



INM 305

Zemin Mekaniği

Zeminlerin Kompaksiyonu

Doç. Dr. İnan KESKİN

inaneskin@karabuk.edu.tr, inaneskin@gmail.com

www.inaneskin.com

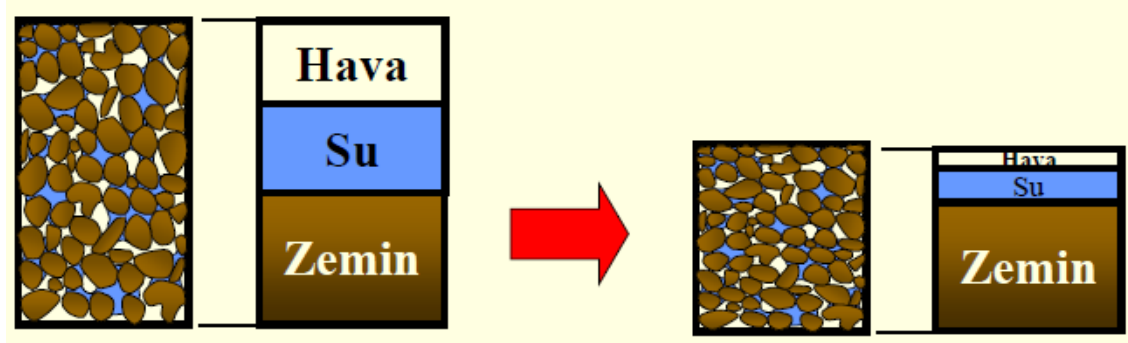
Haftalık Konular

Hafta 1:	Zeminlerin Oluşumu
Hafta 2:	Zeminlerin Fiziksel ve Endeks Özelliklerinin Tanımlanması ve Problem Çözümleri
Hafta 3:	Zeminlerin Fiziksel ve Plastisite Özelliklerine Yönelik Deneyler
Hafta 4:	Zeminlerde Tane Dağılımı ve Analizi
Hafta 5:	Zeminlerin Sınıflandırılması
Hafta 6:	Zemin Sınıflama Sistemleri Uygulamaları ve Karşılaştırmalar
Hafta 7:	Zeminlerde Su
Hafta 8:	Yeraltı Gerilmeleri; Zemin kütlesi nedeniyle oluşan gerilmeler
Hafta 9:	Yeraltı Gerilmeleri; Düşey yükleme ile oluşan zemin kütlesindeki gerilmeler
Hafta 10:	Zeminlerin Kompaksiyonu
Hafta 11:	Standart Proktor Deneyi ve Modifiye Proktor Deneylerinin Uygulaması
Hafta 12:	Sıkışma ve Konsolidasyon Teorisi
Hafta 13:	Konsolidasyon Deneyi
Hafta 14:	Karışık Problem Çözümleri
Hafta 15:	Final Sınavı

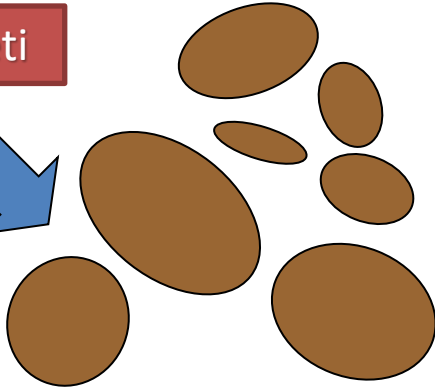
KOMPAKSİYON

Kompaksiyon; Zemin taneleri arasındaki hava boşluklarının mekanik araçlar yardımıyla azaltılarak zeminin sıkıştırılması işlemidir. Kompaksiyon miktarı kuru birim hacim ağırlık değerine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu işlemle, zemin taneleri daha az boşluklu yerleşerek, zeminin boşluk oranı azaltılır.

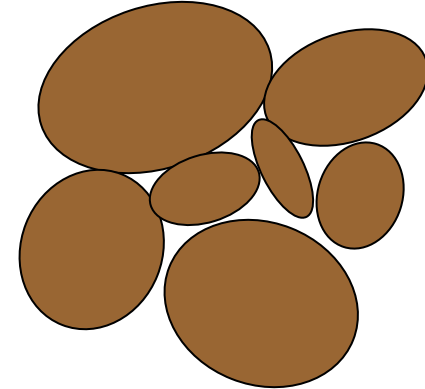
Zemin taneleri ve taneler arasındaki su pratik olarak sıkışmazdır. **Sıkışma boşluklardaki havanın sıkışması veya dışarı çıkması sonucu kısa sürede (ani) olur.** En yoğun durum, su içeriğinde hemen hemen hiç değişim olmadan zeminin içindeki havanın azaltılması ile sağlanır.



