilen granüler dolguların kompaksiyonun da en etkili yöntemidir.

Bu silindirler kil ihtiva eden ince taneli zeminlerde dahil dolgu imalinde kullanılan zeminlerin kompaksiyonun da gittikçe artan bir tercihle kullanılmaktadır [37].

Bu tip sıkıştırmacılar, bilhassa granüler toprak ve malzemelerde maksimum birim hacim ağırlıkların elde edilmesinde hususi bir kabiliyete ve özelliğe sahiptirler [19].

Silindirli vibratörlerde silindirin temas doğrusu altında meydana gelen titreşimler, temas doğrusunun her iki tarafında amplitüdü gittikçe küçülen titreşimlerin doğmasına sebep olur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Silindirli vibratör ile sıkıştırma esnasında zemindeki titreşim durumu.

Temas doğrusunun altındaki zemin, ağırlığın ve titreşimlerin müşterek tesiri sayesinde sıkışır; fakat temas doğrusunun her iki tarafında meydana gelen titreşimler, üstte ağırlık bulunmadığı için, bilhassa kohezyonsuz zeminlerde gevşemeye sebep olur.

Az miktarda kohezyonlu kısım ihtiva eden zeminlerde ağır düz silindirler kadar tesirli bir sıkıştırma yapabilen vibrasyonlu silindirlerin küçük tipleri ile kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminlerde aynı tesir elde edilememektedir. Kohezyonsuz zeminlerde titreşimlerin hem zeminde iyi nakledilemeyişi ve hem de sıkışan kısımları yeniden gevşetişi sıkıştırma tesirini azaltır; kohezyonlu zeminlerde ise bağlantı kuvvetinin büyük oluşu yüzünden taneler arasında sıkışmayı sağlayacak büyüklükte rölatif hareketler meydana getirilemez. Bu itibarla vibrasyonlu silindirlerin küçük tipleri bilhassa topraklı kum gibi az miktarda kohezyonlu kısım ihtiva eden zeminlerin ve asfalt yol kaplamalarının sıkıştırılmasında ağırlığı fazla olan büyük düz silindirlere tercih edilmektedir [17].

Titreşimli keçi ayağı silindirinin, düşük ağırlıklı olmaları, küçük güçlü çekicilerle yetinmeleri ve titreşimsiz keçi ayağı silindirlerden daha az geçiş sayıları ile sıkışmayı sağlayabilmeleri sebebiyle, kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında özellikle iklimi nispeten kurak olan ülkemiz için ekonomik bir sıkıştırıcı olduğu görülmüştür [38].

Genel tatbikat projeleri ile genel şartnamelerde bulunması gereken hususlar

- Dinamik enerji veren sıkıştırıcılarda optimum frekansa tesir eden faktörler:
  1. Dolgu zeminin cins ve özellikleri
  2. Dolgu zeminin su içeriği
  3. Sıkıştırıcının ayak alanı
  4. Sıkıştırıcının ağırlığı
  5. Amplitüdü
  6. Geçiş sayısı
- Dolgu zemininin kayma mukavemeti arttıkça optimum frekansın değeri de artacaktır.
- Dolgu zeminin su içeriğinin artması kayma dayanımını düşüreceğinden, su içeriği arttıkça optimum frekansta azalacaktır.
- Sıkıştırıcı ağırlığının makul değerler içinde arttırılması birim temas basıncında bir artma ve optimum frekansta da bir düşme meydana getirir.
- Amplitüdün artması, dinamik yükte, dolayısıyla birim temas basıncında bir artma doğurur. Bu ise optimum frekans değerini düşürür.
- Titreşimli keçi ayağı silindirlerle yapılan sıkıştırmalarda, diğer titreşimli sıkıştırıcıların aksine frekans çok önemlidir. Belirli bir zemin ve belirli bir titreşimli sıkıştırıcı tipi için, istenen sıkışma oranının minimum geçiş sayısı ile teminini sağlayan optimum bir frekans vardır. Sıkıştırma bu frekansla yapılmalıdır.
- Optimum frekans, zeminin su içeriğine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla bir dolgu zemini tek bir optimum frekansla karakterize edilmemelidir.
- Gerek geçirimsizlik gerekse stabilite bakımından yüksek güvenlik istendiği taktirde, kohezyonlu zeminlerle inşa edilen yüksek dolguların titreşimli düz silindir ve plakalarla sıkıştırılması uygun değildir.
- Optimum frekansın, sıkıştırıcı-zemin kütlelerinin rezonans frekansı ile bir ilişkisi yoktur ve titreşimli keçi ayağı silindir ile sıkıştırma yapılırken rezonans frekansına sıkı sıkıya bağlı kalıp optimum frekanstan fedakarlık etmek hiçbir fayda sağlamaz.

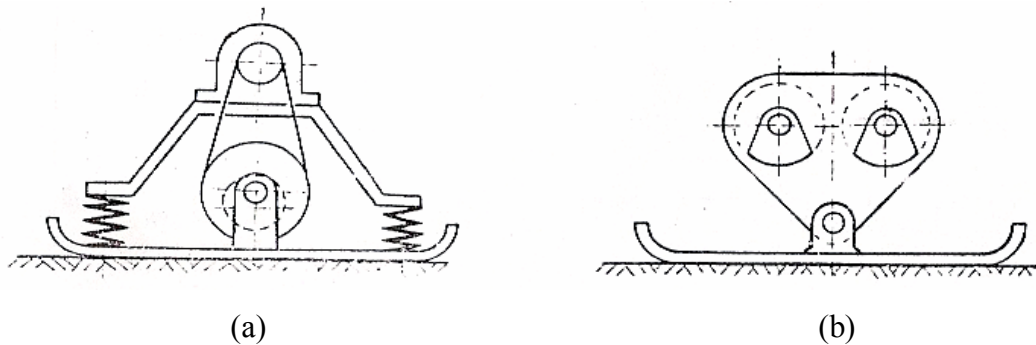
- Optimum frekans zeminin su muhtevasına bağılı olarak değişir. Dolayısıyla bir zemin tipi tek bir optimum frekansla karakterize edilemez.
- Optimum frekans titreşimli keçi ayağı silindirinin birim temas basıncına bağlıdır. Birim temas basıncı küçülürse optimum frekans büyür.
- Optimum frekanstan daha yüksek frekanslarla çalışırken zeminde, hangi geçiş sayısında meydana geleceği belli olmayan birim ağırlık düşmeleri yani çözülme meydana gelir.
- Optimum frekanstan daha küçük frekanslarda sıkıştırma yapılırken zemine gerekli sıkıştırma enerjisi verilemez ve istenilen sıkıştırma oranına erişmek, yine ekonomik mühendislik açısından bir çözüm yolu olmayan yüksek geçiş sayılarını gerektirir.
- Titreşimli keçi ayağı silindirlerle kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında, gevşek halde 20-22 cm'den daha kalın tabakaların sıkıştırılabileceği düşünülmemelidir. Bu sıkıştırıcıların sıkıştırma derinliği bakımından titreşimsiz keçi ayaklarına büyük bir üstünlüğü yoktur.
- Titreşimli keçi ayağı silindirlerle sıkıştırma yapılırken belirli bir geçiş sayısında maksimum kuru birim ağırlığa erişebilmek için zemin, standart kompaksiyon deneyleri ile bulunan optimum su muhtevasının %2-3 kurusunda bir rutubete sahip olmalıdır. Bu durumda, titreşimli keçi ayağı silindirler, özellikle yarı kurak ülkeler için ayrı bir önem taşımaktadır.
- Titreşen sıkıştırıcının frekansı ile zeminin tabi frekansı aynı olması halinde rezonans hale gelmekte ve zeminde maksimum amplitüde erişmektedir.
- Uygun birim temas basıncının ve bu birim temas basıncına göre optimum frekansın belirlenmesi için küçük çapta bir arazi deneyi yapılmalıdır.
- “Dinamik yük/ölü ağırlık” oranının her seferinde sabit tutulabilmesi için farklı zeminlere göre birim temas basıncının değiştirilmesi yerine, alanları farklı demontabl ayaklar kullanılması veya ölü ağırlıklarla birlikte dinamik yükün de değiştirilmesi ile sağlanmalıdır.
- Belirli bir frekansla çalışırken çözümler bölgesinde bulunup bulunulmadığı ayakların zemin içine gömülmelerinden kolayca anlaşılabılır. Her geçişte ayaklar zemine uzunluklarının %50'sinden daha fazla gömülmekte ise çözülme vardır. İlk geçişte yaklaşık olarak %50 gömülme olmakta, bu gömülme sonraki geçişlerde

gittikçe azalarak 6-8 geçişte tabaka yüzeyinde ortalama 2 cm kadar kabarmış zemin kalmakta ise uygun bir frekansla çalışılmaktadır. Ancak, 6-8 geçiş sonucu erişilen sıkışma oranları en az istenen değerde olmalıdır. Aksi takdirde kullanılan frekans, sıkıştırma enerjisinin yetersiz olduğu bölgededir.

- Çözümler bölgesindeki frekanslarla çalışılırken hangi geçişte olursa olsun son geçişe ait ayak izlerindeki birim ağırlıklarla ayak izleri arasındaki birim ağırlıklar birbirinden önemli miktarda farklıdır. Optimum frekansta ise bu fark ihmal edilebilecek mertebededir.
- Verilen sıkıştırma şartlarına uyulduğu takdirde, titreşimli keçi ayağı silindirler, kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında çok iyi sonuç veren, düşük ağırlıklı, küçük güçlü çekicilerle yetinen ve titreşimsiz keçi ayağı silindirlerden çok daha az geçiş sayıları ile sıkışmayı sağlayabilen uygun sıkıştırıcılarıdır [10].

### 3.2.2. Plakalı vibratörler

Plakalı vibratörlerde eksantrik kütle dikdörtgen şeklindeki bir plaka üzerine tertiplenir. Santrifüj kuvvet tek mil ağırlıktan biraz büyük yapıldığı için santrifüj kuvvetin her yukarı doğru yönelişinde zeminden bir miktar kalkan plakalı vibratörler küçük sıçrama hareketleri yaparak zemini sıkıştırır. Şekil 3.14’de şematik olarak tek eksantrik ve çift eksantrik tipi görülmektedir.

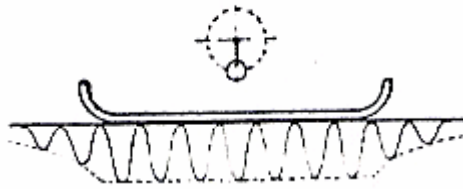


Şekil 3.14. Plakalı vibratörlerin tek ve çift eksantrik kütleli tipi  
a) Tek eksantrik kütleli tip; b) Çift eksantrik kütleli tip

Plakalı vibratörlerin çok büyük tiplerini çalışma esnasında ilerletmek mümkün olmaz. Bunlar ancak bir kren sayesinde zaman zaman kaldırılıp biraz ileriye oturtulmak suretiyle kullanılır [17].

Titreşimli sıkıştırıcıların bir çok yararlarından birisi sıkıştırılan yüz ile buğulaşmaya yardımcı koşul oluşturması ve bu yüzü dışarıdan su girmesine karşı ince bir tabaka ile adeta sıvayarak yalıtmasıdır. Bu sıvama etkisi yağmurdan sonra yeniden hemen işe başlamaya yardımcı olur. Vibrasyonun penetrasyon etkisine bağlı olarak bu sıvama etkisi statik sıkıştırıcıların tersine tabaka boyunca üniform sıkıştırmayı önlemez [6].

