



ATIK MERMER TOZUNUN ZEMİNLERİN SERBEST BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mürsel USTA

Danışman

Yrd.Doç.Dr. İsmail ZORLUER

YAPI EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

Eylül 2004

T.C.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK MERMER TOZUNUN ZEMİNLERİN  
SERBEST BASINÇ DAYANIMINA  
ETKİSİ

Mürsel USTA

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı  
Danışman  
Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER

AFYON

2004

Mürsel USTA 'nın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı '**Atık Mermer Tozunun Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi**' başlıklı bu çalışma, lisans üstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

05/10/2004

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin AKBULUT

(Başkan)

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER  
(Danışman)

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YILDIZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .....  
.....Gün ve.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.  
Enstitü Müdürü

## ATIK MERMER TOZUNUN ZEMİNLERİN SERBEST BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

### ÖZET

Mermer tozu en küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Büyük çoğunluğu 300 mikronun altında olan mermer tanecikleridir. Oluşan toz miktarı Afyon ve İsehisar bölgesi için yaklaşık 125.000 ton / yıl gibi bir rakama ulaşmaktadır. Bu miktarın çoğu atık olarak kalmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu atıkların kullanımı çevre kirliliğinin azalmasına katkıda bulunacaktır.

Bu çalışmada atık mermer tozu, stabilizasyon katkı maddesi olarak kullanıldı. Mermer tozu, zeminin kuru ağırlığına göre belirli yüzde oranlarında ilave edilmiştir. Benzer çalışmalarda dikkate alınarak karışım oranları %3-5-8 ve 10 olarak seçildi. Kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri için deney numuneleri hazırlandı.

Bu çalışma sonunda; kompaksiyon karakteristiklerine baktığımızda maksimum kuru yoğunluk katkı miktarının artışına paralel olarak artmaktadır. Mermer tozu katkı miktarındaki artışın eksenel gerilme değerlerinde artış sağladığı yapılan serbest basınç deneylerinden gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** : Stabilizasyon, Kompaksiyon, Mermer Tozu, Serbest Basınç Dayanımı

## **EFFECT OF THE WASTE MARBLE DUST ON UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF SOİLS**

### **ABSTRACT**

Marble dust is the most small marble waste. All of the them are marble granule having 300 micron size. Marble dust form about 125.000 ton/year in Afyon and İscehisar. Most of the dust waste and cause enviromental pollitian. Using of the waste contributes to decrease of the enviromental pollutian.

In this study, waste marble dust was used as stabilization additive material. The marble dust was added according to dry weight of the soil in spesific percent ratios. These mixture ratios were selected as 3-5-8 and 10% considering other studies. Test samples were prepared for compaction and unconfined compressive experiments.

In the result of the study,if the compaction characteristics are considered maximum dry weight increases when amount of the additive increases. It is observed from the unconfined compressive strength, axial stres values increase when amount of the marble dust increases.

**Keywords:** Stabilization, Compaction, Marble Dust, Unconfined Compressive Strength

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	4
3. ZEMİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ .....	11
3.1 Dane Boyutu ve Dağılımı.....	11
3.2 Kıvam Limitleri .....	14
3.3 Sıkışma ve Oturma Özellikleri .....	16
4. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ .....	19
4.1 Yüzeysel Stabilizasyon.....	21
4.1.1 Katkısız Stabilizasyon.....	21
4.1.1.1 Drenaj .....	21
4.1.1.2 Kompaksiyon .....	22



4.1.2 Katkılı Stabilizasyon .....	33
4.1.2.1 Çimento Katkılı Stabilizasyon .....	34
4.1.2.2 Kireç Katkılı Stabilizasyon .....	37
4.1.2.3 Bitüm Katkılı Stabilizasyon .....	39
4.1.2.4 Diğer Katkı Maddeleri ile Stabilizasyon .....	40
4.1.2.5 Katkılı Stabilizasyonun Arazide Uygulama Şekli .....	43
4.2 Derin Stabilizasyon.....	46
4.2.1 Kohezyonsuz Zeminler .....	46
4.2.1.1 Derin Kompaksiyon .....	46
4.2.1.2 Vibroflotasyon .....	48
4.2.1.3 Patlayıcılar .....	51
4.2.1.4 Enjeksiyon.....	54
4.2.1.5 Kompaksiyon Kazıkları.....	60
4.2.2 Kohezyonlu Zeminler.....	60
4.2.2.1 Ön Yükleme Deneyi .....	60
4.2.2.2 Kum Drenleri Yöntemi .....	62
4.2.2.3 Elektro-Osmoz .....	63
4.2.2.4 Isıl İşlemler.....	64
4.3 Şişebilen Zeminlerin Stabilizasyonu.....	65
4.3.1 Ön Islatma Yöntemi.....	66
4.3.2 Zemin Değişirme Yöntemi.....	67
4.3.3 Kompaksiyon Sıkışma Kontrolü .....	68
4.3.4 Kireç Stabilizasyonu.....	68
4.3.5 Çimento Stabilizasyonu.....	69
5. MATERYAL VE METOT .....	70

5.1 Materyal.....	70
5.2 Metot .....	70
5.2.1 Su Muhtevasının Belirlenmesi.....	70
5.2.2 Özgül Ağırlık Deneyi .....	71
5.2.3 Kıvam Limitleri.....	72
5.2.4 Dane Dağılımının Belirlenmesi .....	75
5.2.4.1 Elek Analizi.....	75
5.2.4.2 Hidrometre Deneyi.....	77
5.2.5 Kompaksiyon Karakteristikleri .....	78
5.2.5.1 Standart Proctor Deneyi.....	78
5.2.5.2 Modifiye Proctor Deneyi .....	80
5.2.6 Serbest Basınç Deneyi .....	80
6. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	85
6.1 Katkı Malzemesinin Özellikleri .....	85
6.2 Numune Özellikleri .....	87
6.3 Kompaksiyon Özellikleri.....	90
6.4 Serbest Basınç Deneyi .....	92
6.4.1 Numune Hazırlama .....	93
6.4.2 Serbest Basınç Deney Sonuçları .....	94
7. TARTIŞMA ve SONUÇLAR .....	96
KAYNAKLAR .....	98

TEŞEKKÜR

## ÖZGEÇMİŞ

## EKLER

Ek- 1: Numunelerin Değişik Yüzdelerde 1-7-28 Günlük Eksenel Şekil	
Değişirme – Eksenel Gerilmelerine Ait Grafikler .....	100
Ek- 2: Numunelere Ait 1-7-28 Günlük Değişik Katkılarıdaki Eksenel Şekil	
Değişirme – Eksenel Gerilme Grafikleri .....	106
Ek- 3: Numunelerin Deney Öncesi ve Sonrası Fotoğrafları.....	116

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Şekil

### Sayfa

3.1	Kıvam Limitleri ve Reolijik Anlamı .....	14
4.1	Zeminlerde Kuru Birim Ağırlık ve Su İçeriği İlişkisi .....	23
4.2	Su Muhtevası / Kuru Birim Hacim Ağırlık Bağıntısı.....	25
4.3	Sıkıştırmanın birim hacim ağırlığı etkilenmesi.....	27
4.4	Vibrasyon Etkisi.....	31
4.5	Zemin-Çimento İnşaatına Ait Granülometri .....	36
4.6	Dinamik Kompaksiyon .....	47
4.7	Vibroflotasyon .....	49
4.8	Vibro – Flotasyon .....	50
4.9	Vibro – Compozer Yöntemi.....	51
4.10	Vibroflotasyon ile Gevşek Granüler Zeminlerin Kompaksiyonu .....	51
4.11	Oturma ile Patlayıcı Miktarı Arasındaki İlişkisi.....	52
4.12	Alman Tekniği ile Patlama metodu .....	53
4.13	Enjeksiyon Tipleri .....	58
4.14	Jet Enjeksiyon Uygulamaları .....	59
4.15	Kompaksiyon Kazıkları .....	60
4.16	Ön yükleme yöntemi.....	61
4.17	Ön yüklemede, oturma-yük-zaman ilişkisi.....	61

4.18	Kum drenleri yöntemi .....	62
4.19	Kum drenleri yönteminde oturma-zaman-yük ilişkisi .....	63
4.20	Elektro-osmoz yöntemi.....	63
5.1	Killerin Kuruma Sırasında Hacim Değiştirmesi.....	72
5.2	Likit Limit Cihazı .....	74
5.3	Casagrande Plastisite Grafiği .....	75
5.4	Kompaksiyon Deneyi İçin Kalıp .....	79
5.5	Eksenel Şekil Değiştirme-Eksenel Gerilme Grafiği .....	81
5.6	Numune Üzerindeki Boy Değişiminin Gösterilmesi.....	82
5.7	$\sigma_3 = 0$ Olduğu Durumda Eksenel Gerilme – Kayma Mukavemeti.....	83
5.8	Eksenel Gerilme – Kayma Mukavemetinin Gösterilmesi .....	83
6.1	Numunelerin Plastisite Kartındaki Yeri .....	88
6.2	Numunelere Ait Granölometri Eğrisi.....	89
6.3	A,B,M Numunelerinin Standart Enerji Seviyelerine Ait Kompaksiyon Eğrileri.....	91
6.4	T,U Numunelerinin Standart Enerji Seviyelerine Ait Kompaksiyon Eğrileri.....	92
7.1	Su Muhtevasının Mermer Tozu Katkısına Göre Değişimi .....	95

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Çizelge

### Sayfa

3.1	Zemin Danelerinin Boyutlarına Göre Sınıflandırılması.....	11
3.2	Zeminlerin Dane Çapı Dağılımını Belirlemek İçin Kullanılan Standart Eleklerin Başlıcaları.....	13
4.1	Çimento Stabilizasyonunun Sıkıştırılmış Zemine Etkisi.....	37
4.2	Kum Tabakasının Sıkıştırılması İçin Sonda .....	50
4.3	Şişen Zemin Özellikleri ve Yapılan Çalışmalar .....	65
5.1	Çeşitli Standartlara Göre Kompaksiyon Deneyleri.....	78
6.1	Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri.....	85
6.2	Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Mermer Tozunun Özellikleri .....	86
6.3	Tesis Atık Sularındaki Parçacıkların Boyut Dağılım Tablosu.....	86
6.4	Tanımlama Deney Sonuçları .....	87
6.5	Numunelerin Kompaksiyon Karakteristikleri.....	90

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Kesit Alanı
c	Kohezyon
e	Boşluk oranı
$G_s$	Özgül Ağırlık
$I_L$	Liklitlik İndisi
$I_p - PI$	Plastisite İndisi
$L_0$	Ortalama Boy
$q_u$	Serbest Basınç Direnci
$S_u$	Direnajsız Kayma Mukavemeti
$W_L - LL$	Likit Limit
$W_p - PL$	Plastik Limit
$W_r$	Rötre Limiti
$\Delta L$	Numunedeki Boy Değişimi
$\epsilon$	Eksenel Şekil Değiştirme
$\phi$	Kayma Mukavemeti Açısı
$\gamma_k - \gamma_d$	Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\gamma_n$	Doğal Birim Hacim Ağırlık
$\sigma$	Eksenel Gerilme
$\tau$	Kayma Gerilmesi
$\omega_n$	Doğal Su Muhtevası

$\omega_{opt}$

Optimum Su Muhtevası

Kısaltmalar

Açıklama

AASHTO

Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemi

PFA

Uçucu Fırın Külü

YASS

Yer Altı Su Seviyesi

SHBY

Doygunluk Eğrisi

## 1. GİRİŞ

Zemin ıslahı terimi (iyileştirme, stabilizasyon, vb.), zeminin kayma direncini, dayanıklılığını artıran; geçirimsizlik ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan her türlü işlem için kullanılır.

Tarihsel gelişim bir yana bırakılacak olursa zemin ıslahı gerçek anlamda yirminci yüzyılın bir mühendislik olayıdır. Özellikle son yıllarda bu konuda yoğun çalışmalar yapılmış ve başarılı uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Zemin ıslah çalışmalarını kaçınılmaz kılan nedenleri; hızlı kentleşmeden dolayı uygun yerleşim alanlarının hızla azalması, yetersiz temel ortamının kullanılma zorunluluğu, komşu yapıların güvenliğini koruma ve yapıların giderek artan boyutlarının getirdiği büyük gerilme limitleri olarak sıralamak mümkündür. Bu nedenle, yerleşim alanlarının tamamı veya yapıların temel sistemlerinin alt kısımlarının iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır (Karakayalı 2002).

Uygun olmayan zeminler üzerine yapılan yapılaşma beraberinde birçok mühendislik problemini de gündeme getirmiştir. Sorunların çözülmesi için



konu ile ilgili yeni yöntem ve teknikler geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizde de artık bu yöntemler sık ve yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır.

Her zaman için mühendislik yapılarını zemin içinde ya da zemin üstünde yapma zorunluluğumuz vardır. İnşaa edilecek olan bu yapılardan oluşan ve zemine aktarılan gerilmeleri, zeminin, zararlı deformasyonlar oluşturmadan güvenle taşınması istenir. Fakat yapı temel zeminleri her zaman istenilen bu özellikleri sağlamayabilir. Bu gibi durumlarda aşağıdaki önlemler alınarak iyileştirme yapılması gerekebilir (Kaya 2001).

Zeminlerin uygun olmaması halinde yol veya geoteknik mühendisi aşağıdaki alternatiflerden birine karar vermek durumundadır.

1. Uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etmek
2. Uygun olmayan zemini atıp yerine uygun bir zemin koymak
3. Uygun olmayan zemini ıslah etmek

Birinci alternatif zeminin zayıf özellikleri göz önüne alınarak üzerine gelecek yapının buna göre dizayn edilmesidir. Ancak bu durumda yapının aşırı büyük boyutlarda dizayn edilmesi gerektiğinden ötürü ekonomik olmayacağı gibi uzun dönemde zeminin olumsuz etkileriyle ilave bakım ve onarım gerektirebilecektir. İkinci alternatif uygun olmayan zeminin kazılması ve kazılan zeminin uygun bir depo yerine taşınması, yerine konacak uygun zemin için bir malzeme ocağının bulunması, malzeme ocağında harfiyat yapılması, uygun olmayan zeminin olduğu yere taşınması ve sıkıştırılması hem çok külfetli hem çok zaman alıcı olduğu için çok büyük bir maliyet getirebilir. Sonuncu alternatif ise değişik stabilizasyon teknikleri ile zeminin ıslah edilerek kullanılmasıdır (Tunç 2002).

Geniş anlamı ile stabilizasyon terimi zemin koşullarını değiştirerek mühendislik davranışını istenen seviyeye getirmek şeklinde tanımlanabilir. Stabil bir zemin

- 1- Dayanıklı, ayrıışmayan, yüklenmesi ile küçük deformasyonlar yapan,
- 2- Hava şartlarının değişmesi ile yukarıdaki özelliklerini koruyan olarak tanımlanabilir (Kumbasar ve Kip 1988).

Temel zemini olarak uygun özelliklere sahip olmayan zemin türlerinin çeşitli özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

- Turbalık ve bataklık zeminler
- Yumuşak killer
- Gevşek kumlar
- Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyonlar

Turbalık ve bataklık zeminler ihtiva ettikleri bitkisel maddelerin çürümesi ile büyük şekil değişimi yapabilecek özelliklerdedir. Ayrıca bu tip zeminlerin taşıma güçleri de yok denecek kadar azdır. Bu özellikleri ile karşılaşılması hiç istenmeyen bir zemin grubudur. Zorunluluk halinde temel zemini olarak kullanılacak ise mutlaka iyileştirilmesi gerekmektedir.

Yumuşak killer de taşıma gücü çok düşük olan ve küçük büyüklükte yükler altında bile büyük deformasyonlar yapabilecek yapıda bir zemin grubudur. İyileştirme yöntemleri ile temel zemini olarak kullanılabilir hale getirilmesi zorunludur (Kaya 2001).

Gevşek kumlar ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyon zeminler ise orta büyüklükte yükler taşıyabilir ve bu yük altındaki deformasyonlar değerleri de sınırlı kalabilir. Bu tip zeminlerde tekrarlı yükler ( deprem, titreşimli

ağır makinelerin çalışması, trafik yükü, geçici patlamalar, dalgalar v.b. ) etkisi altında mukavemet kaybına bağlı olarak taşıma gücünde azalma ve aşırı deformasyon beklenebilir. Özellikle yer altı su seviyesi altındaki gevşek kumlarda tekrarlı yükler sonucunda sıvılaşma davranışı gözlenir. Bu davranış biçiminde mukavemet değeri sıfıra düşer ve şekil değiştirmeler aşırı derecede artarak toptan göçmeler meydana gelir (Kaya 2001).

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzün gelişen ekonomik ve sosyal koşullarında yerleşime ve sanayi tesislerinin yapımına uygun alanların hızla azalması zorunlu olarak inşaat yapımına uygun olmayan zayıf zemin özelliği gösteren alanların imara açılmasını gündeme getirmiştir. Bu zeminler üzerine yapılan yapı temellerinde karşılaşılan düşük taşıma gücü ve yüksek deformasyon sorunları zemin iyileştirme konusunda geliştirilen yeni yöntem ve tekniklerin uygulanmasını gerekli bir duruma getirmiştir (Kaya 2001).

Bir yapı yapılacağı yerdeki zemin özellikleri, yapılacak yapı için uygun özellik taşıyorsa, çeşitli tekniklerle zemin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir. Bu iyileştirme işlemi stabilizasyon olarak adlandırılır. Stabilizasyonun amacı işin özelliğine göre taşıma gücünü artırmak, beklenen oturma ve deformasyonları azaltmak, hidrolik geçirimsizliği azaltmak, zemin sıvılaşma potansiyelini azaltmak, killerin şişme potansiyelini azaltmak vb. özellikler olarak ifade edilebilir. Stabilizasyon, makineler ile sıkıştırma yapmak suretiyle veya çeşitli katkı maddeleri katmak suretiyle zemin özelliklerine göre de değişen çeşitli yöntemler kullanılarak uygulanır.

Mermer toz atıklarının değerlendirilmesi konusunda yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bugüne kadar mermer tozunun zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği konusu çok detaylı olarak ele alınmamıştır. Yapılan araştırmalar sonucu stabilizasyon konusunda ulaşılabilen kaynaklara göre konuyla ilgili yapılan çalışmalar ve kapsamı aşağıda belirtilmiştir.

Kavala (1992), killerin genel yapısı ve özellikleri ile killerin stabilizasyonu üzerinde araştırma yapmıştır. Stabilizasyon metotlarını ortaya koymuştur. Killerin çimento ve kireç ile stabilizasyon işlemlerini ve sonuçlarını açıklamıştır.

Edi (1993), çalışmasında temellerin sınıflandırılması ve temellerin sağlanması gerekli koşullar üzerinde durmuştur. Ayrıca zeminlerin ön yükleme ile ıslah işlemini ayrıntılı olarak çalışmasında açıklamıştır.

Demirdağ (1994), İstanbul Çatalca yöresine ait bir araziden alınan numuneler üzerinde deneysel çalışmaları yapmıştır. Öncelikle farklı başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numunelerin konsolidasyon deney sisteminde şişme basınçlarını ölçme işlemi yapmıştır. Ardından aynı başlangıç koşullarında belirli oranlarda kireç katılmış numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney verilerini inceleyerek varılan deney sonuçlarını belirtmiştir.

İnceer (1994), yapmış olduğu çalışmada temellerin sınıflandırılmasını yapmış, temellerin sağlanması gereken koşulları ortaya koymuştur. Ayrıca derin zeminlerin ıslahı konusunu ayrıntılı olarak ele almıştır. Tezinin son bölümünde ise kum drenleriyle zemin ıslahı konusunu detaylarıyla ortaya koymuştur.

Acar ve Yıldız (1996), yaptıkları çalışmada şişme özelliği gösteren kil zeminlerin mineralojik yapısı ve su muhtevasının azaltılması ile ilgili iyileştirme metotlarını araştırmışlardır. Çalışmada killi zeminlere ait mineralojik yapı ayrıntılı bir şekilde ele alınarak davranışı nasıl etkilediği anlatılmıştır.

Çelik (1996), tarafından yapılan çalışmada mermerlerin özellikleri, kullanıldığı yerler Afyon bölgesinde oluşan mermer artıklarının miktarları ve bu artıkların değerlendirme alanları üzerinde durulmuştur.

Sözen (1996), çalışmasında İstanbul Haliç bölgesindeki taban çamurunun özellikleri incelenmek amacıyla bu bölgeden alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde deneyler yapmıştır. Haliç çamurunun ne yapılacağına dair öneriler getirmiştir. Buradaki atığın fiziksel ve kimyasal yapısını ortaya koymuştur. Atığın türüne ve iyileştirme derecesine bağlı olarak çeşitli katkıları kullanmıştır. Ortaya çıkan sonuç; puzzolanla katılaştırma ekonomik yönden avantajlıdır. Ancak katılaştırılan atık hacmi bazı durumlarda iki katına kadar çıkabilmektedir. Polimer maddelerin kullanımı ekonomik olmamakla beraber hacim artışı oldukça azdır. Ekonomiyi belirleyen faktörler, atığın fiziksel ve kimyasal yapısı, ulaşım olarak değerlendirilir.

Demirhan (1998), çalışmasında kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin özellikleri, zeminlerin sınıflandırılması ve stabilizasyon teknikleri üzerinde ayrıntılı olarak inceleme yapmıştır. Yapmış olduğu bu çalışmada katkı maddeleri ile stabilizasyon tekniği uygulayarak, atık kuma %5,5-6-7-7,5-8 ve 10 oranında çimento katılarak serbest basma dayanımları ölçülmüş ve bu kumun alt temel malzemesi olarak kullanıma elverişliliği araştırılmıştır. Çalışmasında çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde ve kullanılan kumun kimyasal özellikleri ile mineralojik özellikleri üzerinde ayrıntılı olarak durmuştur.

Göksan (1998), tarafından yapılan çalışmada zeminlerin şişme davranışı, şişme potansiyeli ve şişme basıncı ifade edilmiştir. Bu amaçla plastisite indisleri  $I_p=21-67$  arasında değişen zemin numuneleri üzerinde sınıflandırma deneyleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Daha sonra kompaksiyon yöntemiyle

hazırlanan zemin numuneleri üzerinde odometre deneyi sisteminde emme kapasitesi deneyleri ve sabit hacimli şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler iki grupta düzenlenmiştir. Birinci grupta numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları sabit tutulmuş ve başlangıç su muhtevaları değiştirilmiştir. İkinci grupta ise başlangıç su muhtevaları sabit tutulup kuru birim hacim ağırlıkları değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar yardımıyla değerlendirilmiştir.

Okagbue ve Onyeobi (1999), yaptıkları çalışmada kırmızı tropikal zemine bir stabilize katkı maddesi olarak mermer tozunun potansiyelini incelemişlerdir. Doğal haldeki üç farklı kırmızı tropikal zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenmesinde mermer tozunun değişik oranlarda karıştırılması ile değerlendirme yapmışlardır. Numuneler üzerinde boyut dağılımı, özgül ağırlık, Atterberg limitleri, standart kompaksiyon karakteristikleri, basınç dayanımı ve CBR deneyleri yapılmıştır. Numunelerin 28 gün normal kür sonucunda ve aynı zamanda 40-60-80 °C sıcaklıklardaki 24 saatlik hızlandırılmış kür sonrası değerlendirmeleri yapılmıştır. Sonuçlara göre uygun miktarda mermer tozu ilave edilmesiyle plastisitenin %20 –30 azaltıldığı, dayanım ve CBR oranlarının sırasıyla %30 – 46 ve %20 – 55 oranında arttığı gözlenmiştir. 60 °C 'de 24 saat sonunda hızlandırılmış kür sonunda daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Kırmızı tropikal zeminin geoteknik parametreleri üzerinde yüksek dayanım artışları elde edilmesine rağmen yoğun trafiğe maruz bölgelerde esnek kaplama yapımında ana malzeme olarak kullanılması zemin iyileştirilmesi açısından yeterli olmadığını ama hafif trafik yüküne maruz yollarda kullanılabileceği bunun yanında yoğun trafiğe maruz yollarda alt temel malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Ünal (1999), çalışmasında zeminlerin üzerinde kompaksiyon yoluyla mekanik iyileşme yapılarak problemin hafifletilmesi veya kontrol altına alınması yolunda yeni bilgiler elde etmeyi amaçlamıştır. Yüksek plastisiteli siltli killerin üç ayrı sıklık değerinde şişme potansiyellerini araştırmıştır. Sonuç olarak; sıklık oranı arttıkça şişme yüzdesi artmaktadır. Yani sıklık oranı – şişme yüzdesi ilişkisi doğrusal olarak tanımlanmıştır. Yüksek plastisiteli kil zeminlerde temel zeminin %90 sıklıkta hazırlanmasının uygun olacağı görülmüştür. Aynı zamanda kompaksiyon kontrolünün Standart Proctor yöntemiyle yapılmasının daha uygun olacağı ortaya konmuştur.

Ceylan (2000), tarafından yapılan çalışmada dünyada mermer ve mermer üretimi, Türkiye mermerciliği, mermer atıklarının oluşumu mermer işletmecilerinin çevresel açıdan karşılaştıkları sorunlar, mermer fabrika atık sularının arıtılması ve mermer toz atıklarının elde edilmesi, temizlenmesi, mermer atıklarının kullanıldığı sektörleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Bu yapılan çalışmada Isparta, Afyon ve Aydın illeri çalışma bölgesi olarak seçilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında mermer toz atıklarının derz dolgu malzemesi olarak kullanılabilir olup olmama noktası araştırılmıştır. Mermer tozlarının derz dolgu malzemesi üretiminde kullanılabilmesi için mümkün olduğunca beyaz mermer işleyen fabrikalardan numuneler alınmıştır. Deneysel çalışmalar mermer toz atıklarının kalsitin yerine kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla yapılmıştır.

Miller ve Azad (2000), yaptıkları çalışmada çimento fırın tozlarının zemin stabilizasyonuna etkisini bir laboratuvar çalışması olarak ele almışlardır. Çalışmada çimento fırın tozu ilave edilmesiyle serbest basınç dayanımında artışlar gözlenmiştir. Serbest basınç dayanımındaki bu artışlar zeminin plastisite indisine göre ters orantılıdır. Plastisite indisindeki önemli azalmalar, özellikle yüksek plastisiteli zeminler için çimento fırın tozlarının kullanılması ile elde edilmiştir. Çimento fırın tozu ilavesi sıkıştırmadan sonraki 7-14 gün arasındaki



serbest basınç dayanımını hızlı bir şekilde artırır, daha sonra yavaşlama görülür. Benzer çimento fırın tozu muhtevasında artış oranı düşük PI 'lı zeminler için daha büyüktür. Zemin – çimento fırın tozu karışımına karşılık pH, zeminin plastisite indisinde azalma ve serbest basınç dayanımında artış sağlar.

Karpuzcu (2001), çalışmasında zeminlerin iyileştirilmesi için geotekstilin kullanımı ve geotekstilin zemin mühendislik özelliklerine etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmasında üç farklı tip zemin kullanmıştır. Zeminler üzerinde kompaksiyon, serbest basınç, konsolidasyon, permeabilite deneyleri yapmıştır. Böylece geotekstil kullanımının zemin mukavemetine etkisini açıklamıştır. Deneylerde donatı olarak örgülü ve örgüsüz geotekstil kullanılmıştır. Permeabilite deneylerinde tabaka sayısı arttıkça permeabilite katsayısı geotekstil tipine bağlı olarak düşmektedir. Serbest basınç deneylerinde geotekstil zeminin mukavemetini olumlu yönde etkilemiştir.

Kaya (2001), tarafından yapılan çalışmada çalışmada zemin mühendislik özellikleri ve zemin stabilizasyon özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca uygulamaya yönelik olarak uygun olmayan zeminler üzerinde yapılaşan Kayseri serbest bölgesinde yapılan çalışmalar ile mevcut temel sisteminin iyileştirmesine örnek olarak Sivas Vali Bekir Aksoy İlköğretim Okulu temel zemin iyileştirme projesi yapımı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Sonuç olarak zemin iyileştirme yöntemlerinde hangi kararın daha uygun olma noktası ortaya çıkarılmıştır.

Türköz (2001), tarafından yapılan çalışmada Eskişehir meşelik killerin şişme potansiyelinin belirlenmesi ve bu zemine kuru ağırlığın yüzdesi olarak ilave edilen sönmüş kireç katkısının zeminin şişme potansiyeline etkisi çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada şişen zemin özellikleri açıklanmış, zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılması yapılmış, kireç katkısının etkisi belirtilmiştir. Özellikleri TS 30 ve

32 'ye göre tanımlanmış sönmüş kireç katkısının belirli yüzdelerde zemine ilavesiyle serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

Karakayalı (2002), hazırladığı çalışmada zemin ıslah yöntemlerini ayrıntılı olarak ele almış ve bu yöntemleri açıklamıştır. Ayrıca zeminler için arazide ve laboratuarda yapılan deneysel çalışmaları ortaya koymuştur. Çalışmasında Adana çevresinde yapılan uygulamalara da değinmiştir.

Temel (2001), yapmış olduğu çalışmada zemin stabilizasyon yöntemlerini ayrıntılı olarak ele almıştır. Deneysel çalışma yapmadan sadece zeminlerde uygulanan stabilizasyon yöntemlerini açıklamıştır.

Usta ve Çelikaslan (2002), tarafından yapılan çalışmada Eskişehir meşelik killerin mermer tozuyla iyileştirilmesi üzerinde durmuşlardır. Yapılan bu çalışmada zemin stabilizasyon yöntemleri, şişen zemin özellikleri ve belli oranlarda mermer tozu katılarak zeminlerin şişme potansiyeline etkisi ortaya konmuştur. Sonuç olarak %1 - 3 ve 5 mermer tozu katkılı numunelerde şişme yüzdelerinde azalma gözlenmiştir. %5 'ten daha fazla katkılarda şişme miktarlarında yeniden artış olmuştur.

Prabakar, Dendorkar ve Morchhale (2003), tarafından yapılan bir çalışmada bir zemin stabilizasyon katkı maddesi olarak uçucu külün kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi ve temelin daha fazla yük taşıma kapasitesini sağlamak için zemin mühendislik özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada zemin karakteristikleri, kompaksiyon davranışları, oturma, CBR oranı, kesme dayanımı (c ve  $\phi$ ) parametreleri ve şişme karakteristikleri ele alınmıştır. Zemine farklı oranlarda (%9, 20, 28.5, 33.5, 41.2 ve 46) uçucu kül ilave edilmiştir. Uçucu kül ilave

edildiğinde zeminin maksimum kuru birim ağırlığında azalma optimum su muhtevasında ise artış gözlenmiştir.

Zorluer ve Usta (2003), yaptıkları çalışmada şişen zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi konusunda Eskişehir meşelik kellerini kullanmışlar ve mermer tozu Afyon'daki bazı tesislerden elde edilmiştir. Belli oranlarda (%0- 1- 3- 5 ve 7) mermer tozu katılarak zemin üzerinde mermer tozunun şişme potansiyeline etkisi ortaya çıkarılmıştır. Yapılan bu çalışmada mermer tozu katkısının şişme potansiyelini etkilediği ve katkı miktarının etkili olduğu oranın %5 olduğu görülmüştür.

### 3. ZEMİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin, kayaların ayrışması sonucu oluşan katı daneler ile bunlar arasındaki su veya hava dolu boşluklardan meydana geldiği bilinmektedir. Bazı zeminlerin içinde ise organik maddeler gibi bazı katkı maddeleri de bulunabilmektedir. Zeminlerin endeks özelliklerini iki ayrı grup içinde düşünmek mümkün olmaktadır:

**Dane Özellikleri:** Zemini oluşturan katı danelerin boyutları, biçimleri, yoğunlukları ve mineralojik karakteristikleri gibi özellikleri.

**Kütle Özellikleri:** Zemini oluşturan katı, sıvı ve gaz (hava) kısımların birbirine göre hacim veya ağırlık oranları, zeminin dokusu, kıvamı ve iç yapısı gibi bünyesel özellikleri (Özaydın 1999).

#### 3.1 Dane Boyutu ve Dağılımı

Tabii zeminleri oluşturan katı daneler çok değişik boyutlarda olabildiği gibi- aynı zemin içinde birbirinden çok farklı boyutlarda daneler bir karışım halinde bulunabilmektedir. Zeminleri bu açıdan bir sınıflandırmaya tabi tutabilmek için, boyutları belirli büyüklükler arasında kalan daneleri tanımlayan bazı terimler kullanılmaktadır. Zemin daneleri, büyükten küçüğe doğru, çakıl, kum, silt ve kil olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Bu grupları birbirinden ayıran boyut aralıkları değişik sınıflandırma sistemlerinde bazı küçük farklılıklar göstermekle beraber, yaygın olarak kabul gören sınır değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Zemin Danelerinin Boyutlarına Göre Sınıflandırılması

Zemin Cinsi	Dane Boyutu (mm)
Çakıl (4.75- 75.0)	2.00 (veya 4.75- 75.0)
Kum (veya 4.75)	0.075-2.00
Silt (veya 0.005) - 0.0075	0.002
Kil	< 0.002

Yukarıdaki ilk iki grubu oluşturan zeminler(çakıllar ve kumlar) iri daneli zeminler, siltler ve killer ise ince daneli zeminler olarak nitelendirilmektedir. İri daneli zeminler dane boyutuna göre, kaba, orta ve ince kum olarak alt gruplara ayrılmaktadır (Özaydın 1999).

Çakıllar ve kumlar, kaya kütlelerinin ayrışması, aşınması sonucu yerinde veya çeşitli yollarla taşınarak belirli bölgelerde toplanmaları sonucu oluşur. Şekilleri çok köşeliden yuvarlağa kadar değişir. Doğada magmatik, tortul ve metamorfik kütle çakıllarına akarsu yatakları, sahil ve yamaçlarda rastlanır. Kumlar ise oluşum yerlerine göre nehirler, denizler ve çöllerde bulunur. Bileşimlerindeki baskın minerale göre kuvars kumu, granit kumu v.b. isimler alır.

Silt, ince kum ve kil arasında kalan ara bir zemin cinsidir. Geniş anlamda akarsularda taşınan, liman ve körfez diplerinde toplanan ince çamurumsu tortulardır. Siltler organik veya inorganik yapıda olabilir. İnorganik silt plastisitesi olmayan veya çok az olan ince daneli bir zemindir. Düşük plastisiteli olanları eşit boyutta kuvars tanecikleri ihtiva ederler. Organik silt, az veya çok plastisiteye sahip zemindir (Kaya 2001).

Kil, dane boyutu iki mikrondan küçük olan yassı mikroskobik kil minerali parçalarına verilen isimdir. Feldispatlı kütlelerin belirli koşullar altında ayrışması ( kaolinizasyon ) sonucu oluşur. Kil mineralinin birleşimi sulu alüminyum silikattır. Doğada montmorillonit, illit, kaolinit en çok rastlanan kil grubudur. Bu grupların yüzeysel aktiviteleri farklıdır. Kaolinitler aktif olmayan killer, illitler normal killer ve montmorillonitler ise en aktif olan killerdir. Kuru iken sert ve dayanıklı olan killer bünyelerine su aldıkça plastisitetleri artar (Kaya 2001).