Sıkıştırma kuvveti

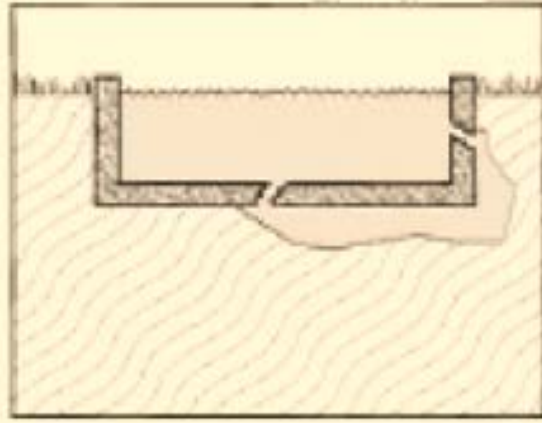


+ SU =

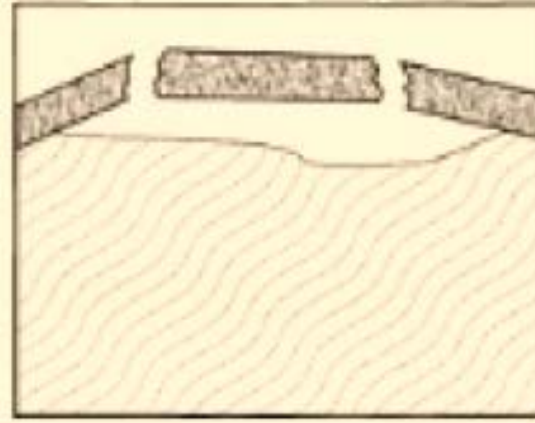


NEDEN KOMPAKSİYON?

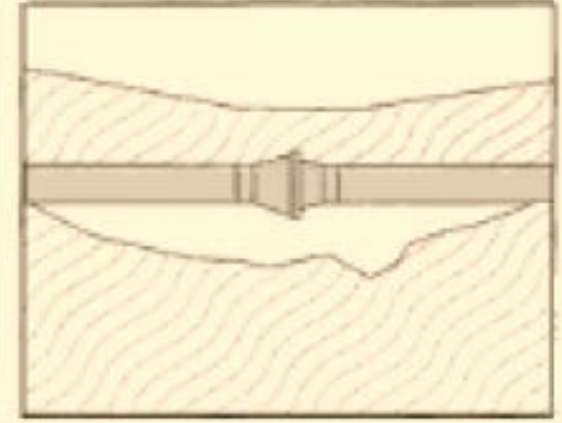
Karayolu, baraj, istinat duvarları, hava alanları, otoyollar gibi pek çok mühendislik uygulamasında zayıf zeminlerin sıkıştırılarak birim ağırlıklarının yükseltilmesi gerekmektedir. Bu işerde yapılacak yanlışlıklar önemli sonuçlar doğurabilir.