Plakalı vibratörler taban sathının dışında kuvvetli titreşimler meydana getirmez (Şekil 3.15). Bu itibarla silindirik vibratörlerde görülen zemini tekrar gevşetme mahzuru yoktur. Buna karşılık silindirik vibratörler yuvarlanmak suretiyle zemin üzerinde kolayca ilerletilebildiği halde plakalı vibratörlerin ilerletilmesi bir problem teşkil eder. Plakalı vibratörlerin tek eksantrik kütleli tipi römork şeklinde çekilmek üzere bir traktöre ihtiyaç gösterir. Kendi kendine ilerleyebilen çift eksantrik kütleli tip ise yapışkan zeminler üzerinde emme tesiri dolayısı ile serbestçe sıçrayamadığı için zor ilerler. Bilhassa belirli frekanslarda meydana gelen şiddetli titreşimler dolayısı ile plakalı vibratörlerin bakım ihtiyacı da fazladır.



Şekil 3.15. Plakalı vibratör ile sıkıştırma esnasında zemindeki titreşim durumu

Plakalı vibratörler esas itibarı ile granülometrisi uygun olan taneli zeminler için elverişlidir. Bunların yüksek frekanslı tipleri az miktarda kohezyonlu kısım ihtiva eden zeminleri de sıkıştırabilir [17].

Plakalı kompaktör hem toprak hem de asfalt sıkıştırma uygulamalarında kullanılır. Tipik toprak sıkıştırma uygulamaları; granürlü dolgular, orta genişlikte kanallar, boru civarları, zemin ve kaldırım projeleridir. Asfalt uygulamaları ise genellikle yama ve küçük deliklerin ve boşlukların tamir işleridir [18].

### **3.2.3. Dahili vibratörler**

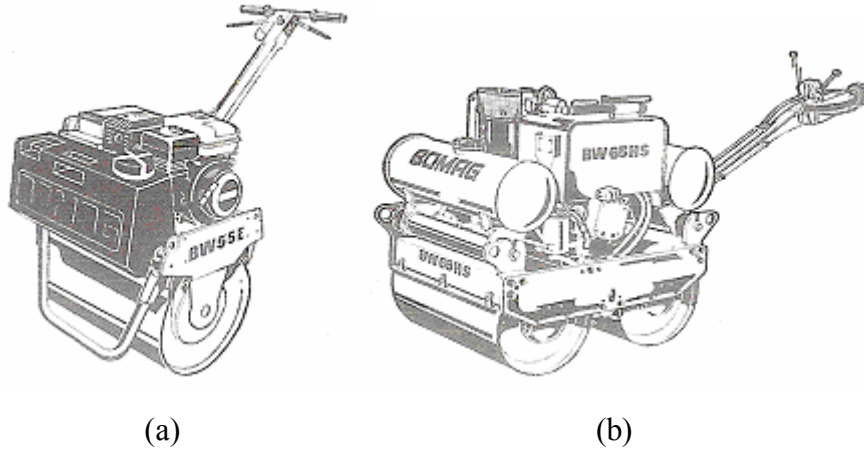
Dahili vibratörlerde eksantrik kütle, düşey eksen etrafında dönecek şekilde silindirik bir mahfaza içerisine yerleştirilmiştir. Bunlar kren vasıtasıyla sarkıtılarak zemine daldırılmak suretiyle sıkıştırmayı sağlar. Dahili vibratörlerin esas özelliği, derinlere indirilmesi ve dolayısı ile diğer makinelerin sıkıştıramayacağı çok yüksek dolguları sıkıştıracıdır [17].

Derine daldırılabilirdiği için çok kalın tabakaları sıkıştıracıdır karşılık, iş verimi düşük olduğu için pahalı bir sıkıştırma metodudur. Bu itibarla teşkili sırasında yeter derecede sıkıştıracılamamış olan yüksek dolguların sonradan sıkıştırılması ve içinde iri taş parçaları bulunan malzeme ile toprak baraj teşkilinde kullanılır [22].

### **3.2.4. Elle çekilir vibrasyonlu silindirler**

Elle çekilir vibrasyonlu silindirler bir veya iki tamburludur. Çift bandajlıları tandem olur ve her tamburun ayrı bir eksantrik şaftı vardır. Hareket ve vibrasyon mekanik veya hidrolik olabilir. Eğimler ve kanallar için özel dizaynları vardır.

Tek tamburlu tipler üst düzeyde oldukça taşınabilir olup daha çok küçük tamir işlerinde, spor alanlarının düzenlenmesi için kullanılır. Resim 3.6'da tek ve çift bandajlı elle çekilir vibrasyonlu silindirler görülmektedir.



Resim 3.6. Tek ve çift bandajlı elle çekilir vibrasyonlu silindirler  
a) Tek bandajlı silindir; b) Çift bandajlı silindir

Elle çekilir silindirler gerek tokmaklar gerekse plakalı kompaktörlerden daha büyük projelerde kullanılır. Dolgu, granür, kohesiv ve karışık toprak yapıları 30 cm tabaka kalınlığına kadar ya da kanal dolgusu, zemin ve kaldırım projelerinde ise daha kalın tabakalar için kullanılabilir.

Elle çekilir silindirlerin su püskürtme sistemi ile donatılmış olanları; yol tamirleri, yama, park alanları ve diğer asfalt uygulamaları için çok iyi netice verir [18].

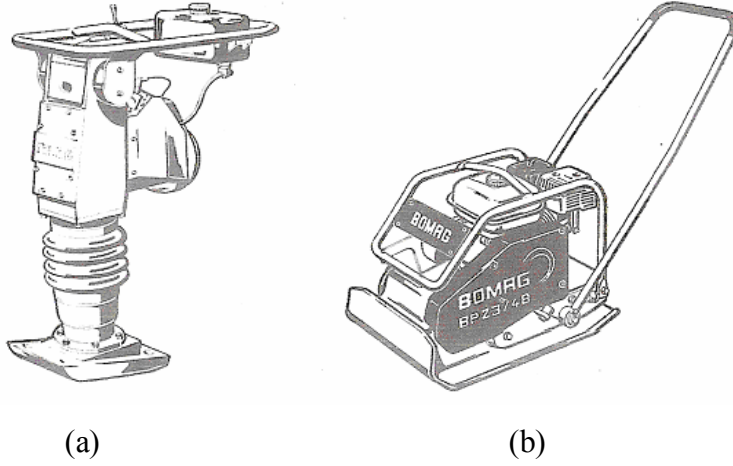
### 3.3.Tokmaklar

#### 3.3.1.Sıçrayan tokmaklar

Zemin kompaksiyonunda kullanılan tokmaklar ağırlıkları 32 kg. dan 150 kg.a kadar basınçlı hava ve içten yanmalı motorlu tiplerle 1 tona kadar olan içten yanmalı motorlu kurbağalardan ibarettir. Bunların hepsi de zemini doyurucu bir kuru birim hacim ağırlığına kadar sıkıştırabilir [7].

Tokmak tarafından sıkıştırılan malzeme üzerine, kesme ve yoğurma etkisi uygulanır. Bu etkiler malzemenin partiküllerini daha yoğun hale getirir. Tokmaklar altta bir tokmak ayağı ve üst kısımda bir taşıyıcı ve tahrik motorundan oluşur. Tokmak tablası

ağaç veya sentetik malzemeden oluşur ve tabla üzeri aşınmaya dirençli çelikle kaplıdır (Resim 3.7) [18].



Resim 3.7. Vibrasyonlu tokmaklar

a) Vibrasyonlu tokmak; b) Vibrasyonlu tablalı kompaktör

Düşey eksenli hafif tipler her sıçrayışta biraz itilerek ilerletilir. Eğik eksenli ağır tipler eğimli olarak yükselip düşey olarak düştükleri için her sıçrayışta kendi kendine biraz ilerler.

Olumlu yanları; sıkıştırılabileceği tabaka kalınlığı fazla, rutubet derecesi bakımından çok hassas değil, manevra ve yanaşma kabiliyeti fazladır.

Olumsuz yanları ise; iş verimi düşük olduğundan sıkıştırma masrafı fazla, bakımı zordur.

İçerisinde az miktarda kohezyonlu kısım bulunan daneli zeminler ile içerisinde iri daneler bulunan zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılır. Kohezyonlu zeminler için elverişli değildir [22].

İçten yanmalı ve basınçlı hava tipli tokmaklar kullanılarak yağlı kilden kuma kadar değişen zeminler üzerinde yapılan deneylerden görülmüştür ki, tabaka kalınlığı 20 cm ‘den 10 cm’ye azaltıldığı zaman çıkarılan iş miktarı iki misli olmaktadır [7].

Bu makineler, yapıların arka kısımlarının dolgularının, kanal dolgularının ve yüksekliği az olan dolgu topraklarının sıkıştırılmaları için elverişlidir [39].

### **3.3.2. Kren tokmakları**

Tokmak, krenin kaldırma vinci sayesinde devamlı olarak belirli yüksekliğe kaldırılıp düşürülür. Tokmağın her kaldırılıp düşürülüşünde krenin üst kısmı sağdan sola veya soldan sağa doğru bir miktar döndürülür. Tokmak sıkıştırma şeridinin kenarına geldikçe kren bir miktar yürütülür ve dönüş yönü değiştirilir.

Ağırlıkları 1,5 tondan 4 tona kadar değişir. 1 ila 2 m yüksekten düşüş yapan tokmak dakikada 6-20 düşüş yapabilir. Taban alanı 0,5- 2 m<sup>2</sup> olan kren tokmaklar, özellikleri ile kullanıldığı yerler bakımından sıçrayan tokmaklar gibidir. Ancak sıkıştırabilecekleri tabaka kalınlıkları 50 ile 250 cm arasında değişir [22].

#### **4. DOLGU ZEMİNİN SIKIŞTIRILMASINDA ZEMİNİN CİNS VE ÖZELLİKLERİNE UYGUN SIKIŞTIRICININ CİNS VE AĞIRLIĞININ SEÇİMİ**

##### **4.1. Sıkıştırıcının Cinsinin Seçimi**

Dolguların sıkıştırılmasında uygun sıkıştırıcı, belirli bir zemin için, istenen su içeriğinde, zemine maksimum verimi sağlayacak ve buna rağmen proje gereği olan birim ağırlığının da en kalın ve en düzgün şekilde dağılımını gerçekleştiren sıkıştırıcı olmalıdır. Toprak dolguların sıkıştırılmasında hemen her sıkıştırıcının kullanılması mümkündür. Ancak, farklı sıkıştırıcılarla sıkıştırıldığında belli bir zemin, değişik özellikler göstermektedir. Bu nedenle sıkıştırıcının seçimi önem kazanır. Dolguların sıkıştırılmasında kullanılan sıkıştırıcılar, yapıllarına göre;

- 1- Silindirler
- 2- Ayaklı sıkıştırıcılar

Sıkıştırıcının meydana getirdiği enerji tiplerine göre de;

- 1- Statik enerji veren sıkıştırıcılar
  - 2- Dinamik enerji veren sıkıştırıcılar
- olarak gruplandırılırlar.

Statik enerji veren sıkıştırıcılar, ayaklı sıkıştırıcılar ve silindirlerdir. Dinamik enerji veren sıkıştırıcılar ise, statik enerji veren sıkıştırıcıların vibrasyonlu olan cinsleri ve tokmak vibrasyonlu plakalardır [10].

Farklı zemin cinsleri için uygun sıkıştırma ekipmanları Çizelge 4.1’de verilmiştir [6].