Çizelge 3.2 Zeminlerin Dane Çapı Dağılımını Belirlemek İçin Kullanılan Standart Eleklerin Başlıcaları

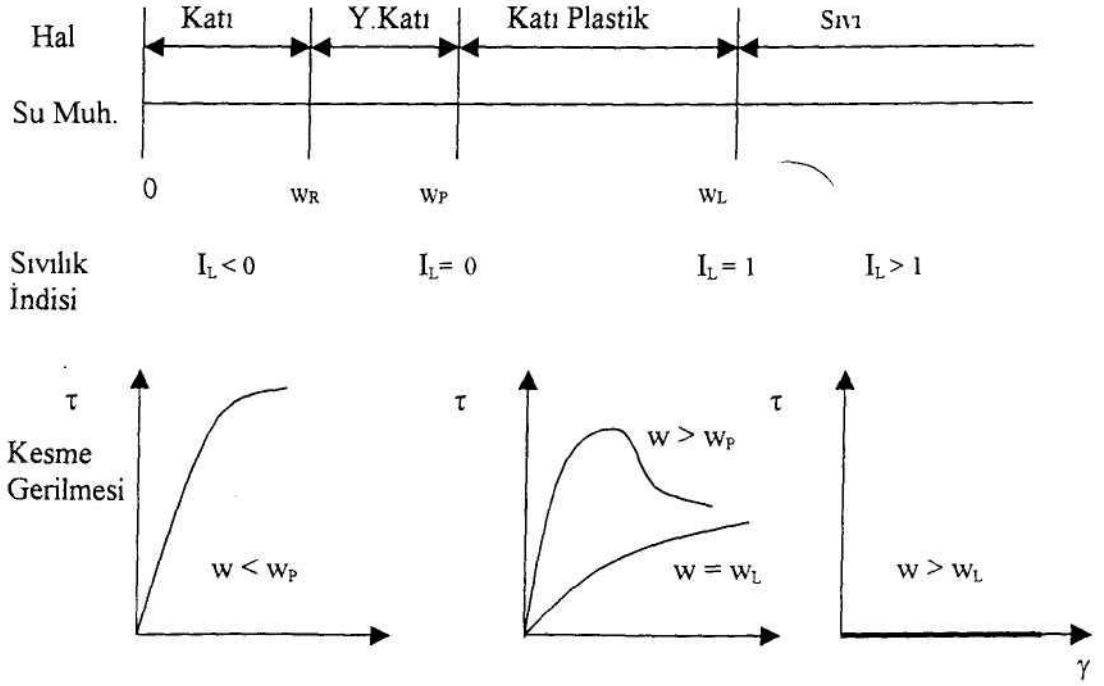
Elek No	Elek Açıklığı (mm)
4	4.75
10	2.00
20	0.85
40	0.425
60	0.25
100	0.15
200	0.075

Dane çapı dağılımı zeminlerin (özellikle iri daneli zeminlerin) birçok, mühendislik özelliğini etkilemektedir. Bunlar arasında başlıcaları aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Zeminin Su Geçirgenliği: Temiz iri daneli zeminler ince daneli zeminlerden çok daha yüksek su geçirgenliğine sahip olmaktadır.
- 2- Zeminin Mukavemeti: İyi derecelenmiş zeminler daha yüksek mukavemet ve taşıma gücüne sahip olmaktadır.
- 3- Zeminin Sıkışabilirliği: iyi derecelenmiş zeminler, uygulanan yükler altında, kötü derecelenmiş veya üniform zeminlerden daha az sıkışma göstermektedir.
- 4- Zemin içinde kapiler su yükselmesi dane çapı dağılımından doğrudan etkilenmektedir.
- 5- Zeminlerin dondan etkilenme oranı dane çapı dağılımına bağımlı olmaktadır.
- 6- Zeminin su geçirgenliğine bağlı olarak yük altında sıkışma hızı, yükleme sırasında içindeki suyun dışarı çıkabilme kolaylığı (ve buna bağlı basınç değişimleri) dane çapı dağılımından etkilenmektedir.
- 7-Yukarıda sıralanan zeminlerin mühendislik özellikleri dane çapından etkilendiği için değişik amaçlarla malzeme seçiminde dane çapı dağılımı belirleyici rol oynamaktadır.
- 8- Zeminlerin standart sistemlere göre sınıflandırılması ancak granülometri eğrilerinin saptanması ile mümkün olmaktadır (Özaydın 1999).

### **3.2 Kıvam Limitleri**

Herhangi bir su muhtevastaki zeminin fiziksel davranışına kıvam denir. Kıvam zeminin akmaya karşı göstermiş olduğu bir direnç olup zeminin zamana bağlı şekil değiştirmelerinin bir göstergesidir. Daneler arası çekme kuvvetinin bir fonksiyonu olup, farklı zeminler farklı su muhtevalarında farklı kıvam özellikleri gösterirler. Kıvam durumlarını birbirinden ayıran limitler, likit limit ( $w_l$ ), plastik limit ( $w_p$ ) ve rötire (büzölme) limiti ( $w_r$ ) duruları olarak tanımlanan su muhtevalardır. Kil - su karışımının sıvıdan plastiğe, yarı katı ve katıya dönüşmesi kıvam limitleri olarak anılan su muhtevaları ile ifade edilirler ( şekil 3.1.).



### Kayma Deformasyonu

Şekil 3.1 Kıvam Limitleri ve Reolijik Anlamı

Limitler ile ilgili deneyler örselenmiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde yapılır ve bulunan limit ve indis değerleri örselenmiş zeminlerin sadece fiziksel özelliklerinin bir göstergesidir. Gerçekte; örselenmemiş numunelerin yapısı, jeolojik kökeni ve diğer fiziksel durumları gerilme - deformasyon - zaman bağıntılarını önemli ölçüde etkiler.

Tabii su muhtevasının likit limite yakın çıkması zeminin normal konsolidasyonunu tamamlamadığını, plastik limite yakın çıkması durumunda ise zeminin kendi yükü altında konsolidasyonunu tamamladığını, oturmalarının sona erdiğini, sertleşerek



mukavemetinin artmış olduğunu gösterir. Likit limit ve plastik limit arasında derinliğe göre çizilen su muhtevası eğrisi yer yer bu limitlere yaklaşıyor ise bu tip killer genelde yumuşaktır veya sert oldukları zaman hassasiyetleri yüksektir (Kaya 2001).

Likit limit, zeminde ölçülebilen kayma mukavemetinin ilk görüldüğü andaki su muhtevası olup danelerin mineral kompozisyonuna, dane yüzeyindeki elektrik yüklerinin çokluğuna, adsorbe suyun kalınlığına, dane yüzeyinin dane hacmine oranına ve dane şekline bağlıdır.

Plastik limit, şekil değiştirmenin sona erdiği andaki su muhtevasıdır. Plastik limitteki yüksek sertlik indisi, zeminin bol miktarda kolloid kil danelerinden meydana geldiğini ve aynı zamanda, zeminde yüksek oranda montmorillonit veya diğer aktif kolloid kil danelerinin de bulunabileceğini gösterir.

Büzülme limiti, zemin içerisinde suyun buharlaşması ile herhangi bir hacim azalmasının olmadığı andaki su muhtevası olarak tanımlanır.

Plastisite indisi, zemin plastik özellik gösterdiği su muhtevası aralığıdır. Sayısal olarak likit limit değerinden plastik limit değerinin çıkarılması ile bulunur. Yüksek plastisite indisine sahip killer kurutulduğu zaman daha yüksek basınca dayanabilirler. Yüksek likit limit değerine ve yüksek plastisite indisine sahip killer kurutulduğunda fazla miktarda büzülme ve su verildiğinde ise ağır yükler altında kabarma gösteren bir davranış gösterirler (Kaya 2001).

### 3.3 Sıkışma ve Oturma Özellikleri

Değişik malzemelerin yük altında şekil değiştirmesini incelediğimizde, bu şekil değiştirmelerin bir kısmının yük kaldırdığı zaman geri geldiğini, bir kısmının ise kalıcı olduğunu görmekteyiz. Genellikle geri gelen şekil değiştirmelere elastik şekil değiştirmeler, kalıcı olanlara ise plastik şekil değiştirmeler adı verilmektedir. Elastik davranış gösteren bazı malzemelerde şekil değiştirmeler ile uygulanan yük arasında doğrusal bir ilişki gözlenirken (lineer elastik) bazılarında ise bu ilişki doğrusal olmamaktadır (nonlineer elastik). Zeminlerde meydana gelen şekil değiştirmeler genellikle uygulanan yük ile doğrusal olarak artmadığı gibi, yükün kaldırılması sonucu geri gelen şekil değiştirmeler de toplam şekil değiştirmelerin yalnızca küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Zeminlerin şekil değiştirme davranışında gözlenen bir başka özellikte bunların zemin üzerine daha önce uygulanmış gerilmelerden etkilenmesidir.

Yüklenen bir zeminin sıkışmasının aşağıdaki nedenlerden dolayı meydana geleceği düşünülebilir:

-Zemin danelerinin sıkışması

-Zemin boşluklarındaki hava veya suyun sıkışması

-Boşluklardaki hava ve suyun dışarı çıkması sonucu danelerin birbirine yaklaşması ve zeminin toplam hacminin azalması.

Zemin daneleri genellikle oldukça sert minerallerden oluştuğu için bunların sıkışması çok küçük olmaktadır. Boşlukların tamamen su ile dolu olması durumunda (suya doymuş zemin) suyun sıkışabilirliğinin çok küçük olması nedeni ile bunun zeminin sıkışmasına katkısı da ihmal edilebilecek mertebelerde kalacaktır.

Özellikle suya doygun zeminlerde, sıkışma esas olarak boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu meydana gelmektedir. Sabit bir yük altında, boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu zeminlerde meydana gelen hacimsel şekil değiştirmelere zemin mekaniğinde konsolidasyon adı verilmektedir. Zemin içinde suyun hareket edebilme özelliklerinin değişik zeminlerde birbirinden çok farklı olduğu bilinmektedir. İnce daneli zeminlerin permeabilitesi çok düşük olduğu için, yüklenen zeminden suyun dışarı çıkması yavaş olacaktır ve buna bağlı olarak zeminin sıkışması da zamana bağlı olarak gelişecektir. Dolayısıyla, zeminlerin sıkışmasının hesaplanmasında gerilme-şekil değiştirme-zaman ilişkilerinin incelenmesi gerekli olmaktadır. Bu ilişkiler deneysel olarak laboratuvarında odometre aleti kullanılarak, kuramsal olarak ise konsolidasyon teorisi ile incelenmektedir (Özaydın 1999).

Zemin tabakalarında meydana gelebilecek konsolidasyon oturmalarının belirlenmesinde aşağıdaki bilgilere ihtiyaç vardır. Zemin tabakaları ve bu tabakaların özellikleri, üst yapı yapılmadan önceki efektif gerilme dağılımı, üst yapı yapıldıktan sonra meydana gelecek olan artış , konsolidasyon katsayısı , arazideki zeminin yükleme yapılmadan önceki boşluk oranı, sıkışma indisi, sıkışan zeminin tabaka kalınlığı ve sıkışan tabakanın drenaj yoğunluğu uzunluğu bilinmelidir.

Oturma (çökme, tasman, sıkışma), yapı temellerinde düşey hareket olarak tanımlanabilir. Bilindiği gibi zemin, çeşitli büyüklükte (birkaç desimetreden birkaç mikrona kadar) ve biçimce (yuvarlak, köşeli, yassı, iğne biçimli vb.) taneler ve taneler arası boşluklardan oluşan doğal bir malzemedir. Daneler arası boşluklar tamamen hava, tamamen su veya kısmen su veya kısmen hava ile dolu olabilir.

Aktarılan yüklerden veya etkilerden dolayı taneler arası boşlukların azalması ile oluşan kısa veya uzun süreli bir hacim azalması, sıkışma olayına oturma denilir.

Genel olarak bir yapının oturması üç ana biçimde olabilir:

a) Uniform oturma : Yapının veya temelin planda her noktası aynı miktar oturuyorsa, böyle oturmaya üniform oturma denir. Birçok yapı büyük üniform oturmalara dayanabilir

b) Rijit dönme :Yapı rijit bir dönme yaparsa, böylece meydana gelen olaya denir.

c) Farklı oturma ; Oturma miktarları yapı tabanında noktadan noktaya farklı ise, böyle oturmalara farklı oturma (üniform olmayan oturma) denir.

Oturma nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

a) Zeminin yüklenmesi,

b) Daneli zeminlerde meydana gelen titreşimler,

c) Yeraltı suyunun indirilmesi,

d) Temel elemanlarının tahrip olması,

e) Bitişik kazılar nedeniyle temel altındaki zemin durumunun bozulması,

f) Yeraltı su akımlarının yal açtığı erozyon,

g) Zeminden geniş çapta su ve petrol gibi sıvıların çekilmesi,

h) Yer altındaki eski galeri, boşluk ve mağaraların çökmesi,

i) Şişen zeminlerde kabarma,

j) Killi zeminlerde çabuk büyüyen ağaçlar,

k) Zeminde meydana gelen kimyasal olaylar,

l) Zeminin ısınmasıdır (İnceer 1994).

#### 4. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Stabilizasyon yöntemleri zemin cinsine ve ne mertebede iyileştirme beklendiğine bağlıdır. Yöntemler çok iyi irdelenerek amaca uygun seçim dikkatle yapılmalıdır. Çünkü metod seçimin de iyileştirmenin yanı sıra uygulanabilirlik ve maliyet koşullarında dikkate alınarak optimum seçim önemlidir.

Zemin ıslahı yöntemlerinin başlıca amaçlarını

- 1-Zayıf bir zeminin taşıma kapasitesini arttırmak
- 2-Toplam oturmayı azaltmak ve konsolidasyonu hızlandırmak
- 3-Dolgu ve yarmaların stabilitesini arttırmak
- 4-Zemini iksa duvarı gibi çalıştırmak
- 5-İksa duvarlarını desteklemek ve yapıların yukarı kalkmasını önlemek
- 6-Zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltmak
- 7-Y.A.S.S yi düşürmek ya da geçirimsizliğini azaltmak

olarak sıralayabiliriz (Karakayalı 2002).

Yapının getirdiği gerilme, drenaj, titreşim değişiklikleri kullanılan zemin tarafından karşılanmalıdır. Zeminin özellikleri yeterli olmadığında seçilecek birkaç yol bulunmaktadır

- 1-Kötü zemini ortadan kaldırmadan temelleri sağlam tabakaya oturtmak.
- 2-Yapı temellerini zayıf zeminin taşıyabileceği özelliklerde yapmak.
- 3-Kötü malzemeyi tamamen kaldırarak yerine üstün nitelikli zemin doldurmak, ya da doğal zemini ıslah ettikten sonra tekrar yerleştirmek.

4-Zeminin özelliklerini yerinde yapılan işlemlerle iyileştirmek (Demirhan 1998).

Her stabilizasyon yöntemi ancak özel koşullarda geçerlidir. Bu koşullar şöyle özetlemek mümkündür.

1-Ortamın türü : kil, organik, tortul v.b.

2-İslah edilecek bölgenin alanı ve hacmi ( Ortamın geometrik özellikleri ve yapı türüne bağlı olarak)

3-Yapının türü ve yüklerin dağılımı.

4-Zeminin özellikleri : Kayma direnci, sıkışabilirlik, geçirimsizlik.

5-İzin verilebilir toplam ve farklı oturmalar.

6-Malzeme durumu : Taş, kum, su, katkı maddeleri.

7-Teknisyen, vasıflı işçi, özel aletlerin varlığı.

8-Çevre koşulları : Atıkların kullanımı, erozyon, su kirlenme kısıtlamaları.

9-Yerel deneyim ve birikim.

10-Ekonomik veriler (Demirhan 1998).

İyileştirme yöntemleri aşağıdaki gibi ana başlıklar altında toplanabilir:

A.Yüzeysel Stabilizasyon

1. Katkısız Stabilizasyon:

\*Drenaj

\* Kompaksiyon

2. Katkılı Stabilizasyon

\*Çimento ile

\*Kireç ile

\*Bitüm ile

\*Diğer katkı maddeleri ile

## B.Derin Stabilizasyon

### 1.Kohezyonsuz Zeminler

\*Derin kompaksiyon

\*Derin vibrasyon(vibro-flotasyon)

\*Kompaksiyon kazıkları

\*Patlayıcılar

\*Enjeksiyon

### 2.Kohezyonlu Zeminler

\*Ön yükleme yöntemi

\*Kum drenleri yöntemi

\* Elektro-osmoz yöntemi

Zeminin iyileştirilmesi ile mevcut zeminin,

1.Kayma mukavemeti artar,

2.Gerilme - deformasyon modülü artar,

3.Sıkışabilirliği azalır,

4.Şişme ve büzülme potansiyeli kontrol altına alınır,



5.Permeabilitesi azalır,

6.Çevre koşullarına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal değişimleri önlenir,

7.Sıvılaşma potansiyeli azalır (Karakayalı 2002).

#### **4.1. Yüzeysel Stabilizasyon**

##### **4.1.1 Katkısız Stabilizasyon**

Mevcut zemine herhangi bir madde katmadan yapılan iyileştirmeye katkısız stabilizasyon denir. Mevcut zeminin granülometrisi uygunsa bu yöntem uygulanabilir. Kompaksiyon ve drenaj katkısız stabilizasyon uygulamalarıdır.

###### **4.1.1.1 Drenaj**

Mühendislik işlerinde kullanılan zeminlerin su muhtevasının önemi bilinmektedir. Genellikle su muhtevasının azaltılması ile zeminin faydalı özellikleri daha fazla olarak meydana çıkarılır ve ıslah edilir. Aksine olarak su muhtevasında bir artış bilhassa Kohezyonlu zeminlerde ekseriya mukavemette ve taşıma gücünde bir azalma doğurur.

Bununla beraber daha önemli olanı, su muhtevasının mutlak değerlerinden çok onun muhtemel değişimidir.Bu değişimler mevsimlik olabilir veya anormal şartlar nedeniyle ara sıra meydana gelebilir. Bu değişimin sebebi ve büyüklüğü ne olursa olsun meydana gelmesi istenmez. Dolmalar, yarmalar ve temeller gibi toprak

yapılar belli şartta zemine göre hesaplanmış olduğundan, bu şarttaki herhangi bir değişikliğin meydana gelmesine mani olunmalı veya bu minimuma indirilmelidir.

Böylece zeminin sağlam ve stabil olarak korunması. sahadan fazla suyun uzaklaştırılması ve sahaya su girişinin önlenmesine bağlı olmaktadır. Bunu başarılabilmesi gerekli drenaj, alt yapının mümkün olduğu kadar üniform su muhtevasında tutulmasını sağlamalıdır (Usta ve Çelikaslan 2002).

#### 4.1.1.2 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 (Tunç 2002).

Uygun koşullarda yapılmış, kontrol edilmiş kompaksiyonun sağlayacağı faydalar aşağıda özetlenmiştir.

- 1.Dolgu ağırlıklarını ve dış yükleri taşımaya yeterli mukavemet sağlanır.
- 2.Yük altındaki oturma ve şekil değiştirmeler minimuma indirilir.
- 3.Aşırı şişme ve büzölmeler gözlenmez.
- 4.Mukavemet ve sıkışabilirlik özellikleri kullanım ömrü boyunca korunabilir.
- 5.Yapı fonksiyonuna uygun permeabilite ve drenaj özellikleri sağlanır.
- 6.Dona karşı olan dayanıklılık artırılır (Kaya 2001).

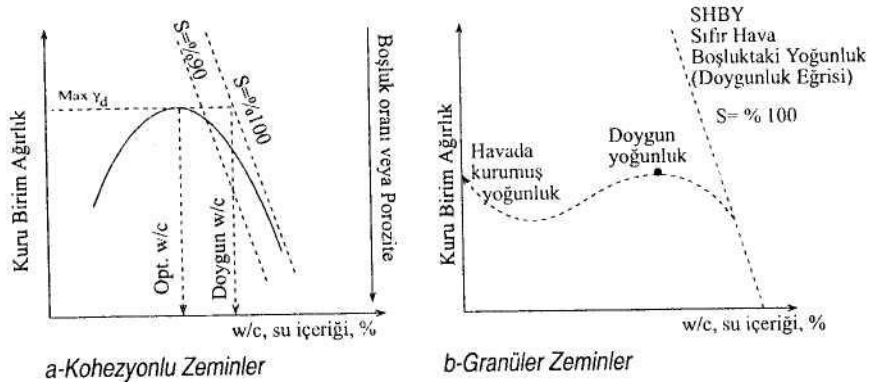
Zeminlerin kompaksiyonu ile zeminden havanın çıkması sağlanırken su içeriği önemli mertebede değişmemektedir. Çünkü sıkıştırmadan önceki zeminin su içeriği sıkışmadan sonrada pek farklı değildir. Zaten kompaksiyonun amacı minimum seviyede hava boşluğunu sağlayarak maksimum yoğunluğu elde etmektir. Bilindiği gibi zemindeki suyun çıkması ile elde edilen sıkışmaya konsolidasyon ama havanın çıkması ile elde edilen sıkışmaya yani yoğunluk artışına kompaksiyon denilir. Kompaksiyon zemin ışlah yöntemleri içerisinde en kolay, en ucuz ve özellikle en etkin olanıdır. Çünkü kompaksiyon ile yukarıda sayılan özelliklerin iyileştirilmesi mümkündür. Kompaksiyon neticesinde zemin yoğunluğu artacağından dolayı daneler arasındaki sürtünme kuvveti ve kilitleme (kenetlenme) artarak kayma mukavemeti ve taşıma gücü artacak fakat boşlukların azalmasından dolayı permabilitesi de azalacaktır. Böylece trafik yüklerinin yaratacağı deformasyonlara ve uzun dönemli oturmalara karşı zemin daha dirençli olacağından dolayı yol kaplamasının performansı da artırılmış olacaktır. Bu nedenlerden ötürü ulaşım yapılarında zeminlerin kompaksiyon ile ışlahı çok büyük bir önem taşımaktadır (Tunç 2002).

Kompaksiyona etki eden başlıca faktörler:

1.Zeminin su içeriği

2.Zeminin zellikleri ve tipi

3.Sıkıştırma enerjisi tipi, miktarı ve metodu olarak ele alınmalıdır.



Şekil 4.1 Zeminlerde Kuru Birim Ağırlık ve Su İçeriği İlişkisi

Zeminlerin kompaksiyon derecesi, belirli bir sıkıştırma enerjisi altında laboratuvarında sahip olabileceği maksimum yoğunluğunun arazide sıkıştırma sonunda elde edilen yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Kompaksiyon testi ile elde edilen maksimum kuru birim ağırlıktaki su içeriğine optimum su içeriği denilir. Eğer zemin arazide deney yoluyla bulunan optimum su içeriği ile maksimum kuru birim ağırlığına kadar sıkıştırılacak olursa stabilitesi de maksimum olacaktır (Tunç 2002).

a) Kompaksiyon eğrisi;

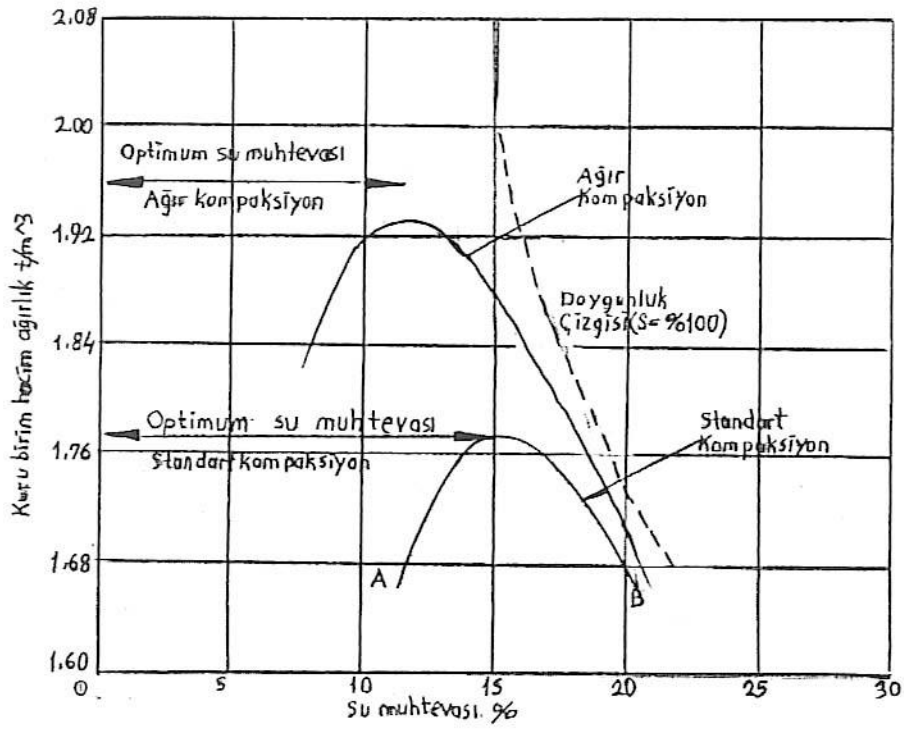
Su muhtevası / kuru birim hacim ağırlık bağıntısı

Bir zeminin kompaksiyon durumu onun kuru birim hacim ağırlığı ile ölçülür. kompaksiyon durumunun belirlenmesi iki değere gerek vardır:  $\gamma_i$  tabii birim hacim ağırlığı ve  $\omega_n$  tabii su muhtevası.

$\gamma_k$  : Kuru Birim Hacim Ağırlığı

$$\gamma_k = \gamma_n / (1 + \omega_n) \quad \text{bağıntısından elde edilir. } (\omega = e / G_s) \quad (4.1)$$

Bir zemin kompaksiyona tabi tutularak, teorik olarak boşluklarında mevcut su ve hava karışımındaki tüm hava dışarı atılırsa, zemin doymun hale gelmiştir denilir. Eğer zeminin dane birim hacim ağırlığı biliniyorsa, herhangi bir su muhtevası için doymun haldeki kuru birim hacim ağırlığı bulunabilir. Bu değer arazide elde edilmesi imkansız bir kompaksiyona karşılık geldiğinden, erişilmesi daha mümkün olan daha küçük birim hacim ağırlığı 'maksimum kompaksiyon durumu' olarak seçilir. Belirli bir kompaksiyon enerjisi , kuru birim hacim ağırlık ile su muhtevası arasındaki bağıntı en iyi, Proctor deneyi olarak bilinen Standart Kompaksiyon Deneyi ile incelenebilir. Bu deneyde belli bir zemin numunesi belli bir şekilde sıkıştırılarak birim hacim ağırlığı ile su muhtevası belirlenir. Bu işlem, farklı su muhtevalarında hazırlanmış bir zemin numunesi için tekrarlanır. Deney sonuçları, kuru birim hacim ağırlığı / su muhtevası eksen takımında çizilerek Şekil 4.2' deki tipik eğriler elde edilir (Usta ve Çelikaslan 2002).



Şekil 4.2 Su Muhtevası / Kuru Birim Hacim Ağırlık Bağıntısı

Standart Proctor Deneyinde elde edilen kompaksiyon durumu, zeminin su muhtevası ile değişir. Zemin yaş olduğu zaman, standart sayıdaki darbelerle, su tarafından işgal edilmemiş az miktardaki boşluklarının hacminin oldukça azaltılması uygundur. Bu şekilde elde edilen kuru birim ağırlığı doygun haldeki kuru birim hacim ağırlığına yaklaşabilir. Yalnız fazla miktarda su bulunduğu için

kuru birim hacim ağırlığı oldukça düşüktür (Şekil 4.2 de A Kısmı). Diğer taraftan su muhtevası düşükse teorik doygun haldeki kuru birim hacim ağırlığı yüksek olur. Bu durumda darbe altında danelerin birbirlerinin üzerinden kayarak daha sıkı hale gelmesi için gerekli yağlamayı sağlayacak yeter miktarda su mevcut olmadığından, ne büyüklükte bir kompaksiyon enerjisi uygulanırsa uygulansın, hava boşlukları fazla miktarda azaltılamaz. Bu durumda varılan nihai kuru birim hacim ağırlığı zemin yaş iken elde edilendeki gibi düşük olur (Şekil 4.2’de B kısmı).

Bu iki ekstrem arasında kalan su muhtevalarında bir optimum noktası vardır ki. bu su muhtevasında standart kompaksiyon, azami kuru birim hacim ağırlığı verir. Bu değer optimum su muhtevası olarak tanımlanır. Şekil-4.2’de kesik çizgi ile gösterilen doygunluk eğrisi.

$$\gamma_k = \gamma_n / (1 + \omega G_s) \quad \text{veya} \quad \gamma_k = G_s \gamma_w / (1 + \omega G_s)$$

denklemden yararlanılarak çizilebilir.

Pratikte kullanılan ağır modern sıkıştırma makineleri ile elde olunabilecek şartlara benzer durumları elde etmek için ‘ağır kompaksiyon’ olarak bilinen değişik bir standart geliştirilmiştir. Bu standart Amerikan Karayolları idaresinin yaptığı çalışmaların sonuçlarına dayanmaktadır. Şekil 4.2’den görüleceği gibi, sıkıştırma enerjisinin artırılması halinde daha büyük kuru birim hacim ağırlığı daha düşük optimum su muhtevasında elde edilmektedir. Bu bakımdan maksimum birim hacim ağırlığı ile optimum su muhtevası zeminin temel özellikleri değildirler. Bunlar uygulanan kompaksiyon enerjisine bağlı bulunmaktadır. Bu standartlardan birinin belli bir iş için kullanılması halinde, ‘relatif kompaksiyon’ olarak tanımlanan ve arazide elde olunan gerçek kuru birim hacim ağırlığı,

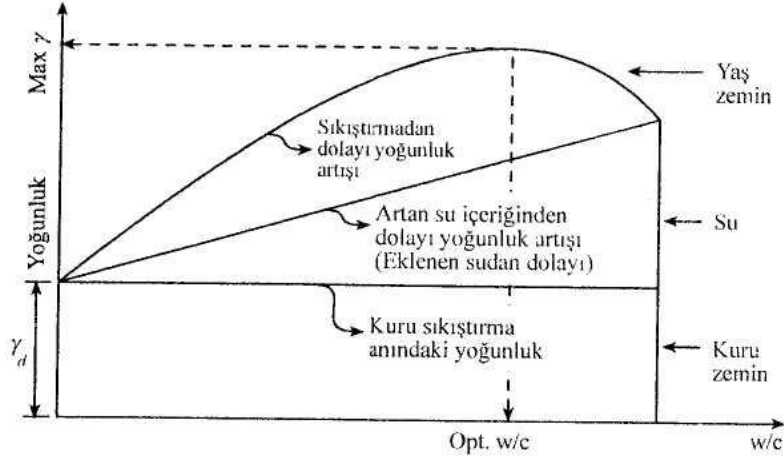
laboratuar deneyinden elde edilen kuru birim hacim ağırlığının bir yüzdesi olarak ifade olunur. Hava muhtevasının toplam hacmin %10'unu geçmemesi istenir. Fakat çoğu zaman daha küçük bir maksimum değerin sağlanması istenir.

Doğal birim hacim ağırlık / su muhtevası ilişkisini ( $\gamma_n - \omega$ ) başka bir yönden incelersek şekil 4.3' te görüldüğü üzere, belli bir sıkıştırma yöntemi ve enerjisi seçilerek bir zeminin kurudan başlayarak değişik su muhtevalarında sıkıştırılması durumunda yaş birim hacim ağırlığının ( $\gamma_n$ ) genelde sürekli yükseldiği izlenecektir.

Doğal olarak bu artış zemin doygunluğuna eriştiğinde durmamaktadır. Bunun ötesinde su muhtevasının artışı ile artan su, özgül ağırlığı daha fazla olan zemin tanelerinin yerini aldığından sıkıştırılmış zeminin birim hacim ağırlığını düşürecektir. Şekil 4.3' de sıkıştırmanın mekaniği görülebilir. Zemin kuru sıkıştırıldığında belirli bir başlangıç değerinden çıkıldığından su muhtevasında artışın  $\gamma_n$  değerinde doğrusal bir yükselme getirmesi gerekir. Sıkıştırmanın birim hacim ağırlığa ilginç katkısı alttaki eğriden görülmektedir. Kompaksiyon işlemi artan su muhtevasında taneleri değişik biçimde dizilime yönlendiğinden eğri bu örnekte %20 su muhtevasında bir maksimumdan geçmektedir. İşte bu değer söz konusu sıkıştırma enerjisinin zemin numunesine en etkin sıkışmayı sağladığı son düzey olmalıdır. Su yüzdesi artırılacak olursa su, tanelerinin yerini almaya başladığından sadece  $\gamma_k$  da değil,  $\gamma_n$  de düşüş olacaktır.

Standart Proktor deneyinde iç çapı 101.6 mm, yüksekliği 116.43 mm olan metal silindir kap kullanılır. Bu kaba bir yaka geçici olarak eklenir. Deney için kurutulmuş ve tanelenmiş birkaç kg.lık zemin numunesi kullanılır. Bir miktar su katılarak iyice karıştırılır. Böylece hazırlanan zemin üç tabaka halinde ve her bir tabaka 305 mm den serbestçe düşen 2,5 kg ağırlığındaki bir tokmakla 25 vuruş ile sıkıştırılır (Kumbasar ve Kip 1988).





Şekil 4.3 Sıkıştırmanın birim hacim ağırlığı etkilenmesi

Uygulanan enerji ise : 
$$E = \frac{2,5 \times 9,806 \times 0,305 \times 3 \times 25}{0,944 \times 10^{-3}} = 593 \text{ kJ/m}^3 \text{ dir.}$$

Daha sonra kompaksiyon kabının yakası çıkarılır, fazla zemin kesilerek uzaklaştırılır. Kabin üzeri düzenlenir. Kabin içindeki sıkıştırılmış zeminin yaş ağırlığı belirlenir. Buradan yaş birim hacim ağırlık  $\gamma_n$  hesaplanır. Kap içindeki zemin çıkartılır. Bundan bir miktar alınarak su muhtevası belirlenir ( $\omega_1$ ).

$\gamma_k = \gamma_n / (1 + \omega)$  bağıntısı kullanılarak bir deney için kuru birim hacim ağırlığı  $\gamma_{k1}$  hesaplanır.

Deney aynı zemin üzerine değişik su muhtevalarında 4 -5 kez tekrarlanır. Yaş birim hacim ağırlıkta ( $\gamma_n$ ) azalma başladıktan birkaç deney sonra deneye son verilir. Deney sonuçları  $\gamma_k - \omega$  eksen takımında işaretlenerek ilgili kompaksiyon eğrisi çizilir. Eğrinin tepe noktasından  $\omega_{opt}$  ve  $\gamma_{kmax}$  elde edilir (Kumbasar ve Kip 1988).

Ağır y¼klere maruz dolgular için (havaalanı, yol) ağır Proktor (modifiye Proktor) deneyi yapılır. Zemin 5 tabaka olarak sıkıştırılır ve kullanılan tokmak 4,5 kg. ağırlığında olup 457 mm. y¼kseklikten d¼ř¼r¼l¼r. Uygulanan enerji ise;

$$E = \frac{4,5 \times 9,806 \times 0,547 \times 5 \times 25}{0,944 \times 10^{-3}} = 2693 \text{ kJ/m}^3 \text{ dır.}$$

#### b) Kompaksiyonun Zemin Özelliklerine Etkisi

Kohezyonsuz zeminlerin kompaksiyonunda birim ağırlık artarken aynı zamanda kayma mukavemetide artar. Ayrıca kompakte edilen gran¼ler veya kohezyonsuz bir zeminin kompressibilitesi de azalır. Kompakte edilen b¼yle bir zeminin sıkıştırılması daha zor olur. Kohezyonsuz zeminlerde kompaksiyon sonucu zeminin sıklık derecesi artmaktadır. Sıkıştırma sırasındaki su muhtevası gran¼ler zeminlerin m¼hendislik özelliklerini önemli şekilde etkilemez . En y¼ksek randıman, titreşimli y¼kler uygulanarak alınabilmektedir (Tekinsoy 2002).

Kompaksiyon su muhtevası ve sıkıştırma y¼ntemi, sıkıştırılmış olan ince daneli zeminlerin dane iç yapısını etkilemektedir. Optimum su muhtevasından daha d¼ř¼k su muhtevalarında sıkıştındığında ( kuru tarafta ) zemini oluşturan danelerin birbirlerine g¼re eğimli olduğu ve daneler arasında kenar y¼zey temasının olduğu, zeminler optimum su miktarından y¼ksek miktarda su ile sıkıştındığında ( ıslak tarafta ) ise zeminlerin birbirlerine paralel uzanan danelerden oluştuğu g¼zlenmiřtir. Kompaksiyon enerjisinin artırılması ve yoğrulma etkisi g¼steren kompaksiyon y¼ntemlerinin kullanılması danelerin birbirlerine paralel olma eğilimini artırıcı etki yapmaktadır. İnce daneli zeminlerde optimumun kuru tarafında sıkıştırılmış zeminlerde kompaksiyon enerjisinin artması ile birlikte mukavemet artarken, ıslak tarafta sıkıştırılmış zeminlerin

mukavemeti kompaksiyon enerjisinden bağımsız olmaktadır. Bu nedenle ıslak tarafta sıkıştırma yaparken ağır kompaksiyon makineleri kullanmanın ve daha fazla geçiş yapmanın fazla bir etkisi olmayacaktır. Aksine kompaksiyon enerjisinin artırılması boşluk suyu basıncında artışlara ve mukavemette azalmalara yol açabilecektir .

Sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin; hacim değiştirme, şişme-büzülme ve permeabilite özellikleri kompaksiyon su muhtevasına bağlı olarak değişiklikler gösterir. Hacim değiştirme özellikleri; optimumun kuru tarafında sıkıştırılan zeminler düşük basınçlar altında daha az olurken, suya doygun olması durumunda basınca bağlı olarak ani olarak büyük değişiklikler göstereceği unutulmamalıdır. Şişme-büzülme özellikleri; optimumun kuru tarafında sıkıştırılmış olan ince daneli zeminler su ile temas ettiklerinde daha fazla şişme meydana gelirken, optimumun ıslak tarafında sıkıştırılan zeminler ise su kaybettiklerinde büzölmeler meydana gelmektedir. Permeabilite; optimumun kuru tarafında sıkıştırılmış olan ince daneli zeminlerinki ıslak tarafta sıkıştırılmış olanlarından daha yüksek olmaktadır (Kaya 2001).

#### c) Arazide Kompaksiyon

Standart kompaksiyon deneyleri, arazide kompaksiyonun yapılmasının gerekli olduğu su muhtevasının belirlenmesinde çok faydalı olur. Laboratuvar sonuçlarının arazide kutlanması için gerekli faktörler;

- Zeminin tabii su muhtevasının optimum değerine uydurmak.
- Arazide yapılacak sıkıştırma için zemin cinsine uygun kompaksiyon makineleri seçmek,

olarak sıralanabilir.