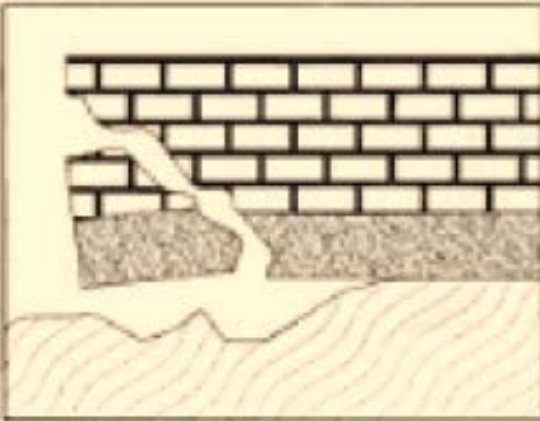
Bodrum ve havuz çatlakları
ve sızıntı



Döşeme çatlakları



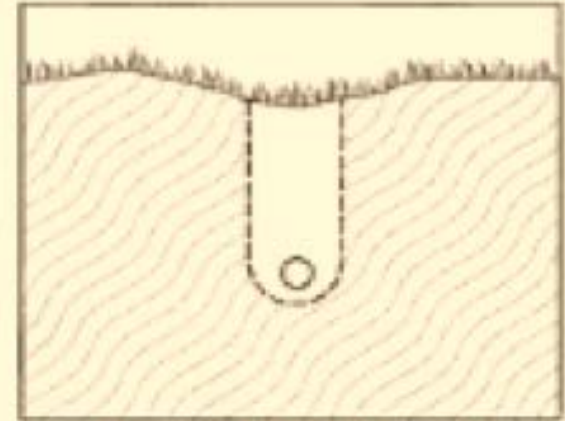
Boru sızıntısından olan
kırılmalar



Temel erozyonu



Yapı ayaklarında oluşan
erozyon

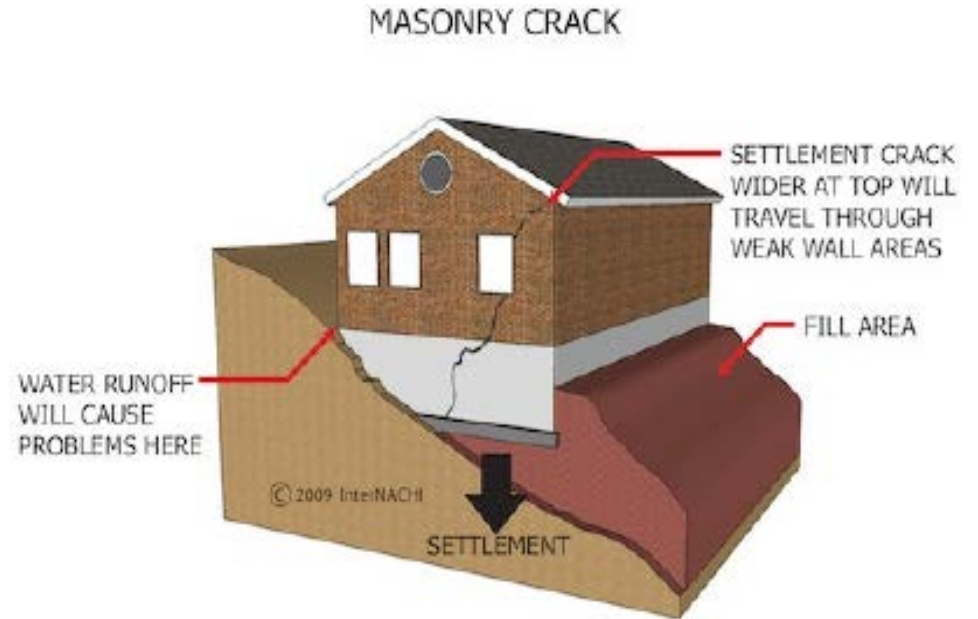


Hendeklerde çökme

KOMPAKSİYON ETKİLERİ

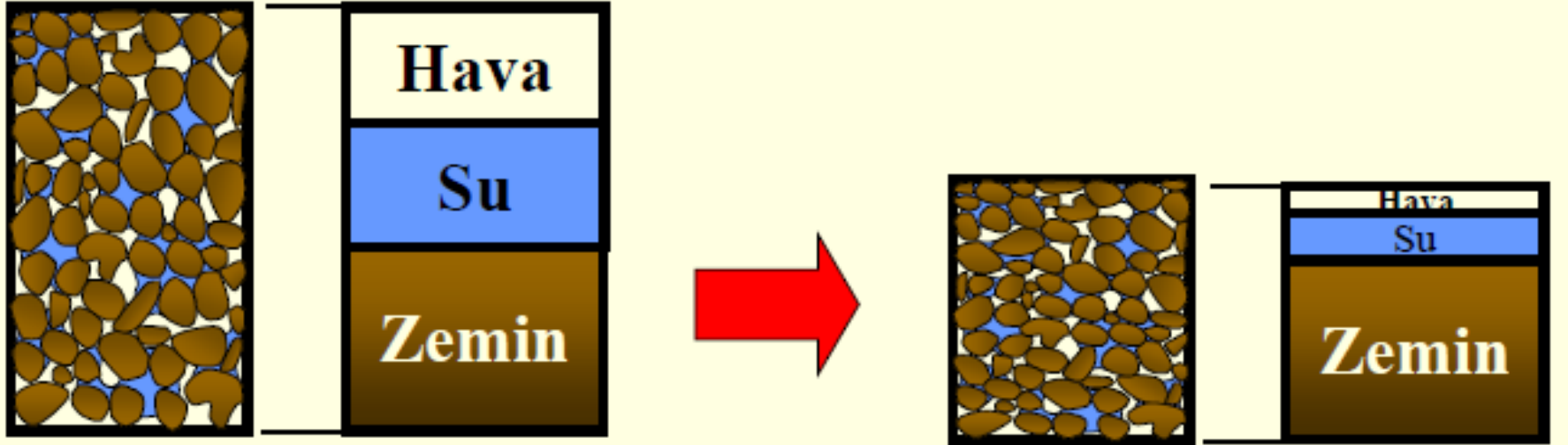
Kompaksiyonla genel olarak şu yararlar sağlanır;

1. Kayma direnci yükselir,
2. Zeminin taşıma gücü artırılır.
3. Zeminin geçirimsizliği azaltılır, zemine daha kararlı bir yapı kazandırılır. Böylece zeminin su alarak, hacim değişikliklerine uğraması azaltılır.
4. Zeminin sabit, hareketli, dinamik yükler altında yapacağı oturmalar, çökmeler azaltılır.
5. Sıkışabilirliği azalır,
6. Şişme-büzülme davranışı kontrol altına alınabilir,
7. Aşınabilirliği azalır veya gecikir,
8. Sıvılaşma yeteneği kaybolabilir,
9. Dondan aşırı etkilenmez.