Çizelge 4.1. Türlü zemin grupları için uygun sıkıştırma ekipmanı [6]

|                                           | ZEMİN GRUPLARI |                            |                               |                         |               |                              |                     |
|-------------------------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|------------------------------|---------------------|
| Kompaksiyon ekipmanı                      | Kaya           | İyi gradasyonlu Kum- çakıl | Üniform gradasyonlu kum-çakıl | Siltli kum Siltli çakıl | Az siltli kum | Düşük ya da Orta direçli kil | Yüksek dirençli kil |
| Statik silindir<br>3-15 ton               | 0              | 1                          | 1                             | 1                       | 1             | 1                            | 0                   |
| Vibrasyonlu düz silindir<br>3-5 ton       | 1              | 2                          | 2                             | 1                       | 1             | 1                            | 0                   |
| Vibrasyonlu düz silindir<br>10-15 ton     | 2              | 2                          | 2                             | 2                       | 1             | 1                            | 1                   |
| Vibrasyonlu plak kompaktör<br>0,1-0,5 ton | 0              | 2                          | 2                             | 1                       | 1             | 0                            | 0                   |
| Lastik tekerlekli silindir<br>10-50 ton   | 0              | 1                          | 1                             | 2                       | 2             | 2                            | 0                   |
| Keçi ayağı silindir<br>5-30 ton           | 0              | 0                          | 0                             | 0                       | 1             | 2                            | 2                   |
| Pad tipi silindir<br>5-30 ton             | 0              | 1                          | 1                             | 2                       | 2             | 2                            | 1                   |

0 : Uygun değil    1 : Uygun    2 : Çok uygun

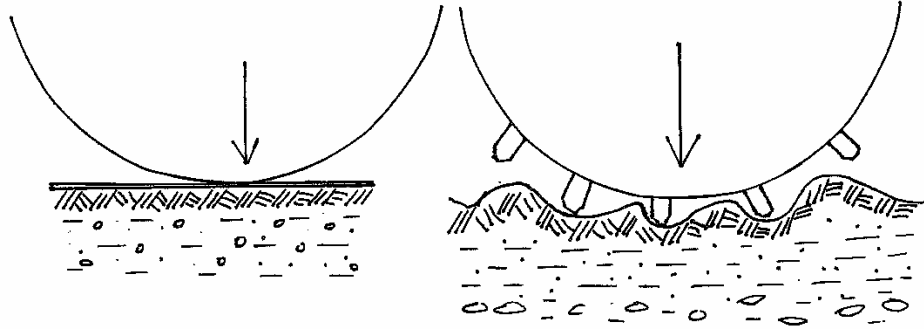
### Sıkıştırıcılar

Sıkıştırıcıların seçiminde, sıkıştırma ilkesi göz önüne alınarak değerlendirildiği takdirde aşağıdaki özellikler ortaya çıkar.

#### *Sıkıştırıcının, dolgunun birim ağırlığına etkisi*

Yapılan araştırmalara göre %35'ten az çakıl içeren dolgu zeminlerin silindirlerle sıkıştırılmalarında çakıllar, dolguya serildiği gibi kalırken, ayaklı sıkıştırıcılarda, çakılların yüzeyden derinlere itildiği görülmüştür. Ayaklı sıkıştırıcılardaki bu durum sıkıştırıcının ağırlığı ile oluşan gerilimin, silindir sıkıştırıcılara göre zeminlerde daha çok derinlere yayılmasını sağlar.

*Sıkıştırıcıların ağırlıkları ile zemindeki gerilim dağılımı*



Şekil 4.1. Farklı sıkıştırıcılarla zemin arasındaki etkileşim

Yukarıdaki Şekil 4.1’de görüleceği gibi ayaklı sıkıştırıcılar tabandan başlamak üzere yoğunlaşarak zeminin yüzeyine doğru dolgu sıkıştırılmaktadır. Ayrıca ağırlığını ayağın ucundan verdiklerinde, sıkıştırıcının gerilim dağılımı, ayaklarının girdiği derinlikten başlar. Bu nedenle ayaklı sıkıştırıcılar, silindir sıkıştırıcılardan en çok bir ayak girdisi kadar daha fazla sıkıştırma yaptığı görülürse de bu fark sanıldığı kadar büyük değildir. Çünkü derinliğe bağlı noktasal gerilme şerit gerilmeden daha azdır.

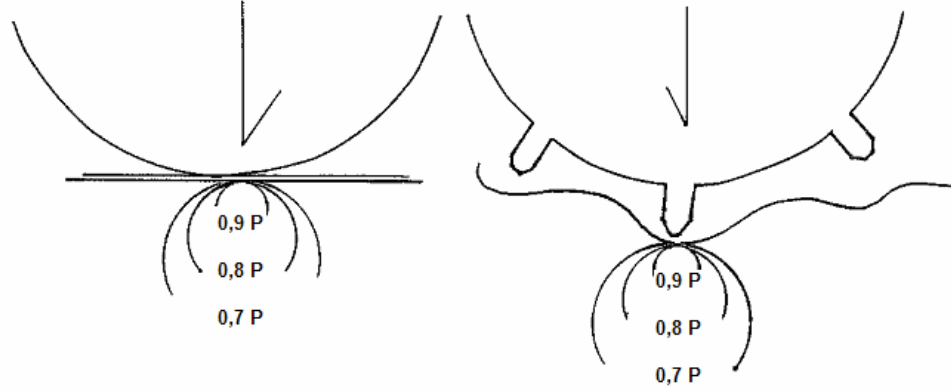
*Sıkıştırıcılara bağlı su içeriğindeki değişme*

Dolgu sıkıştırmasında silindirler, dolgu yüzeyinde boşluksuz, pürüzsüz düzgün bir kabuk meydana getirirler. Kabuğun kalınlığı silindirin ağırlığı ile geçiş sayısına bağlıdır. Bu kabuk, dolgunun derinliğindeki suyun buharlaşmasına engel olur. Ayaklı sıkıştırıcılarda ise, sıkıştırma yüzeyi girintili çıkıntılı, geniş buharlaşma yüzeyli ve sıkıştırıcının her geçişinde dolgu yüzeyi harmanlandığından dolgu suyunun buharlaşmasına yardımcı olur.

### Statik ve dinamik enerjinin sıkıştırmadaki etkisi

Dinamik enerji veren sıkıştırıcıların, statik enerji veren sıkıştırıcılara göre gerilim dağılımında titreşimin frekans ve amplitüdü kadar bir avantajı vardır. Şekil 4.2’de

dinamik enerji veren sıkıştırıcıların, statik sıkıştırıcılara göre gerilim dağılımının daha derinlere tesir ettiği görülmektedir.



Şekil 4.2. Derinliğe bağlı gerilim

Yapılan araştırmalarda, optimum su içeriğindeki dolguda eşit ağırlıklı dinamik ve statik sıkıştırıcılarla yapılan sıkıştırmada, derinliğe bağlı gerilim Çizelge 4.2’de verildiği gibi bulunmuştur.

Çizelge 4.2. Derinliğe bağlı gerilim [10]

| Derinlik                   | Statik enerji altındaki gerilme | Dinamik enerji altındaki gerilme |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 30 cm derinlikteki gerilme | 0.40 kgf/cm <sup>2</sup>        | 0.48 kgf/cm <sup>2</sup>         |
| 60 cm derinlikteki gerilme | 0.26 kgf/cm <sup>2</sup>        | 0.28 kgf/cm <sup>2</sup>         |
| 90 cm derinlikteki gerilme | 0.07 kgf/cm <sup>2</sup>        | 0.088 kgf/cm <sup>2</sup>        |

#### 4.2.Sıkıştırıcının Ağırlığının Seçimi

Sıkıştırıcının ağırlığı, sıkıştırılan zeminin taşıma gücü ile sınırlandırılmıştır. Yani;  $\sigma_T \leq \sigma$  olmalıdır.

$\sigma_T$ = sıkıştırıcının taban basıncı      kgf/cm<sup>2</sup>

$\sigma$ = sıkıştırılan zeminin taşıma gücü      kgf/cm<sup>2</sup>

Aksi halde dolgu zemininde çözülme (gevşeme) olacaktır. Çözülme, sıkışmada, su içeriği ve birim ağırlığında homojen dağılmayı bozacak dolgu için istenen mühendislik özelliklerini de vermeyecektir.

Sıkıştırıcı ağırlığının en çok dolgu zemininin taşıma gücüne eşit olması, sıkıştırıcı ağırlığının seçiminde bilgi ve çalışmalar gerektirecektir. Bilindiği gibi sıkıştırıcının  $\sigma_T \leq \sigma$  sınırları içinde ağırlığı büyüdükçe sıkıştırılan dolgu tabakası kalınlığı büyüyecektir. Dolgu yapımında, ariyet sahasından getirilerek serilen zemin, gevşektir. Sıkıştırıldıkça dayanımı artar. O halde ideal bir sıkıştırma için, sıkıştırıcının ağırlığı, dolgu zemininin sıkıştırma ile artan taşıma gücüne paralel olarak arttırılması gerekecektir. Bu tatbikatta yapılamayacak kadar zordur. Pratikte dolgu zeminini düzelten araçların gezdirilmesi ile silindir ağırlığının arttırılması sağlanır. Bu nedenle kullanılması düşünülen sıkıştırıcı için dolgunun taşıma gücü  $\sigma$  sıkıştırıcının taban basıncına eşit oluncaya kadar sıkıştırılması gerekecektir. Bunun için düzeltici araç veya araçla yapılabilecek sıkıştırma düzeni ile istenen sıkıştırmayı sağlayacak geçiş sayısı belirlenmelidir. Ayrıca;

-Bütün sıkıştırıcılarda, sıkıştırma enerjisinin arttırılması ile elde edilecek birim ağırlıklarında da bir artma olacağı bilinmektedir. Ancak enerjinin arttırılmasındaki anlam, büyük ağırlıklı sıkıştırıcıların kullanılması anlamında alınmamalıdır.

-Sıkıştırma enerjisinin artması, sıkıştırılmış dolgu zemininin taşıma gücünü aşmamak şartıyla uygun temas alanı ve geçiş sayısını arttırmakla sağlanabilir.

-Seçilen sıkıştırıcıların geçiş sayısı azaltılması, bu sıkıştırıcıların birkaçının arka arkaya sıralandırılması ile yapılmalıdır.

-Sıkıştırıcıların seçimi dolgunun yöre, iklim, iletim, işleme koşullarına ve su içeriği kaybı göz önüne alınarak yapılmalıdır.

-Silindir sıkıştırıcılar, dolgu yüzeyinde boşluksuz, düz bir kabuk oluşturduklarında, optimum su içeriğine su verme ile eriştilen, kurak ve sıcak yörelerdeki dolgularda silindirler, optimum su içeriğinden yüksek su içeriğine sahip ariyet sahası malzemeleri ile yapılan dolgularda ayaklı sıkıştırıcılar kullanılmalıdır [10].

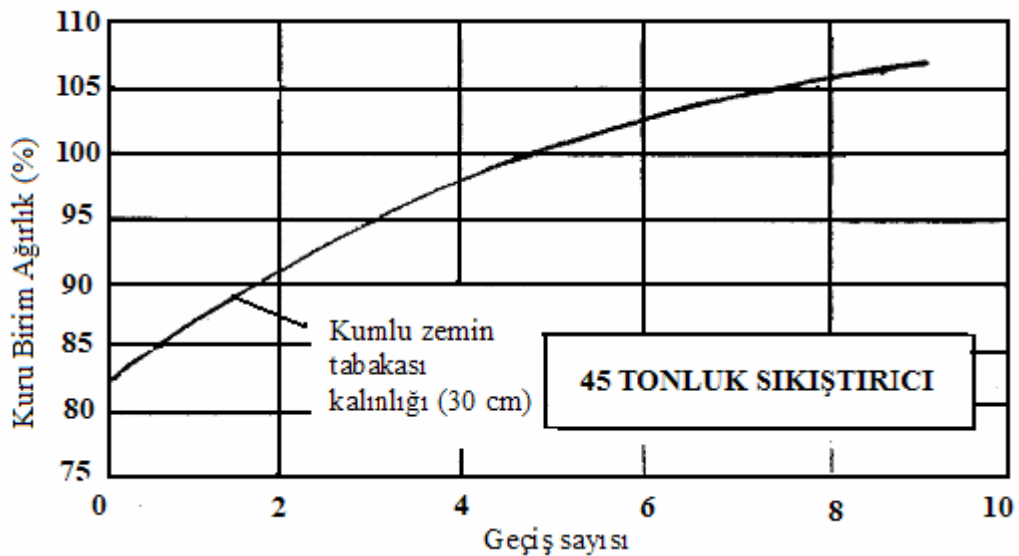
#### 4.3. Uygun Tabaka Kalınlığı, Sıkıştırıcı Geçiş Sayısı ve Hızının Belirlenmesi

Keçi ayağı ve lastik tekerlekli silindirler ile sıkıştırılan zeminlerin optimum tabaka kalınlıkları hakkında hiçbir kesin kaide verilemez. Alışılmış olan usul keçi ayaklı silindirlerle sıkıştırılan zeminlerin 15 cm (sıkışmış), 45,4 tonluk lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılanların ise 22,5 cm'lik tabakalar halinde inşa edilmesidir. Her ne kadar bazı tip zeminler daha kalın tabakalar halinde emniyetle sıkıştırılabilirse de, yukarıda verilen değerler hemen hemen bütün zemin tipleri için tatminkardır.