Arazide ideal su muhtevasında çalışılması çoğu zaman imkansızdır. Arazideki çalışma şartlarının genellikle, zeminin tabii su muhtevasına, saha ve hava şartlarına bağılı olarak değiştirilmesi zorunluluğu vardır.

Arazideki zemin, standart kompaksiyon deneyi ile belirlenen optimum su muhtevasından daha kuru ise ya su muhtevası bu optimum değere gelinceye kadar ıslatılır veya zemin daha büyük bir enerji ile sıkıştırılır. Zira yukarda söz konusu olduğu gibi büyük kompaksiyon enerjisi halinde aynı kuru birim hacim ağırlığı daha düşük su muhtevasında elde olunur

Zemin, optimum su muhtevasından daha fazla ıslak olması halinde, kuru birim hacim ağırlığı ne miktarda kompaksiyon uygulanırsa uygulansın normal su muhtevası / birim hacim ağırlık eğrisinde belirtilen kuru birim hacim ağırlık değerinden daha büyük bir değere ulaştırılamaz. Kuru havalarda, gerekli olması halinde, tabii su muhtevası, zemin ufalanıp dağıtılarak düşürülebilir. Hangi kompaksiyon metodu ve miktarı uygulanırsa uygulansın, maksimum kuru birim hacim ağırlık elde edilmiş olsa bile, zemin içinde yüzde 5 ila 10 mertebesinde bir hava boşluğu kalır.

Pratik uygulamada, Standart Kompaksiyon Deneyi veya Ağır Kompaksiyon (Modifiye kompaksiyon) deneyine göre belirlenecek relatif kompaksiyon değerinin genellikle yüzde 90 ha 95 arasında olması istenilir. Bu uygulamalarda, optimum su muhtevasına dayanılarak belirlenmiş su muhtevası sınırları da verilmelidir.

Hava boşluğu metodu için, su muhtevası seçiminin standart kompaksiyon deneyi sonuçlarından çok. su muhtevası dengesine dayandırılmasının gerektiği ileri sürülmüştür. Denge su muhtevası genellikle yeraltı su seviyesinin yüksek olmaması halinde, zemin yüzünden itibaren 1,0 m. kadar derinlikteki su muhtevasından belirlenebilir (Kumbasar ve Kip 1988).

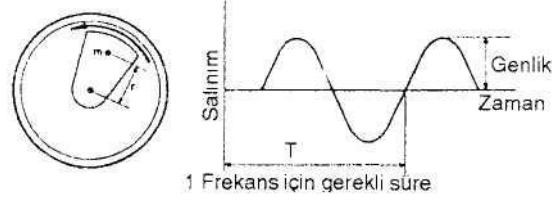
#### d) Kompaksiyon Makineleri

Düz Tekerlekli Silindirler: Islak kil dışında tüm zeminlerde ve üniform kumlarda etkilidir. Dolgu üst tabakası ve asfalt kaplamaların sıkıştırılmasında da kullanılır. Zemin ile yüzde yüz temas halinde olup zemine 400 kPa kadar basınç uygulayabilirler. Bir defada sıkıştıracağı tabaka kalınlığı 20-30 cm.dir. Bu tür silindirler malzemeyi üst tabakadan alt tabakalara doğru sıkıştırırlar. Ortalama 3-6 geçiş sıkıştırma için yeterlidir. Hızları 3-5 km/saat dir (Kaya 2001).

Lastik Tekerlekli Silindirler : Genellikle tüm zeminlerde özellikle ıslak ince daneli zeminlerde ve asfalt sıkıştırmasında kullanılır. Zemin ile % 80 temas halinde olup lastik hava basınçları 700 kPa' a kadar çıkmaktadır. Hareketli veya sabit olarak akslara bağlanmış havalı lastik tekerlerle sıkıştırma yapar. Bir defada sıkıştırabileceği tabaka kalınlığı maksimum 25 cm.dir. zeminde yoğurma ve basınç etkisi ile sıkıştırma yapar. Ortalama 3-6 geçişte sıkıştırma işlemini gerçekleştirir. Hızları 10-15 km/saat dir. Şerit halindeki sıkıştırmada tercih edilir.

Vibrasyonlu Silindirler: Pnömatik silindirler hariç tüm silindirlere vibrasyon etkisi kazandırılarak yol inşaatlarının her aşamasındaki (dolgu, üstyapı hatta asfalt kaplamalar dahil) kompaksiyon işlerinde daha etkili olarak kullanılmaktadır.

Vibrasyon etkisi Şek. 4.4 "de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Vibrasyon Etkisi

Vibrasyon eksantrik ağırlığın dönmesi ile elde edilir. Frekans ve nominal genlik ile diğer parametreler aşağıdaki gibi tanımlanır.

Frekans:  $(1/T)$  n (Hz veya vibrasyon/dak),  $\text{Hz} = 1/60$  (v/dak)

Eksantrik Moment:  $m.r$  (kg.mm).  $m$ : eksantrik ağırlığı

Nominal genlik = Eksantrik Moment/Bandaj ağırlığı (mm)

$$\text{Merkezkaç Kuvveti} = m.r.4 \pi^2 . n^2 \quad (4.5)$$

Vibrasyonlu silindirlerin sıkıştırma etkisi aşağıdaki faktörlere de bağlı olarak değişmektedir.

Statik ağırlık (veya çizgisel yük)

Vibrasyonlu bandaj sayısı ve tahrikli bandaj sayısı

Silindiraj hızı

Toplam ağırlık/Bandaj ağırlığı oranı, tambur çapı ve genişliği

(Tunç 2002).

**Keçiyak ve Kütayak 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 keçiyayağı silindir, dikdörtgen veya kare kesitli ama daha geniş alanlı ve kısa olanlarına kütayak silindir denilir.

Bu tip silindirlerin en büyük özelliği diğerlerinin aksine serilen tabakaları aşağıdan yukarıya doğru sıkıştırabilirlerdir. Serilen gevşek zemin malzemesine silindirin ayakları batarak önce tabakanın altındaki malzemeyi sıkıştırır. Her geçişte malzemenin sıkışması artacağından dolayı batma miktarı da gitgide azalarak tabaka kalıncınca aşağıdan yukarıya doğru homojen bir sıkışma elde edilir. Killi zeminler için keçiayak ama siltli zeminler için kütayak silindir daha uygundur. Granüler zeminler için bu tip silindirler uygun değildir. Zira 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 pasta sayısına ihtiyaç gösterirler. Serilen tabaka kalınlığı ayak yüksekliğine eşit ise en ideal sıkışma elde edilmektedir. Sıkıştırma ayak basıncı ile yapılırsa da ayaklar silindir üzerinde aynı sırada teşkil edildiklerinden dolayı statik çizgisel yük ile sınıflandırılırlar. Ağırlıkları 4,5-7,0 ton arasında olup 30-60 ve > 60 kg/cm statik çizgisel yük olarak sınıflandırılmaktadır (Tunç 2002).

Tokmaklar: İş kapasiteleri sınırlı olduğu için kanallar, köprü kenar ayakları arka dolgusu gibi büyük iş makinelerinin giremediği yerlerde kullanılır. 30-150 kg ağırlığındadır. Basıncı hava, içten yanmalı motorlu tipleri vardır. Saatte 200 m<sup>2</sup> alan sıkıştırabilir. Kaba daneli zeminlerde 75 cm.ye kadar, ince daneli zeminlerde ise 25 cm.ye kadar sıkıştırma yapabilir. Uygulamada; çekiçler, kurbağa çekiçler, normal tokmaklar kullanılır (Kaya 2001).

#### **4.1.2 Katkılı Stabilizasyon**

Geoteknikte hint yağından fosforik asite, tuzdan melasa kadar her türlü kimyasal birleşim zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için uygulanmıştır. Kayma direncini

artırmak, geçirimsizlik ve suya isteği azaltmak, hacim değişimini en aza indirmek gibi amaçlarla yapılan çalışmaların her zaman bilimsel olduğu söylenemez. Ayrıca endüstri yan ürünlerinin ve artıklarının kullanılması gayretleri jeolojik ortamın kinlenmesine de yol açabilmiştir (Usta ve Çelikaslan 2002).

Zamanın kazandırdığı deneyim incelenen yüzlerce maddeden sadece bir kaçının sürekli uygulama olanağı bulunduğunu göstermektedir. Bunlar etkinlikleri yanında, ucuzluk ve gereksinme duyulduğunda kolayca bulunabilme özelliğine göre çimento, bitüm, kireç, fosforik asit, kalsiyum bileşikleri, reçine ve polimerler, çok değerli iyon içeren maddelerdir.

Katkı maddeleri zemine, laboratuarda çok yararlı görünürken arazi uygulanmasında etkin karıştırma güçlükleri, yağmur, sıcak gibi çevre koşulları nedeniyle bu olumlu durumu yitirebilirler. Bu nedenle uygulayıcı tarafından öncelik verilen bir yöntem değildir.

Katkı maddeleriyle stabilizasyon ulaşım yapılarında öncelikle kullanılmıştır. Bunun yanında su yapılarında da giderek artan bir oranda kullanılmıştır. Bir diğer ilginç uygulama hafif binaların temellerinin sertleştirilmesidir. Böylece yetersiz doğal zemin kolaylıkla kullanılabilir (Kumbasar ve Kip 1988).

#### 4.1.2.1 Çimento Katkılı Stabilizasyon

Çimento kullanımı ile zemin stabilizasyonu A.B.D.' de eyalet karayollarının 1920'deki uygulamalarına kadar gitmektedir. Endüstrinin gelişmesi nedeniyle de Türkiye koşullarında uygun bir yöntem haline gelmiştir. Artan trafik yükleri başta hava meydanları olmak üzere tüm ulaşım yollarında çimento ile stabilize edilmiş temel ve alt temel uygulamasını zorunlu hale getirmektedir (Demirhan 1998).



Mukavemet kazandırmak amacı ile zemine çimento karıştırıldığında zeminin kayma mukavemeti yüksek bir seviyeye varır ve içine su girmesine karşı direnci artar. Zeminlerin çimento ilavesi ile stabilizasyonunu sadece, üzerindeki yükleri taşıyamaması ve mukavemet kazanması için yüzde 10- 12 'den küçük bir oranda çimento (kuru ağırlığa göre) ilavesine gerek duyulması halinde düşünülebilir. Çimento ile Stabilizasyon sadece tabii zeminler için değil aynı zamanda kullanılmış veya artık malzemelere mukavemet kazandırılmasında da kullanılır.

Birçok ülkede stabilize zeminin başlıca kullanım yeri, yol alt temel tabakalarının inşaatıdır. Ağır trafik taşıyan yollar için stabilize temel tabakaları için kullanılmaz. Hafif trafiği olan yollarda ise bu tabakalarda başarı ile kullanılmaktadır. Ayrıca bazı hallerde geçici kaplama olarak da kullanılabilirler. Zemin çimento karışımı ilk defa ikinci dünya savaşı sırasında yol ve hava meydanları inşaatları maliyetlerinin düşürülmesi amacı ile geniş çapta kullanılmıştır. Savaştan sonra birçok hafif trafikli yol, yerinde karıştırma metodu ile bu şekilde inşa edilmiştir. Bu sırada karşılaşılan zorluklardan birisi, zemine çimento karıştıran makinenin 15 cm. den daha derine etkiyememesi olmuş, bu bakımdan daha kalın temel ve alt temel tabakasının inşaatı için üst üste iki tabaka yapılması veya daha pahalı diğer karıştırma usullerinin kullanılması gerekmiştir. Halen 25-30cm derinliğe kadar çimentoyu zemine karıştırabilen çok daha kuvvetli makineler vardır (Usta ve Çelikaslan 2002).

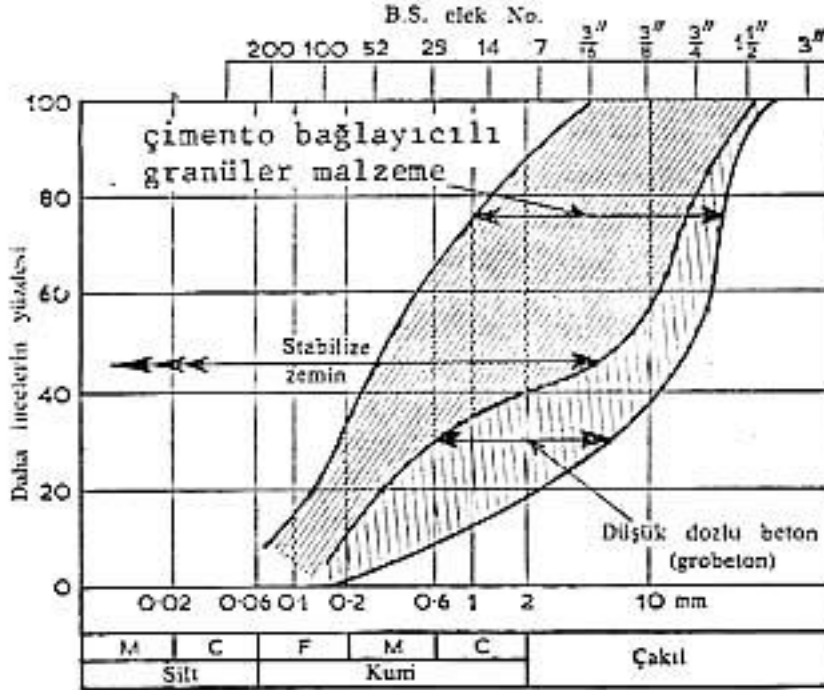
Zemin-çimento, zeminden betona giden zincirin ilk baklasını teşkil eder. Her ne kadar bu kısım sadece zeminle ilgiliyse de, betonun ıslak ve plastik durumda birçok zeminin karakteristiğini gösterdiği de belirtilmelidir. Zeminin betona dönüştüğü noktanın tam olarak tarifi güçtür. İdeal yol temel tabakaları için araştırma yapan mühendisler, tabii malzemedeki oluşan başka çimentolu stabilizasyon tipleri geliştirmişlerdir. Tabii zeminin yerinde stabilize edilmesinde

bir ileri adım çimento bağlayıcı granüler malzemedir. Bu metotta ekseriya yüksek miktarda ince ihtiva eden tabii granüler malzeme kullanılır. Granüler malzeme, bir karıştırıcıda çimento ile karıştırılır, böylece normal stabilize zemine nazaran daha yüksek mukavemet elde edilir. Stabilize zeminin betona daha yakın diğer bir şekli 'zayıf beton' (grobeton) olarak bilinir. Bu, yolların alt temel ve temellerinde büyük ölçüde kullanılmakta olup bu metotta normal çimentolu stabilizasyona nazaran daha az çimento kullanılır (Temel 2001).

Stabilizasyon için gerekli çimento oranı serbest basınç deneyinden elde edilen basınç mukavemeti ile kontrol edilir. Bu deneylerde kullanılan silindirik numunenin yüksekliği, çapının iki katıdır. Hafif trafiği olan küçük yolların temelleri için 7 günlük mukavemeti en az  $17 \text{ kg/cm}^2$  olması uygundur. Bir anayolun temel tabakasında zemin-çimento kullanılması halinde silindirik deney numunelerinin  $28 \text{ kg/cm}^2$  ve küp deney numunelerinin ise  $35 \text{ kg/cm}^2$  değerinde serbest basınç mukavemeti vermeleri istenir. Bu değerlerden daha yüksek mukavemetlerin elde edilmesinin faydası azdır.  $50 \text{ kg/cm}^2$  civarındaki bir mukavemetle, rötre çatlakların oluşması ihtimali vardır. Ayrıca, böyle yüksek bir mukavemet elde edilmesi için gerekli çimento miktarı da çok olacağından ekonomik olmayan bir durumla karşılaşılır (Temel 2001).

Zeminin çimento ile stabilizasyona uygun olmamasının belirlenmesi halinde ilk adım gerekli su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığına karar verilmesidir. Birim hacim ağırlığındaki küçük bir artış aynı miktarda çimento kullanılması halinde mukavemette büyük artışa neden olur. Bu bakımdan kuru birim hacim ağırlığı mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. İlave olunacak su miktarı istenilen kompaksiyona varmak ve çimentonun hidratasyonu için yeterli suyu sağlamalıdır. Bunun belirlenmesinde aşır kompaksiyon deneyinden faydalanılabilir. Burada hava boşluklarının %5'i geçmemesi sağlanmalıdır. Kuru zemin ağırlığının, örneğin %10'u kadar çimento karıştırılarak hazırlanan bir karışım kompaksiyon deneyine

tabi tutularak incelemeye başlanır. Sıkıştırılmış numuneler üzerinde serbest basınç mukavemetleri tayin edilir. Çimento oranlarının örneğin % 5, 10, 15 olarak alınması ile elde edilen karışımlara ait deney sonuçlarından en uygun çimento oranı bulunur.



Şekil 4.5 Zemin-Çimento İnşaatına Ait Granülometri

Arazideki uygulamada, önce zemin ufalanır, sonra çimento ile karıştırılır ve su ilavesi ile istenilen su muhtevasına getirilerek silindirme ile sıkıştırılır.

Beton özellikleri nedeniyle çimento-zemin ilişkilerinin bir bölümü iyi bilinmektedir. Kilin varlığı katkı maddesinin birinci reaksiyonlar dışında da süreçler oluşturmasını sağlamaktadır. Suyun varlığında kireçte olduğu gibi çimento-zemin reaksiyonları CSH ürününü vermektedir. Çimentonun içinde bol miktarda silis bulunduğundan kireçte olduğu gibi ortamın bu bileşiğe

gereksinmesi yoktur. Betonda olduğu özellikle sülfatlı tuzlar ve organik malzeme zemin- kireç karışımının dayanım kazanmasını geciktirmekte ve önlemektedir.

Çimento birinci reaksiyonlar sonucu zemin matrisinde güçlü bağlar oluşturur. Bu reaksiyonun etkinliğini azaltmak için laboratuvar ve arazide altı saatten geç sıkıştırma işlemlerinden kaçınılmalıdır. Birincil reaksiyonda çimentonun bilinen hidroliz ve hidratlanması rol oynar (Temel 2001).

Çizelge 4.1 Çimento Stabilizasyonunun Sıkıştırılmış Zemine Etkisi

ÖZELLİK	İRİ DANELİ	İNCE DANELİ
Birim Hacim Ağırlık ( $t/m^3$ )	1,6 – 2,2	1,4 – 2,0
Serbest Basınç Direnci (kPa)	500 – 1000 C	300 – 600 C
Kür Etkisi (t günde)	$Q_u = q_{uo} + 500C \log(t/t_0)$	$q_u = q_{uo} + C \log(t/t_0)$
Kayma Direnci ( $kN/m^2$ )	$C = 50 + 0,225q_u + \sigma \tan 45^\circ$	$c = 50 + 0,22q_u + \sigma \tan 40^\circ$
CBR	0,0038( $q_u$ )1,45	
Elastisite Modülü (mPa)	$7 - 35 \times 10^3$	$0,7 - 7 \times 10^6$
Poisson Oranı	0,1 – 0,2	0,15 – 0,35
Geçirimsizlik Katsayısı (cm/s)	$< 10^{-6}$	

#### 4.1.2.2 Kireç Katkılı Stabilizasyon

Kireç bilinen en eski stabilizasyon malzemesidir. İçindeki uygulamaları yanında, Romalılar tarafından da yol yapımında kullanılmıştır. Afrika ve Amerika'nın bazı bölgelerinde sönmüş kireç özellikle yüksek kil içeren zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmıştır. Modern anlamda ince deneli zeminlerin kireçle stabilizasyonu

ilk olarak 1940' larda A.B.D. de kullanılmıştır. Kireç stabilizasyonu bugün de karayollarında, hava alanı pistlerinde ve park sahalarında başarı ile kullanılmaktadır (Temel 2001).

Kireç genel olarak, kalsiyum ve magnezyum oksitleriyle hidroksitlerini ifade eder. Ticari olarak kullanılan değişik kireç tipleri mevcuttur. Bunlar kalsitik kireç(CaO) ve dolomitik kireç(CaO±MgO)'dir ve kalsitik ve dolomitik kireç taşından üretilir.

Stabilizasyon işlemlerinde en çok kullanılan kireçler, hidratlı yüksek kalsiyum kireci, mono hidratlı dolomitik kireç, kalsitik sönmemiş kireç ve dolomitik sönmemiş kireçtir. Ancak Thompson ve Portland Cement Association tarafından yapılan araştırmalar yüksek kalsiyumlu kireçlerin zemin plastisitesini değiştirmede daha etkili olduğunu göstermiştir.

Zemin-kireç karışımını sertleşmesi yüksek sıcaklıklarda daha hızlı olarak meydana geldiğinden bu tip stabilizasyon sıcak iklimler için daha uygun olmaktadır. Aynı miktar kirecin zemini sağlamlaştırmada etkisi portland çimentosuna nazaran çok daha azdır. Kirecin ana faydası, killi zeminlerin plastik limitini artırdığından, zeminleri daha kuru bir hale getirerek daha iyi ufalanmasını ve stabilize edici malzemenin daha üniform olarak karışmasını sağlamaktadır. Bu özelliği inşaat alanlarında kullanılan makinelerin hareketini kolaylaştırdığından, kireci bu gibi yerlerin geçici stabilizasyonu için uygun malzeme haline getirmektedir. Sönmemiş kireç, bazen kurumunun hızlandırılması için kullanılır. Kirecin zemine karıştırılması ile nihai ufalanma işlemi arasındaki zaman kurumaya yardım eder.

En uygun sonuçların elde edilmesi için gerekli kireç miktarı % 3-8 arasındadır. Küçük oranlar bazen ön karışım işinde kullanılır. Büyük yüzdeler mukavemette

aynı oranda artış sağlamaz. % 1-2 gibi küçük oranlarda eklenmesi, normal çimento stabilizasyonu için çok yağlı veya ıslak olan zeminlerin çimento stabilizasyonuna uygun hale getirilmesi için kullanılır. Kireç, bitümlü stabilizasyonda da kullanılır (Usta ve Çelikaslan 2002).

Kireç stabilizasyonunda en zararlı etken zeminde bulunabilecek organik malzemedir. Organik madde ve sülfat iyonunun varlığı önceleri stabilizasyonun olumsuz etkilendiğini belli etmemekte, ancak daha sonra kuruma, ıslanma olduğunda zemin ufalanmaktadır. Zeminle karıştırıldığında kirecin ilk etkisi plastisiteyi düşürmektedir. Ortamın pH'ı 1 azaldığında yapı topaklanmakta, böylece ağır killeri işlemek kolaylaşmaktadır. Kullanılan kirecin kimyasal özelliği de önem taşır. Dolomitik ve saf kalsiyum kireçleri farklı özellikli killerde montmorillonit başta olmak üzere değişik sonuçlar vermektedir.

Bir büyük projede zeminin hangi yüzde de kirece gereksinimi olduğunu saptamak için %3-8 arası katkı ve 7,14,28 gün bekletme ile optimumun bulunması olduğu bilinmektedir. Ancak çabuk sonuç istenen durumlarda her % 10 kil içeriği için % 1 kireç uygulaması kuralı kullanılabilir. Bulunacak yüzdelerin  $\pm 2$ 'sinde hazırlanan iki örnekten de optimum hakkında bilgi edinilebilir.

Kireç katkısı kil içeriği yüksek zeminler için en uygun malzeme olarak belirlenmiştir. Ayrıca oluşan reaksiyon hızının yüksek olmaması nedeniyle yapım sırasında sorunlar çıkarmaması bir avantajdır. Yerinde yapılacak gecikmeli kompaksiyonun bazı sakıncaları öne sürülmüşse de bu, diğer katkı maddelerine oranla ihmal edilir ölçektektir. Yapılan araştırmalar kil içeriği yüksek olan zeminlerde jipsin de kireç kadar faydalı bir katkı malzemesi olabileceğini göstermiştir (Demirhan 1998).

#### 4.1.2.3 Bitüm Katkılı Stabilizasyon

Yollarda temel malzemesine uygulanan bitümlü stabilizasyon taneli malzemeye kohezyon verir. İnce taneli zeminlere katıldığında ise malzemenin suya karşı isteğini azaltmaktadır. Kireç ve çimentoya oranla pahalı olduğundan daha az uygulanır. Bitüm, zemine emülsiyon ya da köpük biçiminde katılmaktadır.

Olağan koşullarda 76 mikrondan geçeni 10-50 arasında, plastisite indisi 18'den küçük olan zeminler bu yöntemle en iyi cevap verir. Bu şekilde taneler asfaltla rahatça kaplanabileceği gibi bitüm boşlukları tıkama işlevini de yerine getirmektedir (Demirhan 1998).

Stabilizasyonun başarılı olması için asfaltın tüm zemini kaplaması gerekmektedir. Öte yandan gereğinden fazla bitüm taneler arası bağlar ve kilitlemeyi önleyerek malzemenin kayma direncini azaltmaktadır. En yüksek kayma direnci ve birim hacim ağırlık, en düşük su emme özelliğini yansıtan optimum çözümün %20 hava boşluğu durumunda olduğu bulunmuşsa da porozite ile bitüm içeriği arasında güvenilir bir bağlantı da oluşturulamamıştır. Sadece kum emülsiyon karışımlarında asfalt gereksinmesi ( % p ) için

$$p = 0,75 (0,05 a + 0,1 b + 0,5 c) \quad (4.6)$$

denklemini güvenilirliği ispatlanmıştır. Burada a, 2 mm elek üzerinde kalan b, 2-0,074 mm elekler arasındaki, c ise 74 mikron elekten geçen kum yüzdesini göstermektedir (Demirhan 1998).

Bitüm Emülsiyonları; %40-50 içerirler ve emülsiyon içinde bitüm, ince danelere ayrılmış bir durumda bulunur. Bu tip stabilizer sıvı olup, kumla iyi bir şekilde karışarak çorba kıvamında bir karışım meydana getirir. Su buharlaştıkça ve çorba kıvamındaki karışım kurudukça, emülsiyon parçalanır ve bitüm, kum daneleri üzerinde depolanır. Su muhtevası minimum değere inince kompaksiyon yapılır. Bitüm emülsiyonları aslında kapiler suyun yükselmesine mani olan geçirimsizliği sağlar (Usta ve Çelikaslan 2002).

Bitüm emülsiyonlu stabilizasyonun başarılı olması karışmış malzemenin çabuk olarak kuruyarak kompaksiyon için uygun hale gelmesine dayanır. İngiltere’de böyle bir kuruma zor ve yavaştır. Bu bakımdan İngiltere için bitümlü emülsiyona az miktar portland çimentosu ilavesi kurumaya yardım ettiği halde, yine de emülsiyon kullanılması zordur.

#### 4.1.2.4 Diğer Katkı Maddeleriyle Stabilizasyon

Çimento, kireç ve bitüm dışındaki katkıları ancak özel koşullar ve kısıtlı hacimlerde ekonomik olarak kullanılabilir. Bugüne kadar üretilen katkı maddeleri arasında ekonomik ve başarılı olanlar, tuz, kalsiyum klorür, fosforik asit, fosfor tuzları, kostik soda, reçineler, polimerler ve lignin olarak sıralanabilirler.

Reçineler; Zemin stabilizasyonunda önemli bir metot reçinelerin kullanılmasıdır. Bunlar geçirimsizliği sağlayan malzemeler olup, vaksli (mumlu) katbek bitümlü benzer bir etkiye sahiptirler. Bitümlü işlemde olduğu gibi, zemin yaklaşık olarak % 1 miktarda kireçle karıştırılarak, bir “ön-muameleye” tabi tutulur. Kullanılan reçine özel olarak hazırlanmış bir malzeme olup, gerekli miktar



yalnız % 1-2 civarındadır. Bitüm gibi reçineler de kötü derecelenmiş ve kohezyonu yeterli olmayan zeminlerin stabilizasyonuna tabi tutulma olanaklarını artırır.

İyi karışmış toz halinde veya çorba kıvamında uygulanan reçineler, zemin boşluklarında suya dayanıklı çok ince tabakalar meydana getirecek şekilde yayılarak, kapiler yükselmeye karşı su tutan bir engel oluştururlar. Gerekli reçine miktarı 15 cm kalınlık ve 1 m<sup>2</sup>saha dahilindeki zemin için yalnız 2-5 kg arasındadır. Diğer hiçbir stabilizörün bu kadar az miktarlar halinde kullanıldığı zaman etkili olması kabil değildir. Hazırlanmış zemin optimum kompaksiyon meydana getirecek şekilde sıkıştırılır Daha çok Avrupa ülkelerinde kullanılan doğal reçineler organik ayrışmaya uğradığından daha sonraları 'vinsol' olarak bilinen yapay reçine kullanılmıştır (Temel 2001).

Uçucu fırın külü (PFA); elektrik santrallerinin yan ürünü olan başarılı bir dolgu malzemesi ve kireç stabilizasyonunda puzolanik reaksiyonu hızlandıran bir katkıdır, ancak uygulaması taşıma masrafları nedeniyle kısıtlıdır.

Tuz ve kalsiyum klorür; çok eskiden beri ince danelerin floklaşmasını sağlayarak zeminin birim hacim ağırlığını, dolayısıyla kayma direncini artıran özellikleri nedeniyle kaplamasız ve kaplamalı yollarda kullanılmıştır. Boşluk suyunda artan tuz yoğunluğu donma derecesini de düşürdüğünden donmadan oluşan zararların önlendiği gibi de bir katkı oluşmuştur. Bu katkı yönteminin en olumsuz yanı, yağış ve yer altı su düzeyindeki oynamalar sonucu tuzların hızla zemin matrisinden yıkanarak etkisini yitirmesidir. Bir olumlu etkisi ise, kaplamasız yollarda tozu bastırma özelliğidir. Tuz uygulanması günümüzde çok ucuz ve artık madde olarak sağlanması ve taban zeminindeki killi bölümün montmorillonit kökenli olması durumunda düşünülebilir.

Fosforik asit katkısı; pH değeri 7'nin çok altında ve kil mineralinin klorit olması durumunda düşünülebilecek stabilizasyon yöntemidir. Ekonomik olarak sağlanabildiği ABD'de kile %2-10 arası katılıp rutubetli ortamda küre bırakıldığında asitle kil mineralleri ve bunlara bağlı iyonlar arasında oluşan reaksiyonlar sonucu çok sıkı bağlı bir ürün elde edildiği bildirilmiştir.

Calgon; ticari adıyla piyasada olan sodyum-fosfor tuzlarının donmaya duyarlı olan zeminleri etkin olarak stabilize ettiği öne sürülmüştür. Bu tuzlarda tripolifosfat ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) donmaya en duyarlı zeminleri bile başarı ile stabilize etmiştir.

Sudkostik; adıyla da bilinen sodyum hidroksit (NaOH) çok uygulanmakla birlikte ucuzluğu ve laterit türü zeminlerde etkinliği nedeniyle ilig çekmektedir. Sıkıştırma için serpilecek suya kolayca karıştırılarak %3-10 arası uygulandığında kaolin kökenli killerle reaksiyona girerek birim hacim ağırlığı artırır, 28 güne kadar da kayma direncini yükseltir. Bu maddenin kireçle stabilizasyonunda çok faydalı ikincil bir katkı olabileceği saptanmıştır. İnsan cildine yaptığı yakıcı etki dışında, uygulanması ümit verici olarak nitelendirilebilir (Temel 2001)

Polimerler; zemin stabilizasyonu için önerilenleri çok çeşitlidir. Katyon, anyon ve iyonik olmayan biçiminde üç grupta toplanabilen polimerlerin işlemleri farklıdır. Katyonik grup ince silis kumu ile kil minerallerinin negatif yüklü yüzeyi arasında güçlü bir elektrostatik bağ oluşturmaktadır. Bu etki floklu yapıyı oluşturarak kilin kayma direncini arttırmakta ise de arazi koşullarında düşen kuru birim hacim ağırlık değeri bu etkiyi ortadan kaldırmaktadır. çok uygulanmış katyon tipi katkı maddesi poliakrilamid'dir. iyonik olmayan katkı maddesinin tipik türü polivinil alkoldür. Polimer zincirdeki —OH grupları ile kil minerallerinin yüzeyindeki oksijenlerin oluşturduğu bağ ile etkin olur.

Ligninler; kağıt ürünlerinin artık malzemesi olan potasyum di karbonat, lignin molekülü olup etkin bir katkı malzemesi olabileceği öne sürülmüştür. Lignin molekülü iriliği ve yapısı nedeniyle silisli yüzeylere isteği olan bir özellik taşır. Volkanik ve kloritik yapıli zeminlerde etkili olur (Temel 2001).

#### 4.1.2.5 Katkılı Stabilizasyonun Arazide Uygulama Şekli

Bulunan malzeme üzerinde çeşitli deneyler yapılip, stabilizasyon tipine karar verildikten sonra, geriye kalan problem bu sonuç ve kararları pratiğe aktarmaktır. Zemini optimum su muhtavasında iyice karıştırarak üniform bir malzeme elde etmek ve yeter bir kompaksiyon meydana getirmek için gerekli araçların sağlanması işi, önemli iki konudur.

Karıştırma işi boyunca ve temelin teşkili için yapılacak ileriki işlemler sırasında boyuna ve enine seviyeler dikkatli olarak kontrol edilmeli ve üst yüzün gereken eğimden fazla miktarda ayrılmasına asla müsaade edilmemelidir. ilk işlem temel zemininin kaba bir şekilde tesviyesi ve onun mekanik stabilizesini iyileştirmek için gerekli malzemenin sathı yapılmasıdır. Bu işlemler bıçak uzunluğu 3.5 m kadar olan greyderlerle yapılabilir (Usta ve Çelikaslan 2002).

Zemin stabilizenin zeminle iyice karışmasını sağlamak için ufalanmalıdır. Bu iş için normal ziraat makinelerinden geliştirilmiş çeşitli tip makineler kullanılır.

Eğer temel veya temel zeminin herhangi bir tabakasına stabilize işlemi uygulanacaksa, karıştırma işlemi için şu üç metottan biri kullanılabilir:

(a) Tesiste karıştırma(Plant-mix): Bulun malzeme sabit bir makineden geçirilerek istenilen su muhtevasına getirilir ve stabilizer ile karıştırılır.

(b) Yeninde karıştırma(Mix-in-place): Tüm karıştırma işlemi yerinde yapılır ve malzeme bütün işlem boyunca tam seviyesinde tutulur.

Zemin-çimento için Mix-in-place metodu :

Bu işlemde beş kademe mevcuttur: ufalama, çimentonun dağıtılması, çimentonun kuru olarak karıştırılması, ıslak karıştırma ve kompaksiyon.

Çimentonun dağıtılması için en iyi yol, portland çimentosu torbalarını üniform aralarla ufalanır zemin üzenine yerleştirmektir. Torbalar arası uzaklık zemine katılacak çimento miktarına göre ayarlanır. Torbalar yırtılır ve içindeki tırmıklanarak ve sürülerek, bütün karışımın rengi üniform oluncaya kadar zemine karıştırılır. Daha sonra tesviyesi yapılır ve su muhtevasının %2 üstüne çıkaracak su eklenir.

(c) Gezerek karıştırma(Travel-mix):Figüreler halinde malzeme kovalı elevatör ile kaldırılarak, figüreler boyunca ilerleyen karıştırma makinesine serilir. Makinede karışan malzeme, yeniden figüreler haline getirilerek, yayılma ve kompaksiyona hazır duruma geçer.

Gezerek karıştırma makinesi bir yükleyici ve bir karıştırıcıdan meydana gelir. Karıştırıcıda zemin, su ve stabilizer ile karıştırılır. Reçine ve portland çimentosu gibi toz halindeki stabilizerler yol boyunca dağılmışlardır ve figürelerden zeminin yanı sıra kovalı elevatör ile alınır.

Bu üç metottan iki ve üçüncüsü en çok kullanılanıdır. Gezerek karıştırma işi her tip stabilizerde kullanılır.

6 m. genişlikteki bir şeridi kaplamaya yetecek büyüklükteki her figüre. karıştırmadan sonra yayılır ve tokmaklanır. Portland çimentosu ile çalıştığı zaman çabuk yapılmalıdır. Bitüm kullanıldığında nihai yayma, gerekli ise, geciktirilebilir. Figüre ve gezerek karıştırma metodu ile operasyon. yeminde karıştırma metoduna nazaran hava şartlarından daha az etkilenir. Buharlaşıma figürelerin içinde azdır veya hiç yoktur. Yağmur dik kenarlardan akarak su muhtevasını fazla miktarda değıştirmez (Kumbasar ve Kip 1988).

İncelenen üç metodun faydaları ve mahsurları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Yerinde karıştırma metodu faydaları

- (1) Makineler basit ve ucuzdur, kolayca nakledilebilir
- (2) Gerekli makine sayısı işin büyüklüğüne göre ayarlanabilir.
- (3) İşlenen bütün kısım, aynı anda kompaksiyona hazırdır.
- (4) Büyük bir ortalama iş miktarı elde edilebilir.
- (5) Nemli bir iklimde buharlaşma, fazla nemden kurtulmanın yolu olduğu için bu metot faydalı olabilir.

Mahsurları :

- (1) Makineleri belirli bir derinliğe ayarlamak güç olduğundan, muntazam bir uygulama derinliği elde etmek kolay değildir.