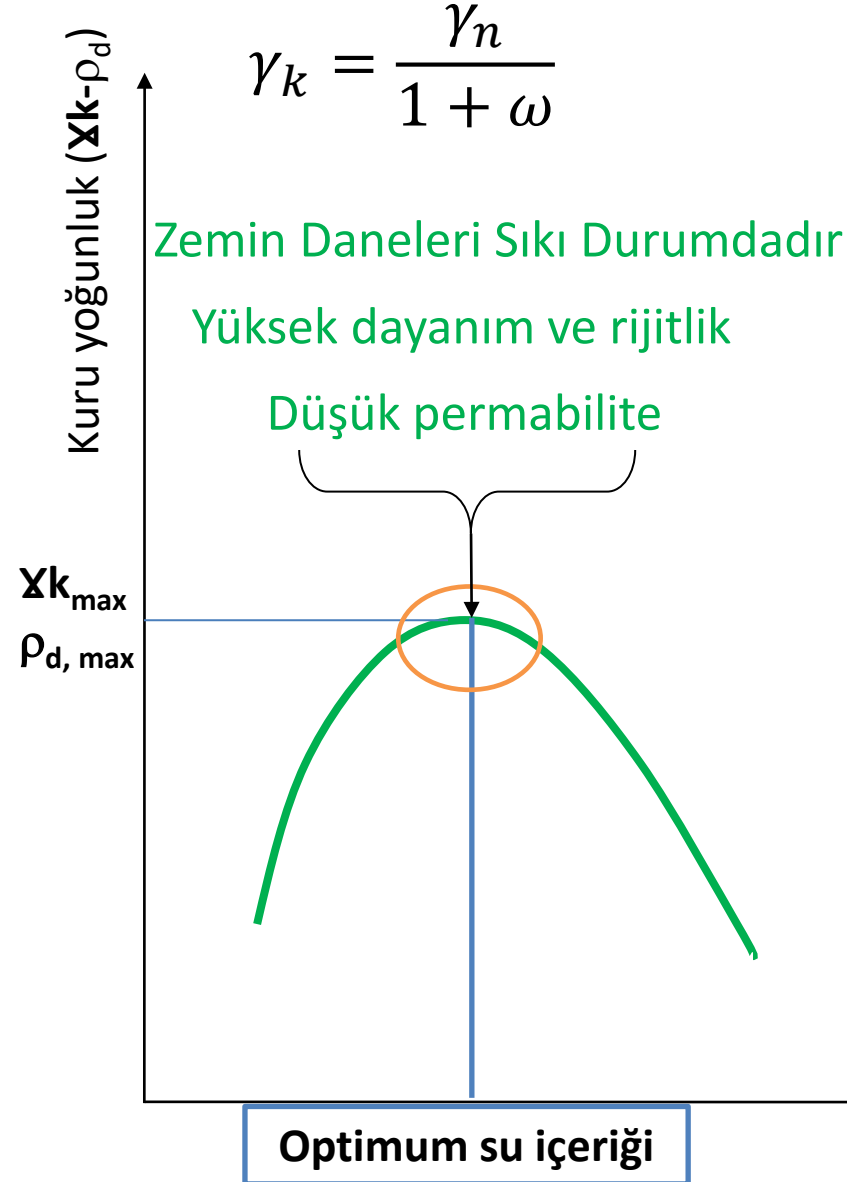
SIKIŞTIRMAYI ETKİLEYEN ÖZELLİKLER

- 1) Zeminin türü (kum, kil),
- 2) Tane dağılımı (D_{max} , c_u , c_r),
- 3) Kıvam limitleri (w_L , w_p),
- 4) Boşluk suyu kimyası (pH, tuzluluk),
- 5) Hava sıcaklığı (donma)



KOMPAKSİYON EĞRİSİ

Kompaksiyon eğrisi kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevasına bağlı olarak çizilir