45,040 tonluk lastik tekerlekli silindirlerle 3-6 geçiş yapılması genellikle tatminkar bir kuru birim ağırlık temin eder [28].

Lastik tekerlekli araçlar yukarıdan itibaren sıkıştırma yaparlar ve sıkışma, danecikleri birbirine yaklaştırmak suretiyle meydana gelir. Bu nedenle sıkıştırmanın yavaş yapılmasında fayda vardır. Normal olarak 24 km/sa hızda sıkıştırma yapılmaktadır.

Geçiş sayısı aracın tipine ve zeminin cinsine bağlıdır. Sayıyı tespit için, sıkıştırmanın ilk zamanında tecrübe yapmalıdır. Bir örnek olmak üzere, 45 ton hizmet ağırlığında bir araç ile 30 cm kalınlığında kumlu bir zemin tabakası için geçiş sayısına tabi olarak sıkılama yüzdesini gösterir tecrübe sonucu Şekil 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.3. Geçiş sayısı – Kuru birim ağırlık grafiği

Tecrübe sonucunu gösteren bu grafikten 6-8 geçiş arasında %100 sıkışma temin edilmiş olduğu görülmektedir. Yapılan başka bir takım tecrübeler, 10 cm kalınlığındaki tabakaların 22 km/h hızla 2-4 geçişte sıkıştırılabildiğini göstermiştir [23].

Uygun tabaka kalınlığı, sıkıştırıcının geçiş sayısı ve hızının belirlenmesi, deney dolgusu ile yapılmalıdır. Proje limitleri içine düşen bir su içeriğine eriştirilen 50 veya 60 cm kalınlığında deney dolgusu bölgelere ayrılır. Her bölgeye seçilen cins ve ağırlıktaki sıkıştırıcıyla 4, 5, 6, 7, 8 vs (sıkıştırıcı ve zeminin cins ve özelliğine bağlı) geçiş yapılır. Her bölgede 5 cm derinliklerle sıkıştırma denetimi uygulanır.

Projede ön görülen limitler içerisinde en az geçiş sayısı ile en kalın tabaka, uygun geçiş hızı ile uygun tabaka kalınlığını verecektir.

Geçiş hızının sıkışmaya tesiri henüz bilinmemektedir. Pratikte yok kabul edilmekle beraber, sıkıştırmada ekonomik bir hız aralığı vardır. Bu aralığın dışında kalan hızlarda gerekli sıkıştırmaya erişmek için yüksek geçiş sayılarına ihtiyaç olduğu saptanmıştır. Yapılan araştırma ve çalışmalara göre hızın artması ile belli bir sıklığa erişmek için gerekli geçiş sayısı da artmaktadır [10].

#### **4.4. Sıkıştırma Kapasitelerinin Belirlenmesi**

Eskiden yapılan barajlarda paletli veya pnömatrik tekerlekli dozerlerle çekilen lastik tekerlekli silindirlerin hızları 5 ila 6,5 km/sa idi. Daha sonra deneylerin en iyi sıkışmanın daha yüksek hızlarda olacağını göstermediği hallerde hızın maksimum limiti 13 km/sa olarak kabul edilmiştir. Bir lastik tekerlekli silindirin kullanılması halinde saatte 380 ila 750 m<sup>3</sup> dolgu sıkıştırılabilir. Bu kapasite silindir hızına, durma ve dönüşlerdeki zaman kayıplarına bağlı olarak değişir.

Keçi ayaklı silindirler ile saatte sıkıştırılabilen dolgu miktarı çalışma sahasının genişliği ve normal gecikmelere bağlı olarak değişir. Saatte sıkıştırılan dolgu miktarı bir çift keçi ayaklı silindir için 75 ila 380 m<sup>3</sup> arasında değişir [28].

Sıkıştırıcılarda statik kapasite aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır.

$$Q = \frac{L \times V \times H \times 1000}{n} \times C \quad (\text{m}^3/\text{saat}) \quad (4.1)$$

Burada :

$L$  = tambur genişliği (m)

$V$  = silindir hızı (km/h)

$H$  = sıkışmış tabaka kalınlığı (m)

$n$  = geçiş sayısı

$C$  = randıman sayısı

*Randıman sayısı (C)* : Silindirin saatte 50 dakika çalıştığı ve sıkıştırma şeridinin üst üste binmesi vb. nedenlerle genel olarak sıkıştırmalarda  $C = 0,75$  uygun bir değerdir. Kohezyonlu dolgularda  $C = 0,60 - 0,75$  alınması pratiğe daha yakın değerler vermektedir.

*Sıkışmış tabaka kalınlığı (H)* : Sıkışmış tabaka kalınlığının yapılacak tecrübelerle tespit edilmesi lazımdır. Bunun değeri gevşek tabaka kalınlığına, silindir ağırlığına ve geçiş sayısına ve dolgu cinsine göre değişir. Ancak baraj inşaatlarında ( $H=a \times \text{gevşek kalınlık}$ ) bağıntısında, kohezyonlu zeminlerde  $a = 0,75$  ayrık zeminlerde  $a = 0,85$  ve kaya dolgularda  $a = 0,93$  alınması yeterli bir yaklaşıklıkla uygun değerler verir [12].

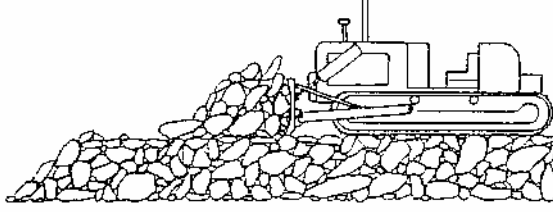
## 5. KOMPAKSİYON METODLARI

Yol inşası sırasında ekonomik mesafedeki malzeme ocakları ile yarmadan çıkan malzeme farklı zemin cinslerini içerdiğinden dolayı bunların dolguda kullanımları sırasında da uygulanacak kompaksiyon metotları ve silindir tipleri de farklılıklar gösterecektir.

### 5.1. Kaya Dolgularda Kompaksiyon

Kaya dolguların inşası sırasında hafriyattan veya malzeme ocağından elde edilen malzemenin yükleme makineleri yardımıyla 30 cm'den daha küçük olanlar ve olmayanlar ayrılmalıdır. Dolgunun orta kısımları ince malzeme ve kenarları kaba malzeme ile doldurulması ve sıkıştırma sırasında 300-400 lt/m<sup>3</sup> su ilavesi ile kaya dolguların kompaksiyonu yapılmalıdır. Su ilavesi her ne kadar sıkışabilirliği azaltmakta ise de sıkıştırma sırasında dolgunun oturması hızlandırılarak ileride olabilecek oturmaların en aza indirildiği arazi tecrübeleriyle kanıtlanmıştır. Eğer kaya dolgular çok fazla ince malzeme ihtiva ediyorsa ve yeterli sıkıştırma yapılamazsa yükün etkisi ile zaman içinde önemli oturmalar oluşur.

Bu nedenle kaya dolgular Şekil 5.1'de görüldüğü gibi dozerler ile 0,5 ila 2.0 m'lik tabakalar halinde serilmeli ve vibrasyonlu ağır demir bandajlı silindirlerle sıkıştırılmalıdır. Serim sırasında dozerin bıçağı taşları homojen bir şekilde yerleştirebilmekte ve dozerin kendi ağırlığıyla da dolguyu sıkıştırarak silindirler için düzgün yüzeyler elde edilmektedir. Kaya dolguların seriminden sonra yeterli sıkıştırma yapılmazsa kaya parçalarının birbirleriyle olan temas noktalarında trafiğin etkisi ile kırılarak oturmalar neden olacaktır. Bu nedenle uygun serimden sonra ağır vibrasyonlu demir bandajlı silindirlerin vibrasyon ve statik ağırlıklarının etkisiyle kayalar en sıkışık konuma getirilerek daha stabil ve yoğun bir sıkışma sağlanmalıdır. Çünkü vibrasyonun etkisi kaya parçalarının birbirine değme noktalarındaki içsel sürtünme kuvvetlerini azaltarak birbirleri üzerinde kolayca hareket etmesini sağlar. Böylece maksimum yoğunluk elde edilir.



Şekil 5.1. Kaya dolguların serimi

Maksimum kaya boyutu sıkışmış tabaka kalınlığının  $2/3$ 'ünden daha fazla olmamalıdır. Ayrıca kaya dolgularda serim işçiliği kompaksiyondan daha önemlidir. Kaya dolguların seriminde yeterli yüzey düzgünlüğü sağlanamazsa silindirin hareketi sırasında silindir genişliğince dolgu yüzeyinin her noktasında tam temas olmamakta ve bunun sonucu olarak üniform sıkışma elde edilememektedir. Kaya dolguların sıkışma kontrolü için bu güne kadar herhangi bir standart metot geliştirilememiş olmakla beraber genel olarak %4 ila %8 oturma yapacak şekilde yapılan sıkıştırma yeterli kabul edilmektedir [4].

Karayolları Fenni Şartnamesinde, kaya dolgularda maksimum tane boyutu 500 mm olmalıdır. Kazı malzemesi içerisinde iri kayalar varsa dolgu tabakasına getirilmeden önce parçalanarak gerekli boyutlara indirilmelidir. Bu dolgularda tabaka kalınlığı 750 mm'yi geçmemek üzere malzemenin en büyük tane boyutunun en fazla 1,5 katı olacak şekilde serilmelidir.

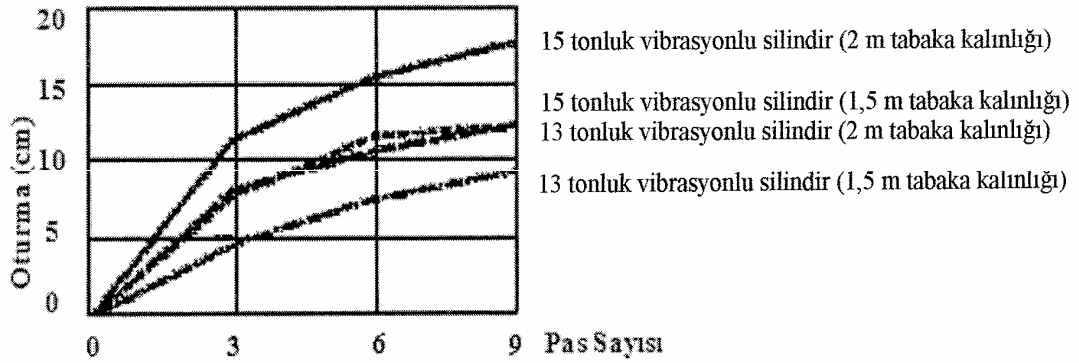
Kaya dolgular, paletli dozerler kullanılarak serilmelidir. Kaya dolgu malzemesi, yayılarak serilecek ve boşluk oluşmaması için, iri kaya parçalarının arası ince kaya parçaları ile doldurulacak şekilde yerleştirme yapılmalıdır. Sıkıştırma için, ihtiyaç duyulursa malzemeye su ilave edilmeli veya ince kısmın rutubeti fazla ise gerekli kurutma işlemi yapılmalıdır. Sıkıştırma işleminde yeterli kapasitede vibrasyonlu düz bandajlı silindirler kullanılmalıdır.