- (2) Karıştırma, seyyar veya sabit karıştırıcılarda olduğu kadar üniform olmaz.
- (3) Şiddetli yağmur, yapılan bütün işi bozabilir.
- (4) Kuru iklimlerde, buharlaşmayla kaybedilen suyu ikmal etmek zordur.

Gezen makina metodunun faydaları :

- (1) Eklenen su miktarı iyi kontrol edilebilir.
- (2) Üniform karışım.
- (3) Karıştırma süresinin kısalığı.
- (4) Üniform bir altyapı yüzü elde edilebilir ve uygulamaların derinliği iyi kontrol edilebilir.
- (5) Belli bir işçi ve makine masrafına göre en fazla iş çıkaran metottur.

Mahsurları :

- (1) Makinelerin fiyatı çok yüksektir.
- (2) Bunun neticesi olarak makinelerin her zaman tam kapasiteyle çalışmasının sağlanması zorunluluğu.
- (3) İş, bir makinenin bir parçasında meydana gelen ufak bir arızayla durur.

Yerinde duran makine metodunun faydaları :

- (1) Karışım oranlarının iyi kontrol edilebilmesi.
- (2) Uygulama derinliğinin iyi kontrol edilmesi
- (3) Karıştırma veya taşıma sırasında az su kaybı olur

(4) Karıştırma için betoniyerler kullanılabilir

Mahsurları :

(1) Eğer yerindeki zemin muameleye tabi tutulacaksa pahalıdır

(2) Malzeme yerleştirildikçe sıkıştırılmalıdır (Kumbasar ve Önalp 1970).

## **4.2 Derin Stabilizasyon**

### **4.2.1 Kohezyonsuz Zeminler**

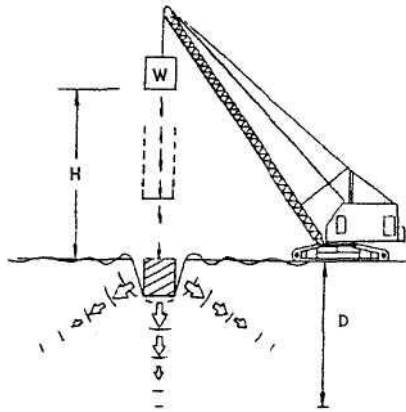
#### **4.2.1.1 Derin Kompaksiyon**

Tarih öncesi Çin resimlerinde zeminin 10-15 işçinin yerden 1,50 m kaldırarak düşürdükleri taş ağırlıkla sıkılaştırıldığı görülmektedir. Bu yöntemin uygulaması kompaksiyon deneyinde olduğu gibi, doymun olmayan zeminlerin yoğunlaşması prensibine göre yapılırken derin kompaksiyonda doymun ve batık kumların çok büyük enerji ve titreşim alarak sıvılaşması gözletilmektedir. Son zamanlarda kohezyonlu zeminlerde de uygulama düşünülmüşse de yöntemin geçerli olabilmesi için zemin yapısını bozacak enerji, makul zamanda artan boşluk suyu basınçları ve suyun hareketi için çatlak kanallarının oluşması gerekli görülmektedir. Moloz dolgular derin kompaksiyonla etkin olarak sıkıştırılabilmektedir. Yöntem esas olarak taneli zeminler için uygundur. Kohezyonlu zeminlerde de iyi sonuçlar alındığı ileri sürülmüştür .

Dinamik konsolidasyon, ağır tokmaktama diye de adlandırılan bu yöntemde ağırlığı 2 den 200 tona varan ağırlıklar 5-40 m yükseklikten bir vinç yardımıyla, birkaç metre aralıklarla zemin yüzüne düşürülür. Ağırlık, genellikle betonarme

dikdörtgen bir blok olup, dışı kalın saca kaplıdır. Uygulamada birkaç metre aralıklı noktalarda tokmaktama ortalama 2-3 vuruş/m<sup>2</sup> kılavuzuyla yapılır. Gerektiğinde koordinat ağı değiştirilerek ikinci, hatta üçüncü geçiş yapılır. Her geçiş arası boşluk suyu basınçlarının sönümüne izin verecek kadar zaman bırakılmalıdır. Vuruş noktaları arasında birim hacim ağırlık üniformluluğunu sağlamak için birkaç ek vuruşla ütöleme yapılır. Eğer tokmaktama sonunda bir noktada beliren krater hacmi yanlarda şişme yapan hacme oranlanırsa yöntemin verimi hakkında bilgi edinilir. Başarı bu oranın büyüklüğü ile değerlendirilir. Bu yöntemin ekonomik açıdan verimli olabilmesi için işlem görecekt alanın kumlarda 5000, doymun olmayan ortamda 15000 m<sup>2</sup>'den büyük olması gerekmektedir (Karakayalı 2002).

Zeminin ıslah derecesi uygulanan enerjinin büyüklüğüne bağlıdır. Uygulama enerjisi tokmak ağırlığının, düşme yüksekliğinin, düşme sayısının ve nispeten de tatbik aralığının bir fonksiyonudur. Bilindiği gibi enerji Joule(J) = N-m veya kg-m veya "ağırlık x mesafe" olarak tanımlanır. Uygulama enerjisi J/m" olarak alınır (Tunç 2002).



Şekil 4.6 Dinamik Kompaksiyon



Şekil 4.6 da D=ıslah derinliđi, metre; W= tokmak ađırlıđı, ton ve H= tokmak dūşü yūkseklıđi, metre olarak ifade edilir. Dinamik kompaksiyon için etki derinliđine bađlı olarak W ve H deđerleri, uygulama enerjisi, dūşü aralıđı ve dūşme sayısı, geçiř sayısı gibi hususların bilinmesi gerekir.

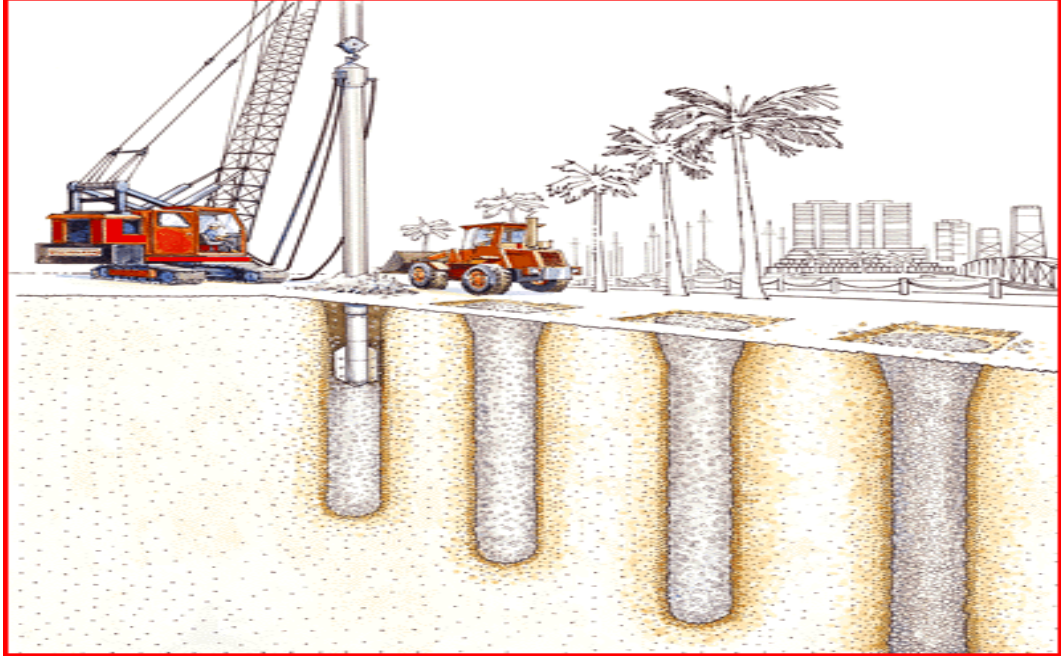
Eđer yūksesk enerji tatbik edilirse zemin yūzeyinde 1- 1,5 metre derinliđinde çukurlar oluřmaktadır. Bu çukurların dozer ile dūzeltilmesinden sonra yūzeyde gevřek bir tabaka oluřtuđundan dolayı bu tabakanın yođunluđunu artırmak amacıyla plaka řeklindeki daha hafif tokmaklar ile daha az yūkseklikten dūřürölmek sureti ile ütüleme yapılmaktadır. Dolayısıyla toplam uygulama enerjisi dinamik kompaksiyon ile ütüleme kompaksiyonunda sarfedilen enerjinin toplamı olmalıdır. Eđer ukur derinlikleri az ise dūzeltmeden sonra konvansiyonel kompaksiyon makineleri ile kompaksiyon yapılabilir.

#### 4.2.1.2 Vibroflotasyon

Bu gruba giren yöntemlerde zemine içi boř ya da dolu bir sonda yūksesk frekanslı hareketle sokulur ve sıkılaşma torpido şekilli sondanın dışarı alınması sonucunda olur. Bazı metotlarda sondanın çekilmesi sırasında kuyuya çakıl ya da kırmataş doldurularak sıkıştırılan kitleye rijitlik sağlanır. Bu yöntemlerde olağan etki derinliği 20 m dir.

Titreřimli sondajla sıkıştırma fikri 1930'larda Almanya'da Steuerman ve Keller tarafından geliştirilerek uygulamaya konulmuştur. Terraprobe, ya da vibro-probe patentli adlarıyla gūnümüzde uygulanan teknikte 76 cm çaplı içi boř elik sonda istenilen sıkıştırma derinliğinden 3-5 m daha derine titreşimli kazık akıcı ile itilir. Birimin frekansı 15 Hz ve dūřey genliği 10-25 mm dir. Saatte 1-3 m aralıklı 15

sondalama yapılabilir. Buna benzer bir başka yöntem içi boş ve dibi klapeli sonda kullanılmaktadır. Sonda açık olarak kuma indirildikten sonra, darbe başlığında titreşimlerin başlamasıyla kapaklar kapatılır. Kum bu sırada sıkılaşmaktadır.



Şekil 4.7 Vibroflotasyon (<http://www.nicholson-rodio.com> ,2002)

Vibroflotasyon olarak bilinen metot verdiği iyi sonuçlar yanında yoğun reklamlar sayesinde en çok tanınan işlem olarak belirmiştir. Şekil 4.8'de görülen düzen vibratör-sonda, ek tüpler ve kontrol vinci olarak üç bölümden oluşur. İçi boş olan vibratör gücü düşey eksen çevresinde eksantrik dönen ağırlıktan almaktadır. Çizelge 4.2'de vibroflot ve terraprobe'un özellikleri karşılaştırılmaktadır. Çatışma frekansı 30-50 Hz arasındadır. Sonda yaklaşık 8 atmosfer basınç 3000 lt/dk ya kadar çıkabilen debide suyla zemine indirilir. İstenen derinliğe erişildiğinde su akımı azaltılıp sonda ucundan tepesine aktarılır ve yukarı doğru çekilirken daneli malzeme çukura doldurulur (Karakayalı 2002).

Japonya'da geliştirilen vibro-compozer yönteminde kaplama borusu istenen derinliğe vibratör yardımıyla indirildikten sonra dibine bir miktar kum

yerleştirilmekte ve içerisine basınçlı hava üfürülürken boru yukarı çekilmektedir. Sonra boru titreşimle tekrar geri itilip kumu sıkılaştırarak geniş bir ampule dönüştürmektedir. Bu işlem tekrarlanarak yüzeye varıldığında 60-80 cm. çaplı bir kum kazığı elde edilmektedir. SVS ve Toyomenka yöntemi olarak bilinen yöntemlerde benzer yoldan kumu sıkıştırırlar.

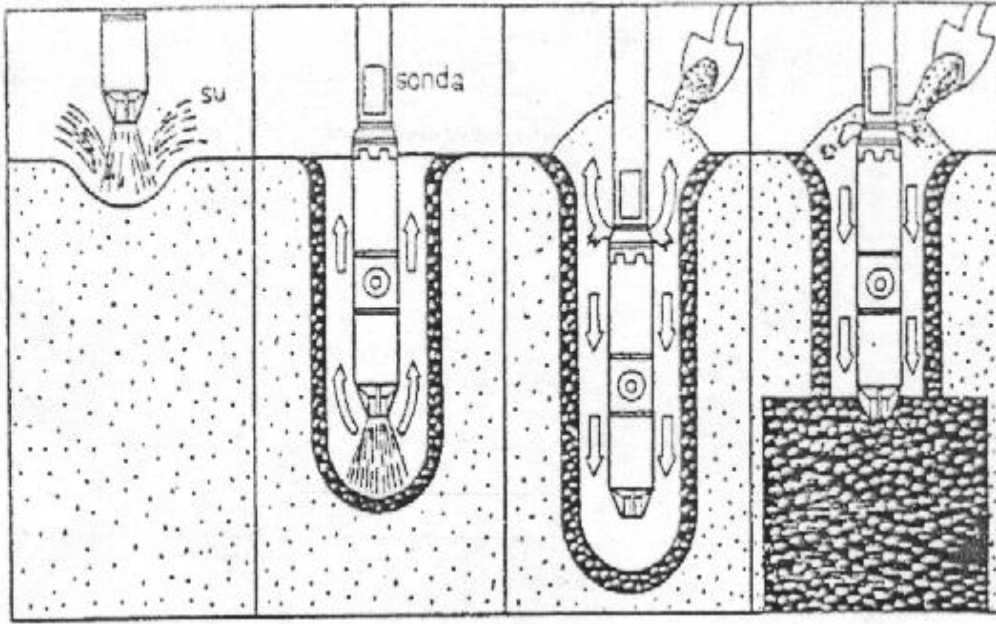
Çizelge 4.2 Kum Tabakasının Sıkıştırılması İçin Sonda

	Çap	Uzunluk	Ağırlık	Toplam Ağırlık	Frekans	Genlik	Hız Giriş- Çıkış
Vibroflot	41	210	1800	5400	1800	30	5 0,5
Terra-Probe	76	1370	-	9000	900	10 - 25	- -

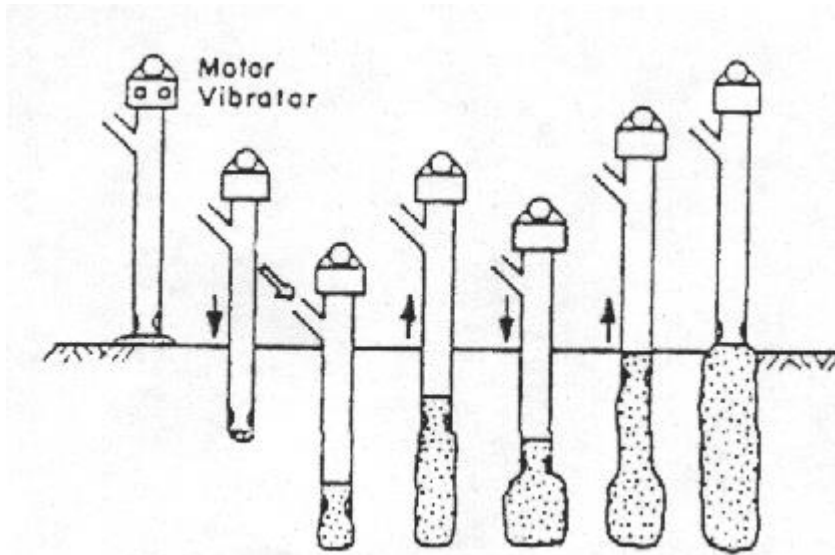
Zeminin sıkıştırılması sırasında kraterle doldurulan malzeme ile doğal malzemenin uyumluluğu stabilizasyon etkinliğini artırır. İri kum ince kuma oranla titreşimleri daha iyi ilettiğinden tercih edilir. Dolgu malzemesi uygunluk sayısı,

$$N_d = 1,7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}}$$

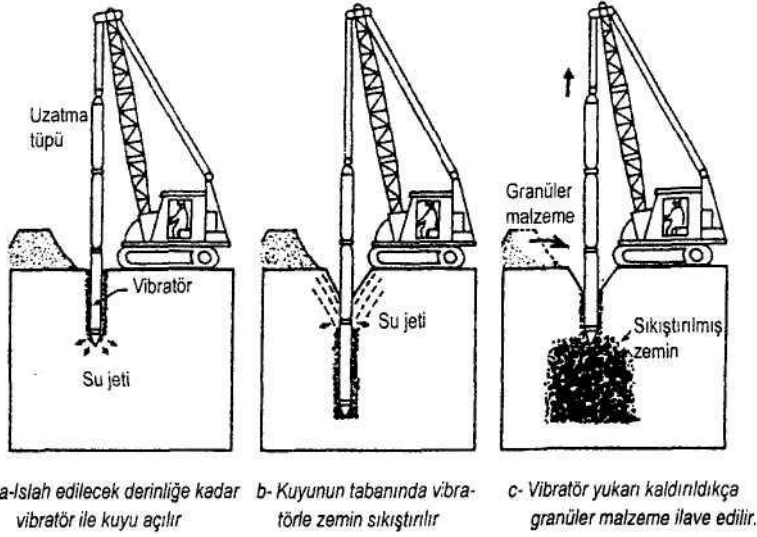
Dolgu malzemesi uygunluk sayısı olarak tarif edildiğinde 0-20 iyi, 20-30 orta, 30-50 katsayılı malzeme ise düşük uygunluk durumunu yansıtmaktadır. 50'den büyük N malzemesi dolgu için kullanılmaz.  $D_{50}$ ,  $D_{20}$  ve  $D_{10}$  mm. olarak dane dağılımı eğrisinden okunacaktır (Usta ve Çelikaslan 2002).



Şekil 4.8 Vibro – Flotasyon



Şekil 4.9 Vibro – Compozer Yöntemi



Şekil 4.10 Vibroflotasyon ile Gevşek Granüler Zeminlerin Kompaksiyonu (Tunç 2002)

#### 4.2.1.3 Patlayıcılar

Patlatma ile sıkıştırma yapışkanlığı az olan gevşek zeminlerde zemini oluşturan malzemenin daha küçük parçalara dönüştürülerek sıkıştırılmasının sağlandığı bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem ile bağlayıcı ve yapışkanlık özelliği az olan zemin bileşenleri patlatma etkisi ile yer değiştirerek ve daha küçük parçalara ayrılarak çıkan tozun da etkisi ile sıkışmaya uygun bir yapıya dönüştürülmektedir.

Patlama ile Olması Beklenen Zemin Davranışı

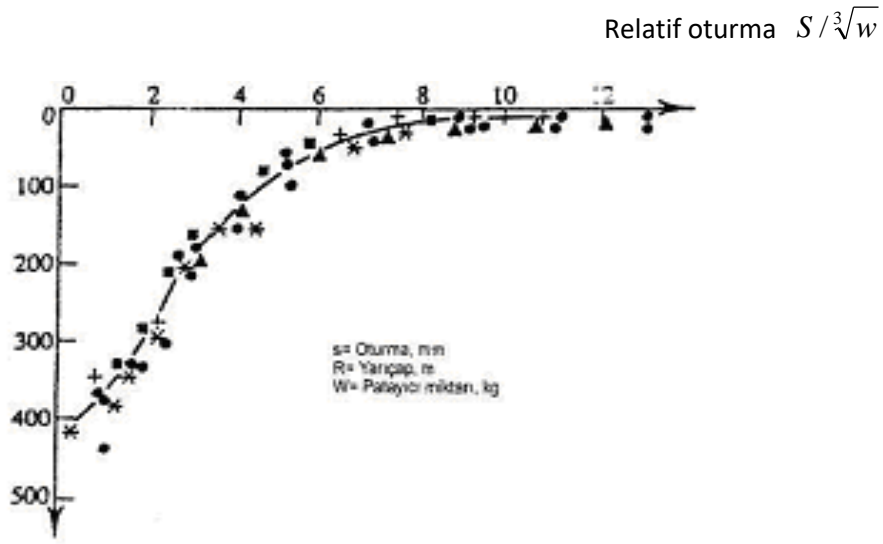
1. Yüzeysel işleme hazır bir yapıya hızla kavuşur
2. Patlatma işlemine tabi olmuş zemin penetrasyonu bir kaç hafta geçtikçe artmaktadır
3. Patlama etkisiyle zemin özellikle yüzeyde gevşeklik kazanabilir

#### Dikkate alınması Gereken Koşullar

1. Patlayıcılar sıkıştırılmak istenen zemin tabakasının yaklaşık 1/2 ila 3/4 derinliğine kadar yerleştirilmelidir.
2. Sıkıştırılması planlanan zemin test edildikten sonra patlatılacak mesafe aralığı 5-15 metre arasında tespit edilir
3. Patlatmalar aynı anda olmaz gecikmeli yapılmaktadır
4. Patlama noktalarının her biri bir kaç tane patlayıcı içermektedir
5. Başarılı bir sıkıştırma için patlayıcıların yerleştirilmesi bir kaç gün sürebilmektedir
6. İşlenecek zeminde kullanılacak patlayıcılar m<sup>3</sup> için gram olarak hesaplanır ve yukarıda yazdığı şekilde hesaplanarak yerleştirilir

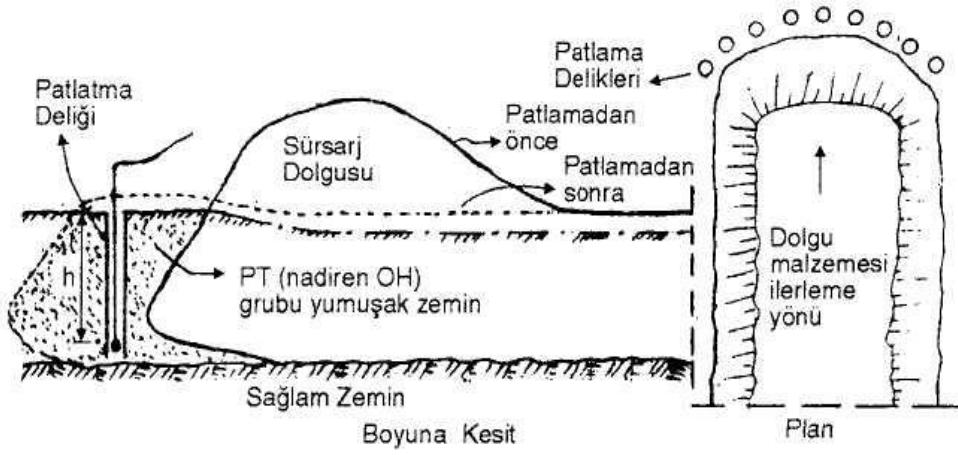
Patlatma ile sıkıştırma yapışkanlığı az olan gevşek zeminlerde zemini oluşturan malzemenin daha küçük parçalara dönüştürülerek sıkıştırılmasının sağlandığı bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem ile bağlayıcı ve yapışkanlık özelliği az olan zemin bileşenleri patlatma etkisi ile yer değiştirerek ve daha küçük parçalara ayrılarak çıkan tozun da etkisi ile sıkışmaya uygun bir yapıya dönüştürülmektedir. ( <http://www.sanayisiteleri.com> )

Granüler zeminlerde patlama ile kompaksiyonun başarılı olması için zeminin tam doygun olması gerekir. Eğer zeminde ne kadar fazla hava varsa kompaksiyonda o kadar yetersiz olmaktadır. Patlama tekniğinde belli aralıkta belli derinlikte zemin içine yerleştirilen patlayıcı maddeler çok kısa aralıklarla patlatıldığında daha iyi kompaksiyon elde edilebilmektedir. İlk patlamada toplam oturma miktarını %50 si ile %60 elde edilirken daha sonraki patlamalarda yaklaşık %20 si elde edilebilmektedir. Şekil 4.11’de zemindeki oturma ile patlayıcı miktarı arasındaki ilişki görülmektedir.



Relatif Yarıçap  $R/\sqrt[3]{w}$

Şekil 4.11 Oturma ile Patlayıcı Miktarı Arasındaki İlişkisi



Şekil 4.12 Alman Tekniği ile Patlama metodu

Şekil 4.12 de görüldüğü gibi yumuşak zemin patlama ile ötelenip yerine uygun kalitede dolgu malzemesi yerleştirilmektedir. Bunun için yumuşak zeminde açılan patlama deliklerine uygun miktarda yerleştirilen patlayıcılar ile ani şok yaratarak yumuşak zemin ötelenmekte ve yerine uygun kalitede malzemenin yerleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu teknik ile yapılacak zemin ıslahı için yumuşak zeminde 20-30 cm. çapındaki patlama delikleri sağlam zemine kadar açılır. Patlama delikleri, yumuşak zeminin kalınlığına bağlı olarak 5-25 cm aralıklarla teşkil edilir. Patlama deliklerinin tabanına 30-40 kilo patlayıcı madde konur ve aynı anda veya son derece kısa aralıklarla patlatılır. Patlama sonucu zayıf zemin ile uygun kalitedeki dolgu malzemesi yer değiştirir. Daha sonra patlama deliklerinin üzerine sürsarj dolgusu yapılıp ve işlem tekrarlanarak yol boyunca ilerlenir (Tunç 2002).

#### 4.2.1.4 Enjeksiyon



Temel zeminin veya ana kayanın kayma mukavemetini artırmak ve permeabilitesini azaltmak maksadıyla kaya veya zemin içerisine basınç altında çeşitli bileşimdeki karışımların basılmasına “enjeksiyon” denir. Şerbetleme ve grouting kelimeleri de enjeksiyon yerine kullanılabilir. Enjeksiyon ile zeminin veya kayanın boşlukları tamamen veya kısmen doldurularak danelerin birbirine kenetlenmesi sağlanır. Enjeksiyonla zemin ıslağı yaklaşık 200 yıldır uygulanmaktadır. Bu yöntemin bilinen ilk uygulaması 1802 yılında Fransa'nın Dieppe kentinde altı oyulmakta olan su yapısının altına kil ve kireç karışımının şırıngalanmasıdır. Bu tarihten sonra Londra metrosu (1870-1880) yapımında ve Panama kanalı açılışında. kalkerlerdeki karstik boşlukları doldurmak için su ile karıştırılmış (% 50-60) basınçla yeraltına verilmiştir. Türkiye’de 1950’lerden sonra baraj temeli geçirimsizlik perdelerinin ve tünel dolgularının (değme) enjeksiyonu yapılmıştır. Özellikle baraj inşaatlarında geniş uygulama sahası bulmuştur. Enjeksiyonun geoteknik mühendisliğindeki uygulama yerleri aşağıdaki şekildedir:

1. Geçirimsizlik perdelerinin teşkil edilmesinde, barajların altında cut - off oluşturulmasında (Perde Enjeksiyonu),
2. Aşırı oturmaların ve su kaçaklarının önlenmesi maksadıyla boşlukların doldurulmasında
3. Dinamit atımıyla gevşeyen temel kayasının üst kısımlarının sağlamlaştırılmasında (Konsolidasyon Enjeksiyonu),
4. Yapı ile ana kaya arasında kalması muhtemel boşlukların doldurulmasında (Kontakt Enjeksiyonu),
5. Tünel inşasında, tünel aynasının stabilizesinin sağlanmasında ve üst tabakalarda kemerleme sağlamak amacıyla,
6. Temel çukuru duvarlarının stabilizesinin sağlanmasında.
7. Komşu temellerin takviyesinde veya oturmuş temellerin tahsis edilmesinde,
8. Hacim değişmesi gösteren zeminlerde şişme ve büzülmenin azaltılmasında,

9. Gevşek kumlarda sıvılaştırmanın önlenmesinde,
10. Yer altı suyu düzeyi altındaki temel inşaatında kurutma ve destek işlerinden kaçınma,
11. Yanal toprak basıncını kısıtlama,
12. Kazıkların yanal yük kapasitesini artırma,
13. Yamaç stabilizesini sağlama,

Bu amaçlardan her hangi biri için enjeksiyon yapılacaksa orada bulunan zemin daneleri ve kayaçların;

- a) Türleri, ayırık ise boyutları, sıralanışları, çimentolanma dereceleri, litolojik ve birleşimleri
- b) Yapısal özellikleri, poroziteleri, boşlukları ve süreksizlikleri.
- c) Yer altı su düzeyi, debisi, basıncı, akış hızı ve bileşimi,
- d) Yüzey ve yer altı jeolojisi,
- e) Sondaj loğları (RQD, TCR) hazırlanmalı,
- f) Basıncılı su deneyleri yapıp yer altındaki kayaçların geçirimsizliğine (K. Lugeon değerleri) bulunmalı
- g) Gerekirse deneme enjeksiyonu yapılmalı

Bunlardan sonra enjeksiyon yapımına geçilmelidir. Enjeksiyonda genellikle;

1. Su içinde erimeyen, asılı kalan süspansiyon maddeleri (kireç, kil, çimento, uçucu kül)

2. Suya katılan yağlı sütsü emülsiyon (mulzere : süt haline getirmek) maddeleri (bitüm vb.)

3. Su içinde önce eriyen ve enjeksiyondan sonra kristalleşen maddeler kullanılmaktadır.

Enjeksiyon uygulaması üç ana gruba ayrılabilir: Sızıntı (permeasyon), kompaksiyon ve kaplama. Sızıntı grubunda şırınga edilen malzeme orta, iri kum boşlukları ve kayaç çatlaklarını doldurur. Ortamın hacminde değişiklik olmaz. Kompaksiyon enjeksiyonunda koyu bir sıvı kullanılır ve zeminde oluşan ampuller boşlukları doldurduğu gibi çevrede sıkıştırma görevi yapar. Kaplama tüm doğal olarak parçalanmış ya da topaklı ortama yüksek basınçta sıvı yollayarak gerçekleştirilebilir. Burada amaç boşluklara kadar girme yerine ayrı parçalar arasında oluşturulan mercceklerle kaplamanın gerçekleştirilmesidir. Şekil 4.13'de üç tür enjeksiyon hakkında bilgi verilmektedir. Özel amaçlarla yapılan çatlama ve doldurma enjeksiyonlar da burada hatırlatılmalıdır. Çatlama enjeksiyonunda geçirimsizliğin nedeni ile yeterli hızda şerbet almayan kayaç ve zeminlerde yeni akım yolları açma gözetilir Eski madenler, yer altı mağaraları ise doldurma enjeksiyonu ile tıkanabilir (Temel 2001).

#### Enjeksiyonda Kullanılan Malzemeler

Süper Akışkanlaştırıcılar: Enjeksiyon şerbetinin su oranının artması akışkanlığını yükseltir. Ancak su miktarı arttıkça enjeksiyon şerbetinde ayrışma görülür. Ayrışan su fazı, delik çeperlerindeki zemin tarafından emilirken, çimentolu faz suya doygun halden kuru hale dönüşür, içsel sürtünme artar ve delik blokajına yol açar. Ayrıca, yüksek su oranı nedeniyle mekanik dayanım düşük olur, boşluk miktarı artar, durabilite özelliği bozulur. Bu sakıncaları önlemek için enjeksiyon şerbetlerine akışkanlaştırıcı ve özellikle süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilir. Süper

akışkanlaştırıcılar ile enjeksiyon şerbetinin mobilitesi artırılarak delik çeperleri tarafından emilmeden hızlı bir şekilde akması sağlanırken, su azaltma etkisi sayesinde daha yüksek mekanik dayanım ve durabilite elde edilir.

**Priz Geciktirici Katkılar:** Enjeksiyonda kullanılan çimentonun priz yapmasını geciktirmek için kullanılan katkıdır. Çeşitli organik geciktiriciler, sodyum tri fosfat, tetrapotasyum piro-fosfat, sodyum hegzametafosfat gibi çeşitli fosfat bileşikleri bu amaçla kullanılmaktadır.

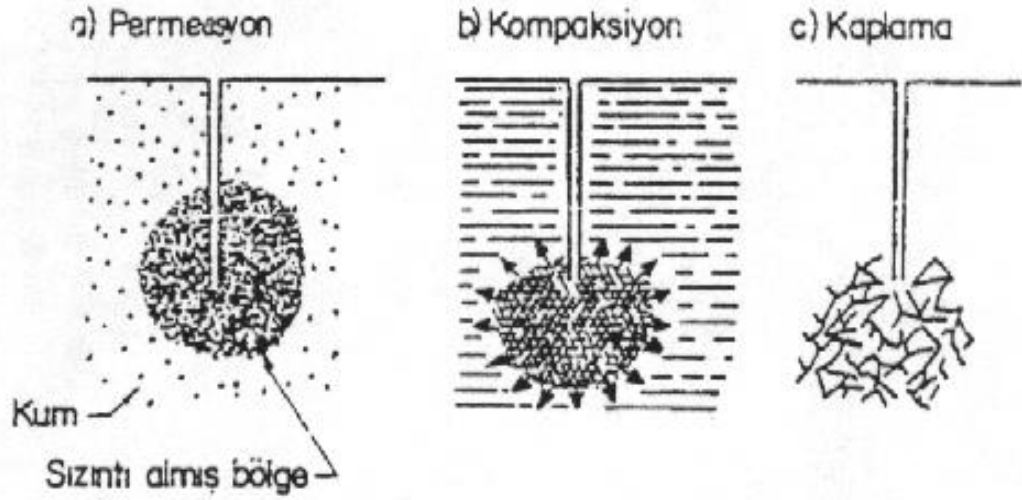
**Priz Hızlandırıcı Katkılar:** Donatı bulunmayan enjeksiyon işlemlerinde klorür esaslı katkılar da yine priz hızlandırıcı olarak kullanılabilir. Ayrıca sodyum ve alüminyum silikat türündeki anorganik silikatlar, sertleşme hızlandırıcı ve su tutucu özellik gösterirler. Ancak çimento ile beraber kullanıldığında silikatlarda ileri yaşlarda dayanımı düşürdüğü beyan edilmektedir (Parlak ve Sağlam 2003).

**Viskozite Düzenleyici Katkılar:** Enjeksiyon şerbetlerinde çökelmeyi önlemek, akışkanlığı sağlamak kadar önemlidir. Eskiden, bu amaçla karışıma yüksek oranda (çimentonun % 5'i) bentonit kili katılmakta idi. Böyle durumlarda, bentonit su gereksinimini artırmakta, bu da sertleşmiş enjeksiyon harcının dayanım ve durabilite özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak günümüzde, süper akışkanlaştırıcı katkılarla, bentonit oranı %0.5 ve su/çimento oranı da 0.60 mertebelerine indirilerek sorun çözülmeye çalışılmaktadır. Bentonit kili kayma eşiğini önemli oranda, plastik viskoziteyi ise nispeten düşük oranda artırmaktadır. Bu durumun bentonitin kaydına özelliğinden (yağlayıcı etki de denilmektedir) kaynaklandığı varsayılır. Plastik viskozite bulamacın akış hızını, kayma eşiği ise maksimum iletim boyunu belirler. Böylece bentonit akış sırasında şerbet hacmini sınırlar. Halbuki akışkanlaştırıcılar kayma eşiğini büyük ölçüde, viskoziteyi ise nispeten düşük düzeyde azaltırlar, sonuçta akış hızı artar ve enjeksiyon işlemi kısa sürede

tamamlanır. Bu durum bentonitin yağlayıcı etkisinin akışkanlaştırıcı katılması kadar önemli olmadığını anlamına gelmemelidir. Çünkü bentonitin bulamaç stabilitesini sağlama işlevinin hala geçerli olduğu kabul edilmelidir. Özellikle kaya çatlaklarının geniş olması durumunda bulamaca ince kum katılması yoluna gidilir. Bu tür kumlu enjeksiyon harçlarına yaklaşık %0.5 oranında bentonit katılması çökelmeyi önler (Parlak ve Sağlam 2003).

Çimento: Çimento, enjeksiyonda bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Normal portland yanında cürüflu veya sülfata dayanıklı çimento kullanılması da mümkündür. Çökelmeyi önlemek için bentonit dışında başvurulan yollar çimento dozajını artırmak ve daha ince taneli çimento kullanmaktır.

Enjeksiyonun en çok uygulandığı alan kuşkusuz baraj temelleridir. Alüvyonlu zeminler ve gözenekli kayalarda baraj güvenliğinin korunması için enjeksiyon programının uygulanması zorunlu olur. Türkiye’de bir çok projede başarıyla uygulanan bu yöntem Hirfanlı’dan başlayarak DSİ örgütünün üstün başarı kazandığı konulardan birisi olarak belirmiştir. En çok kullanılan enjeksiyon malzemesi çimento türleri, bentonit, silikatlar ve son yıllarda rağbet bulan lignin, akrilamid, rezorsinol, formol gibi kimyasal bileşimlerdir. Şekil 4.13’de bu malzemelerden bazılarının özellikleri ve uygulanabilecekleri zeminler gösterilmektedir. Görüldüğü gibi permeasyon enjeksiyonu orta limitine kadar kısıtlı olmaktadır (Usta ve Çelikaslan 2002).