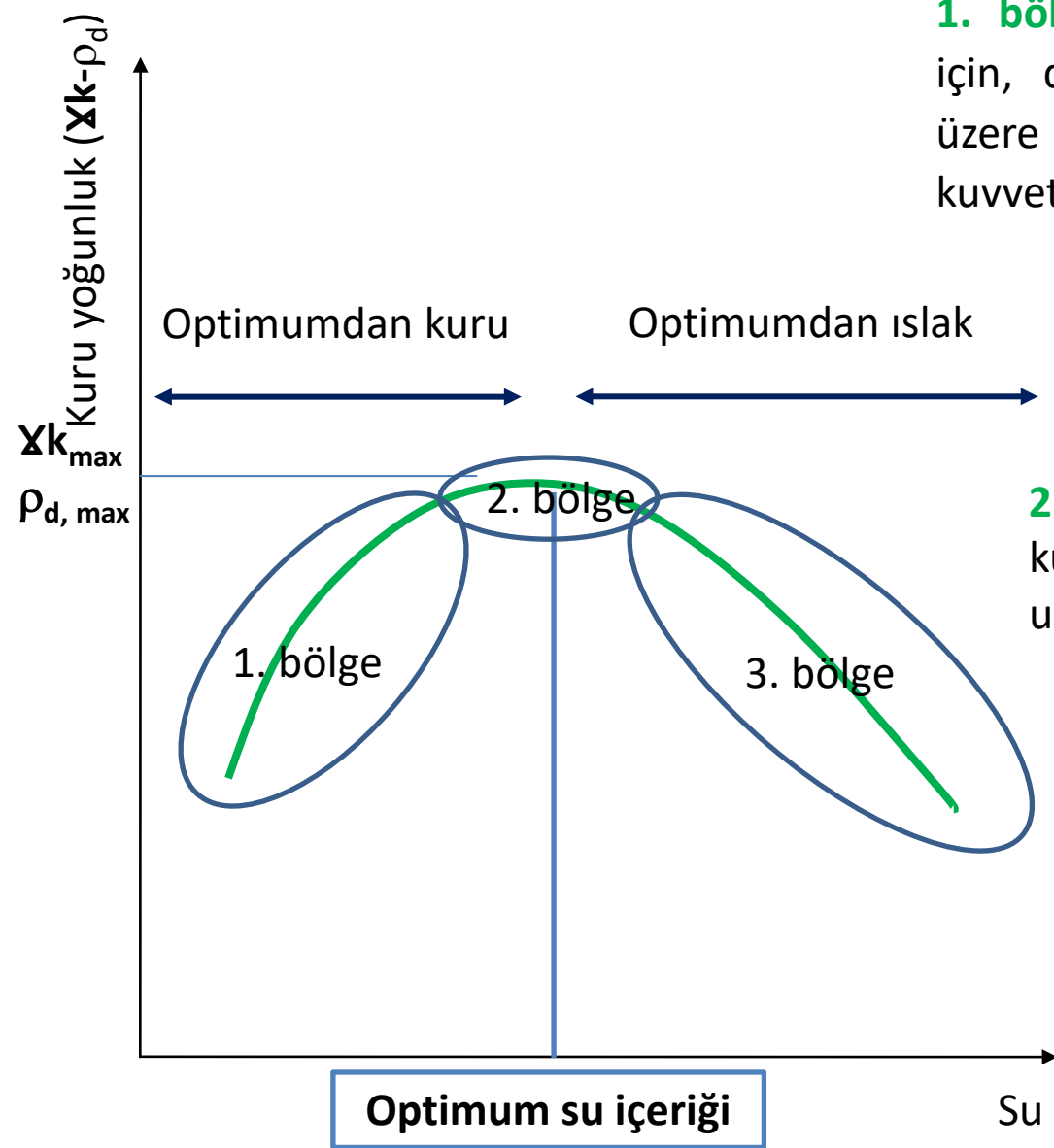


Belirli bir sıkıştırma yöntemi ve enerjisi seçilerek bir zeminin kurudan başlayarak birçok su muhtevasında sıkıştırılması durumunda birim hacim ağırlığının yükseldiği izlenecektir.

Doğal olarak bu artış zemin doygunluğa eriştiğinde durmaktadır. Bunun ötesindeki su muhtevalarında, zeminde su daha yüksek özgül ağırlıkta tanelerin yerini aldığından, birim hacim ağırlık düşürecektir.

KOMPASİYON EĞRİSİ

Kompaksiyon eğrisi kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevasına bağlı olarak çizilir