Kaya dolgularda sıkışma kontrolü, dolgu yapımında kullanılan malzemenin tabaka tabaka dökülüp, her bir tabakanın sıkıştırılması sırasında, 15 ton statik ağırlığındaki

silindirin son iki geçişinde toplam oturma miktarı 6 mm.den az ise yeterli sıkışmanın elde edilmiş olduğu kabul edilmektedir [40].

Kaya dolguların vibrasyonlu silindir ile sıkıştırılması sırasında üst yüzeyinde kırılmalar parçalanmalar oluştuğundan dolayı pas sayısının az olması gerekir. Bu nedenle çok ağır silindirle ve mümkün mertebe daha az genlikteki vibrasyonla daha az pas sayısında sıkıştırma yapılması uygun olacaktır.

Kaya dolguların kompaksiyonunda silindir ağırlığı, sıkıştırılan tabaka kalınlığı ve silindir pas sayısının sıkıştırma sırasında oturma miktarına olan etkisi şekil 5.2’de açıkça görülmektedir. Silindir ağırlığı arttıkça ve sıkıştırılan tabaka kalınlığı azaldıkça daha az pas sayısında daha fazla oturma olmaktadır. Silindir ağırlığı %15 ve tabaka kalınlığı %33 artırıldığında hemen hemen aynı oturma miktarı elde edilmektedir.



Şekil 5.2. Kaya dolgu kompaksiyonuna etki eden faktörler

Son yıllarda delme-patlama teknolojisinin hızla gelişmesi sonucu taş ocaklarından oldukça ekonomik kaya malzemesi elde edilmektedir. Bunun sonucu olarak deniz dolguları üzerinde yapılan ulaşım yapılarında oldukça büyük çaplı kaya dolgular üzerine daha küçük çaplı kaya dolgular yapılarak sağlam tabanlar elde edilebilmektedir. Kaya dolgu yapıldıktan sonra üzerine küçük boyutlu kayalar suyla sıkıştırılarak dolgunun içine belli derinlikte nüfus etmesi (penetre) sağlanmaktadır. Hatta bu amaçla alt da çok büyük çaplı üzerine orta boyut da ve en üstte küçük boyutlu olmak üzere üç farklı tabakadan yapılan kaya dolgular ile sağlam yol veya

hava alanı kaplama temelleri elde edilmektedir. Fakat zemin üzerine yapılacak kaya dolgularda iri kayalar yanda ve küçük kayalar ortada olacak şekilde veya bunların uygun karışımları ile yapılması halinde kompaksiyon sırasında en fazla sıkışma sağlandığından dolayı ileriki dönemlerdeki oturmalar azalmaktadır. Deniz (veya göl, akarsu) kaya dolguları için alt da daha iri kayaların kullanılmasıyla suyun dinamik etkilerine karşı daha büyük direnç sağlanabilmektedir [8].

## 5.2. Granüler Zeminlerde Kompaksiyon

Kum veya çakıllı zeminler, kum-çakıl karışımı zeminler, çok az kil veya silt içeren kumlu veya çakıllı zeminler ve özellikle üniform derecelenmiş kum gibi granüler zeminler için en uygun kompaksiyon vibrasyonlu düz bandajlı silindirlerle yapılabilmektedir. Eğer granüler zeminler %5 veya %10'dan daha az ince malzeme (0.002 mm'den küçük) ihtiva ediyorsa serbest drene olabilmektedirler. Bu tip serbest drene olabilen zeminler daha kalın tabakalar halinde çok yüksek su içeriğinde hatta yağmur altında dahi kolayca sıkıştırılabilirler. Ayrıca yüksek su içeriğinde düşük su içeriğine nazaran daha kolay sıkıştırılabilmektedir. Eğer granüler zemin %5 veya %10'dan daha fazla ince malzeme içeriyorsa serbest drene olabilme kabiliyeti azalır ve yüksek su içeriğinde sıkıştırmak zorlaşır. Bu durumda maksimum sıkışma optimum su içeriğinde veya yakın civarında mümkün olabilmektedir. Üniform derecelenmiş granüler zeminlerin kompaksiyonu oldukça zordur. Bu tip zeminlerde sıkıştırma esnasında özellikle üst kısımlarda ve nispeten alt kısımlarda düşük yoğunluklar elde edilir. Bu tip zeminler 35-40 cm kalınlıkta serilip sıkıştırıldığında en iyi sonuç elde edilir. Ancak tabaka kalınlığını azaltarak üst tabakanın sıkıştırılması sırasında alt tabakanın sıkışmayan üst kısmı sıkıştırılacağından dolayı 20 cm civarında serip sıkıştırma yapılarak dolgunun tüm kalınlığında homojen bir yoğunluk elde edilebilir. Özellikle kaplama altında don kabarması, drenaj vb. nedenlerden ötürü yapılan serme malzeme tabakası üniform derecelenmiş ise 20 cm'lik tabakalar halinde sıkıştırılmaları halinde en yoğun sıkışma elde edilmektedir. Keçi ayak veya küt ayak silindirler ile bu tip zeminleri sıkıştırmak mümkün değildir. Zira sıkıştırma sırasında silindirin ayakları altında bu tip zeminlerin daneleri oynayarak sıkışmaya karşı direnç gösterirler. Bu nedenle vibrasyonlu ağır

silindirlerle en iyi sonuç elde edilebilmektedir. Özellikle kaplamalarda temel ve alt temel tabakaları granüler ve sıkışma direnci yüksek kırma taş malzemelerden inşa edildikleri için vibrasyonlu düz silindirlerle çok iyi sonuç alınabilmektedir. Aynı şekilde lastik tekerlekli silindirler ile granüler temel tabakalarının kompaksiyonunda çok iyi sonuç alınabilmektedir [1].

Sıkıştırma sırasında, malzemenin su içeriği, Standart Proctor metodu ile bulunan optimum su içeriği  $w_{opt} \pm 2$  değerleri arasında kalmalıdır. Sıkıştırma işlemi, statik çizgisel yükü 30 kg/cm.den az olmayan vibrasyonlu düz bandajlı silindirlerle 20-30 cm kalınlığında tabakalar halinde yapılmalıdır. Silindir kapasitesinin artması durumunda tabaka kalınlığı 30-40 cm.ye yükseltilebilir [40].

### 5.3. Siltli Zeminlerde Kompaksiyon

Siltli zeminler plastik olmayan veya düşük plastisiteli ince malzemelerdir. Optimum su içeriği civarındaki silt ve siltli zeminler kolaylıkla sıkışabilmektedir. Bu tip zeminler için en ideal sıkışma küt ayaklı silindirlerle sağlanmaktadır. Eğer silt çok ince ise killerde olduğu gibi vibrasyonlu keçi ayak silindirler daha uygun olabilir. Bu tip zeminler eğer çok ince kum içeriyorsa yüksek su içeriklerinde kolayca likit duruma geçmeleri özel bir problem yaratmaktadır. Dolayısıyla optimum su içeriği civarında sıkıştırılmaları en uygunu olacaktır [8].

Plastik olmayan silt ya da siltli zeminlerin sıkıştırılmasında lastik tekerlekli silindirler en geçerli olanlarıdır. Keçi ayağı silindirler ise düşük kohezyonlu plastik zeminlerin sıkıştırılmasında daha etkilidir [16].

Bu zeminler için kompaksiyon işlemlerinin etkisi önemli ölçüde zeminin nem miktarına bağlıdır. Özellikle plastik olmayan homojen ince taneli zeminler için geçerlidir. Eğer su içeriği optimuma tamamen eşit değilse, bu zeminler tam olarak sıkıştırılmaz [41].

#### 5.4.Killi Zeminlerde Kompaksiyon

Killi zeminlerin plastik özelliklerinden ötürü kompaksiyonları her zaman daha zordur. Suyun miktarından çok fazla etkilendiklerinden dolayı kompaksiyon karakteristikleri doğrudan su içeriğine bağlıdır. Çünkü düşük su içeriğinde sert ve katı halde iken yüksek su içeriğinde plastik bir özellik gösterirler. Maksimum kuru birim ağırlığına tekabül eden optimum su içeriğinde en iyi sıkışma elde edilir. Bu nedenle kompaksiyonda dikkat edilecek en önemli husus, sıkıştırma anında zeminin optimum su içeriğinde olmasını sağlamaktır.

Bu nedenle killi zeminlerin kompaksiyonuna büyük itina gösterilmeli ve sıkışma kontrolleri daha sık yapılmalıdır. Killi zeminlerde kompaksiyon ne kadar başarılı olursa zeminin olumsuz özellikleri de o kadar azaltılmış olacaktır. Çünkü ne kadar iyi sıkışma sağlanırsa o kadar daha az boşluk içereceklerinden dolayı permeabiliteleri de o kadar az olacağından kapilerite ile su emmeleri azalacak ve dolayısıyla da yüksek stabilite ve don direnci gösterecekleri gibi oturmalarında da önemli azalmalar olacaktır.

Killi zeminlerde sıkıştırmadan sonra da bir miktar oturmaların olması, düşük kayma mukavemetli oluşu ve dolguda değişen su içeriğine göre farklı davranış göstermesi, dona aşırı duyarlı oluşu vb. nedenlerden ötürü kullanmamak veya düşük plastisiteye sahip olanlarını tercih etmek her zaman daha iyi sonuç verecektir.

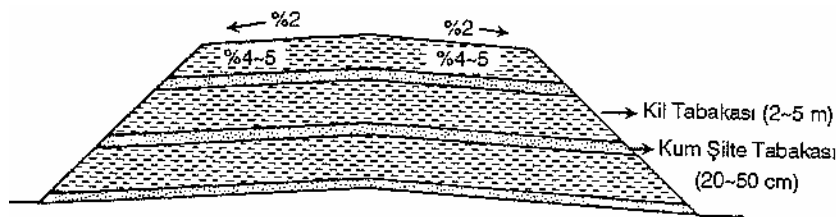
Killi zeminler kohezyonsuz zeminlere nazaran daha çok kompaksiyon enerjisine ihtiyaç gösterirler ve uygun sıkıştırma için daha ince tabakalar halinde serilip sıkıştırılmaları gerekir. Bu tip zeminler için en uygun silindir tipi vibrasyonlu keçi ayak silindirler olmakla beraber eğer belli miktar kum içeriyorsa vibrasyonsuz keçi ayağı veya küt ayak silindirlerde başarıyla kullanılmaktadır. Bu tip zeminler için lastik tekerlekli silindirlerde kullanılabilir. Ancak son yıllarda vibrasyonlu çelik bandajlı silindirlerle çok iyi sonuçlar alınmaktadır [4].

Kil toprakları arasındaki boşluklar titreşim ve kısa süreli basınçlar ile azaltılamaz. Buna karşın, keçi ayağı silindirlerin kullanılması, topraklar arasındaki boşlukların azaltılmasında etkindirler ve sıkışmanın niteliği de büyük ölçüde buna bağlıdır. En iyi sonuçlar eğer doğal su içeriği değeri plâstik limit yakınlarında ise elde edilir. Eğer su içeriği, plâstik limitten oldukça büyükse, kil sıkıştırma aracına yapışır yada araç zemine gömülme eğilimi gösterir. Su içeriği plâstik limitten oldukça küçük ise kil toprakları parçalanamaz ve aralarındaki boşluklar açık kalır [16].

KFŞ' de killi malzemeler 20-25 cm kalınlığında, tabakalar halinde; küt ayak, keçi ayağı, vibrasyonlu keçi ayağı, vibrasyonlu küt ayak ve lastik basıncı ayarlanabilen lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılmalıdır. Sıkıştırmada keçi ayağı silindir kullanılması halinde ise ayakların yüksekliği 15 cm.den az olmayacak, ayak kesiti  $25 - 75 \text{ cm}^2$  arasında olacak ve ayaklara düşen basınç da  $14 \text{ kg/cm}^2$  den az olmamalıdır.