Şekil 4.13 Enjeksiyon Tipleri

Bugüne kadar özellikle alüvyonlar üzerine inşa edilen barajlarda yüzlerce metre uzunlukla ve derinlikte, içlerinde yer altı su akımı olan zeminleri geçirimsiz hale getirmek amacıyla yapılan enjeksiyon işleri ayrı bir uzmanlık alanı doğurmuştur. Barajlarda yapılacak perde derinliği;

$$d = \frac{1}{3h} + c \quad (4.8)$$

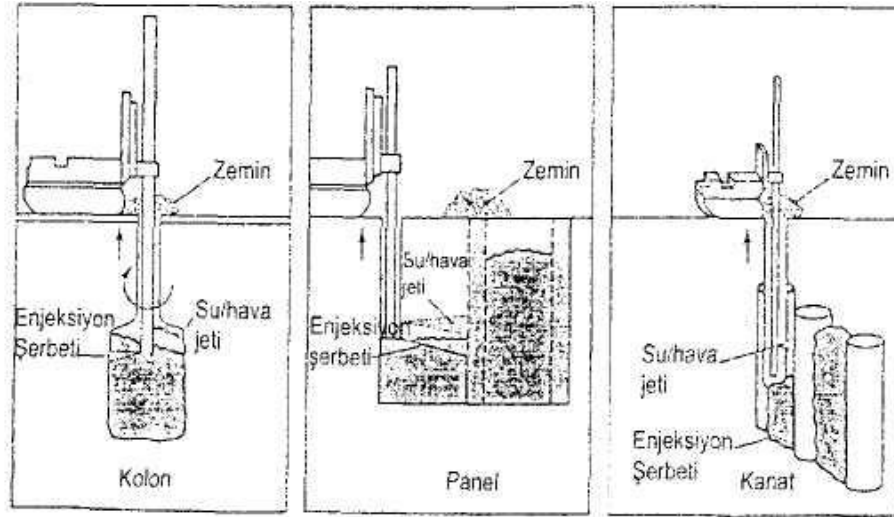
ampirik formülü ile bulunmaktadır.

d : delik derinliği, h : delik ağzından itibaren baraj yüksekliği (m), c : katsayı (zayıf kayalarda 23, sağlam kayalarda 8 alınır).

Bu derinlik genellikle  $1/3h - 2/3h$  arasında değişmektedir. Uygulanacak basınç

$P = (5 + 0.5)h \text{ kg/cm}^2$  ampirik formülü ile bulunur.  
(4.9)

Alüvyonlarda, çatlaklı, tabakalı ve masif kayalarda basınç miktarı, enjeksiyon yapılan Zeminin yoğunluğuna ve enjeksiyon maddesi özelliklerine göre bazı ampirik formüllerle bulunur (Temel 2001).

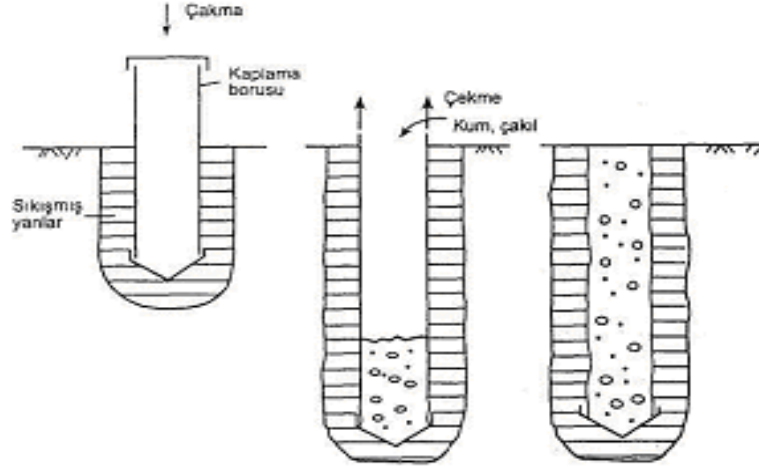


Şekil 4.14 Jet Enjeksiyon Uygulamaları (Tunç 2002)

#### 4.2.1.5 Kompaksiyon Kazıkları

Kompaksiyon kazığı, gevşek taneli zeminlerde, ucu kapalı kaplama borusunun zemine çakılması, içi doldurulurken ucun yerinde bırakılarak, kaplama borusunun yukarı çekilmesi esasına dayanır (Uzuner 2000).

Kaplama borusu zemine girerken, hacmi kadar zemini yanlara iterek çevre zemini sıkıştırır. Ayrıca çakma ile oluşan titreşimler, taneli zemini sıkıştırır (Şekil 4.15).



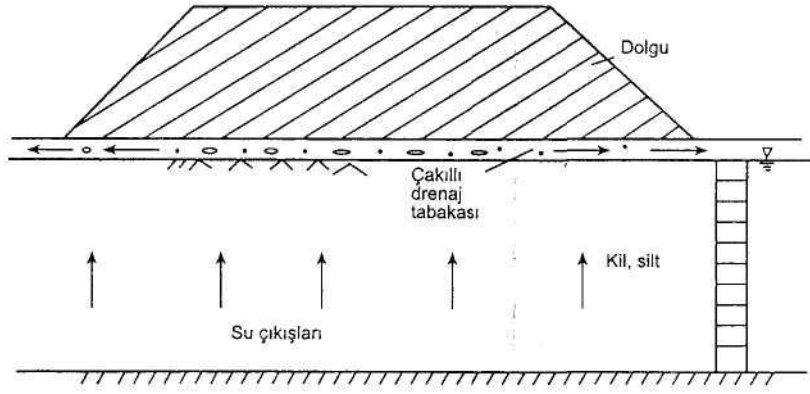
Şekil 4.15 Kompaksiyon Kazıkları

## 4.2.2 Kohezyonlu Zeminler

### 4.2.2.1 Ön Yükleme Yöntemi

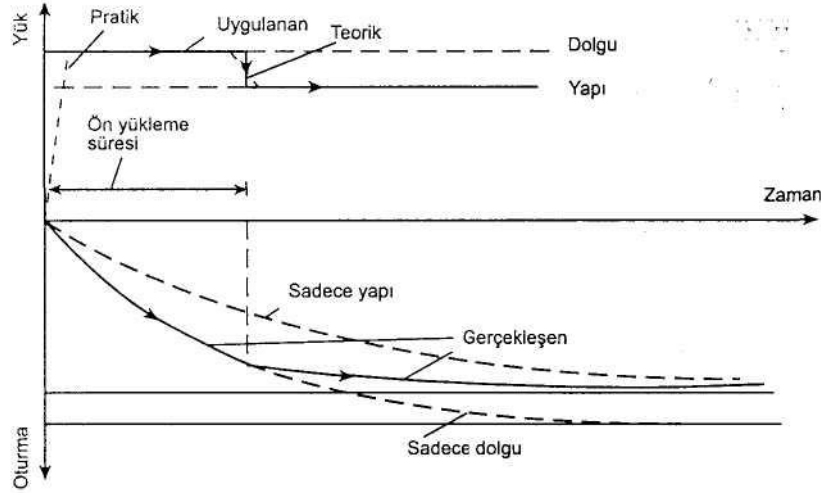
Özellikle suya doymun kohezyonlu zeminlerde; taşıma gücünü artırmak, muhtemel oturmaları azaltmak için; zemin üzerine bir yük yerleştirilerek, bir süre (birçok aydan, birkaç yıla kadar) beklenilir (Şekil 4.16). Böylece zemin konsolidasyona uğratılır (Uzuner 2000).





Şekil 4.16 Ön yükleme yöntemi

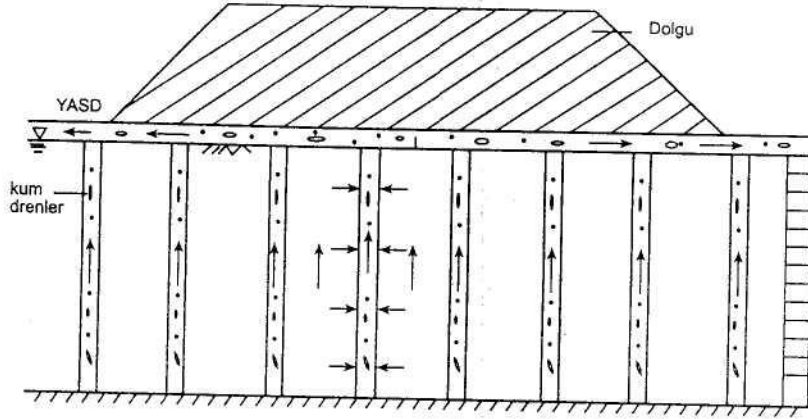
Yük olarak, genellikle, kum, çakıl dolgu kullanılır. Tipik yükseklik 3-8 m olabilir. Bazen de,- içi su doldurulan tanklar veya, taban ve yanlar geçirimsiz örtü ile kaplı su dolu havuzlar vb. ile yükleme yapılabilir. Bu yöntemde, oturma-yük-zaman ilişkisi, şekil 4.17 da görülüyor. Belli bir süre sonra dolgu kaldırılarak, yerine yapı inşa edilir.



Şekil 4.17 Ön yüklemede, oturma-yük-zaman ilişkisi

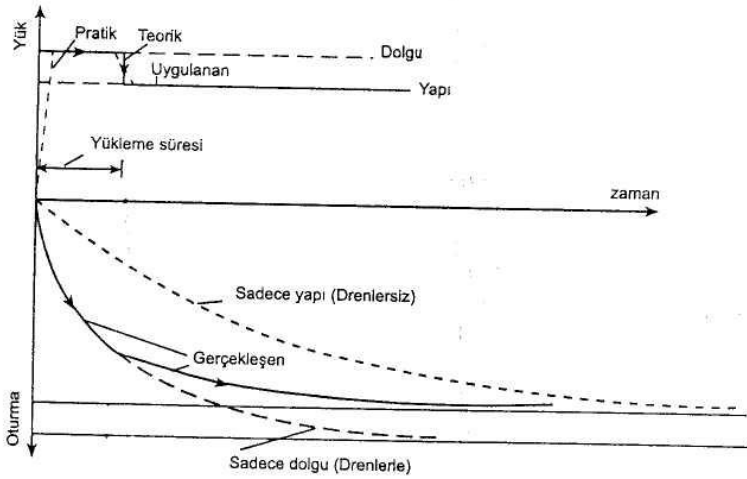
#### 4.2.2.2 Kum Drenleri Yöntemi

Bazı çok ince taneli zeminlerde, ön yükleme süresi çok uzun olabilir (3-5 sene gibi). Bu süreyi kısaltmak (konsolidasyonu hızlandırmak) için; zeminde aralıklarla kum drenleri oluşturulur. Bunun için, ucu kapalı bir kaplama borusu zemine çakılarak veya en iyisi ucu açık bir kaplama borusu, içi boşaltılarak, zemine indirilir. Kaplama borusu çekilirken, içine kum, çakıl (filtre malzemesi) doldurulur. Drenlerin çapı, tipik olarak 30-60 cm olabilir (Şekil 4.18). Planda, kare veya üçgen örnekte, bir kaç m ara ile oluşturulurlar. Son yıllarda, hazır drenler (plastik veya kağıt drenler) kullanılmaya başlandı. Bunlar, yaklaşık 10 cmx0.4 cm enkesitli olup, makaraya sarılmış olarak, özel aletlerde, zemine sokularak, aralıklarla yerleştirilmektedir. Bunlar, kum drenlerine göre, daha hızlı inşa edilebilmektedir (Uzuner 2000).



Şekil 4.18 Kum drenleri yöntemi

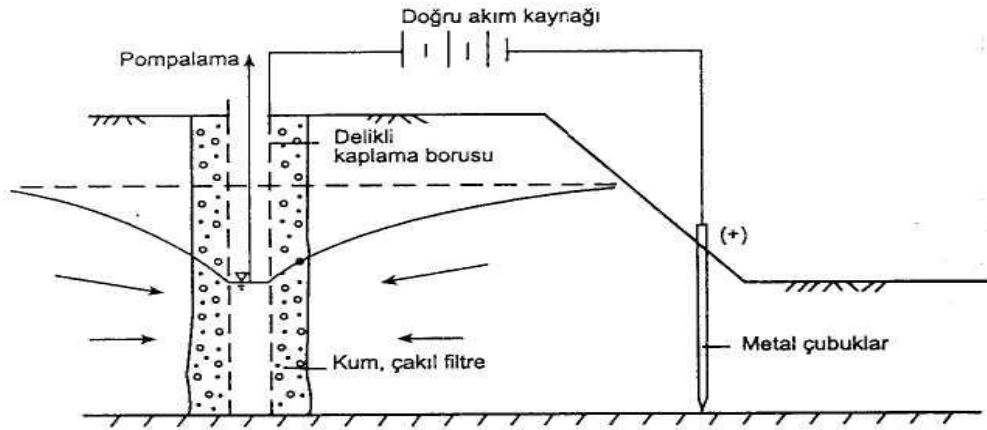
Dolgu altında, zemindeki suyun bir kısmı düşey doğrultuda çıkarken, daha büyük bir kısmı yatay olarak drenlere doğru akmakta oradan da dışarıya gitmektedir. Böylece, konsolidasyon hızlanmakta konsolidasyon süresi bir kaç kat azaltılmaktadır. Bu yöntemde, tipik, oturma-zaman-yük ilişkisi, Şekil 4.19 da görülmektedir.



Şekil 4.19 Kum drenleri yönteminde oturma-zaman-yük ilişkisi

#### 4.2.2.3 Elektro-Osmoz

İnce taneli zeminlerden suyun uzaklaştırılması (drenaj) diğer yöntemlerle zordur. Çünkü, böyle zeminlerde, taneler arası boşluklardaki su, serbestçe akıp uzaklaşamaz. Böyle zeminlerde, su, elektriksel yöntemle uzaklaştırılır. Bunun için - kutup (katot) işlevini gören delikli kaplama borulu kuyular ile, + kutup (anot) işlevini gören metal çubuklar, aralıklarla, karşılıklı olarak zemine yerleştirilerek bunlar arasında, bir batarya vb. ile doğru akım oluşturulur (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 Elektro-osmoz yöntemi

#### 4.2.2.4 Isıl İşlemler

Dondurma Yöntemi:

Temel shaft (kuyu) ve tünel gibi kazıların yapıldığı ortamlarda oluşturulan kazı duvar ve tavanları kendini tutamayacak kadar zayıf olan zeminlerde duyarlılığın sağlanması için uygulanan geçici bir yöntemdir. Zemin ya da kayaç dondurulduğu süre içinde yüksek kayma direnci kazandığı bilinmektedir. Kayma direncindeki

artma zemin ya da kayacın içerdiği suyun donması sonucudur. Dolayısıyla burada dikkat edilmesi gereken iki husus vardır. Birincisi dondurulmak istenen ortamın ısı durumunun bilinmesi gerekir. Örneğin derin (et kalınlığı fazla) ya da magmatik faaliyetlere yakın yerlerde açılan tünellerde ısı oldukça yüksektir. Yüzeyde yapılacak kazılarda böyle bir durum söz konusu değildir. İkincisi ise zeminin ya da kayaç dondurulduğunda yani içindeki su buz haline geldiğinde artan hacme bağlı olarak oluşacak gerilmelerin duyarlılık üzerindeki etkisinin önceden bilinmesi gerekir. Genel olarak yer altı su akımının olmadığı ( $2\text{m}^3/\text{gün}$ 'den az) her ortamda dondurma yolu uygulanabilir, ancak maliyeti yüksek olur. Yumuşak zeminlerde, 7-8 m derinliklerde. ekonomik olarak uygulanabilir ancak önemine göre bu derinlik arttırılabilir (Usta ve Çelikaslan 2002).

**Piştirme Yöntemi:**

Piştirme yöntemi, zemin ve kayaçların içerdiği suyun sıcaklıkla ( $110^\circ\text{C}$  de) buharlaştırarak ya da zemini pişirerek geçici ve kalıcı olarak uygulanan bir yöntemdir. Löss başta olmak üzere doygun olmayan silt ve killer ortam sıcaklığının olağan üzerine çıkarılmasıyla kuvvetlendirilebilir. Bu usulde de amaç zeminlerin içsel sürtünme açısını ( $\phi$ ) ve kohezyonunu ( $c$ ) arttırmaktadır. Özellikle killer  $400-600^\circ\text{C}$  ye kadar ısıtıldıklarında rutubet almayacak kadar değişikliğe,  $900^\circ\text{C}$  ye kadar ısıtıldıklarında ise tuğlaya dönüşmektedir. Piştirme sonucunda killerin plastisitesi kaybolmakta ve basınç dirençleri artmaktadır (Usta ve Çelikaslan 2002).

### **4.3 Şişebilen Zeminlerin Stabilizasyonu**

Genleşen killerde şişme mekanizması komplekstir. Birçok faktörden etkilenmektedir. Genleşme iç gerilme dağılımını bozan zemin suyunun miktarındaki değişikliklerin bir sonucudur. Şişme mekanizmasını etkileyen faktörlerin başında plastisite ve yoğunluk gibi zeminin fiziksel özellikleri yer alır. Zeminin büzülme-şişme potansiyelini etkileyen faktörleri zemin karakteristikleri , çevresel faktörler ve gerilme durumu olarak inceleyebiliriz (Ünal 1999).

Bir kil zeminin şişme potansiyeli değişik önlemler alınarak düşük seviyelere indirilebilir. Bu önlemler arasında yerindeki zeminde inşaat öncesi şişmeyi sağlayacak şekilde ön ıslatma yapılması sıkıştırma kontrolü ile zemin sıkılığının azaltılması şişen zeminin şişmeyen zeminle yer değiştirmesi sürşarj uygulaması ve kimyasal katkıların kullanılması en sık kullanılan yöntemleri oluşturmaktadır. Ayrıca su muhtevası değişmeyecek şekilde gerekli temel izolasyonunun yapılması da şişme potansiyelinin önlenmesi doğrultusunda zeminde uygulanan tasarım önlemleri olarak dikkate alınır. Günümüzde bu yöntemler verimliliği ekonomisi ve kolay uygulanabilirliği yönünden değerlendirilmektedir (Türköz 2001).

Çizelge 4.3 Şişen Zemin Özellikleri ve Yapılan Çalışmalar (Ünal 1999)

FAKTÖR	AÇIKLAMA	REFERANSLAR
Kil Minerolojisi	Hacimsel değişime yol açan kil grupları montmorillonitler, vermikülitler ve bazı karışık katmanlı minerallerdir. İllitler ve kaolinitler, genelde genleşmezler, fakat partikülleri çok ince olursa hacimsel değişikliğe yol açabilirler.	Grim (1968); Mitchell (1973-76) Snethen (1976) vb.
Zemin Suyu Kimyası	Şişme, artan katyon yoğunluğu ve değerliği ile azalır. Örneğin, suyun içindeki Na+1 iyonları Mg+2 iyonlarına	Mitchell (1976)

	göre daha fazla şişmeye sebep olurlar.	
--	--	--

Çizelge 4.3 (Devam) Şişen Zemin Özellikleri ve Yapılan Çalışmalar (Ünal 1999)

Plastisite	Yüksek su muhtevasına ve likit limitlere sahip zeminler daha çok şişme ve büzülme eğilimi gösterirler. Plastisite genişlemenin bir belirleyicisidir.	
Zemin Yapısı ve Fabrik	Folüküle killer, dağılmış killere nazaran daha çok genişirler.	Jonson ve Sneathen (1978) vb.
Kuru Yoğunluk	Yüksek yoğunluklara sahip zeminlerde partiküller arası itme kuvvetleri daha çok olur ve daha çok şişerler.	Chen (1973), Uppal (1965)

#### 4.3.1 Ön İslatma Yöntemi

Şişebilen zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan en eski yöntem olup şişebilen zemini doygunluk derecesine kadar ıslatıp maksimum şişme sağlanır. Bu amaçla şişebilen zemin üzerinde bir göllenme yaratarak veya dolguda kullanılacak şişebilen zemini malzeme ocağında ıslatarak maksimum şişme sağlanır. Ön ıslatma yönteminde aşağıdaki hususlar göz önünde tutulmalıdır.

1. Şişebilen zemin üzerinde göllenme yaratarak zeminin su muhtevası en az 30 gün ama permabilitesi düşük zeminlerde 1 yıldan fazla süre gerekebilir.

2. Şişmenin sağlanması için zeminin su muhtevasının PL'den en az %2 ila %3 daha fazla olmalıdır.
3. İslatma süresini azaltmak için zeminde derin hendekler veya belirli aralık ve derinlikte düşey kum drenler açılabilir.
  4. Çok çatlaklı ve kuru zeminler için daha uygundur.
5. Şişme için gerekli süre su muhtevasının artışı için gerekli süreden daha fazla olabilir.
6. Çatlaksız ve sıkı killerde etkin olmayabilir.
7. Zeminin üst kısmındaki aşırı su içeriği ileriki yıllarda alt kısımda şişmeye neden olabilir.
8. Zeminin üst kısmında taşıma gücü azalacağından dolayı 20 ila 30 cm kalınlığında granüler tabaka yapılarak veya kireçle stabilize edilerek ağır iş makinalarının çalışması için platform oluşturulması gerekir.
9. Zemin yüzeyinde suyun buharlaşmasını önleyici tedbirlerin alınması gerekebilir.
10. Diğer yöntemlere göre daha basit ve daha kolay olsa da daha ekonomik olmayabilir veya çok uzun süre gerektiğinden dolayı uygun bir yöntem olmayabilir (Tunç 2002).

#### **4.3.2 Zemin Değişirme Yöntemi**

Şişebilen zemin kazılıp atıldıktan sonra yerine uygun bir malzemedan geri dolgu yapılması şişebilen zeminlerin stabilizasyonu için en basit bir yöntem olarak görünse de kazı geri dolgu miktarı artıkça en pahalı yöntem olabilmektedir. Zemin değişirme yönteminin başarılı olabilmesi için aşağıdaki hususların göz önünde tutulması gerekir.



1. Şişme ve geçirgenlik özelliği olmayan geri dolgu malzemesi ekonomik olarak temin edilmelidir.

2. Geri dolgu malzemesi en az 90 cm tercihen 120 cm kalınlıkta olmalıdır.

3. Geri dolgu malzemesini şişebilen zeminden daha fazla sıkıştırılarak taşıma gücü artırılmalıdır.

4. Geri dolgu malzemesi granüler ise suyun şişebilen zemine gitmesi veya su birikiminin oluşmasını önlemek için gerekli tedbirler alınmalıdır.

5. Kabarmalar daha üniform olmaktadır (Tunç 2002).

#### **4.3.3 Kompaksiyon Sıkışma Kontrolü**

Bilindiği gibi şişebilen zeminlerin kuru yoğunluğu artıkça şişme potansiyeli de artmaktadır. Bu nedenle şişme potansiyeli yüksek zeminlerin aşırı sıkıştırılmaları şişme miktarını ve/veya şişme basıncında artıracığından dolayı problem yaratmaktadır. Şişebilen zemin az sıkıştırılacak olursa şişme azalmakta fakat bu defa zamana bağlı oturmalar artmakta ve taşıma gücü ile kayma mukavemeti azalmaktadır. Tipik şişebilen bir zeminin yoğunluğu %10 azaltılırsa şişme basıncı ve miktar: %2,6 kadar azaltabilmektedir. Ayrıca şişebilen zeminler pnömatik ve keçiayağı gibi silindirler ile sıkıştırıldıklarında örselenerek demir bandajlı silindirlere nazaran daha az şişme basıncı göstermektedir. Şişebilen zeminler optimum su içeriğinden %1 ila %3 daha ıslak ve şartnamede belirtilen minimum sıkışma yüzdesinde sıkıştırıldığında daha az şişme göstermektedir.

Şişebilen zeminlerin kompaksiyon ile stabilizasyonunda aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

1.Şişme potansiyeli düşük zeminler için diğer yöntemlere nazaran daha ekonomik ve kolaydır.

2.Şişme potansiyeli yüksek zeminler için tek başına uygun değildir.

3.Şişme potansiyeli düşük, kuru yoğunluğu yüksek, doğal su muhtevası düşük ve çatlaklı yapıdaki zeminler için daha uygundur (Tunç 2002).

#### **4.3.4 Kireç Stabilizasyonu**

Zeminde oluşacak şişmeyi en düşük seviyeye indirmek ve zeminin işlenebilirliğini artırmak amacıyla çoğu projede özellikle karayolu projelerinde başarıyla kullanılmıştır. Kireç reaksiyonunu açıklayan kimyasal teoriler oldukça karmaşıktır. Tüm ince taneli zeminler kireç kullanımı suretiyle daha düşük plastisiteye ve daha iyi işlenebilirliğe sahip olacak şekilde dönüştürülebilir. Kireçle işleme tabi tutulmuş zeminin dayanım karakteristikleri esas itibarıyla zemin cinsine, kullanılan kirecin tipine, kireç yüzdesine ve kür koşullarına bağlıdır (Türköz 2001).

Derin zeminlerde kireç stabilizasyonu için 1,2 - 1.5 metre aralıklarla 15 - 30 cm çapında 75 – 125 cm derinlikte açılan deliklere kireç bulamacı katılarak basınçlı kireç enjeksiyonu yapılmalıdır (Tunç 2002).

Şişen killerin stabilizasyonu için kullanılan değişik kireç tipleri bulunmaktadır. Bu kireçler arasında kalsiyum yönünden zengin sönmüş kireç ve sönmemiş kireç pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Şişen killerin stabilizasyonu için gereken kireç miktarının ağırlıkça %2-8 arasında değiştiği ifade edilmektedir (Türköz 2001).

Kireçle stabilize edilen şişebilen zeminlerde permabilite ve kayma mukavemeti artarak zeminin özellikleri iyileşmektedir. Zeminin mukavemet kazanması için en az 10-14 gün boyunca ısının 21°C üstünde olması gerekir. Kirecin katılması sırasında zeminin su içeriği yüksek olmalıdır. Kireçle stabilize edilen zeminlerin yüzeysel ve yüzey altı sularına karşı korunması gerekir. Aksi halde kireç yıkanarak yok olmaktadır (Tunç 2002).

#### **4.3.5 Çimento Stabilizasyonu**

Portland çimentosunun hidratasyonu değişik bileşik ve jeller oluşturan karmaşık bir puzolonik reaksiyondur. Kil ile çimento karışımının sonuçları kireç-kil karışımının sonuçları ile benzerlik taşımaktadır. Bu uygulama ile likit limit plastisite indisi ve zeminin hacim değişikliği potansiyeli azaltılır ve rötre limiti ile kayma dayanımı artırılır. Yüksek plastisiteli killer için portland çimentosu kireç kadar etkili değildir. Kireç ile iyileştirilemeyen zeminlerde genellikle çimento kullanımı başarılı olmaktadır. %2-6 arasında çimento muhtevası zeminin yarı rijit bir kaplama gibi davranmasını sağlar. Ancak çimento ile stabilize edilen malzemenin çatlama eğilimi vardır ve kullanımdan önce bu dikkate alınmalıdır (Türköz 2001).

### **5.MATERYAL VE METOT**

#### **5.1 Materyal**

Zemin numuneleri, Afyon şehir merkezi ve çevresindeki beş farklı noktadan alınmıştır. Bu numunelerin iki tanesi Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer Kampüsünden, diğerleri ise merkezden (Dumlupınar, Ataköy ve Uydu Kent )

temin edilmiştir. Alınan bu numunelerin mermer tozu katkısı ile stabilizasyonu araştırılmıştır. Bu amaçla numunelerin öncelikle tanımlama ve sınıflandırma özellikleri TS 1900 esasında belirlenmiş, kompaksiyon karakteristikleri bulunmuş ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Stabilizasyon katkı maddesi olarak atık mermer tozu kullanılmıştır. Atık mermer tozu Afyon – Ankara karayolu üzerindeki büyük bir mermer tesisinden elde edilmiştir. Atık mermer tozu mermerin işlenmesi sırasında ortaya çıkmaktadır. Zeminin kuru ağırlığının belirli bir yüzdesi olarak katkı maddesi karıştırılmıştır. Bu karışım, literatürdeki benzer malzemelerle yapılan çalışmalardaki oranlarda dikkate alınarak % 3-5-8-10 olmak üzere oluşturulmuştur. Bu yüzdelerden elde edilerek hazırlanan deney serileri üzerinde deneyler gerçekleştirilerek numunelerde meydana gelen değişimler ölçülmüştür.

## **5.2 Metot**

### **5.2.1 Su Muhtevasının Belirlenmesi**

Bu deney zemin numunelerinin su muhtevasının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Zemin laboratuvar deneyleri içinde en sık kullanılan ve belirlenmesi en kolay olan su muhtevası; bir zemin numunesinin içerdiği su ağırlığının, aynı numunenin kuru ağırlığına oranı olarak tanımlanır ve yüzde olarak ifade edilir. Yapılan deney yönteminde TS 1900 'de belirtilen hususlar dikkate alınmıştır.

Önceden numara verilmiş numune kapları 0.01 gr hassaslığındaki bir terazide tartılır. Bu ağırlıklar tara ağırlıkları olarak kaydedilir ( $W_1$ ). Islak zeminden bir parça alınarak kaba koyulur ve su muhtevasının değişmemesi için hemen

tartılır. Ağırlık  $W_2$  olarak kaydedilir. Sonra kap ve ıslak zemin etüve konularak sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilir. Bu süre genellikle 12 - 24 saat arasında değişebilir. Sabit ağırlığa gelen zemin etüvden alınarak hemen tartılır, ağırlığı  $W_3$  olarak kaydedilir. Daha sonra formülde yerine konarak zeminin su muhtevası belirlenmiş olur (Akbulut vd. 2003).

$$w = (W_2 - W_3) / (W_3 - W_1) \times 100$$

(5.1)

### 5.2.2 Özgül Ağırlık Deneyi

Özgül ağırlık zeminin tane birim hacim ağırlığının 20 °C sıcaklığındaki suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak ifade edilebilir.  $G_s$  sembolü ile gösterilir.

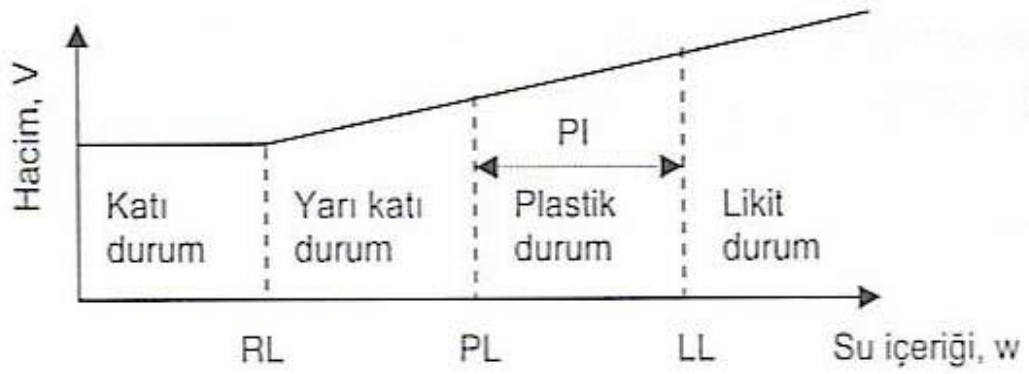
Bir zemin mekaniği laboratuvarında özgül ağırlık değerine genellikle konsolidasyon deneyinde boşluk oranlarının hesaplanması için ve hidrometre veya pipet deneylerinde tane çaplarının ve toplam geçen yüzdelerin hesaplanması için gerekmektedir (Orhan vd. 2004).

Numune 105°C'de tamamen kurutulur. Kurutulmuş numune elle veya tokmak yardımı ile ufalanır. Ufalanmış olan numunedan 50 gr. alınır ( $W_1$ ). Numune piknometreye boşaltılır ve üzerine damıtık su eklenir. Piknometre iyice çalkanarak içindeki numune karışması sağlanır. Bu esnada dışarı atılamayan numunedeki hava kabarcıkları, kaynama yöntemi ile veya vakum pompası ile tamamen dışarı atılır. Üzerine işaretli noktaya kadar damıtık su eklenir ve tartılır ( $W_2$ ). Boş piknometre damıtık su ile işaretli yere kadar doldurulur, tekrar tartılır ( $W_3$ ). Aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanır (Usta ve Çelikaslan 2002).

$$G_s = \frac{W_1}{(W_1 + W_2 - W_3)} \quad (5.2)$$

### 5.2.3 Kıvam Limitleri

Kohezyonlu bir zemine aşırı miktarda su ilave edilirse zemin akışkan bir sıvı gibi davranarak kendi ağırlığı altında kolayca akabilecek duruma gelir. Böyle bir zemin belli bir miktar kurutulursa kırılma veya çatlama olmadan kolayca istenilen şeklin verilebileceği plastik duruma gelir. Biraz daha kurutulursa herhangi bir şekil verilmek istendiğinde kırılarak parçalanacağı yarı katı duruma geçer. Bu durumda iken kurutmaya devam edilirse tamamen katı duruma geçerek gevrek ve kırılğan bir hal alır. Zeminlerin farklı su içeriklerinde gösterdikleri bu davranışlar kıvam olarak adlandırılır. Zeminlerin bu kıvamlarını birbirinden ayıran sınır su içeriklerine ise sırasıyla likit limit, plastik limit ve büzülme (rötre) limiti adı verilmiştir. Bu tanımlar ilk kez İsveçli bilim adamı A. Atterberg (1911) tarafından tarım topraklarının kıvamlarına göre tanımlanması amacıyla ortaya konulmuştur (Orhan vd. 2004).



Şekil 5.1 Kıtlerin Kuruma Sırasında Hacim Değişirmesi

#### a) Likit Limit ( $W_l$ veya LL)

Viskozitesi yüksek bir sıvı gibi akıcı durumdaki zeminin plastik duruma dönüştüğü andaki su muhtevasıdır. Likit limit Casagrande Yönteminde belirlenmiştir. Kullanılan likit limit aleti, kolu döndürüldüğünde, sert bir lastik blok üzerine 1 cm. yükseklikten düşen yarım küre büyüklüğünde piriç tasta oluşur. Kurutulmuş ve 40 nolu elekten geçirilmiş zeminden bir miktar alınarak porselen bir kap içerisine konur. Karıştırılan numuneden biraz alınır. Piriç tasta yerleştirilir. Üzeri ıspatula ile düzeltilir. Yarıç açma bıçağı ile tastaki numune ikiye bölünür. Tekrar üst tarafı düzeltilir. ikiye bölme sırasında her iki parçasının da eşit büyüklükte olmasına dikkat edilir. Sonra aletin kolu çevrilerek tas 1 cm. yükseklikten saniyede 2 defa olmak üzere düşürülür. Düşme etkisiyle oyuk kapanmaya, ayrılan iki parça birbirine yaklaşmaya başlar. Başlangıçtan itibaren her vuruş, yarıç 1,12 cm. kapanana kadar sayılır. Kapandığı anda, buradan bir miktar numune, su

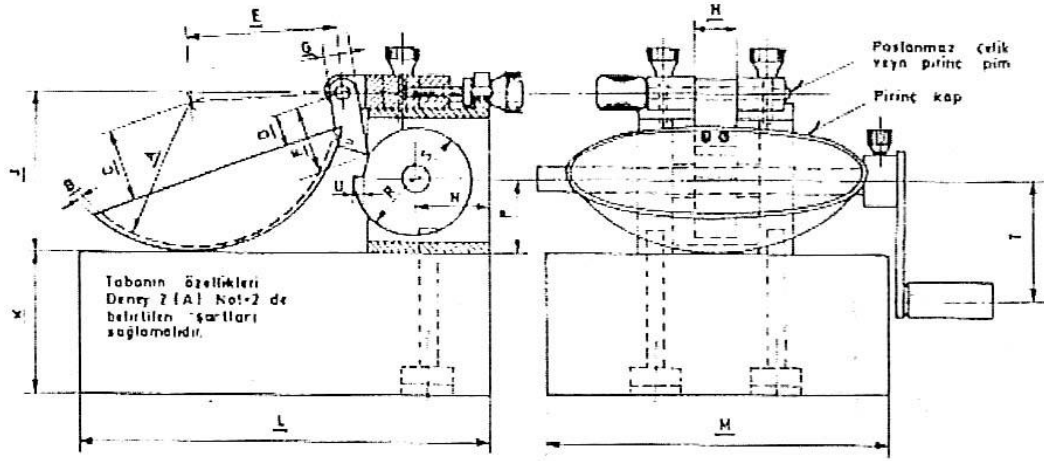
muhtevası belirlenmek için alınır ve vuruş sayısı kayıt edilir. Tas temizlenir, kapta bulunan numune üzerine damıtık su ilave edilerek karıştırılır. Yukarıdaki işlem birkaç defa daha tekrarlanır. Deney sonunda logaritmik ölçekli vuruş sayıları – su muhtevası grafiğı çizilir. Grafikten 25 vuruşa

karşılık gelen su muhtevası değeri likit limit değeri olarak belirlenir (Usta ve Çelikaslan 2002).

### **b) Plastik Limit**

Bu deneyde de 40 nolu elekten geçirilmiş zemin kullanılır. Pratikte genel olarak likit limit deneyi için kullanılır. Plastik limit ıslak zeminin yoğrulma sırasında yüzeyinde çatlakların belirdiğı su muhtevası olarak tanımlanır. Likit limit deneyinden artan bir miktar zemin cam üzerinde avuç ile yuvarlanır. Plastik limit el altında yuvarlama sırasında oluşan zemin 3 mm. kalınlıkta ufalandığı su muhtevasıdır. Eğer zemin çapı 2 mm.ye düştüğü halde ufalanma meydana gelmiyorsa zeminin henüz plastik olduğu kabul edilerek bir miktar daha kurutma yapılarak deney tekrarlanır. Görüldüğü gibi bu deneyde oldukça sübjektif olup, deneyi yapan kişiye oldukça bağımlıdır (Usta ve Çelikaslan 2002).