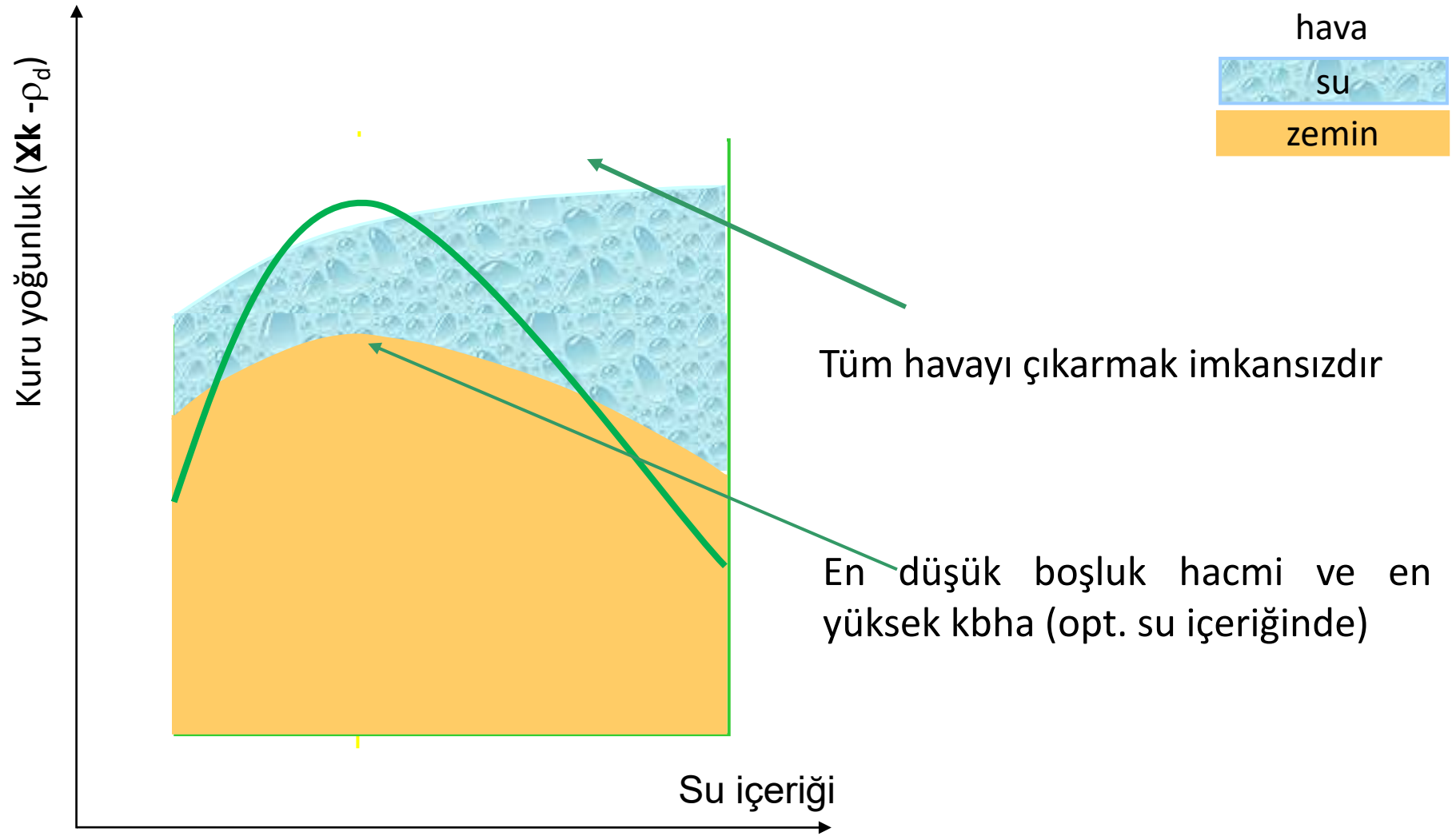


1. bölgede, zeminde yeterli su bulunmadığı için, danelerin daha az boşluklu yerleşmek üzere hareket etmeleri, daneler arası sürtünme kuvvetlerinden dolayı zordur.

2. bölgede, sıkışma en yüksek olmakta, kuru yoğunluk maksimum değere ulaşmaktadır.

3. bölgede, zeminde fazla su bulunduğu ve suyun da pratik olarak sıkışmaz olmasından dolayı, gene zeminin boşluk hacmi fazla azaltılamamaktadır

KOMPASİYON EĞRİSİ



Üç fazlı zemine su ilave edilmesi durumunda oluşan durum

SIFIR HAVA BOŞLUĞU EĞRİSİ

- 100% doyumlukla karşılaştırma

Tepe noktasında doyumluk derecesi ne kadar yüksekse sıkışma o kadar iyidir.

Pratik olarak tam doyum durum elde edilmez

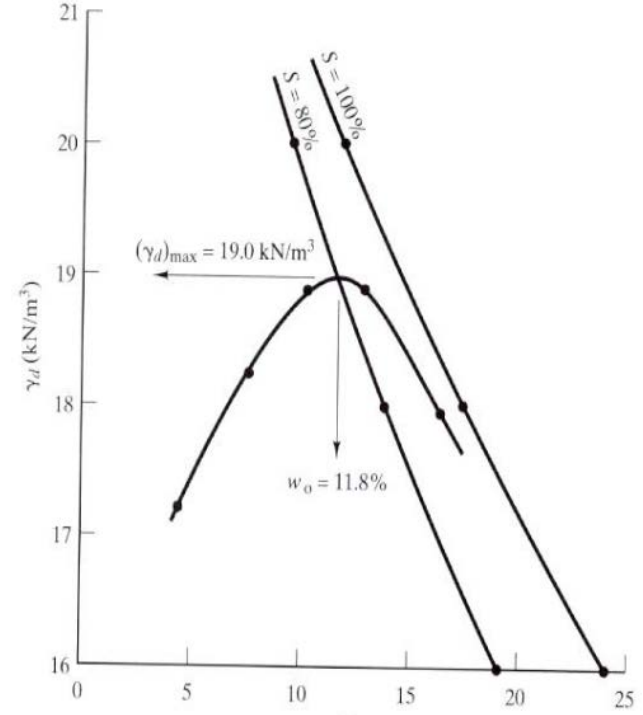
Sıfır hava boşluğu eğrisi (S=100%)

S<100%

S>100% (imkansız)

Suya doyumluk eğrilerinin denklemleri, $\gamma_{k\%x} = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + \frac{G_s * \omega}{S_r}}$