Sıkıştırma sırasında plastisite indeksi  $PI > 20$  olan malzemenin su içeriği, Standart Proctor metodu ile bulunan optimum su içeriği  $w_{opt} - (w_{opt} + \%2)$  değerleri arasında,  $PI < 20$  olan malzemelerin su içeriği ise  $w_{opt} - (w_{opt} - \%2)$  değerleri arasında olacak şekilde ayarlanmalıdır [40].

Killi zeminlerin şişme ve büzülme karakteristikleri su içeriği ile değişiklik gösterdiğinden dolayı yüksek dolgularda kullanılması problem yaratmaktadır. Bu nedenle son yıllarda yüksek dolgularda Şekil 5.3'de görüldüğü gibi sandviç tabakalı dolgular yapılmaktadır [8].



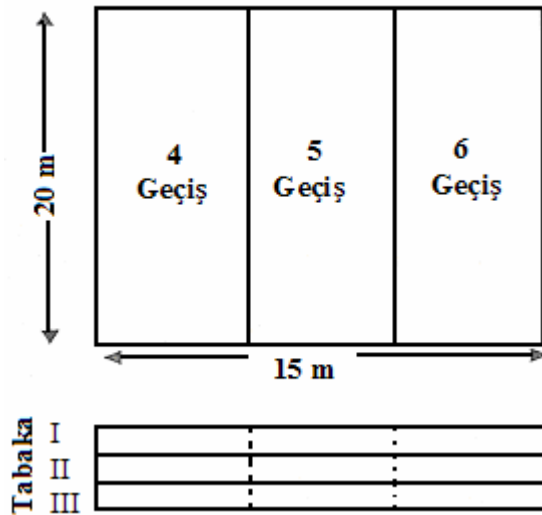
Şekil 5.3. Yüksek dolgularda sandviç tabaka uygulaması

## 6. ARAZİ ÇALIŞMA ÖRNEĞİ VE KRİTERLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde; Yahyasaray Barajı deney dolgusunda kullanılan zemin, sıkıştırma aracı, yapılmış laboratuvar ve arazi tecrübe sonuçları verilerek, aynı malzemenin sıkıştırılması için farklı kompaksiyon makineleri ile geçiş sayıları hesabı ve verim hesapları analiz edilmiştir.

### 6.1. Arazi Çalışması Örneği ( Yahyasaray Barajı Deneme Dalgusu )

- Bu deney dolgusunda kullanılan vibrasyonlu düz tamburlu silindirin çapı 1.60 m, silindir uzunluğu 2,12 m olup, kendi hareket eden tiptedir. Vasitanın toplam ağırlığı 17,2 ton, frekans 30-35 Hz (1740-2100 titreşim / dakika), amplitüt 1,5 -2,0 mm arasındadır.
- Deney dolgusu 20 m uzunluğunda, 15 m genişliğinde dar bir alanda gerçekleştirilmiştir.
- Bu alanda 4, 5 ve 6 geçiş yapılarak üç şerit halinde bölgelere ayrılmıştır (Şekil 6.1).

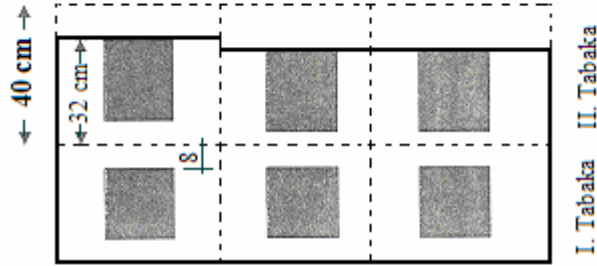


Şekil 6.1. Deney dolgusu geçiş ve tabaka sayısı

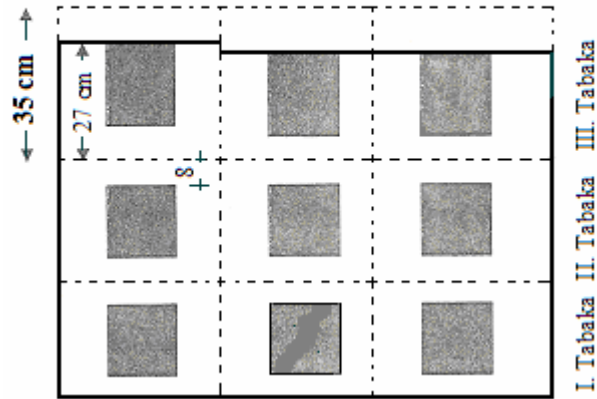
- Deney dolgusu üç tabaka halinde ve her tabakada aynı geçiş sayıları ile gerçekleştirilmiştir.
- Her tabakadan ayrı ayrı sıkıştırma kontrolü için numune alındığı gibi , ayrıca her tabakadan sonra bir alt tabakaya inilerek tekrar numuneler alınmıştır (Şekil 6.2).
- Her tabakada kullanılan malzemenin rutin deneyleri ve sınıfı tespit edilmiştir (Çizelge 6.1).
- Her tabakada sıkışma tecrübeleri ve su muhtevası tecrübeleri yapılmıştır [42].



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.2. Her tabakadan alınan numune sayıları (dolgu kesiti)

- I. tabaka dolgu kesiti
- I. ve II. tabaka dolgu kesiti
- I., II. ve III. tabaka dolgu kesiti

Çizelge 6.1.Deney dolgusunda kullanılan malzemenin laboratuvar sonuçları [42]

| DİŞİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ              |          |             |                          |                  |            |                     |      |      |    |                        |                |                       |             |                       |                  | TANIMLAMA VE MÜHENDİSLİK                     |                         |                         |  |  |  |  |  |  |  | Numunenin geldiği yer : ..... |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------|----------|-------------|--------------------------|------------------|------------|---------------------|------|------|----|------------------------|----------------|-----------------------|-------------|-----------------------|------------------|----------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--|--|--|--|--|--|--|-------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| ..... Bölge Müdürlüğü             |          |             |                          |                  |            |                     |      |      |    |                        |                |                       |             |                       |                  | Numunenin ait olduğu yer: YAHYA SARAY BARAJI |                         |                         |  |  |  |  |  |  |  | DENEYDOLGUSU                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ..... KALİTE KONTROL LABORATUVARI |          |             |                          |                  |            |                     |      |      |    |                        |                |                       |             |                       |                  | DENEYLERİ RAPORU                             |                         |                         |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1                                 | 2        | 3           | 4                        | 5                |            | 6                   |      |      |    | 7                      | 8              | 9                     | 10          |                       | 11               |                                              | 12                      | 13                      |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Numune No.                        | Kuyu No. | Derinlik(m) | Danelerin Özgül ağırlığı | Kompaksiyon      |            | Atterberg limitleri |      |      |    | Tabi su muhtevaa w (%) | Perozite n (%) | Perma-abilite k cm/sn | Direk kesme |                       | Üç aksanlı kesme |                                              | serbest basınç q kg/cm² | Sınıflı ve Grup sembolü |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   |          |             |                          | $\gamma'_{kmax}$ | $W'_{opt}$ | LL                  | PL   | PI   | RL |                        |                |                       | C           | $\phi^{\circ}$ kg/cm² | C                | $\phi^{\circ}$                               |                         |                         |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   | I.       | tabaka      | 2,63                     | 1,79             | 15,1       | 33,6                | 17,2 | 16,4 |    |                        |                |                       |             |                       |                  |                                              |                         | CL                      |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   | II.      | tabaka      | 2,62                     | 1,83             | 14,9       | 33,5                | 17,6 | 15,9 |    |                        |                |                       |             |                       |                  |                                              |                         | SC-CL                   |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   | III.     | tabaka      | 2,63                     | 1,83             | 13,7       | 31,3                | 17,1 | 14,2 |    |                        |                |                       |             |                       |                  |                                              |                         | CL                      |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   |          |             |                          |                  |            |                     |      |      |    |                        |                |                       |             |                       |                  |                                              |                         |                         |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   |          |             |                          |                  |            |                     |      |      |    |                        |                |                       |             |                       |                  |                                              |                         |                         |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   |          |             |                          |                  |            |                     |      |      |    |                        |                |                       |             |                       |                  | KONTROL                                      |                         |                         |  |  |  |  |  |  |  |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

## 6.2. Farklı Kriterlerin Değerlendirilmesi

Farklı sıkıştırma ekipmanları ile geçiş sayısı ve verimin belirlenmesi amacıyla seçilen sıkıştırma ekipmanlarının karakteristik özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Sıkıştırma ekipmanlarının karakteristik özellikleri

| Sıkıştırma Ekipmanı               | Ağırlık<br>W (kg) | Silindir<br>Çapı<br>D(cm) | Silindir<br>Uzunluğu<br>L (cm) | Frekans<br>f (Hz) | Amplitüd<br>(genlik)<br>r (mm) |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| 1.Araç:Vibrasyonlu düz silindir   | 17200             | 160                       | 212                            | 33                | 1,8                            |
| 2. Araç:Vibrasyonsuz düz silindir | 17200             | 160                       | 212                            |                   |                                |
| 3. Araç:Vibrasyonlu keçi ayağı    | 17200             | 150                       | 180                            | 33                | 1,8                            |
| 4. Araç:Vibrasyonsuz keçi ayağı   | 17200             | 150                       | 180                            |                   |                                |

### 6.2.1.Geçiş sayılarının hesabı

Eş. 2.3 - Eş. 2.6, ve Eş. 3.4 kullanılarak Çizelge 6.2’de ki sıkıştırma ekipmanları için gereken geçiş sayılarının hesaplanması.

$$\text{Eş. 2.4'den laboratuvar sıkıştırma enerjisi; } C_E = \frac{nNHM}{V}$$

$$C_E = \frac{3 \times 25 \times 0,305 \times 2,50}{0,956 \times 10} = 59820 \text{ kg m/m}^3$$

#### 1.Araç: Vibrasyonlu düz silindir

m=17200 kg, r=1,8 mm, f=1980 devir/dakika ve L=212 cm olmak üzere dinamik kuvvet Eş. 3.4’den;

$$F_d = m.r.2\pi.f^2$$

$$F_d = 17200 \times 0,0018 \times 2\pi \times (1980/60)^2$$

$$F_d = 211733 \text{ N}$$

$$(1 \text{ kg-f} = 9,807 \text{ N})$$

$$F_d = 21590 \text{ kgf}$$

$$\text{Lineer (çizgisel) Yük } S = \frac{21590}{212} = 102 \text{ kgf}$$

Silindir genişliğinin 1 m.lik yol boyunca yaptığı iş (Z), Eş. 2.5' den; (Zayıflama sayısı  $k = 0,30$  için)

$$Z = S \times L \times k \times 1,00$$

$$Z = 102 \times 212 \times 1,00 \times 0,30 = 6487 \text{ kg.m}$$

Laboratuar kompaksiyon enerjisi = Arazi kompaksiyon enerjisi

Arazi sıkıştırma enerjisi;  $CE = \frac{nZ}{a.h}$  eşitliğinde:

$n$  = Geçiş sayısı

$Z$  = Yapılan iş (6487 kg.m)

$a$  = silindir boyu  $\times 1,00 \text{ m} = 2,12 \times 1,00 = 2,12 \text{ m}^2$

$h$  = Serilen tabaka kalınlığı (30 cm )

$$59820 \text{ kg m/m}^3 = \frac{n \times 6487}{2,12 \times 0,30}$$

$$n = 6 \text{ geçiş}$$

2.Araç: Vibrasyonsuz düz silindir

$m = 17200 \text{ kg}$ ,  $L = 2,12 \text{ m}$ ,  $h = 0,30 \text{ m}$ .