Harf	A	B	C	D	E	F	G
mm	54 ± 0,25	2 ± 0,25	27 ± 0,25	12,5 ± 0,25	58 ± 0,5	25 ± 0,5	10 ± 0,25

Harf	H	J	K	L	M	N	P	R	S	T	U
mm	16 ± 0,25	60 ± 0,5	50 ± 0,5	150 ± 1	127 ± 1	27	28	22	19	45	6

NOT - Şekilde gösterilen cihaz yeterlidir; mecburi işlevlerini yerine getirebilen başka bir cihaz da kullanılabilir. (mecburi) boyutların altı çizilmiştir.)

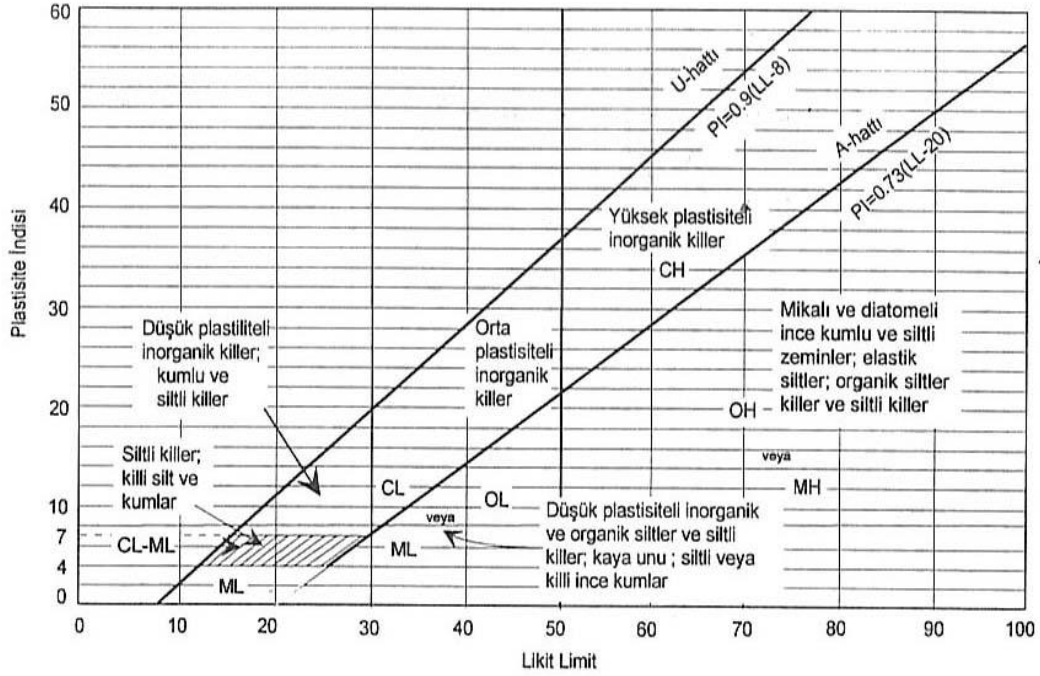
Şekil 5.2 Likit Limit Cihazı

### c) Büzülme (Rötre) Limiti

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi zeminin likit (sıvı) ve plastik durumlarında su muhtevastaki azalmalara bağlı olarak hacimleri de azalmaktadır. Zemin yarı katı duruma geldiğinde hacim azalmasının su muhtevastaki azalma ile devam etmediği görülür. Hacim bundan sonra ideal bir gösterimle azalmayacak ve sabit olarak kalacaktır. Grafikteki yatay kısmın başlangıcındaki su muhtevastına büzülme (rötre) limiti ( $W_s$ ) adı verilir.

Casagrande üzerinde deney yaptığı birçok kilin likit limiti ile plastisite indisi bir grafik üzerinde noktalanmış ve çok ilginç sonuçlar elde etmiştir. Bu killer özelliklerine göre Şekil 5.3'de görüldüğü gibi grafik üzerinde belli bölgelere

çıkıyorsa deneylerde bir hata yapıldığı kuvvetle muhtemeldir ve deney tekrarlanmalıdır (Aytekin 2000).



Şekil 5.3 Casagrande Plastisite Grafiği

#### 5.2.4 Dane Dağılımın Belirlenmesi

Tabii zeminler, değişik boyutlarda danelerin karışımından oluşmaktadır. Bu zeminlerin tane boyutlarının istatistiksel dağılımını ve zeminin esas olarak hangi zemin grubuna girdiğini deneysel olarak belirlemek gerekir. Dane boyutunu belirlemek için dane çapı kullanılmaktadır. Bu amaçla iri daneli zeminlerde elek analizi, ince daneli zeminlerde ise ıslak analiz (hidrometre veya pipet analizi) deneyleri yapılır. Zeminin dane çapı belirlenir ve granülometri eğrisi çizilir (Akbulut vd. 2003).

#### 5.2.4.1 Elek Analizi

Bu deney zeminlerin No. 200 (0.075 mm) elek üzerinde kalan iri kısmına uygulanır. Özellikle ince taneli zeminlerde, kil ve silt boyutundaki taneler birbirlerine veya kum ve çakıl boyutundaki tanelerin üzerine yapışarak topaklanmış halde olacağından bunları birbirinden ayırmak için kesinlikle yıkayarak eleme işlemi yapılmalıdır.

Elek serisi standartlara uygun kare delikli elekler olmalıdır. Oluşturulacak elek serisinde No. 4, No. 10 ve No. 200 eleklerin mutlaka bulunmasında fayda vardır. Çünkü bu elekler sırasıyla çakıl, kum ve silt boyutlarını birbirinden ayıran sınır eleklerdir. Deney için yeterli miktarda alınan numune etüve konur ve 60 °C' de kuruyuncaya kadar bekletilir. Killi zeminlerin tam olarak kuruması 16-24 saat gibi bir süre alır. Deney örneği etüvden çıkartılır, laboratuvar sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenir. Birbirine yapışarak kümeleşmiş ve topaklaşmış haldeki taneler lastik tokmak ile darbeler uygulamak suretiyle ezilerek dağıtılır ve ufalanır. Yeterince ufalanan numune No. 200 elekten elenerek ince ve iri olmak üzere iki kısma ayrılır. Hidrometre deneyi için No. 200 elekten geçen siltli zeminlerde 50-60 gr, killi zeminlerde ise yaklaşık 30-40 gr örnek gerekmektedir. Bu işlemlerin sonucunda No. 200 eleğin üstünde kalan ve altına geçen örnekler ayrı ayrı tartılarak ağırlıkları toplanır. No. 200 eleğin altına geçen numune hidrometre deneyi için cam beher içerisine konularak deney yapılana kadar bekletilir (Orhan vd. 2004).

No. 200 elek üzerinde kalan örnek bir kap içerisine boşaltılarak üzerini birkaç cm geçinceye kadar çeşme suyu doldurulur. Zeminin ayrışmasını kolaylaştırmak için üzerine bir miktar dağıtma maddesi ( $\text{NaPO}_3$  çözeltisi ) ilave edilir. Bu karışım

birkaç saat veya gece boyu bekletilir. Daha sonra No. 200 elek üzerine boşaltılır ve çeşme suyu kullanılarak bu elek üzerinde yıkanarak elenir. Eleğin altından akan su temiz ve berrak oluncaya kadar yıkamaya devam edilir.

Yıkamanın sonunda No. 200 elek üzerinde kalan taneler hiç kayıp verilmeden kurutma kabına aktarılır ve etüve konarak  $110 \pm 5$  °C sıcaklıkta kurutulur. Etüvden çıkarılan örnek göz açıklığı büyükten küçüğe doğru dizilmiş elek serisinin en üstüne boşaltılır ve elekler sarsılarak eleklerin altına artık zemin tanesi geçmeyinceye kadar eleme işlemi yapılır. Eleme işlemi bitince her eleğin üzerinde kalan tanelerin ağırlıkları tartılarak deney formunda ilgili eleğin karşısına yazılır. Böylece deney tamamlanmış olur (Orhan vd. 2004).

#### 5.2.4.2 Hidrometre Deneyi

0.075 mm' den daha küçük boyutlu olan zeminlerin tane boyutunun belirlenmesi için uygulanan ve bir çöktürme analizi olan hidrometre deneyin genel prensipleri Stokes yasasına dayanmaktadır. Stokes yasasında bir sıvı içerisinde çöken ve geometrik şekli küre olan tanelerin çökme hızları ile tane çapları arasında bir ilişki olduğu ifade edilmiştir.

Çöktürme analizinde zemin taneleri içi su ile dolu olan bir silindirin içerisinde kendi ağırlığı ve yer çekimi etkisiyle çökmeye bırakılmakta ve belli zamanlarda hidrometre adı verilen camdan yapılmış bir gereçle tanelerin çökme mesafeleri ve zemin-su karışımın yoğunluğu ölçülmektedir.

Deneyde No. 200 elekten geçen, killi zeminlerde 30-40 gr, siltli-kumlu zeminlerde 50-60 gr numune gerekir. Deney numunesi cam behere boşaltılır ve üzerine 125

ml dağıtma maddesi ilave edilir, 3-5 dk boyunca cam çubukla karıştırılır. Bütün tanelerin ayrılmasını sağlamak için 16 saat nem dolabında bekletilir. Daha sonra nem kabından alınarak karıştırıcı kabına dökülür. Üzerine 2/3 dolacak şekilde damıtık su ilave edilir. Mekanik karıştırıcı ile 1 dk karıştırılır. Ardından çöktürme silindrine aktarılır ve silindirin içindeki karışımın üzerine damıtık su ilave edilerek hacmi 1000 ml' ye tamamlanır. Silindirin ağzı kauçuk tapa ile kapatılarak yaklaşık 1 dk içerisinde 60 kere ters-düz ederek çalkalanır. Çalkalama işleminden sonra çöktürme silindiri deneyin yapılacağı yere yerleştirilir ve zaman ölçer çalıştırılır. Böylece deney başlatılmış olunur.

İlk hidrometre okuması 1dk sonra diğerleri ise sırasıyla 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 250, 600 ve 1440 dakikaların sonunda yapılır. İlk üç okuma yapılanaya kadar hidrometre karışımdan çıkartılmamalıdır. Her hidrometre okuması yapıldığında ardından sıcaklık ölçer ile karışımın sıcaklığı ölçülmelidir. En son hidrometre okuması yapıldıktan sonra deney tamamlanmış olur (Orhan vd. 2004).

### **5.2.5 Kompaksiyon Karakteristikleri**

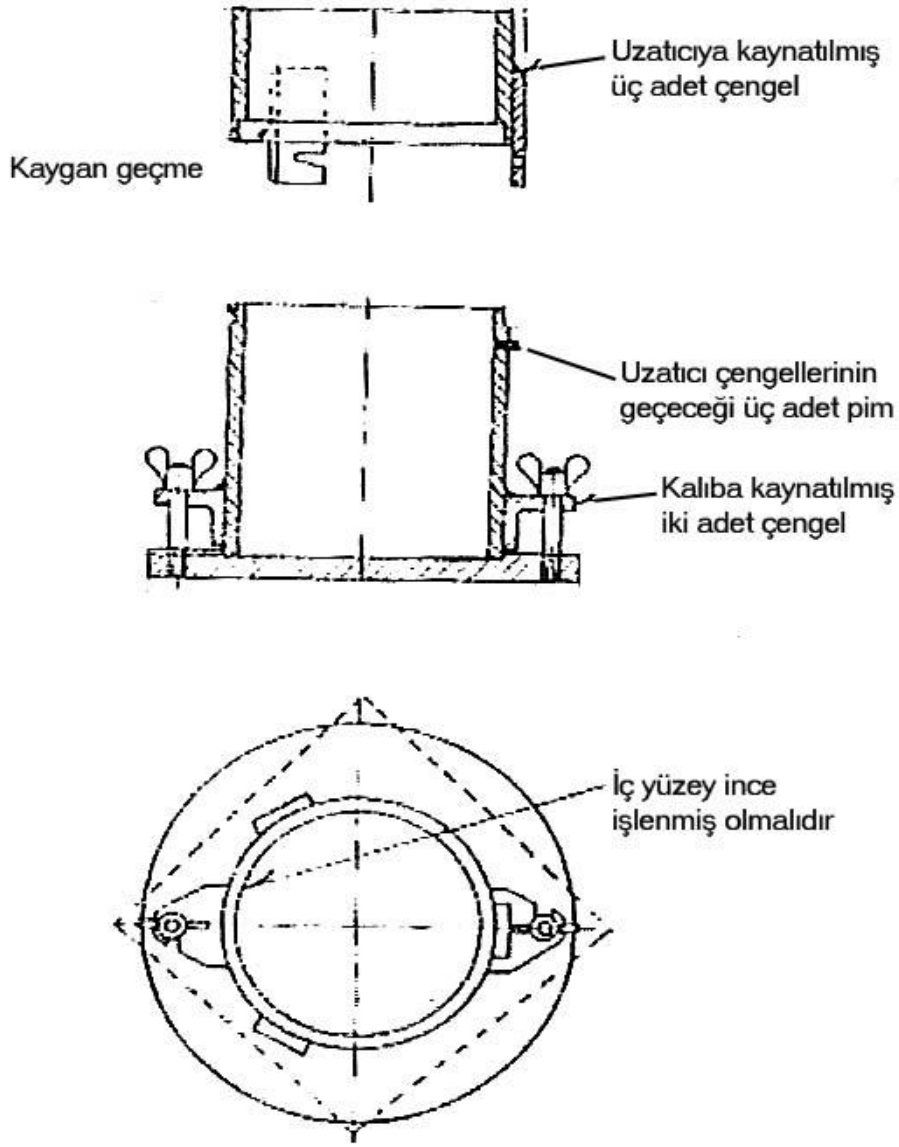
Kompaksiyon boşluk hacminin azalmasıyla danelerin birbirine yaklaşarak zemin yoğunluğunun artması ile tarif edilebilir. Yoğunluğun artmasıyla zeminlerin kayma mukavemetleri artarken oturmaları ve hidrolik geçirgenlikleri azalmış olur. Kompaksiyon deneylerinin amacı optimum su muhtevası değerinde en büyük kuru yoğunluğun elde edilmesidir. Zeminlerin bu özellikleri Proctor deneyleriyle elde edilir. Bu deneyler uygulanan enerji bakımından iki çeşittir (Akbulut vd. 2003).

Çizelge 5.1 Çeşitli Standartlara Göre Kompaksiyon Deneyleri (Kaya 2001)

	Elek çapı (mm)	Kalıp Hacmi (cm <sup>3</sup> )	Tokmak		Tabaka	
			Ağırlığı (kg)	Düşüş Yüksekliği	Sayısı	Darbe sayısı
ASTM-AASHTO Standart Modifiye	4.76	944	2.49	30.5	3	25
	4.76	944	4.54	45.7	5	25
İngiliz( B.S.1377) Standart Modifiye	19	1000	2.5	30	3	27
	19	1000	4.5	45	5	27

#### 5.2.5.1 Standart Proctor Deneyi

Kompaksiyon silindiri sert bir yüzey (beton döşeme çelik plaka gibi) üzerine yerleştirilir. Zemin numunesi birbirine eşit olacak üç tabaka halinde kompaksiyon silindirinin içine serilerek her bir tabaka 2,5 kg ağırlığındaki tokmağın 30,5 cm yükseklikten serbest düşüşü ile yatayda homojen olarak dağıtılan 25 vuruş (15,24 cm çaplı silindir kullanılması halinde 56 vuruş) ile sıkıştırılır. En üsteki tabaka serilmeden önce silindirik kabin yakası takılır.Son tabaka sıkıştırıldıktan sonra yaka çıkartılır. Sıkıştırılmış haldeki son tabakanın silindirik kaptan yukarıya taşan kısmı 0,5 – 1,0 cm arasında olmalıdır. Bu fazlalık kısım bıçak ve ıspatula kullanılarak kesilip temizlenir (Usta ve Çelikaslan 2002).



Şekil 5.4 Kompaksiyon Deneyi İçin Kalıp

#### 5.2.5.2 Modifiye Proctor Deneyi

Kompaksiyon silindiri sert bir yüzey (beton döşeme, çelik plaka gibi) üzerine yerleştirilir. Zemin numunesi birbirine eşit olacak beş tabaka halinde kompaksiyon silindirin içine serilerek, her bir tabaka 4,5 kg ağırlığındaki tokmağın 45,7 cm yükseklikten serbest düşüşü ile yatayda homojen olarak dağıtılan 25 vuruş (15,24 cm çaplı silindir kullanılması halinde 56 vuruş) ile sıkıştırılır. En üsteki tabaka serilmeden önce silindirik kabın yakası takılır. Son tabaka da sıkıştırıldıktan sonrada yaka çıkarılır. Sıkıştırılmış haldeki son tabakanın silindirik kaptan yukarıya taşan kısmı 0,5 – 1,0 cm arasında olmalıdır. Bu fazlalık kısmı bıçak ve ıspatula kullanılarak kesilip temizlenir.

Her iki deneyde de tokmağın düşey olarak tutulmasına özen gösterilmelidir. Tokmakla yapılan vuruşlar seri olarak yapılmalı ve 25 vuruş yaklaşık olarak 35 sn de tamamlanmalıdır. Tokmak düşüşleri sırasında kılavuz borusunun üstüne kadar çekilip serbest düşmeye bırakılmalı el ile bir başlangıç hızı verilmemelidir ya da aksine tokmak düşerken el bırakılmayarak hareket hızı engellenmemelidir. Ayrıca düşüşler sırasında tokmak kılavuz borusunun çevresine sürtünmemelidir (Aytekin 2000).

#### **5.2.6 Serbest Basınç Deneyi**

Doğgun bir kil numunesi çevresel hücre basıncı altında tamamen konsolide edilir ve sonra hücreden çıkarılırsa bu basıncın yerine eşit şiddetteki kapılar basınç numune üzerine etkimeye başlar ve netice olarak kildeki su muhtevası ve efektif gerilmeler pratik olarak değişmez. Bu noktadan hareketle arazide yerinde konsolide olmuş zemin numunesi üzerinde serbest basınç deneyi yapılabilir. Serbest basınç deneyi ile konsolidasyonlu direnajsız üç eksenli deney sonuçları aynı zemin için hemen hemen aynı sonuçları verir.

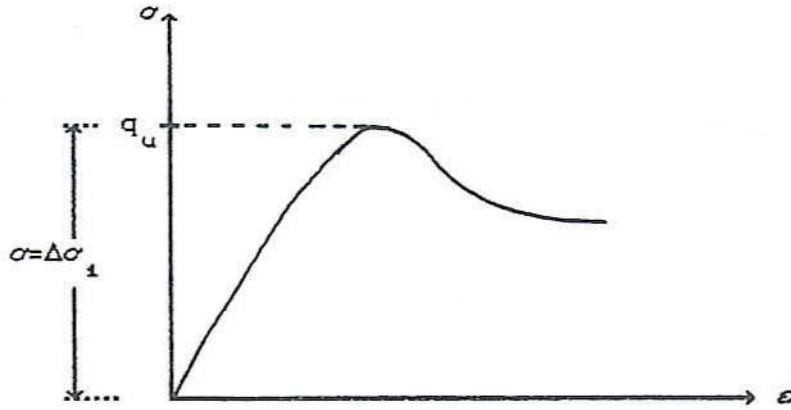


Eğer zemin arazide normal konsolidasyon durumundaysa, zemin üzerine etki eden  $P_h$  yatay konsolidasyon basıncı daima düşey toprak basıncı  $P_v$  'den bir miktar azdır. Bu oran, yüksek derecede plastik killer için 0.6-0,8 ve normal konsolide killer için 0.7 'dir.

Serbest basınç deneyinde numuneye çevresel olarak etki eden basınç atmosfer basıncıdır. Genellikle 7,5 cm boyunda ve 3,75 cm çapında örselenmemiş numuneler kullanılır. Deneyin prensibi sıfır yanal basınç altında numuneyi kırılıncaya kadar eksenel basınçla yüklemektir. Kırılma diagonal bir düzlem boyunca kayma suretiyle veya yanal şişme ile meydana gelir. Bu deneyde;

Büyük asal gerilme = Uygulanan Basınç / Alan 'dır.

Numune basınç aletine yerleştirilir. Alet 1,5 mm/dk 'lık deformasyon hızına ayarlanmıştır. Aletten deformasyona karşılık yükler elde edilir. Böylece gerilme – deformasyon  $\sigma - \epsilon$  rğrisi çizilir. Bu eğrinin maksimum noktası maksimum basınç gerilmesi,  $q_u$  değerini verir. Serbest basınç deneyi sadece kohezyonlu zeminler üzerinde yapılabilir.

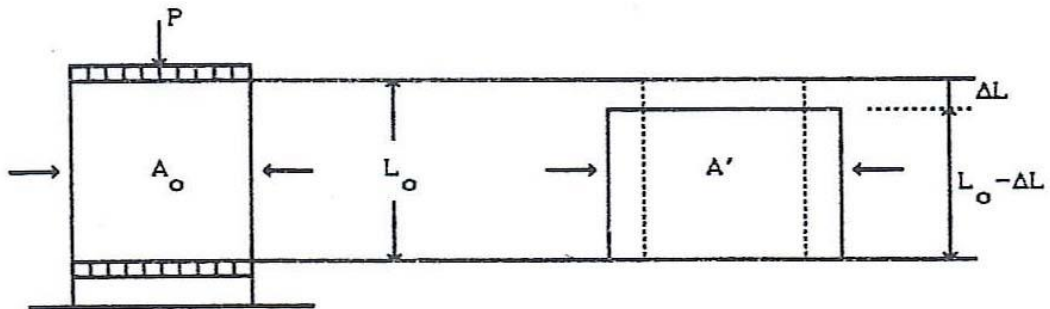


Şekil 5.5 Eksenel Şekil Değiştirme-Eksenel Gerilme Grafiği

Basınç gerilmesi  $\sigma$  ( $\Delta \sigma_1 =$  üç eksenli için ) çelik, beton ve diğer malzemelerde

$$\sigma_1 = P/A \quad A = \text{kesit alan} \quad (5.3) \quad \Delta$$

olmak üzere hesaplanır. Zemin düşey olarak deforme olurken deformasyonlar da meydana gelir. Bunlar gerilmeye karşı koyan efektif kesit alanını artırırlar. Bu durum laboratuarda daima meydana geldiğinden ve arazide de Poisson etkisiyle aynı şekilde genişleme olacağından basınç gerilmelerinin böyle genişlemiş  $A'$  alanı üzerinden hesaplanması daha doğru olacaktır. Bu alan numunelerinin hacminin sabit kalacağı kabulüyle hesaplanabilir (Çinicioğlu).



Şekil 5.6 Numune Üzerindeki Boy Değişiminin Gösterilmesi

$$A_0 \cdot L_0 = A' \cdot (L_0 - \Delta L)$$

$$A' = A_0 \cdot L_0 / (L_0 - \Delta L)$$

$$1 - \varepsilon$$

(5.4)

$$A' = A_0 /$$

Birim deformasyon ,

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

(5.5)

Buna göre deviatör gerilme  $\Delta\sigma_1$  ,

$$\Delta\sigma_1 = P / A'$$

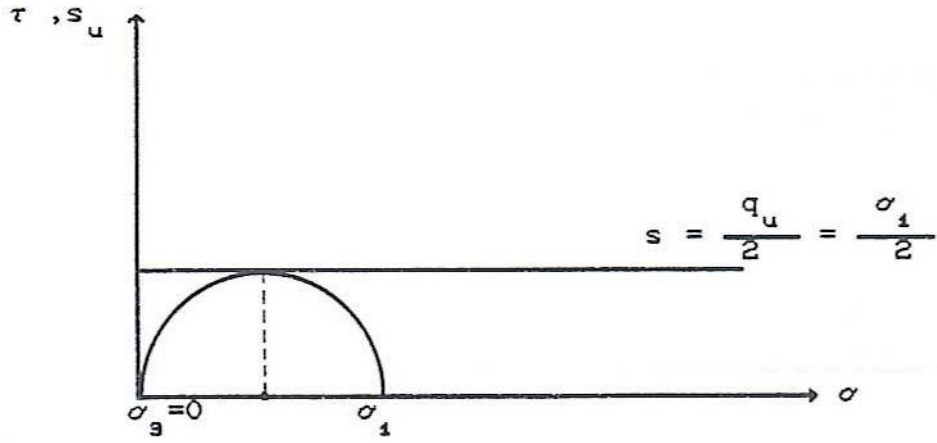
(5.6)

Burada  $\Delta\sigma_1$  asal gerilmedeki değişikliktir. Çünkü zemin numunesinin uç kısımlarında kayma gerilmesinin olmadığı kabul edilecektir.

Serbest basınç deneyi sonunda elde edilen Mohr gerilme dairesinden, drenajsız kayma mukavemeti ( $\phi_u = 0$  için) ;

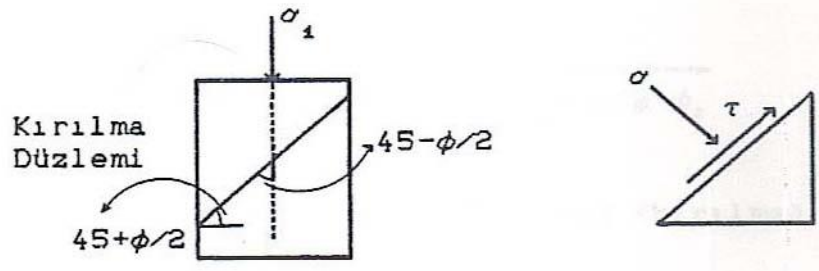
$$\tau = S_u = c = q_u / 2$$

(5.7)



Şekil 5.7  $\sigma_3 = 0$  Olduğu Durumda Eksenel Gerilme – Kayma Mukavemeti

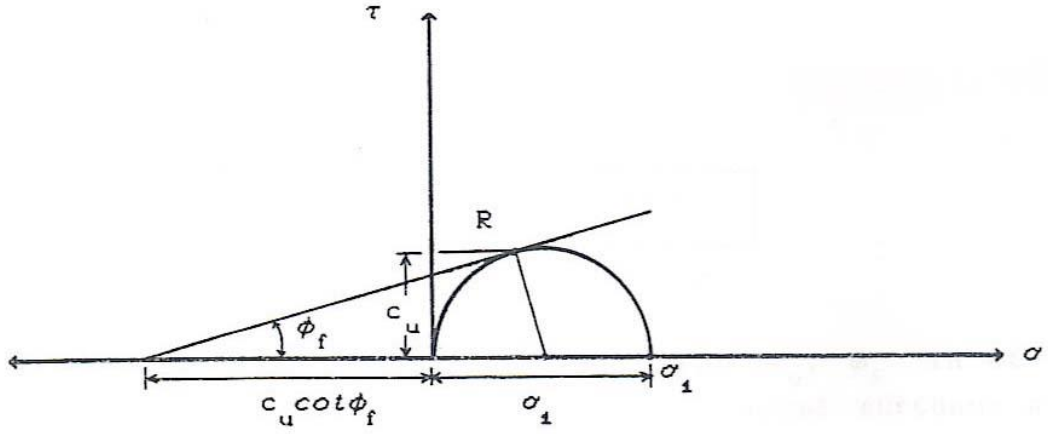
Eğer  $\phi = 0$  ise,



Eğer  $\phi_u = 0$  ise,

$$c_u = \sigma_1 / 2$$

(5.8)



Şekil 5.8 Eksenel Gerilme – Kayma Mukavemetinin Gösterilmesi

Bir düzlem üzerinde meydana gelen kayma mukavemeti kırılma mukavemetinin yarısından azdır.

Kayma mukavemeti ;  $\tau = c_u + \sigma \cdot \tan \phi_f$

(5.9)

Burada elde edilmek istenen değer  $c_u$ ,  $\phi_f$  'in etkisi ihmal edilebilir. Killer aslında bir içsel sürtünme açısına sahiptirler, ancak drenajsız deneylerden elde olunan kırılma dairelerinden hesaplanan kayma mukavemeti açıları sıfır olarak bulunur.



## 6. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1 Katkı Malzemesinin Özellikleri

Mermerin kimyasal bileşiminin kireçle benzerlik göstermesi ve mermer tozu taneciklerinin çok küçük boyutlu olması ince taneli zeminlerin iyileştirilmesi için kireç yerine mermer tozunun kullanılabilmesi fikrini oluşturmuştur.

Mermer tozu en küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi sırasında oluşan ve büyük çoğunluğu da 300 mikronun altında olan mermer tanecikleridir. Kesme işleminde su kullanılması nedeniyle suyla birlikte çökeltme havuzlarına taşınır. Havuzlarda çökelen mermer tozu daha sonra atık sahalarına alınmaktadır. Kesme sırasında oluşan toz miktarı Afyon ve İncehisar bölgesi için yaklaşık 125 000 ton/yıl gibi bir rakama ulaşmaktadır. Bu miktarın çok büyük bir kısmı atık olarak kalmakta ve çevresel problemlere neden olmaktadır. Halbuki mermer tozu atıkları inşaat sektöründe mozaik, harç, sıva, karo vb. üretiminde, seramik sanayinde sır üretiminde, çimento sanayinde beyaz çimento üretiminde ve kağıt sanayi, tarım ve gübre sanayi, yem sanayi, diğer bazı sanayi sektörlerinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Buna rağmen katılan miktarın düşük oranlarda olması atık sahalarında büyük yığınlar oluşmasına neden olmaktadır (Zorluer ve Usta 2003).

Çizelge 6.1 Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri (Usta ve Çelikaşlan 2002)

Özgül	Ağırlığı	2,75
-------	----------	------

(gr/cm <sup>3</sup> )		
Birim Hacim Ağırlığı	(gr/cm <sup>3</sup> )	2,73
Porozite		0,2
(%)		
Doluluk Oranı	(%)	99,3
Gözeneklilik Derecesi	(%)	0,7
Elastisite Modülü	(Kgf/cm <sup>2</sup> )	5,9 x 10 <sup>4</sup>

Çizelge 6.2 Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Mermer Tozunun Kimyasal Bileşimi

ÖZELLİK	MİKTAR
SiO <sub>2</sub> (%)	0,01
Fe <sub>2</sub> O (%)	0,04
CaO (%)	55,30
MgO (%)	0,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,85
Na <sub>2</sub> O (%)	0,03
K <sub>2</sub> O (%)	0,20
A.Z. (%)	43,45

Çizelge 6.3 büyük ölçekli mermer işletme tesisinden alınan atık su örneği lazer difraksiyon metodu ile çalışan "Fritsch Particle Sizer Analysette 22" cihazı ile boyut analizi yapılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.3 Tesis Atık Sularındaki Parçacıkların Boyut Dağılım Tablosu

BOYUT (μ)	% ALTINDA
250	99,96



212	99,93
180	99,75
150	99,23
125	97,94
106	95,80
75	86,50
63	79,40
53	71,88
45	64,61
38	57,33
25	40,95
20	33,32
15	25,46
10	18,35
4	10,09
2	5,82
1	2,14

## 6.2 Numunelerin Özellikleri

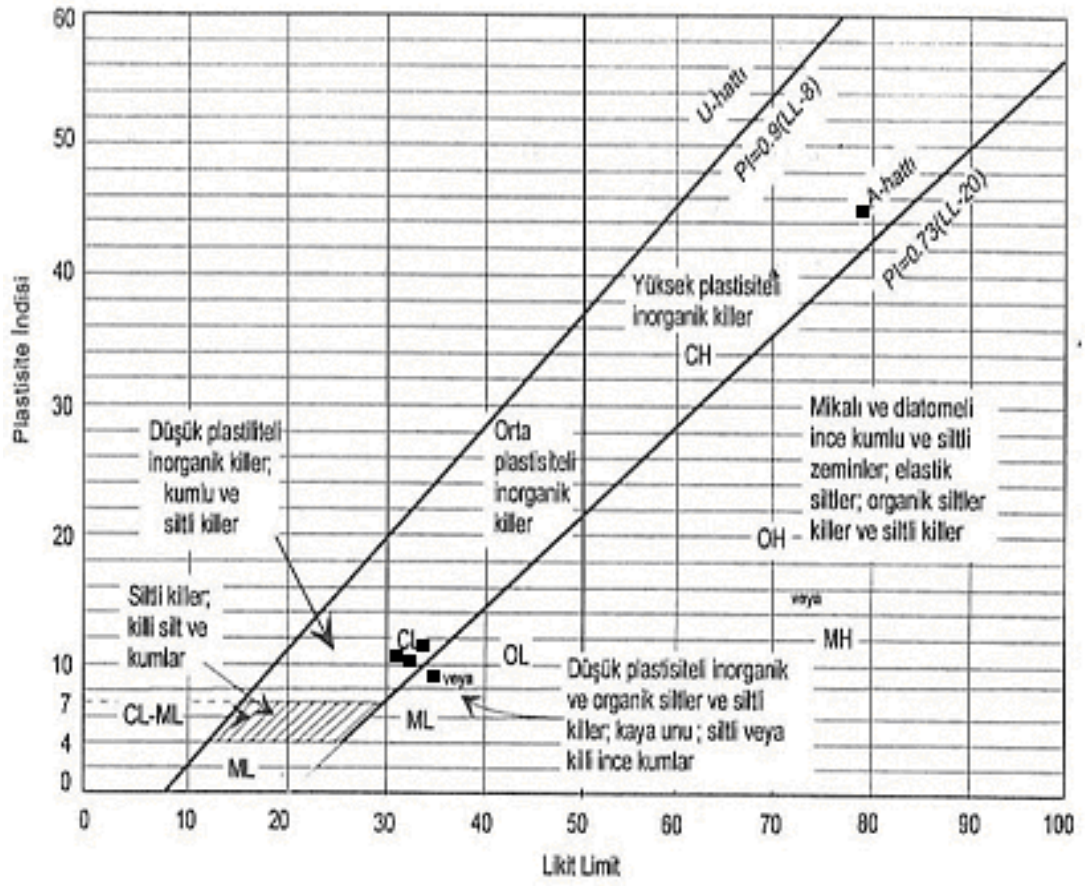
Deney kapsamında beş farklı noktadan almış olduğumuz numuneler üzerinde boyut dağılımı, kıvam limitleri ve özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Bu numunelerin tanımlama deney sonuçları çizelge 6.4 'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.4 Tanımlama Deney Sonuçları

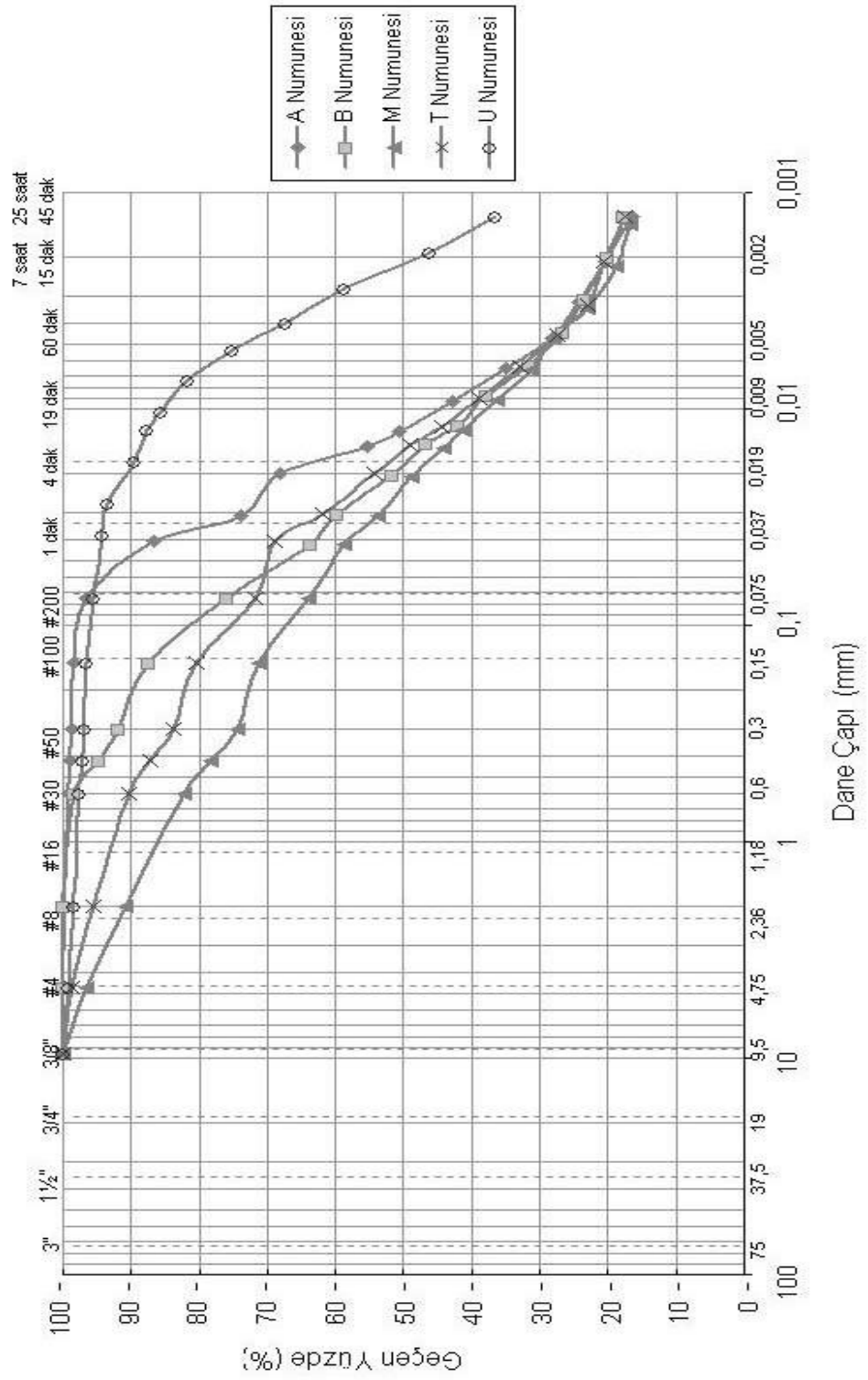
Numune Adı	Dane Dağılımı (%)			Kıvam Limitleri			Özgül Ağırlık	Aktivite	Grup Sembolü
	<0,002 mm	<0,075 mm	<4,76 mm	LL	PL	PI			
A	20	96,63	100	35,50	26,32	9,18	2,51	0,49	ML
B	20	76,01	100	31,50	20,10	11,40	2,55	0,52	CL
M	19	63,84	96,60	34,00	22,85	11,95	2,37	0,63	CL
T	20	71,80	98,76	32,80	21,76	11,04	2,48	0,55	CL
U	48	95,52	99,24	79,00	34,49	44,51	2,50	0,93	CH