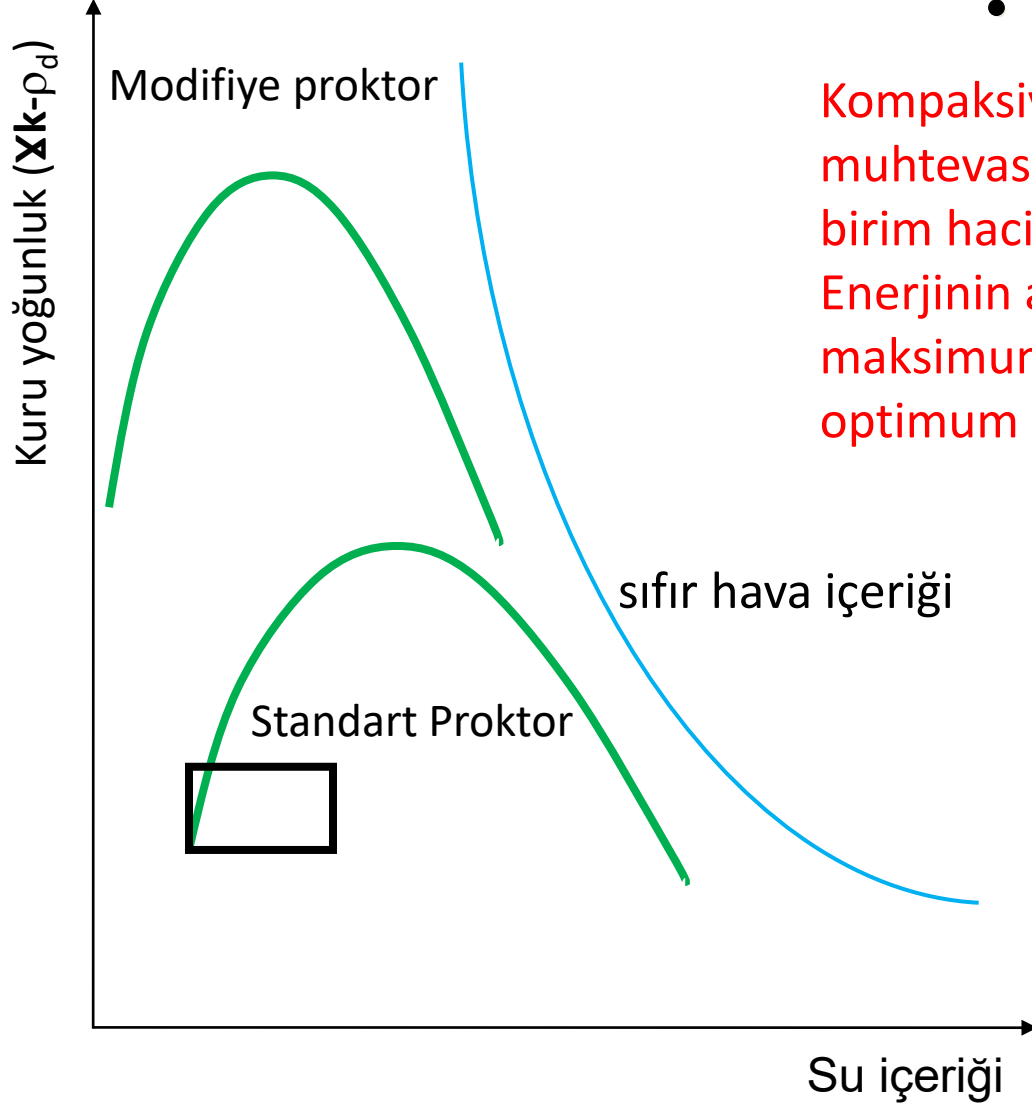
$$\gamma_{k\%x} = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + \frac{G_s * \omega}{S_r}}$$



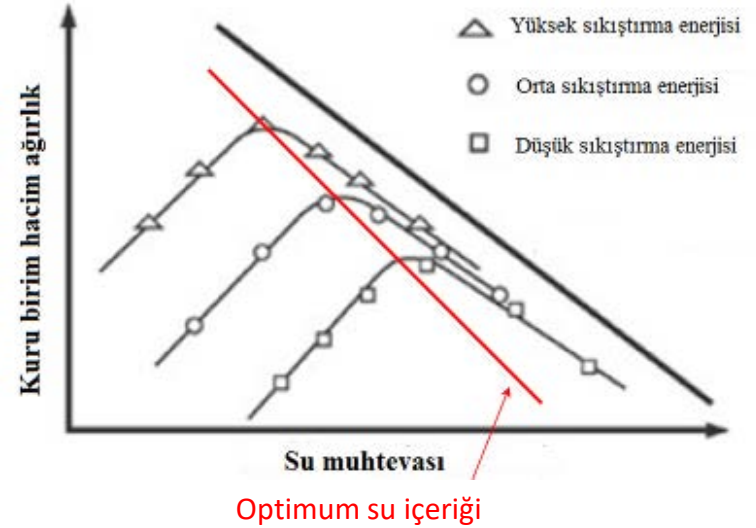
Bütün kompaksiyon noktaları sıfır hava boşluğu eğrisinin solunda olmak zorundadır.