$$\text{Lineer Yük } S = \frac{17200}{212} = 81 \text{ kg/cm}$$

$$Z = 81 \times 212 \times 1,00 \times 0,30 = 5152 \text{ kg m}$$

Eş. 2.3'den;

$$59820 \text{ kg m/m}^3 = \frac{n \times 5152}{2,12 \times 0,30}$$

$$n = 8 \text{ geçiş}$$

### 3. Araç: Vibrasyonlu keçi ayağı

$m = 17200 \text{ kg}$ ,  $r = 1,8 \text{ mm}$ ,  $f = 1980 \text{ devir/dakika}$ ,  $L = 1,80 \text{ m}$   
1 sırada dizili ayak sayısı = 7, ve ayak kesit alanı  $8 \times 8 = 64 \text{ cm}^2$

Dinamik kuvvet Eş. 3.4'den;

$$F_d = m.r.2\pi.f^2$$

$$F_d = 17200 \times 0,0018 \times 2\pi \times (1980/60)^2$$

$$F_d = 211733 \text{ N}$$

$$(1 \text{ kg-f} = 9,807 \text{ N})$$

$$F_d = 21590 \text{ kgf}$$

$$\text{Birim basınç } \sigma = \frac{21590}{7 \times 64} = 48,2 \text{ kgf/cm}^2$$

Silindir genişliğinin 1 m.lik yol boyunca yaptėı iş (Z) ; Eş. 2.4;

$$Z = \sigma \times s \times a \times k \times 1,00$$

Burada ;

$$\sigma = \text{birim basınç} = 48,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$s = \text{bir sırada dizili ayak sayısı} = 7$$

$$a = \text{ayak sıkıştırıcı alanı} = 64 \text{ cm}^2$$

$$k = \text{zayıflama katsayısı} = 30$$

$$Z = 48,2 \times 7 \times 64 \times 0,30 = 6478 \text{ kg.m}$$

Laboratuar kompaksiyon enerjisi = Arazi kompaksiyon enerjisi

$$\text{Arazi sıkıştırma enerjisi; } CE = \frac{nZ}{ah} \text{ eşitliğinde:}$$

$$n = \text{Geçiş sayısı}$$

$$Z = \text{Yapılan iş (6478 kg.m)}$$

$$a = \text{silindir boyu} \times 1,00 \text{ m} = 1,80 \times 1,00 = 1,80 \text{ m}^2$$

$$h = \text{Serilen tabaka kalınlığı (30 cm)}$$

$$59820 \text{ kg m/m}^3 = \frac{n \times 6478}{1,80 \times 0,30}$$

$$n = 5 \text{ geçiş}$$

#### 4.Araç: Vibrasyonsuz keçi ayağı

$$m = 17200 \text{ kg, } L = 1,80 \text{ m, } h = 0,30 \text{ m.}$$

$$\text{Lineer Yük } S = \frac{17200}{7 \times 64} = 38,4 \text{ kg/cm}$$

$$Z = 38,4 \times 7 \times 64 \times 1,00 \times 0,30 = 5161 \text{ kg m}$$

Eş. 2.3'den;

$$59820 = \frac{n \times 5161}{2,12 \times 0,30}$$

$$n = 7 \text{ geçiş}$$

### 6.2.2. Verim hesabı

Sıkışmış tabaka kalınlığı  $H = a \times \text{gevşek kalınlık}$   
( $a = \text{kohezyonlu zeminler için } 0,75 \text{ kabulü ile}$ )

$$H = 0,75 \times 0,30 = 0,225 \text{ m}$$

$$V = \text{Silindiraj hızı} = 5 \text{ km/sa}$$

$$L = \text{Silindir genişliği}$$

$$n = \text{Geçiş sayısı}$$

$$C = \text{Randıman sayısı (0,75)}$$

Verim faktörü Eş. 4.1'den;

$$Q = \frac{L \times V \times H \times 1000}{n} \times C$$

1.Araç: Vibrasyonlu düz silindir

$$L = 2,12 \text{ m, } n = 6 \text{ geçiş}$$

$$Q = \frac{2,12 \times 5 \times 0,225 \times 1000}{6} \times 0,75 = 298 \text{ m}^3/\text{sa}$$

2.Araç: Vibrasyonlu düz silindir

$$L = 2,12 \text{ m, } n = 8 \text{ geçiş}$$

$$Q = \frac{2,12 \times 5 \times 0,225 \times 1000}{8} \times 0,75 = 224 \text{ m}^3/\text{sa}$$

3.Araç: Vibrasyonlu keçi ayağı

$$L = 1,80 \text{ m, } n = 5 \text{ geçiş}$$

$$Q = \frac{1,80 \times 5 \times 0,225 \times 1000}{5} \times 0,75 = 304 \text{ m}^3/\text{sa}$$

4.Araç: Vibrasyonsuz keçi ayağı

$$L = 1,80 \text{ m, } n = 7 \text{ geçiş}$$

$$Q = \frac{1,80 \times 5 \times 0,225 \times 1000}{7} \times 0,75 = 217 \text{ m}^3/\text{sa}$$

### **6.3. Deney Dolgusu Sonuçları ve Analitik Bulgular**

Yahyasaray Barajı deney dolgusunda proktor deneyi ile kontrol edilen laboratuvar ve arazi sıkışma değerleri ile su içeriği değerleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Proctor deneyi ile kontrol edilen deney dolgusunun laboratuvar ve arazi sonuçları [42]

| TECRÜBE NO. | DOLGU ÜZERİNDE<br>TECRÜBENİN YERİ |                                 | VİBRASYONLU SİLİNDİR<br>GEÇİŞ SAYISI | DOLGU RUTUBETİNDE                    |                                                        |                              |         | STANDART LAB.<br>KOMPAKSİYONUNA |                                                         | ÇABUK KONTROL<br>DEĞERLERİ                             |                                                                                                |                                                                            | ÖZGÜL<br>AĞIRLIK |                 |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
|             | Tabaka<br>Sayısı                  | Numunenin<br>Alındığı<br>Tabaka |                                      | %+No-4 (Kuru birim<br>ağırlığa göre) | No-4 teki su içeriği<br>kuru birim<br>ağırlığının %'si | +No-4 Kuru<br>Birim Ağırlık  |         | Maksimum kuru<br>Birim ağırlık  | Optimum su içeriği<br>(Kuru birim ağırlığının<br>% 'si) | Optimum su içeriğinden<br>Dolgu su içeriğinin<br>farkı | Dolgu w muhtevasında;<br>Dolgudaki $\gamma_k$ 'nın, kom.<br>Siliindirindeki $\gamma_k$ 'ya or. | Dolgudaki $\gamma_k$ 'nın,<br>Lab. Mak. Kuru bir.<br>Ağırlığına oranı (%D) | +<br>No-4 Kısım  | -<br>No-4 Kısım |
|             |                                   |                                 |                                      |                                      |                                                        | Kompaksiyon<br>siliindirinde | Dolguda |                                 |                                                         |                                                        |                                                                                                |                                                                            |                  |                 |
| 1           | I                                 | I                               | 4                                    | 2,6                                  | 15,6                                                   | 1,837                        | 1,780   | 1,839                           | 15,1                                                    | - 0,5                                                  | 96,9                                                                                           | 96,8                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 2           | I                                 | I                               | 5                                    | 1,0                                  | 18,9                                                   | 1,757                        | 1,692   | 1,761                           | 18,4                                                    | -0,5                                                   | 96,3                                                                                           | 96,1                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 3           | I                                 | I                               | 6                                    | 0,8                                  | 14,9                                                   | 1,788                        | 1,785   | 1,809                           | 16,5                                                    | 1,4                                                    | 99,8                                                                                           | 98,7                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 4           | II                                | II                              | 4                                    | 2,2                                  | 15,6                                                   | 1,860                        | 1,835   | 1,862                           | 15,3                                                    | -0,3                                                   | 98,7                                                                                           | 98,5                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 5           | II                                | II                              | 5                                    | 1,9                                  | 17,5                                                   | 1,746                        | 1,757   | 1,748                           | 18,1                                                    | 0,6                                                    | 100,6                                                                                          | 100,5                                                                      | 2,43             | 2,63            |
| 6           | II                                | II                              | 6                                    | 2,0                                  | 16,2                                                   | 1,771                        | 1,769   | 1,772                           | 16,9                                                    | 0,7                                                    | 99,9                                                                                           | 99,8                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 7           | II                                | I                               | 4                                    | 1,9                                  | 16,4                                                   | 1,832                        | 1,710   | 1,833                           | 16,6                                                    | 0,2                                                    | 93,3                                                                                           | 93,3                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 8           | II                                | I                               | 5                                    | 1,6                                  | 17,9                                                   | 1,735                        | 1,779   | 1,790                           | 16,9                                                    | -1,0                                                   | 99,7                                                                                           | 99,4                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 9           | II                                | I                               | 6                                    | 1,4                                  | 15,9                                                   | 1,787                        | 1,757   | 1,789                           | 16,7                                                    | 0,8                                                    | 98,3                                                                                           | 98,2                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 10          | III                               | III                             | 4                                    | 1,6                                  | 13,4                                                   | 1,836                        | 1,885   | 1,846                           | 14,6                                                    | 1,2                                                    | 102,7                                                                                          | 102,1                                                                      | 2,43             | 2,63            |
| 11          | III                               | III                             | 5                                    | 1,5                                  | 14,8                                                   | 1,793                        | 1,791   | 1,800                           | 15,9                                                    | 1,1                                                    | 99,9                                                                                           | 99,5                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 12          | III                               | III                             | 6                                    | 3,7                                  | 13,7                                                   | 1,803                        | 1,887   | 1,841                           | 15,6                                                    | 1,9                                                    | 104,7                                                                                          | 102,5                                                                      | 2,43             | 2,63            |
| 13          | III                               | II                              | 4                                    | 2,4                                  | 15,6                                                   | 1,757                        | 1,717   | 1,803                           | 17,6                                                    | 2,0                                                    | 97,7                                                                                           | 95,2                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 14          | III                               | II                              | 5                                    | 1,5                                  | 17,8                                                   | 1,735                        | 1,720   | 1,737                           | 18,4                                                    | 0,6                                                    | 99,1                                                                                           | 99,0                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 15          | III                               | II                              | 6                                    | 1,4                                  | 16,1                                                   | 1,799                        | 1,722   | 1,800                           | 16,3                                                    | 0,2                                                    | 95,7                                                                                           | 95,6                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 16          | III                               | I                               | 4                                    | 3,1                                  | 15,1                                                   | 1,831                        | 1,674   | 1,835                           | 15,8                                                    | 0,7                                                    | 91,4                                                                                           | 91,2                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 17          | III                               | I                               | 5                                    | 3,4                                  | 13,7                                                   | 1,851                        | 1,819   | 1,860                           | 14,8                                                    | 1,1                                                    | 98,3                                                                                           | 97,8                                                                       | 2,43             | 2,63            |
| 18          | III                               | I                               | 6                                    | 0                                    | 13,9                                                   | 1,857                        | 1,861   | 1,865                           | 14,7                                                    | 0,8                                                    | 100,2                                                                                          | 99,8                                                                       | 2,43             | 2,63            |

Bir grafik üzerinde de sıkıştırma sonuçları gösterilmiş olup buna göre 4 geçişte sıkışmalarda büyük bir dağılım olduğu 5 ve 6 geçişte ise sıkıştırma sonuçlarının iyi olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Geçiş sayılarına bağlı sıkışmaların grafiği

Yahyasaray Barajı için sonuç olarak geçirimsiz kil malzemenin 6 geçiş (pas) yapılarak 30-35 cm.lik tabakalar halinde düz tamburlu vibrasyonlu silindir ile sıkıştırılması ve sıkıştırmadan sonra meydana gelen düz sathın 5-7,5 cm. arasında uygun bir vasıta ile tırmıklanarak kabartıldıktan sonra üzerine yeni malzeme serilmesine karar verilmiştir [42].