Numunelerin tamamının ince taneli olduğu Çizelge 6.4 'te görülmektedir. Numunelerde ince tane yüzdesi %63,84 - %96,63 arasında değişmektedir. Kil

yüzdeleri %19 - %48 arasında değişmektedir (Şekil 6.2). Numunelerin aktivite değerlerini incelediğimizde aktif olmayan killer sınıflandırılmasında oldukları görülmektedir. Likit limit değerleri %31,50 - %79 arasında  $I_p$  9,18 – 44,51 arasında değişmektedir. Özgöl ağırlık değerlerine bakıldığında 2,37 – 2,55 arasında değişim gözlenmektedir. Birleştireilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre yapılan sınıflandırmada bir numunenin ML, bir numunenin CH, üç numunenin de CL olduğu görülmektedir. Numunelerin plastisite kartındaki yeri Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Numunelerin Plastisite Kartındaki Yeri



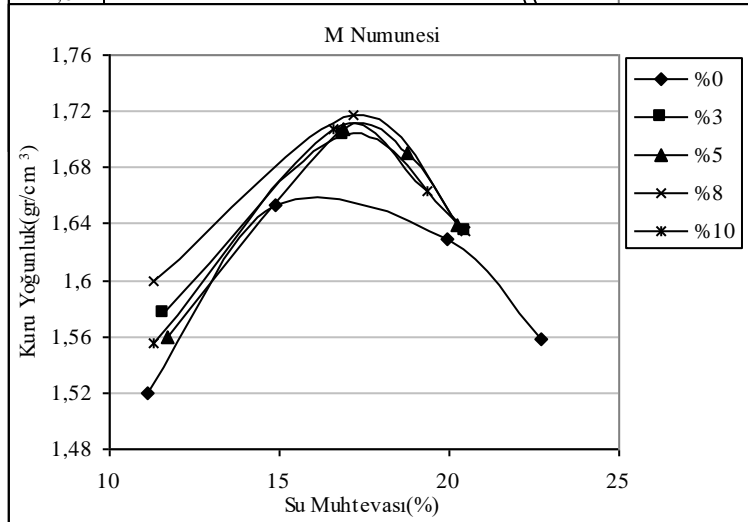
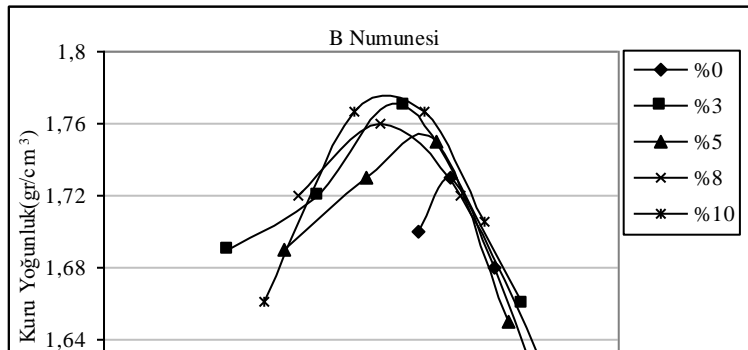
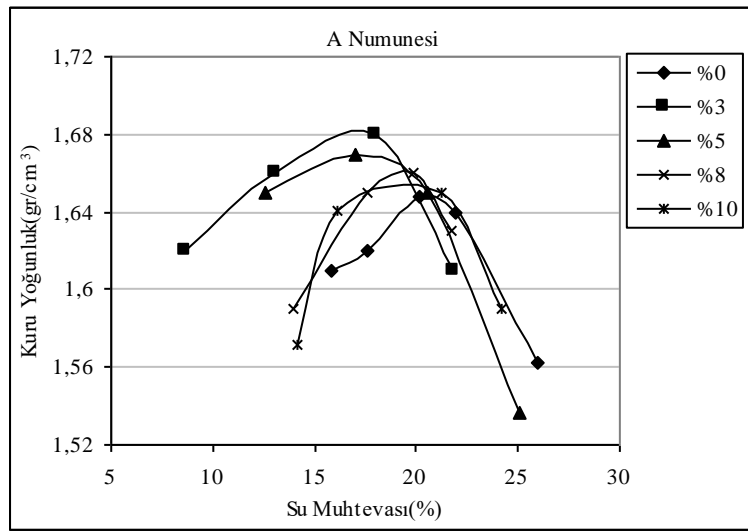
Şekil 6.2 Numunelere Ait Granülometri Eğrisi

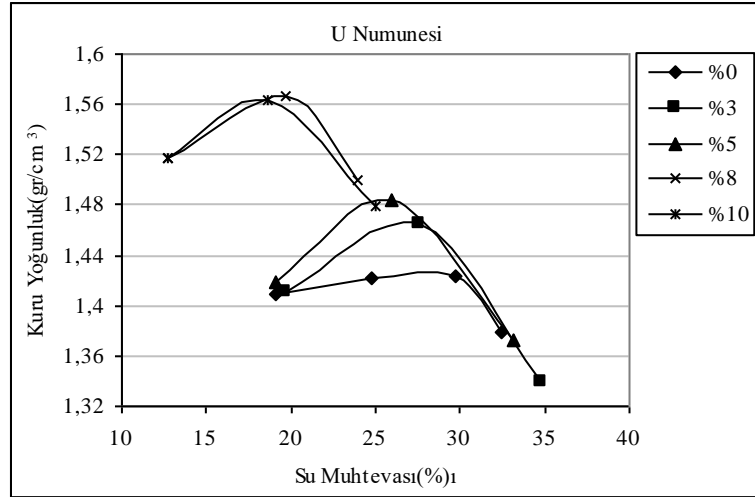
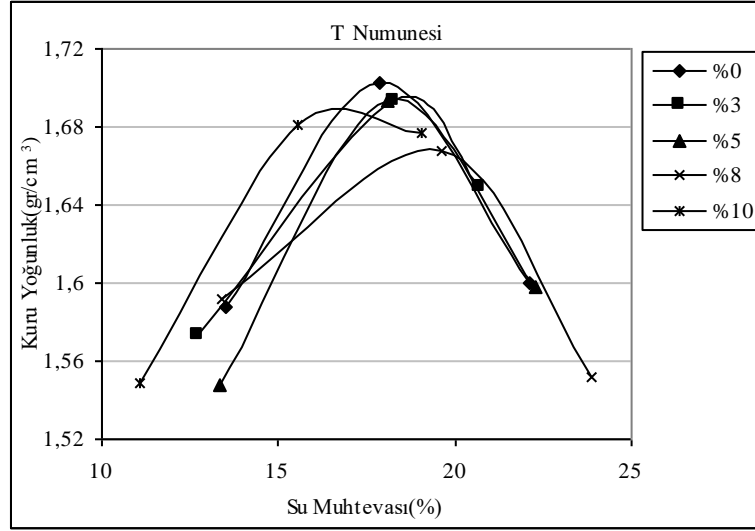
### 6.3 Kompaksiyon Özellikleri

Çizelge 6.5 ve Şekil 6.3 'e bakıldığında, tüm numunelerde genel olarak kuru yoğunlukta artma, optimum su muhtevasında ise önce azalma sonra artma görülmektedir. En büyük kuru yoğunlukların %8 – 10 mermer tozu katkıli numunelerde olduğu, buna karşın yoğunluk arttıkça optimum su muhtevalarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. M ve T numunelerine bakıldığında ise optimum su muhtevalarında artma yönünde küçük bir değişim ifade edilebilir.

Çizelge 6.5 Numunelerin Kompaksiyon Karakteristikleri

Numune Adı	% Katkılar	$\gamma_{d \max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W opt.(%)
A (Kampus- Atelye)	Katkısız	1.64	21
	%3 MT	1.68	16.8
	%5 MT	1.67	16.8
	%8 MT	1.66	19
	%10 MT	1.65	19.2
B (Kampus – Yurt)	Katkısız	1.73	18.3
	%3 MT	1.77	16.1
	%5 MT	1.75	17.3
	%8 MT	1.76	15.7
	%10 MT	1.77	16
M (Dumluşınar)	Katkısız	1.69	16.8
	%3 MT	1.71	17
	%5 MT	1.71	17.5
	%8 MT	1.72	17.6
	%10 MT	1.71	17.3
T (Ataköy)	Katkısız	1.70	17.86
	%3 MT	1.70	18.6
	%5 MT	1.70	18.1
	%8 MT	1.67	19.65
	%10 MT	1.69	16.66
U (Uydukent)	Katkısız	1.43	28.6
	%3 MT	1.46	27.5
	%5 MT	1.49	26
	%8 MT	1.57	19.3





Şekil 6.4 T,U Numunelerinin Standart Enerji Seviyelerine Ait Kompaksiyon

Eğrileri

#### 6.4 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi, numunelerde mermer katkısı ve kür süresine bağlı olarak kayma mukavemeti değerlerinde meydana gelen değişimleri gözlemek için yapıldı.

#### **6.4.1 Numune Hazırlama**

Bu deneyde kullanılacak numunelerin hazırlanması amacıyla 38mm çapında ve 76mm yüksekliğinde bir kalıp yapılmıştır. Numuneler bu kalıba hacim kontrollü olarak sıkıştırılmışlardır. Kalıbın hacmi sabit olduğundan bu hacme sıkıştırılacak zeminin kuru ağırlığı, standart proctor deneyinden elde edilen en büyük kuru yoğunluk değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu kuru zemin ağırlığına göre optimum su muhtevası değerinde saf su hazırlanmıştır. Mermer tozu katkısı ise zeminin kuru ağırlığına göre belirli bir oranda (%3-5-8-10) uygulanmıştır. Numuneler sıkıştırılmaya başlarken öncelikle kuru haldeki zemin ve kuru haldeki mermer tozu iyice karıştırılmış ve hazırlanan saf su ilave edilmiştir. Bu karışıma saf suyun tam olarak dağılması için porselen potada tekrar karıştırma yapılmıştır. Elde edilen bu zemin karışımına hiçbir şekilde kayıp vermeden kalıp içerisine sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Kalıba sıkıştırma yaparken üç tabaka halinde ve kalıp çapında bir tokmakla yavaş yavaş vurarak bu işlem gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işleminde en önemli nokta, üçüncü tabakanın sıkıştırılması bittiğinde tam kalıbın ölçüsünde olmasıdır. Aksi halde tam sıklığa ulaşmaz. Numune tam kalıp ölçüsünde sıkıştırılmış ve sıkıştırma sırasında malzeme kayıp verilmemişse numune kalıptan bir numune çıkarıcı yardımı ile çıkarılır, su muhtevası değişmemesi için naylon poşet içine sarılarak ağzı kapatılır. Numune numaralandırılarak kür süresi uygulanmak üzere depolanacağı yere yerleştirilir.

Kür süresi tamamlanmış olan numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulur. Numune ilk önce 0,001 duyarlıklı bir terazide tartılır ve ağırlığını kaydedilir.



Numunenin çapı ve boyu bir kumpas yardımı ile hassas şekilde ölçülerek kaydedilir. Ardından numune deney aygıtının alt başlığının merkezine yerleştirilir. Alet çalıştırılarak numunenin üst başlığa teması sağlanır. Numunenin alt ve üst yüzeyleri deney aygıtının alt ve üst başlıklarının merkezlerine gelecek şekilde ayarlanır. Okuma saatleri sıfırlanarak o andaki göstergedeki okumalar alınarak kaydedilir. Bu işlem hem kuvvet halkası saati hem de deformasyon saati için yapılmalıdır. Numune üzerine kuvvet uygulamak amacıyla cihaz çalıştırılarak deneye başlanır. Belli aralıklarla kuvvet halkası saatinden ve deformasyon saatinden okumalar alınır. Bu durum zemin numunesi kırılıncaya kadar sürdürülür. Kırılma işleminden sonra artık numune yük taşımadığı için kuvvet halkası saatinde yük değeri azalmaya başlar bu andan itibaren birkaç okuma daha alınıp deney tamamlanır.

Elde edilen veriler sonucunda numunelere ait  $\sigma - \epsilon$  grafikleri çizilmiştir. Bu işlemler için aşağıdaki hesaplamalar yapıldı.

Numune boyundaki değişim,

$$\Delta L = (\text{deformasyon saati okuması}) \times (\text{saatin katsayısı}) \quad (6.1)$$

$$\text{Eksenel birim boy değişimi, } \epsilon = \Delta L / L_0 \quad (6.2)$$

$$\text{Kırılma anındaki numunenin en kesit alanı, } A_c = A_0 / (1 - \epsilon) \quad (6.3)$$

$$\text{Orjinal kesit alanı, } A_0 = \pi D_0^2 / 4 \quad (6.4)$$

$$\text{Kırılma yükü, } P = (\text{kuvvet halkası okuması}) \times (\text{saatin katsayısı}) \quad (6.5)$$

Deviatör gerilme (=toplam gerilme  $\sigma_3=0$  için)

$$\sigma_1 = \Delta \sigma = P / A_c \quad (6.6)$$

#### 6.4.2. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Aynı kür süresine tabi tutulmuş numuneler incelendiğinde mermer tozu katkı miktarına bağlı değişim gözlenmiştir. Mermer tozu katkısı arttıkça eksenel gerilme değerinin, doğru orantılı olarak bir artış kaydettiği görülmektedir. Bu durum EK-1'deli grafiklerden net olarak görülebilir. Bir günlük küre tabi tutulmuş katkısız A numunesinde eksenel gerilme değeri  $\sim 10 \text{ N/cm}^2$  civarından %10 katkılı olduğu durumda  $\sim 35 \text{ N/cm}^2$  değerlerine ulaşmıştır. B,T,U ve M numunelerinde de katkı miktarı artışı, eksenel gerilme değerlerinde 2-4 kat artışlar meydana getirmiştir.

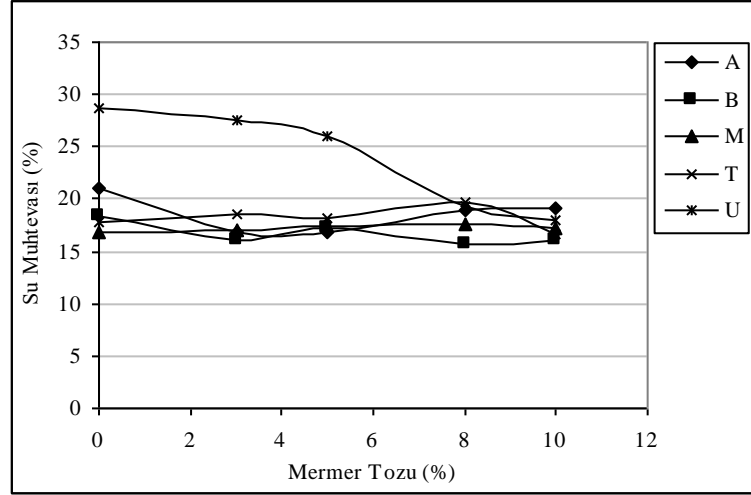
Numunelere 1-7-28 gün olmak üzere üç farklı zaman diliminde kür süreleri uygulanmıştır. Aynı oranda katkı miktarına sahip farklı kür süresine tabi tutulmuş numuneler incelendiğinde EK-2'de kür süresine bağlı olarak eksenel gerilmenin arttığı görülmektedir. %10 mermer tozu katkılı A numunesinin bir günlük kür süresi sonunda  $\sim 35 \text{ N/cm}^2$  olan eksenel gerilme değeri 28 günlük kür ile  $\sim 50 \text{ N/cm}^2$  civarlarına çıktığı görülmektedir. Kür süresinin artışına paralel olarak eksenel gerilme değerlerinde artış doğru orantılı bir şekilde gözlenmiştir, durum diğer numuneler içinde aynı şekildedir.

Numunelerin serbest basınç deneyi sonrasında oluşan kayma yüzeyleri EK-3'deki fotoğraflarda net olarak görülmektedir. Numuneler kırılma anında oluşan kayma yüzeyleri ile ikiye ayrılırlar. Kayma yüzeyleri, numunenin içsel sürtünme açısına bağlı olarak farklı değerlerde yatayla açı yaparak oluşurlar.

## 7. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma kapsamında stabilizasyon malzemesi olarak atık mermer tozu kullanılmıştır. Kullanılan mermerin bileşiminde %55 oranında CaO vardır. Bu miktar kireçte de yüksektir. Bu amaçla kireç yerine mermer tozunun kullanımı gündeme gelmiştir. Kullanılan mermer tozunun boyut analizine bakıldığında tamamına yakın bir kısmının 250 $\mu$ ' dan daha küçük taneleri içerdiği ,hatta %86,5'ininde 75 $\mu$ ' dan küçük tanelerden oluştuğu gözlenmektedir. Bir başka ifade ile ince taneli zemin boyutundadır.

Kompaksiyon karakteristiklerinden maksimum kuru yoğunlukta katkı miktarının artışına paralel olarak artış gözlenmiştir. Genelde tüm numuneler için aynı ifade geçerlidir. Ancak T numunesinde artma olmamış, %8 ve %10 mermer tozu katkılarında çok az bir miktar düşme gözlenmiştir. A,B ve U numunelerinde optimum su muhtevaları azalma eğilimindedir. İlave edilen mermer tozu kile göre daha az suya ihtiyaç gösterir. Ancak %10 mermer tozu katkılı numunelerde değişim artma yönüne doğrudur. Bu durum artan yüzey alanının daha çok su ihtiyacı göstermesi olarak ifade edilebilir.



Şekil 7.1 Su muhtevasının mermer tozu katkısına göre değişimi

Serbest basınç deney sonuçları, mermer tozu katkı miktarındaki artışın, eksenel gerilme değerlerinde artış oluşturduğunu göstermiştir. Genelde tüm numunelerde elde edilen en büyük eksenel gerilme değeri %10 MT katkı yapılmış numunelerde görülmüştür. Ancak, mermer tozu katkıları yapılırken numunelerin katkısız durumda elde edilen kuru yoğunluk ve optimum su muhtevaları dikkate alınmıştır. Serbest basınç deneyi için numune hazırlamakta kullandığımız kalıp sabit hacimde olduğundan yapılan katkılar numunelerde daha sıkı bir yapı oluşturmuştur. Oluşan bu sıklık eksenel gerilme değerindeki artışı etkilemiştir.

Kür süreleri açısından incelediğimizde kür sürelerinin eksenel gerilmeye olumlu etki yaptığını söyleyebiliriz. Aynı oranda katkı miktarına sahip numunelerde kür süresinin artışı eksenel gerilme değerlerini artırmıştır. Kür süresi zemin taneleri

ile mermer tozu arasında etkileşim yaparak numunelerde daha güçlü bir yapı oluşturmuştur.

Bu konuda yapılacak çalışmalara öneri olarak, serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelerde, her katkı miktarı için elde edilen en büyük kuru yoğunluk ve optimum su muhtevaları dikkate alınmalı ve numunelerde mermer tozu katkısından kaynaklanabilecek daha sıkı bir yapı oluşumuna izin verilmemelidir. Kür süreleri boyunca numunelerdeki su muhtevalarının değişimi de gözlenmelidir. Su muhtevalarındaki değişim numunelerin mukavemet özelliğine etki edecektir.

## KAYNAKLAR

- Acar, H., Yıldız, M., 1996, "Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sergi ve Seminerleri", s 91 – 107, Akdeniz Üniversitesi, Antalya
- Akbulut, H., Ünal, O., İçağa, Y., Demir, İ., Zorluer, İ., Ergün, A., 2003, " İnşaat Laboratuvar Deneyleri" Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon
- Aytekin, M., 2000, "Deneysel Zemin Mekaniği" Akademi Yayınevi, Trabzon
- Ceylan, H., 2000, " Mermer Fabrikalarında Mermer Toz Atıklarının Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi" Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
- Çelik, M.Y., 1996, " Mermer Artıklarının (Parça-Tozların) Değerlendirilmesi" Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon
- Demirdağ, A., 1994, "Şişen Zeminler ve Bir Kilin Şişme Basıncına Kireç Katkısının Etkisi" İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Demirhan, N., 1998, "Atık Kumların Çimento ile Stabilizasyonu" Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
- Edi, E.F., 1993, "Ön Yükleme ile Zemin Islahı" Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
- Göksan, T.S., 1998, "Killi Zeminlerde Emme Kapasitesi ve Şişme Basıncı İlişkisi" Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

<http://www.sanayisiteleri.com/yapisistemleri>

<http://www.nicholson-rodio.com>

İnceer, Ş., 1994, "Kum Drenleri ile Zemin Islahı" Karadeniz Teknik Üniversitesi,  
Trabzon

Karakayalı, Ş., 2002, "Zemin Islahı ve Adana Çevresindeki Uygulamalar"  
Çukurova Üniversitesi, Adana

Karpuzcu, M., 2001, "Zeminlerin Stabilizasyonunda Geotekstil" Süleyman  
Demirel Üniversitesi, Isparta

Kaya, Z., 2001, "Temel Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamaya Yönelik  
İki Proje Çalışması" Erciyes Üniversitesi, Kayseri

Kavala, İ., 1992, "Killerin Çimento ve Kireç ile Stabilizasyonu" Anadolu  
Üniversitesi, Eskişehir

Kumbasar, V., Kip, F., Önalp, A., 1970, "Yol Mühendisleri İçin Zemin Mekaniği"  
Çağlayan Kitabevi, İstanbul

Kumbasar, V., Kip, F., 1984, "İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği"  
Çağlayan Kitabevi, İstanbul

Miller, A. G., Azad, S., 2000, "Influence of soil type on stabilization with cement  
kiln dust" Construction And Building Materials, pp 89 - 97

Okagbue, C.O., Onyeobi, T. U.S., 1999, "Potential of marble dust to stabilise red  
tropical soils for road construction" Engineering Geology, pp 371 - 380

Orhan, M., Özer, M., Işık, N.S., 2004, "Zemin Mekaniği Laboratuvar DeneYleri (İndeks ve Sınıflama DeneYleri) Cilt 1 Gazi Kitabevi, Ankara

Özaydın, K., 1999, "Zemin Mekaniği" Birsen Yayınevi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Parlak, N., Sağlam, A.R., 2003, "Enjeksiyon Teknolojisinde Kullanılan Kimyasal Katkıları" Türkiye Mühendislik Haberleri, Yapı Malzemeleri 1, Ankara

Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchale, R.K., 2003, "İnfluence of fly ash on strength behavior of typical soils", Construction And Building Materials

Sözen, S.B., 1996, "Yumuşak Zeminlerin İyileştirilmesi" Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Tekinsoy, M.A., 2002, "Doymamış Zeminlerin İndeks ve Hidrolik Özellikleri" Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

Temel, Y., 2001, "Zemin Stabilizasyon Yöntemleri" Selçuk Üniversitesi, Konya

Tunç, A., 2002, "Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları" Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul

Türköz, M., 2001, "Şişen Zeminlerin Sönmüş Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir Meşelik Killere Uygulanması" Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir

Usta, M., Çelikaslan, B., 2002, "Şişen Killerin Mermer Tozu Katkısı ile



Stabilizasyonu” Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon

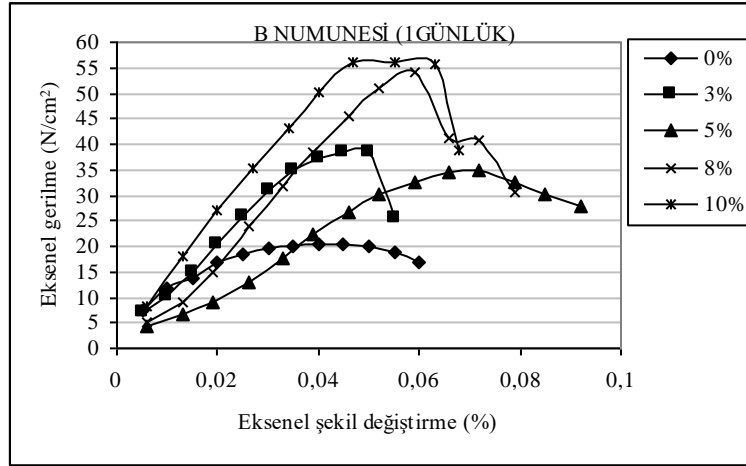
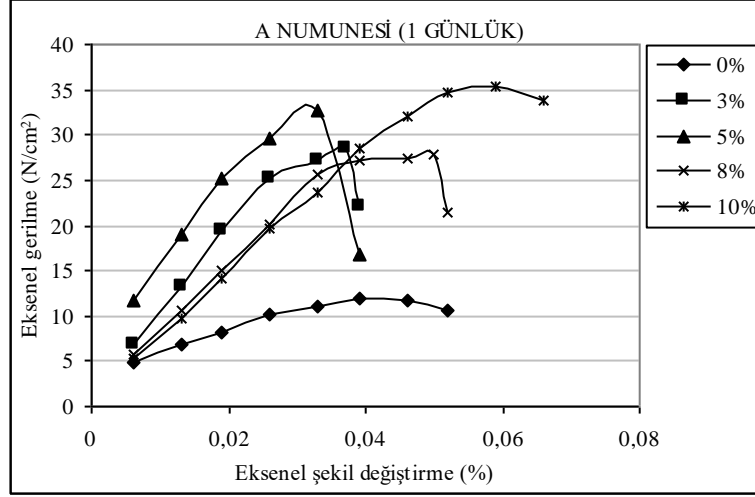
Usta, M., Zorluer, İ., 2003, “Zeminlerin Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi”  
TMMOB Maden Mühendisleri Odası Afyon İl Temsilciliği, Türkiye IV.  
Mermer Sempozyumu MERSEM’2003, s305-311, Afyon

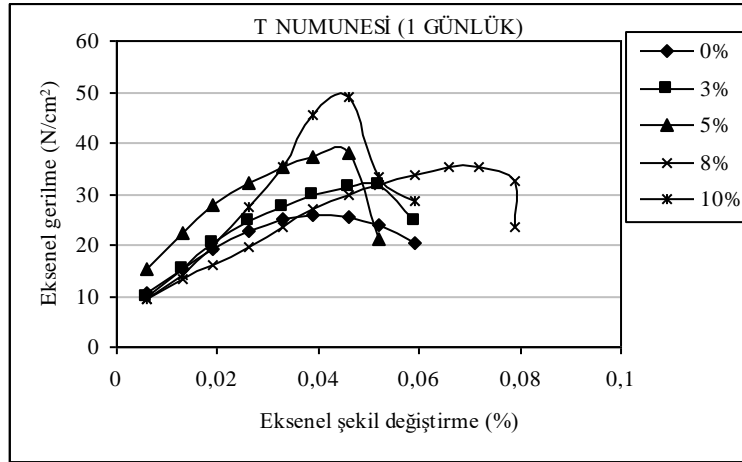
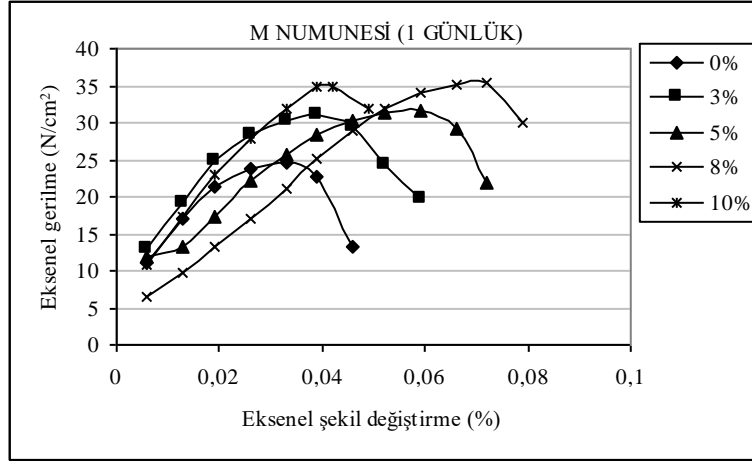
Uzuner, B.A., 2000, “Temel Mühendisliğine Giriş” Derya Kitabevi, Karadeniz  
Teknik Üniversitesi, Trabzon

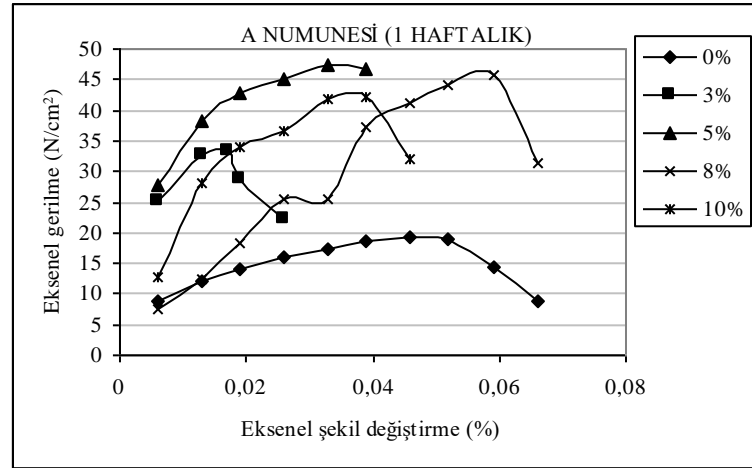
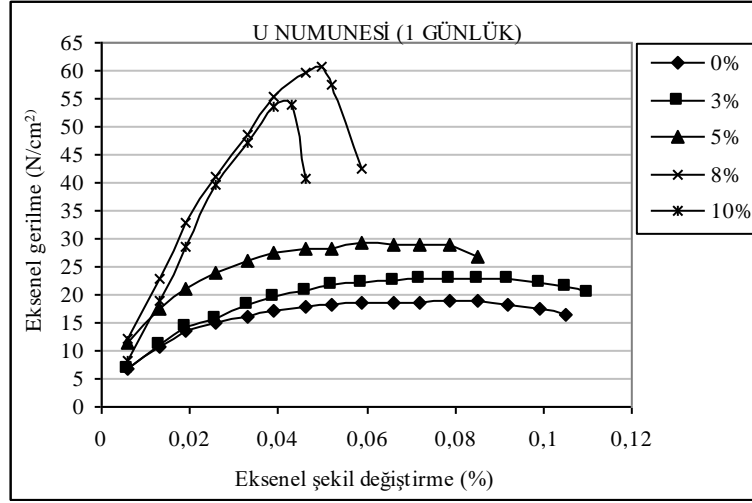
Ünal, S.M., 1999, “Şişen Zeminlerin Kompaksiyon Yoluyla Kontrolü”  
Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir

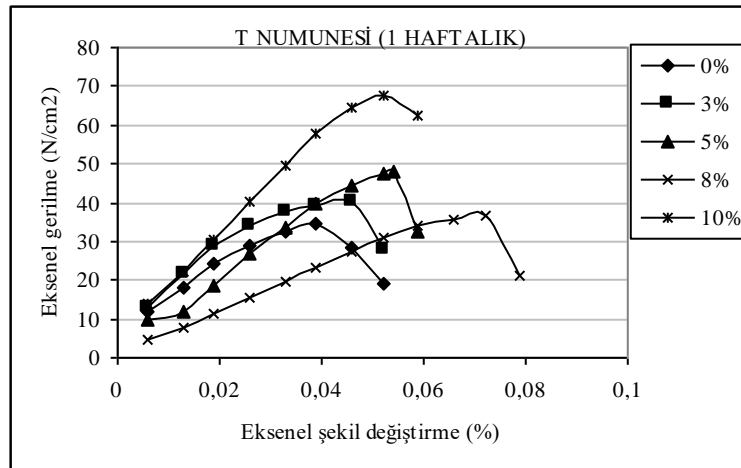
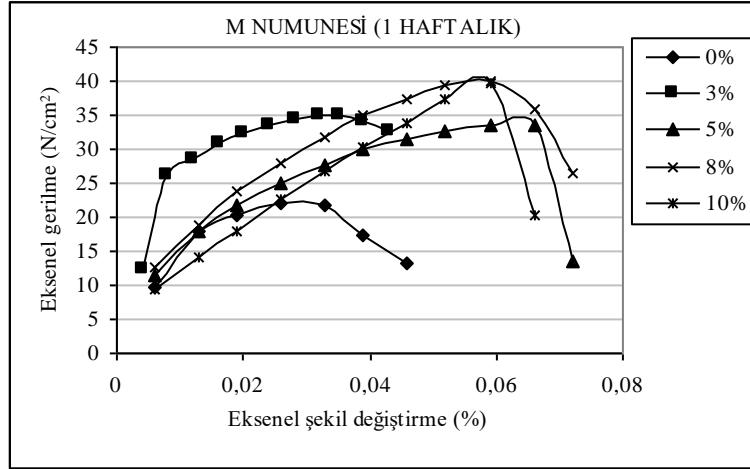
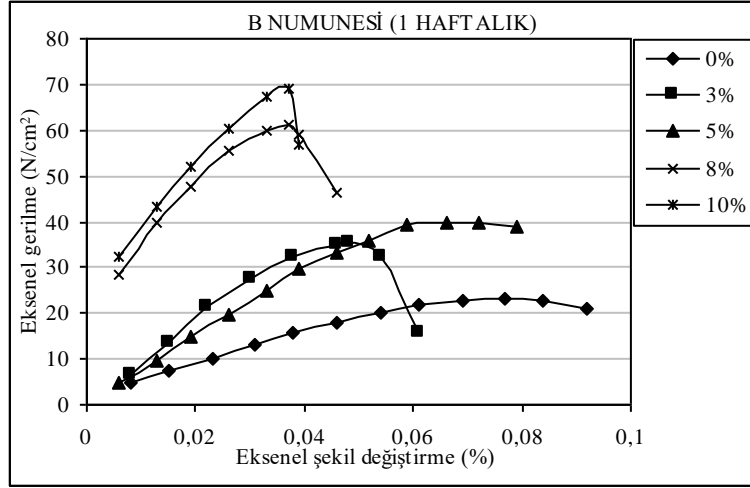
**EK – 1**

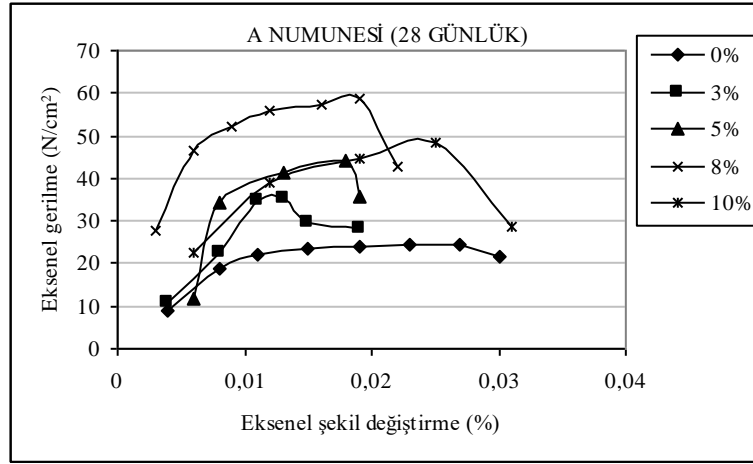
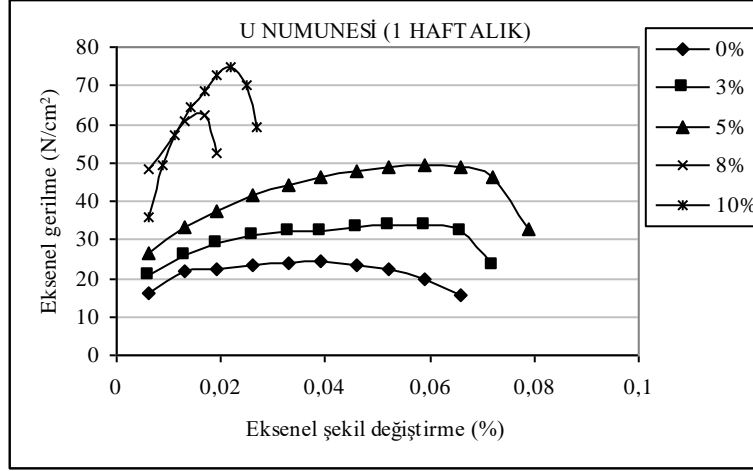
NUMUNELERİN DEĞİŞİK YÜZDELERDE 1 – 7 – 28 GÜNLÜK EKSENEL ŞEKİL  
DEĞİŞTİRME – EKSENEL GERİLMELERİNE AİT GRAFİKLER