Farklı sıkıştırma ekipmanlarına ait geçiş sayıları ve verimlerine ait hesaplamaların sonuçları ile 500 000 m<sup>3</sup> lük bir dolgu yapımı için gerekli çalışma saatleri hesaplanarak Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Sıkıştırma ekipmanlarına ait pas sayıları ve verim

| Kompaksiyon ekipmanı      | Geçiş sayısı | Verim (m <sup>3</sup> /sa) | 500 000 m <sup>3</sup> dolgu için çalışma saati |
|---------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| Vibrasyonlu düz silindir  | 6            | 298                        | 1678                                            |
| Vibrasyonsuz düz silindir | 8            | 224                        | 2232                                            |
| Vibrasyonlu keçi ayağı    | 5            | 304                        | 1645                                            |
| Vibrasyonsuz keçi ayağı   | 7            | 217                        | 2304                                            |

Sıkıştırma ekipmanlarının karakteristik özelliklerinden yararlanılarak teorik olarak, farklı sıkıştırma ekipmanlarına ait geçiş sayıları ile saatlik kapasiteleri hakkında yaklaşık değerler bulunmuştur. Bunun sonucunda sıkıştırma aracının 500 000 m<sup>3</sup>'lük bir dolgu işi için gerekli çalışma saati hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4'ten görüldüğü üzere arazi çalışma örneğindeki sıkıştırma aracının karakteristik özelliklerine sahip vibrasyonsuz sıkıştırıcıların verimlerinin, vibrasyonlu sıkıştırıcılara oranla % 20 – 30 daha az olduğu görülmektedir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yapılan araştırma ve örnek çalışmadan çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

En iyi sıkışma ancak zemin içinde yeterli miktarda su bulunması durumunda sağlanabilmektedir. Zeminin en iyi ve en kolay sıkışabileceği su içeriği optimum su içeriğidir.

Belirli bir zemin ve belirli bir titreşimli sıkıştırıcı tipi için istenilen sıkıştırma oranının minimum geçiş sayısı ile teminini sağlayan optimum bir frekans vardır. Sıkıştırma bu optimum frekans ile yapılmalıdır.

Sıkıştırıcı cinsinin belirlenmesini, farklı zemin cinslerine uygulanacak farklı kompaksiyon metotları belirler. Kompaksiyon enerjisinin zemine güvenli aktarılması açısından sıkıştırıcı cinsinin doğru belirlenmesi önemlidir. Orta kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında düz silindirler, üniform derecelenmiş kum gibi granüler zeminler için vibrasyonlu düz silindirler, killi zeminler için vibrasyonlu keçi ayağı silindirler başarı ile kullanılabilir.

Sıkıştırıcı ağırlığının belirlenmesinde, sıkıştırıcı birim basıncının dolgu zeminin taşıma gücünü aşmaması gerekir. Aksi halde dolgu zemininde çözülmeler olur.

Geçiş hızının sıkışmaya tesiri kesin olarak bilinmemekle birlikte araştırmalar göstermiştir ki sıkıştırmada ekonomik bir hız aralığı (5-13 km/h) vardır. Yapılan araştırma sonuçlarına göre hızın artması ile belli bir sıklığa erişebilmek için gerekli geçiş sayısı da artmaktadır.

Sıkıştırılacak dolgu zeminin tabaka kalınlığının belirlenmesinde; optimum tabaka kalınlığı hakkında kesin kaide verilememektedir. Ancak değişik şartnameler, yapılan araştırma ve tecrübeler doğrultusunda; belirli zemin türleri ve sıkıştırma araçlarının kapasitelerine göre uygun tabaka kalınlıkları seçilir. Keçi ayağı sıkıştırıcılar için,

sıkıştırılacak tabaka kalınlığı ayak boyu ile (22,5 cm) sınırlandırılabilir. Ayrıca vibrasyonlu keçi ayağı silindirleri vibrasyonsuz keçi ayağı silindirlere göre tabaka kalınlığı açısından belirli bir üstünlüğü yoktur.

Sıkıştırma aracının geçiş sayısını ise dolgu zemini cinsi ve su içeriği, sıkıştırıcının ağırlığı ve frekansı, serilen tabaka kalınlığı ve geçiş hızı gibi birçok parametre belirler. Bu nedenle her bir parametrenin titizlikle seçilmesi önemlidir.

Arazi çalışması örneği ile farklı sıkıştırma araçlarının geçiş sayıları ve performanslarına bakıldığında, vibrasyonlu sıkıştırıcıların statik sıkıştırıcılara oranla % 20-30 daha fazla verim sağladıkları söylenebilir.

Sıkıştırma ekipmanlarının seçiminde, sıkıştırıcının karakteristik özelliklerinden yararlanılarak teorik olarak sıkıştırıcı ağırlığı ve dinamik kuvvetlerin etkisi ile birlikte dolgu tabaka kalınlığı ile geçiş sayıları hakkında belirlenebilen yaklaşık değerler mühendise ön bilgi verir. Böylece iş programlarının yapımında, işçi sayısının belirlenmesinde, her türlü taşıyıcı ve sıkıştırıcı ekipmanın seçiminde, işin süresi ve maliyeti hakkında yol gösterici özellik sağlanır.

Ancak; zeminlerin çok farklı özellikleri ve vibrasyonlu silindirin kompaksiyon sırasında sürekli yeni zemin elemanlarıyla karşılaşacak şekilde hareket etmesi nedeniyle, elde edilen ön bilgiler ışığında mutlaka deneme dolgusu yapılmalı, bunun sonucunda en ekonomik tabaka kalınlığı, geçiş hızı ve geçiş sayısına karar verilmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Aytekin, M., “Deneysel Zemin Mekaniği”, *Teknik Yayınevi*, Ankara, 1, 191-192 (2004).
2. Sonuç, T., “Karayolu Tekniği”, *Birsen Yayınları*, İstanbul 341, 345, 346, 358, 363, 371 (1983).
3. Ekinci, C. E., “ Bordo Kitap : Yapı ve Tasarımcının El Kitabı”, *Üniversite Kitabevi*, Elazığ, 274 (2005).
4. Tunç, A., “Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları”, *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul, 187-217 (2002).
5. Schroeder, W.L., Dickenson S.E., Wranring Don C., “Soil in Construction” *Prentice Hall*, Upper Saddle Ri, 150 (2004).
6. Çağlarer, B., “Yol Yapım Tekniği”, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara, 197,198, 202-214, 220 (1986).
7. Kumbasar, V., “Yol Mühendisliği İçin Zemin Mekaniği”, *Teknik Üniversite Matbaası*, İstanbul, 217-219, 274, 280 (1970)
8. Tunç, A., “Yol Malzemeleri ve Uygulamaları”, *Atlas*, İstanbul, 511-512, 521-523, 528-531 (2001).
9. Umar, F., “Yol İnşaatı” *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 236 (1997).
10. Güntekin, A., “Dolgu Yapımı ve Denetim Tekniği”, *DSİ. Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı*, Ankara, 7-12, 21-27 (1985).
11. Çağlarer, B., “Yol Yapım Tekniği”, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara, 46 (1986).
12. Ural, Ö., “Dolgu Yapım Tekniği ve Dolgu Yapımında Statik Sıkıştırıcının Seçimi”, *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, Adana, 3, 12, 13, 24-29, 34 (1985).
13. Özenci, R., “ Dolgu Malzemesi Etüdü ve Barajlarda Dolgu Yapımında Karşılaşılan Güçlükler, Uygulamadaki Çözümleri”, *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri*, Adana, 15 (1985).
14. Spigolon,, S.J., “The McGraw-Hill Civil Engineering PE Exam Depth Guide”, *McGrank-Hill*, New York, 6 (2001).
15. Holtz, Robert D., “Geoteknik Mühendisliğine Giriş” *Gazi Kitabevi*, Ankara, 102, 103, 104, 111, 112 (2002).

16. Ertan, Y., Ülkü S., “Zemin Özellikleri ve Deneyleri”, *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*, Ankara, 147-149 (1978).
17. Ersoy, S., “Yapı Makineleri”, Cilt.2, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 199-213, 223-231 (1966).
18. Yayla, N., “Karayolu Mühendisliği”, *Birsan*, İstanbul, 239-240 (2002).
19. Toprak Şefliği Araştırma Fen Heyeti, “Toprak Mühendisliği Bilgileri ve Deneyleri”, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 112, 115-120 (1967).
20. Pierre, H., “An Outline Of Soil And Rock Mechanics”, *Cu*, Cambridge, 50 (1982).
21. Sonuç, T., “Karayolu Tekniği”, Cilt.2, *Sermet*, İstanbul 81,83,85 (1976).
22. Ersoy, S., “Makine Bilgisi ve Yapı Makinaları” *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 150-159 (1987).
23. Berkmen, E., “Toprak İşleri”, Cilt.2, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 84-95 (1967).
24. Edwards, D., J., “Management of Off-Highway Plant and Equipment”, *Spon*, London, 35 (2003).
25. Craig, R., F., “Soil Mechanics”, *Spon Press*, London, 34 (1998).
26. Das, B. M., “ Principles Of Geotechnical Engineering” *PWS*, Boston, 125 (1998).
27. Evren, G., “Toprak İşleri”, *Birsan*, İstanbul, 221 (2000).
28. Çakmur, C., “Toprak Baraj İnşa Tekniği”, *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*, Ankara, 31-38 (1967).
29. Tuncer, İ. K., “Yapı Makinaları”, *Çukurova Üniversitesi Ceyhan MeslekYüksek Okulu*, Ceyhan, 103 (1987).
30. Özsöylev, T., “İş ve İnşaat Makinaları”, *Şatana*, İstanbul, 142-145 (1992).
31. Atkins, H. N., “Highway Materials, soils, and Consretes” *Prentice Hall*, Upper Saddle Ri, 109 (2003).
32. Bell, F., G., “Ground Engineer’s Reference Book”, *Butterworths*, London, 37/7 (1987).

33. Smith, G., N., “Elements Of Soil Mechanics For Civil and Mining Engineerins”, **Granada**, London, 406 (1982).
34. Harris, F., “Constractian Plant”, **Granada**, London, 98 (1881).
35. Yalçın, C., Apaydın, E., “Fiziğin Temelleri”, **Arkadaş Yayınevi**, Ankara, 401 (2004).
36. Hansbo, S., “Foundation Engineering”, **Elsevier**, Amsterdam, 404-405 (1994).
37. Özüdoğru, K., “Vibrasyonlu Araçlarla Yapılan Dolgularda Araç Zemin Etkileşimi” **Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri**, Adana, 1,2 (1985).
38. Acatay, A., “Kohezyonlu Zeminlerin Titreşimli Sıkıştırıcılarla Sıkıştırılması”, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, IV, V (1968).
39. Schoklitsch, A., “Temel İnşaatı”, Acun, N., **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 328 (1968).
40. Karayolları Fenni Şartnamesi, **Karayolları Genel Müdürlüğü**, Ankara, 63-65 (2006).
41. Terzaghi, K., Peck, R., B., Mersi, G., “Soil Mechanics In Engineering Practice”, **John Wiley&Sons**, New York, 312 (1996).
42. İkiler, H., “Beton ve Zemin”, **DSİ XII. Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü**, Kayseri, 181-187 (1999).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KEÇETEPEN, Hulusi  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 07.08.1970 Kayseri  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 555 603 34 20  
e-mail : hkecetepen@hotmail.com

### Eğitim Derece

Yüksek lisans

Lisans

Lise

### Eğitim Birimi

Gazi Üniversitesi /Yapı Eğitimi

Gazi Üniversitesi/ Yapı Eğitimi

Mimar Sinan İnşaat Teknik Lisesi

### Mezuniyet tarihi

-

1998

1988

### İş Deneyimi

Yıl

1998-

Yer

MEB

Görev

Sınıf Öğretmeni

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Masa tenisi, tiyatro