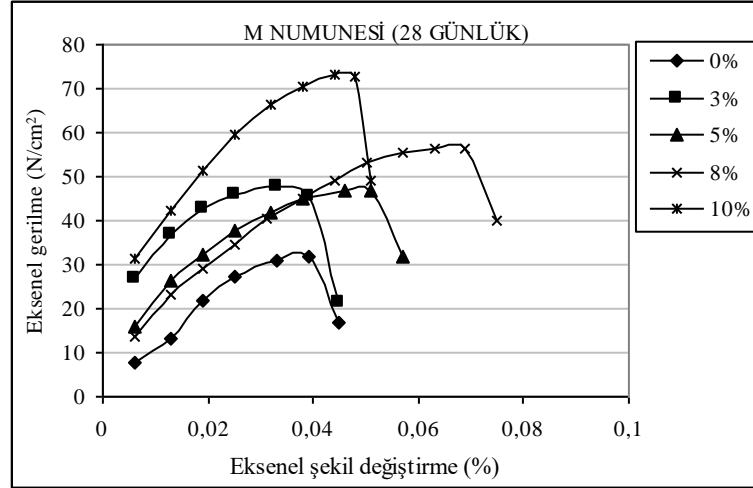
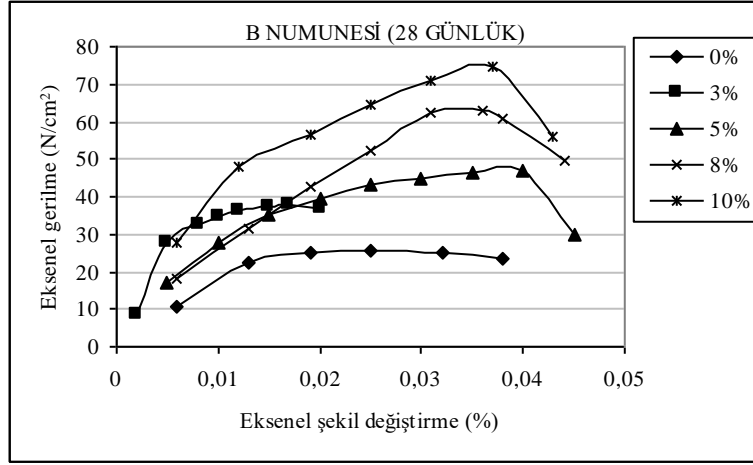




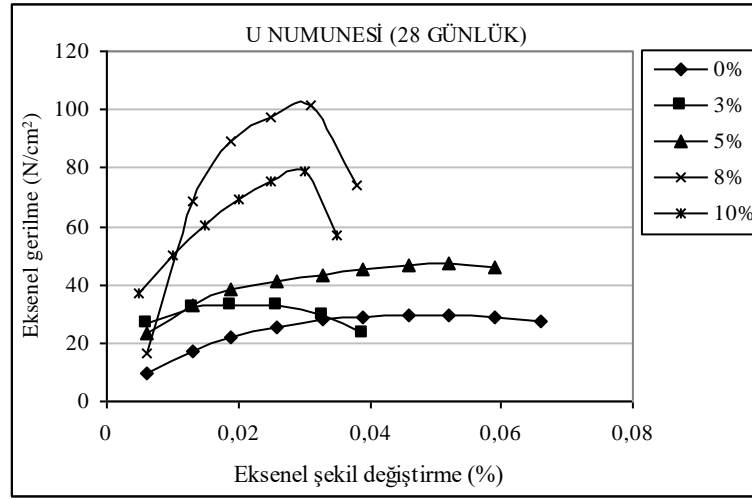
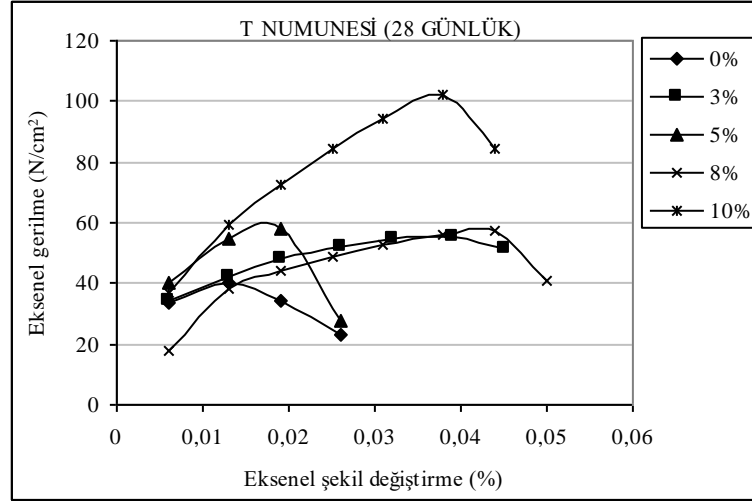






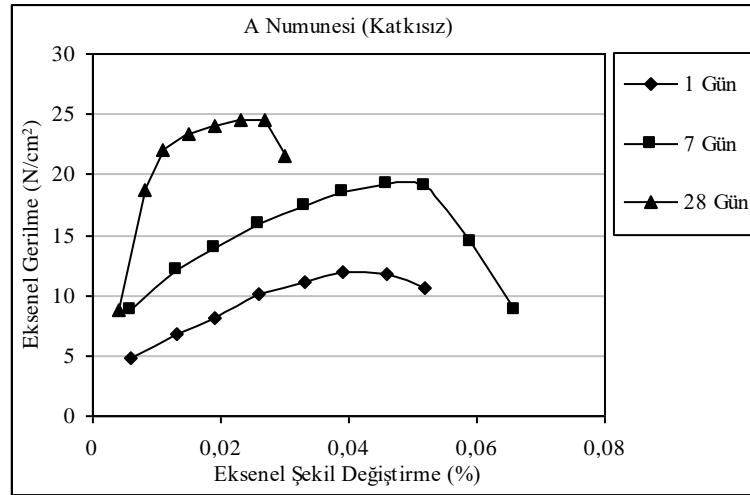


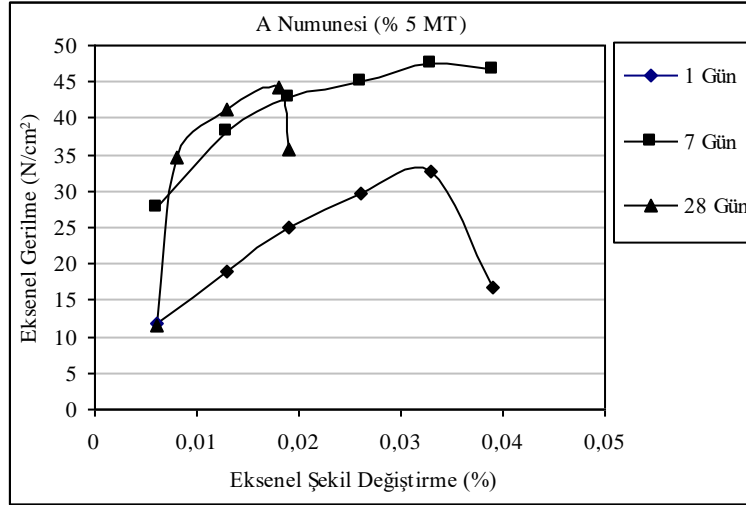
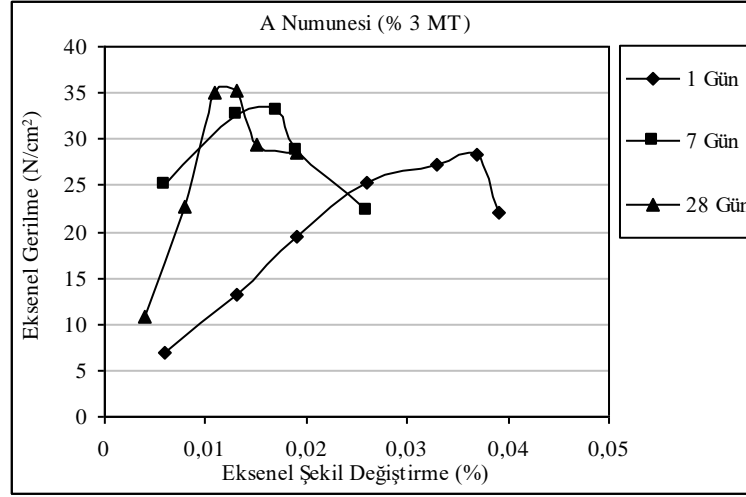


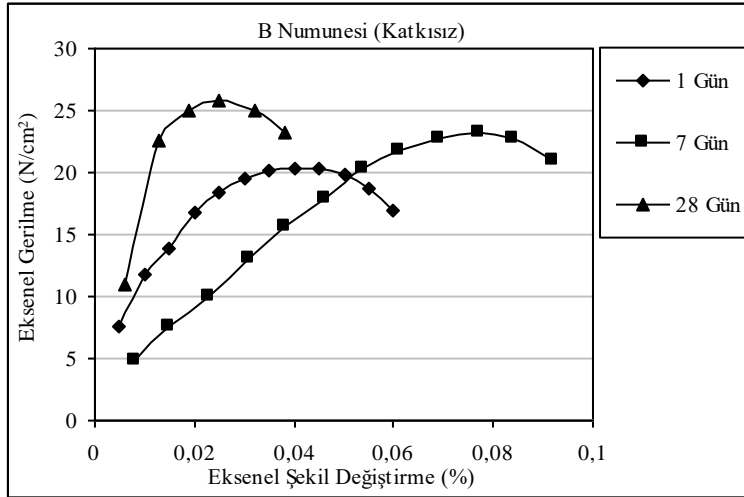
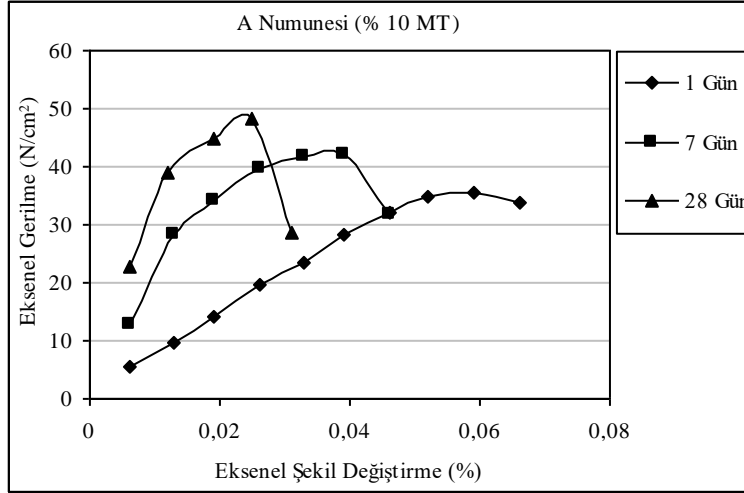
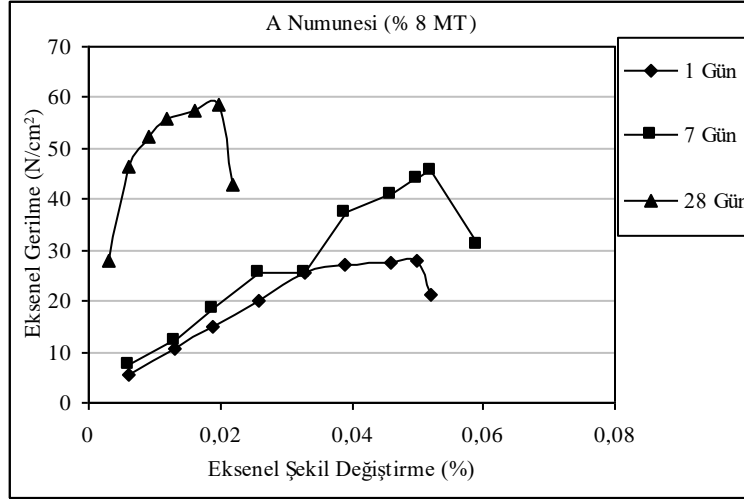


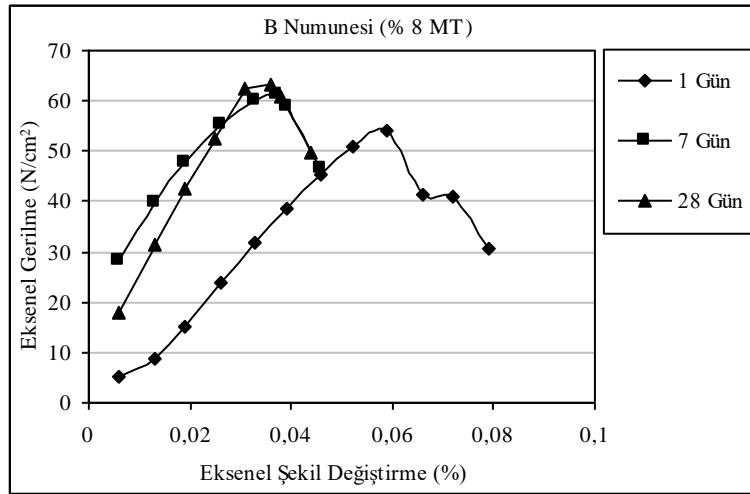
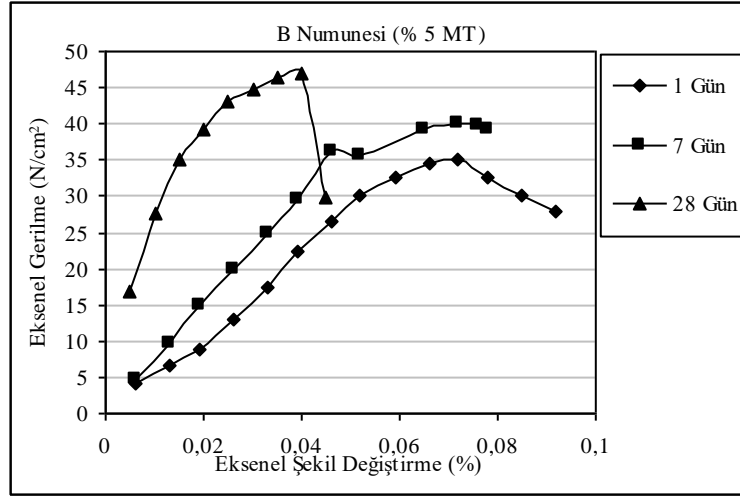
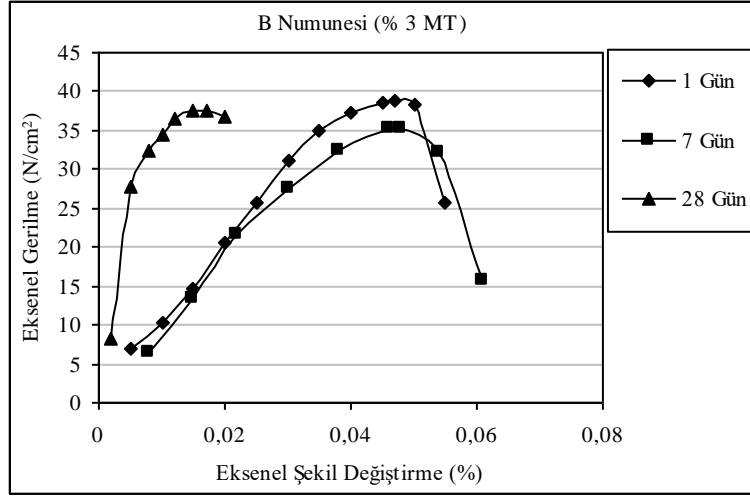
**EK – 2**

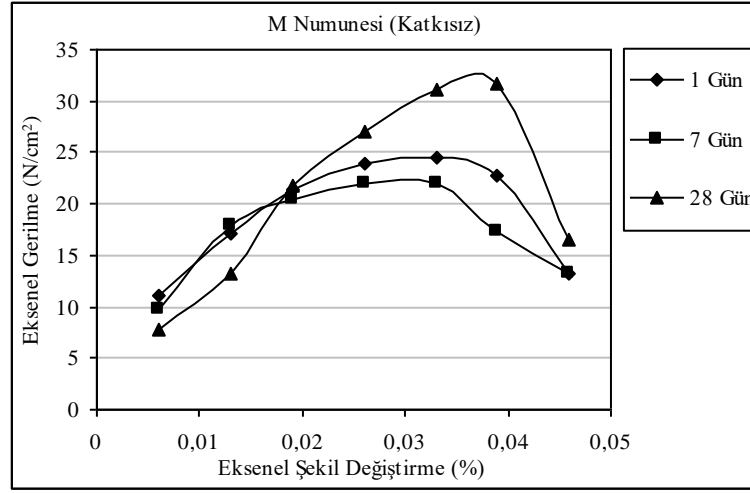
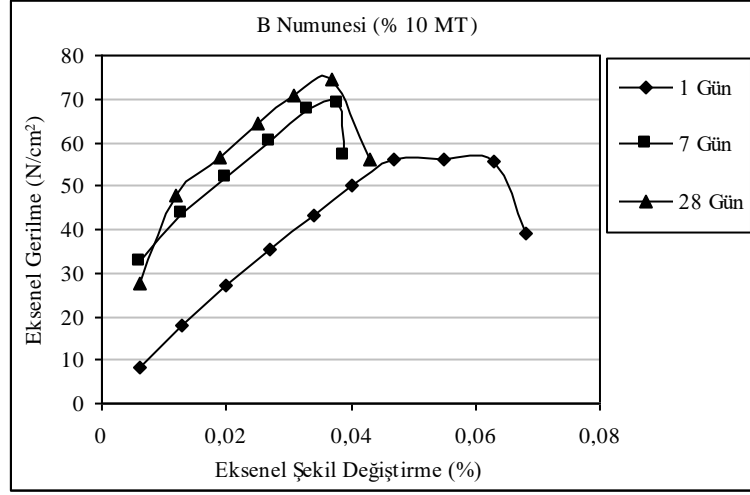
NUMUNELERE AİT 1 – 7 – 28 GÜNLÜK DEĞİŞİK KATKILARDAKİ EKSENEL ŞEKİL  
DEĞİŞTİRME – EKSENEL GERİLME GRAFİKLERİ

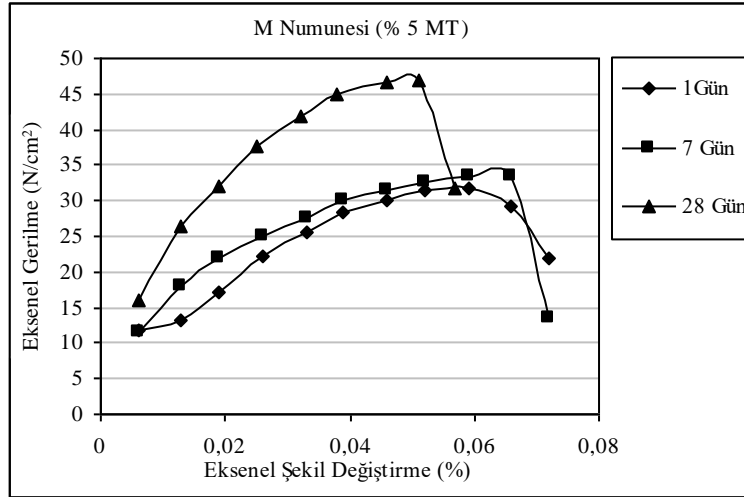
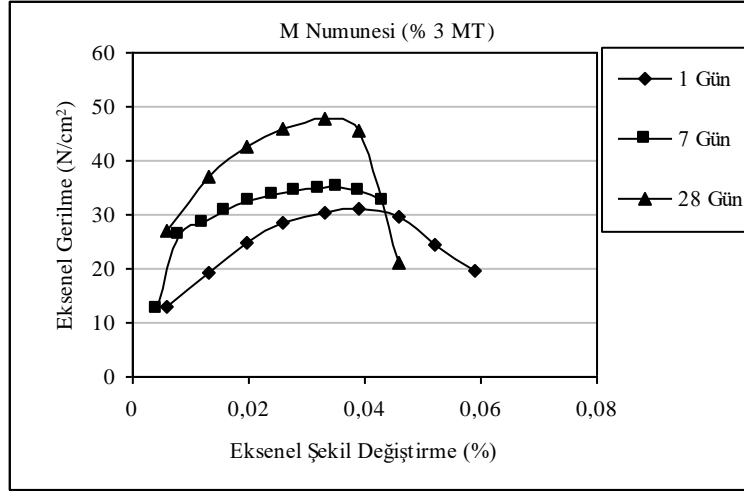




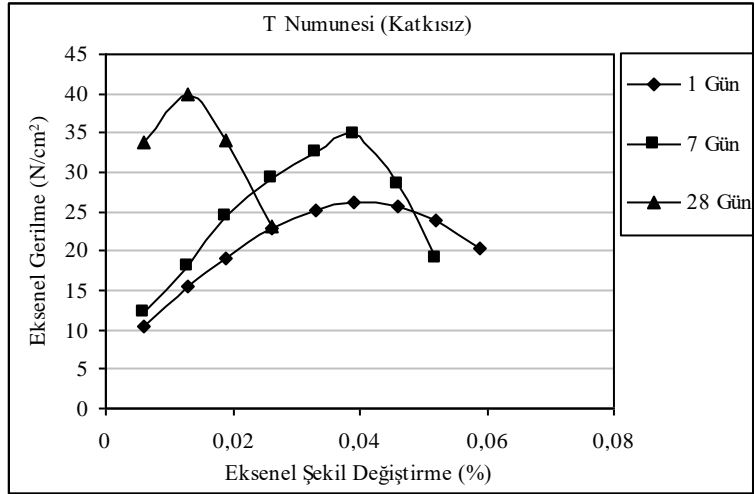
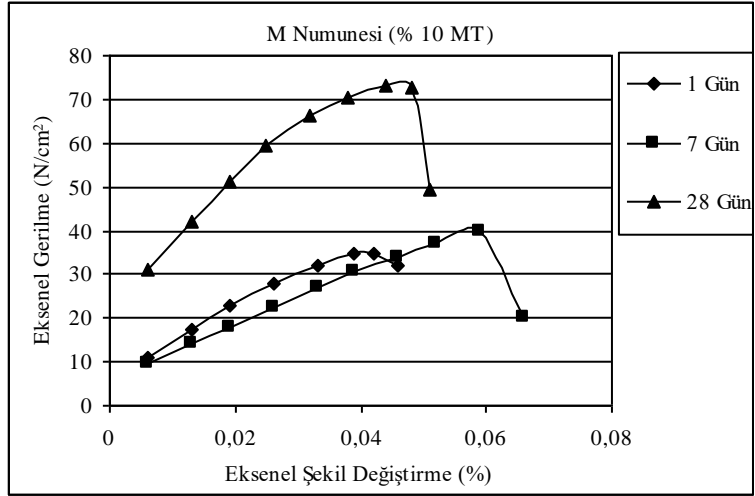
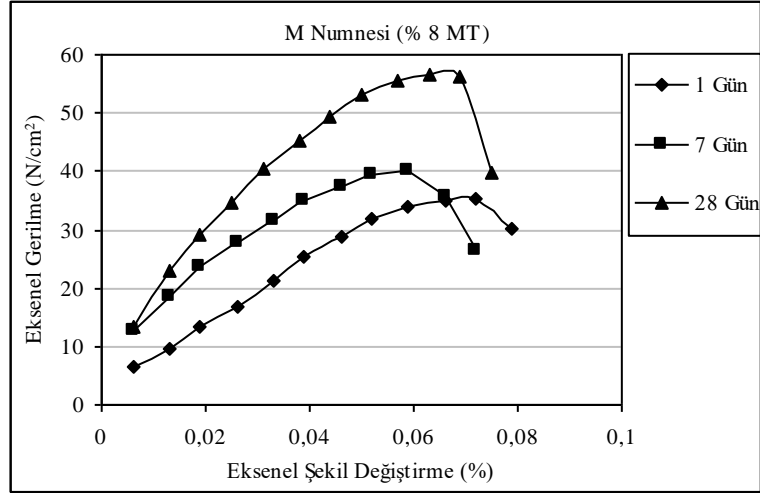


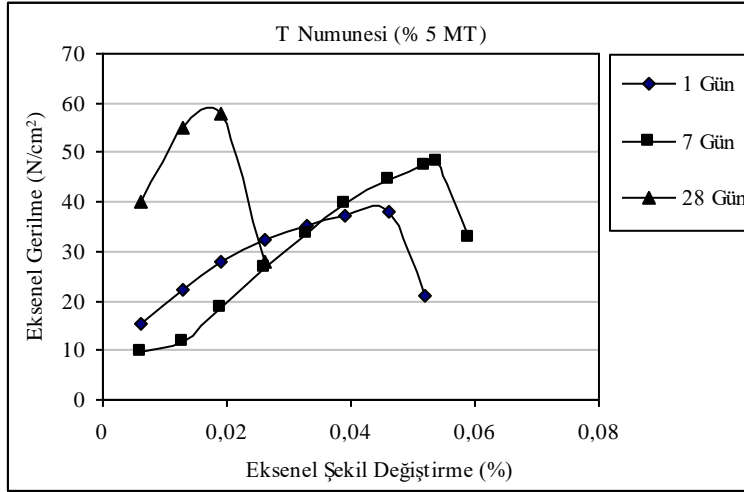
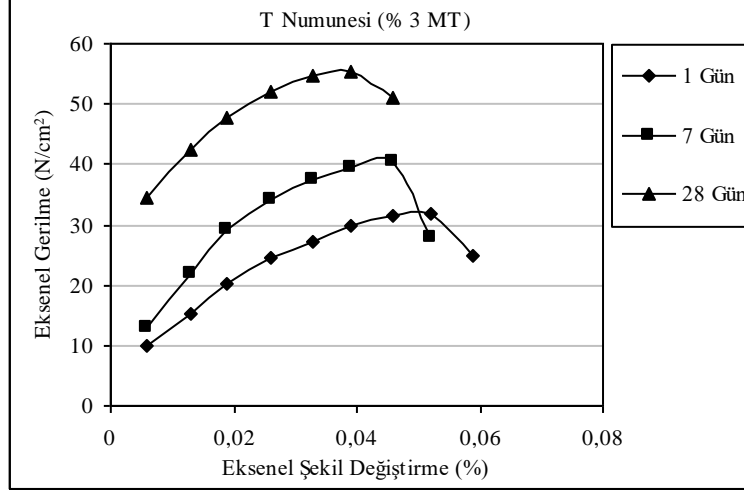


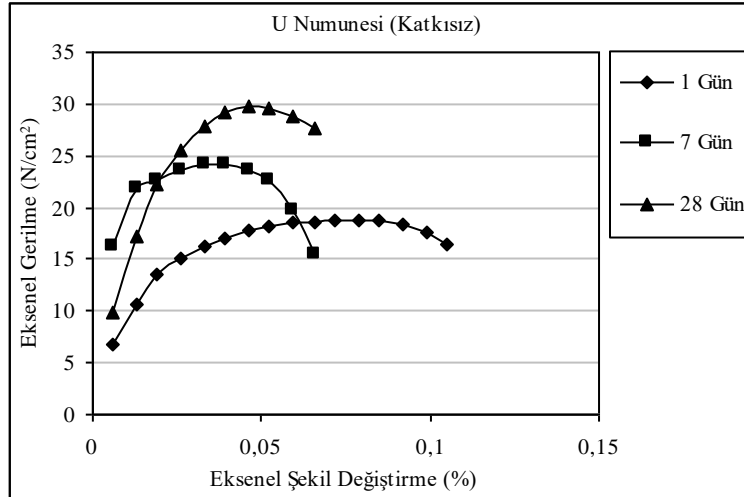
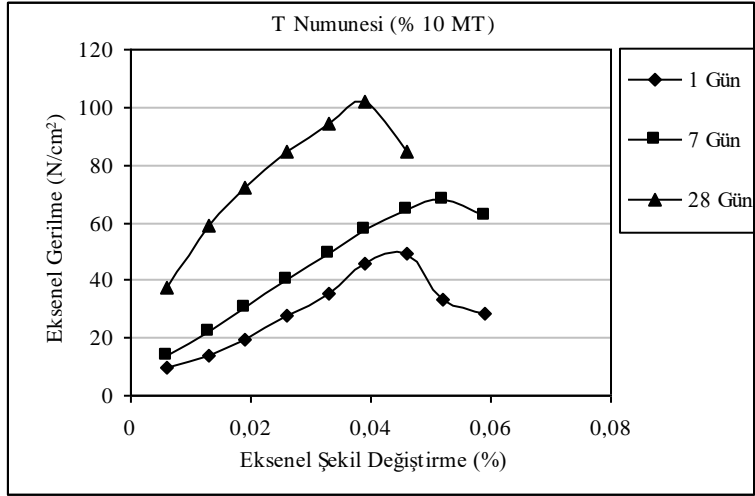
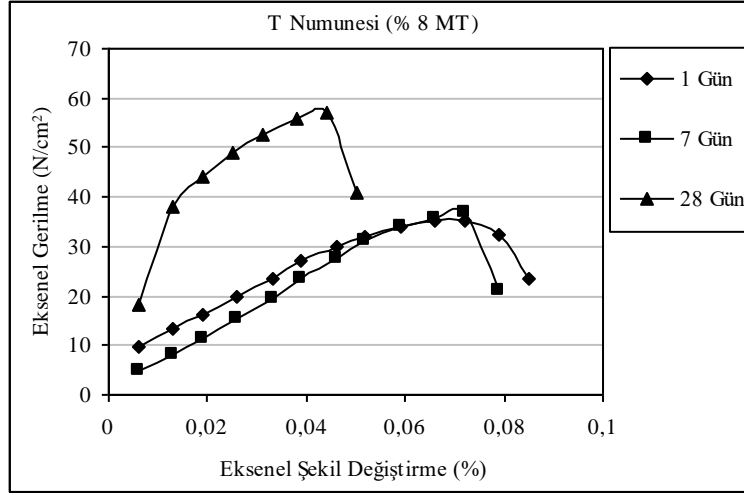


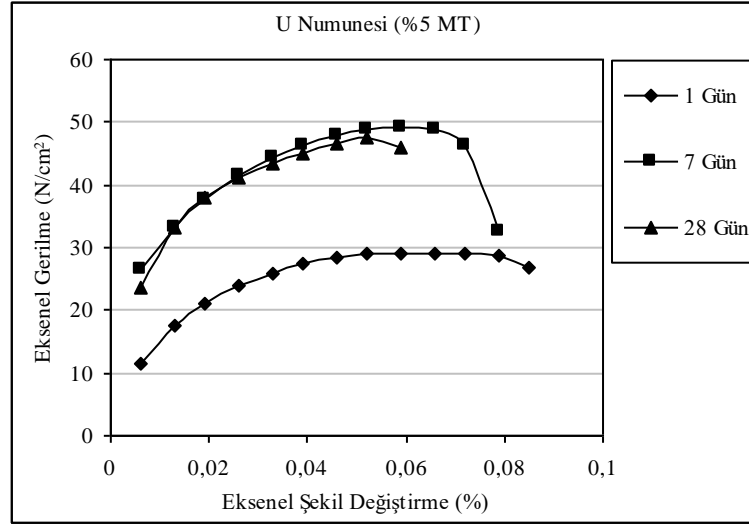
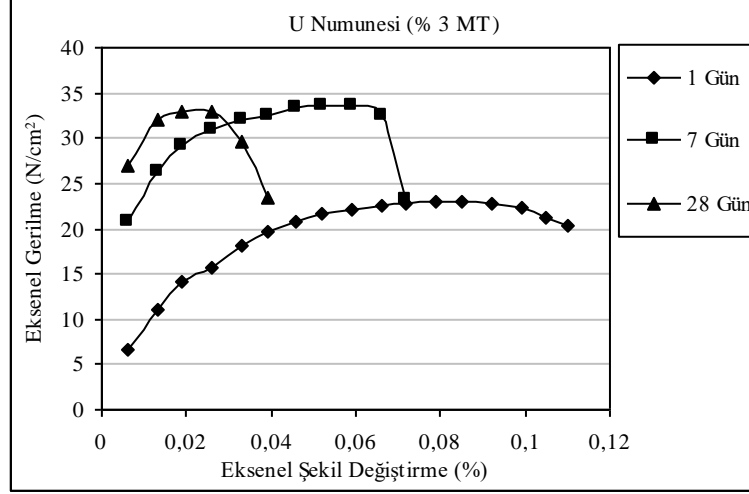


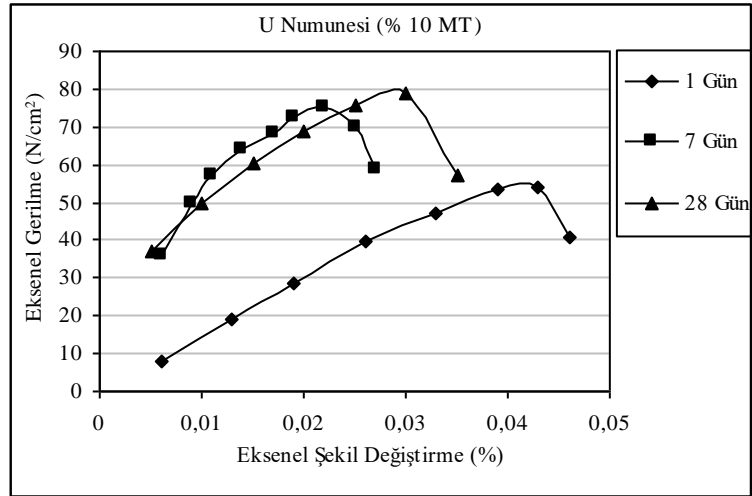
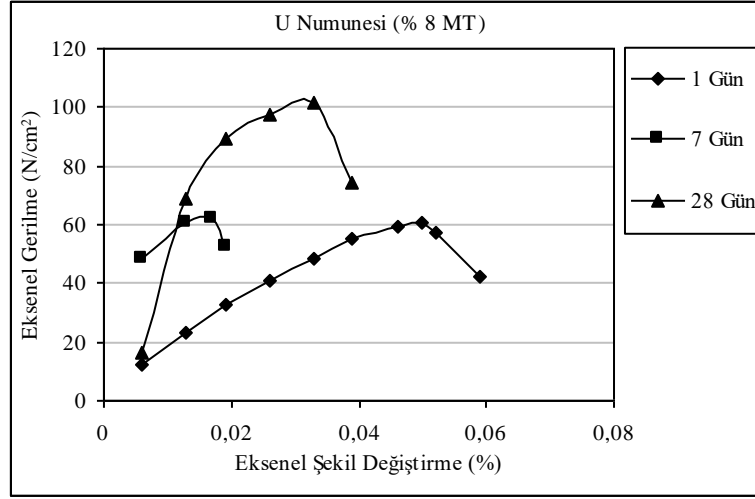












**EK – 3**

**NUMUNELERİN BİR KISMININ DENEY ÖNCESİ VE SONRASI FOTOĞRAFLARI**

## **Deney Öncesi Fotoğraflar**



A Numunesi %10 MT  
Numunesi %3 MT

B Numunesi %5 MT

T



## Deney Sonrası Fotoğraflar



U Numunesi %5 MT

T Numunesi %5 MT



A Numunesi %10 MT  
Numunesi %3 MT

B Numunesi %5 MT

T



A Numunesi %10 MT

## TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu çalışmada bana maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, öncülük eden değerli hocam Yrd.Doç.Dr. İsmail ZORLUER' e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu çalışmam sırasında bana destek olan değerli aileme, tezin yazılması aşamasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma en derin teşekkürlerimi sunuyorum.

## ÖZGEÇMİŞ

### Mürsel USTA

Doğum tarihi : 27/10/1978

Doğum yeri : ÇORUM

### ÖĞRENİM DURUMU

Lise : İskilip Lisesi (Fen Bilimleri)

Üniversite : Afyon Kocatepe Üniversitesi

Teknik Eğitim Fakültesi

Yapı Öğretmenliği'nden 2001-2002 T.E.F. birincisi olarak  
mezun oldu.

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

### LİSAN BİLGİSİ

İngilizce

## AÇIKLAMALAR

Yüksek lisans eğitimine devam ederken aynı zamanda Milli Eğitim’de ücretli öğretmen olarak iki yıl süreyle İngilizce ve matematik dersleri verdi.