KOMPAKSİYON ENERJİSİNİN ETKİSİ

- Optimum su içeriği düşer
- Maksimum kuru yoğunluk yükselir



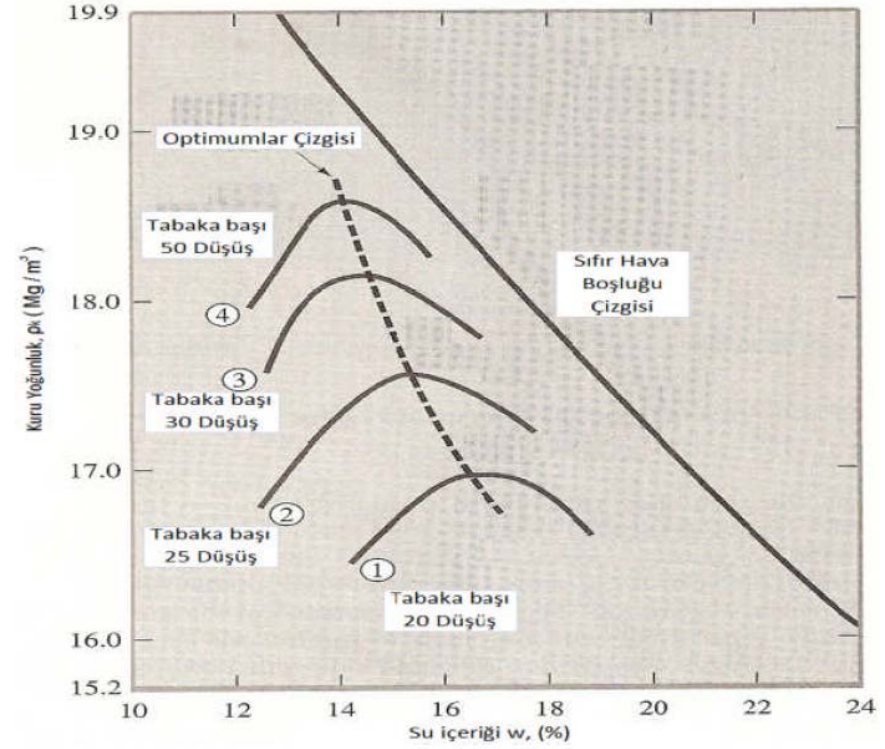
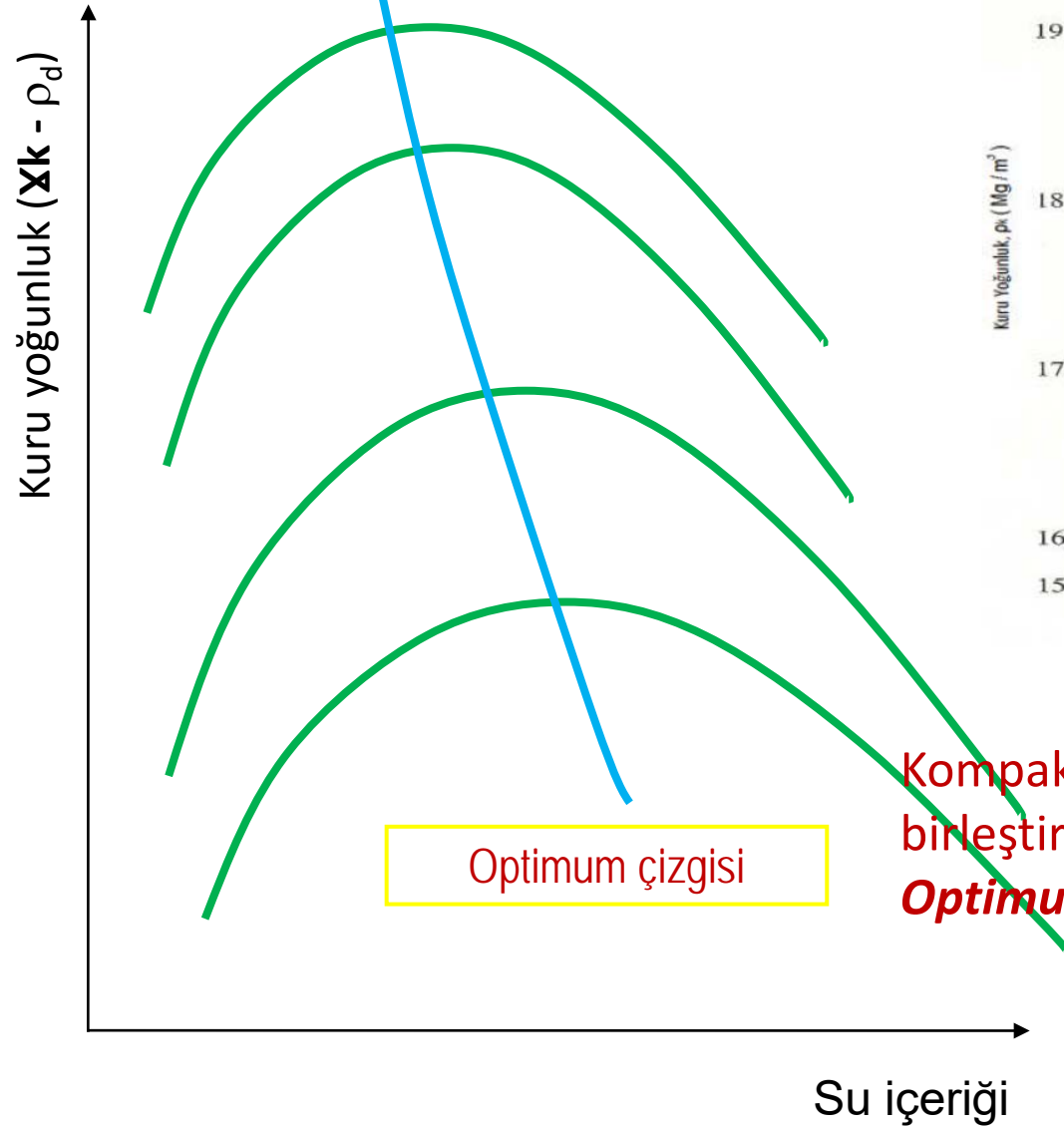
Kompaksiyon enerjisini artırmakla aynı su muhtevsındaki zemini daha yüksek bir doğal birim hacim ağırlığa getirmek mümkündür. Enerjinin artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık artmakta, optimum su muhtevası azalmaktadır.



Kompaksiyon Enerjisi $E = \frac{(Her\ tabakaya\ düşüş\ sayısı) \times (Tabaka\ sayısı) \times (Çekiç\ ağırlığı) \times (düşüş\ yüksekliği)}{Kalıp\ hacmi}$

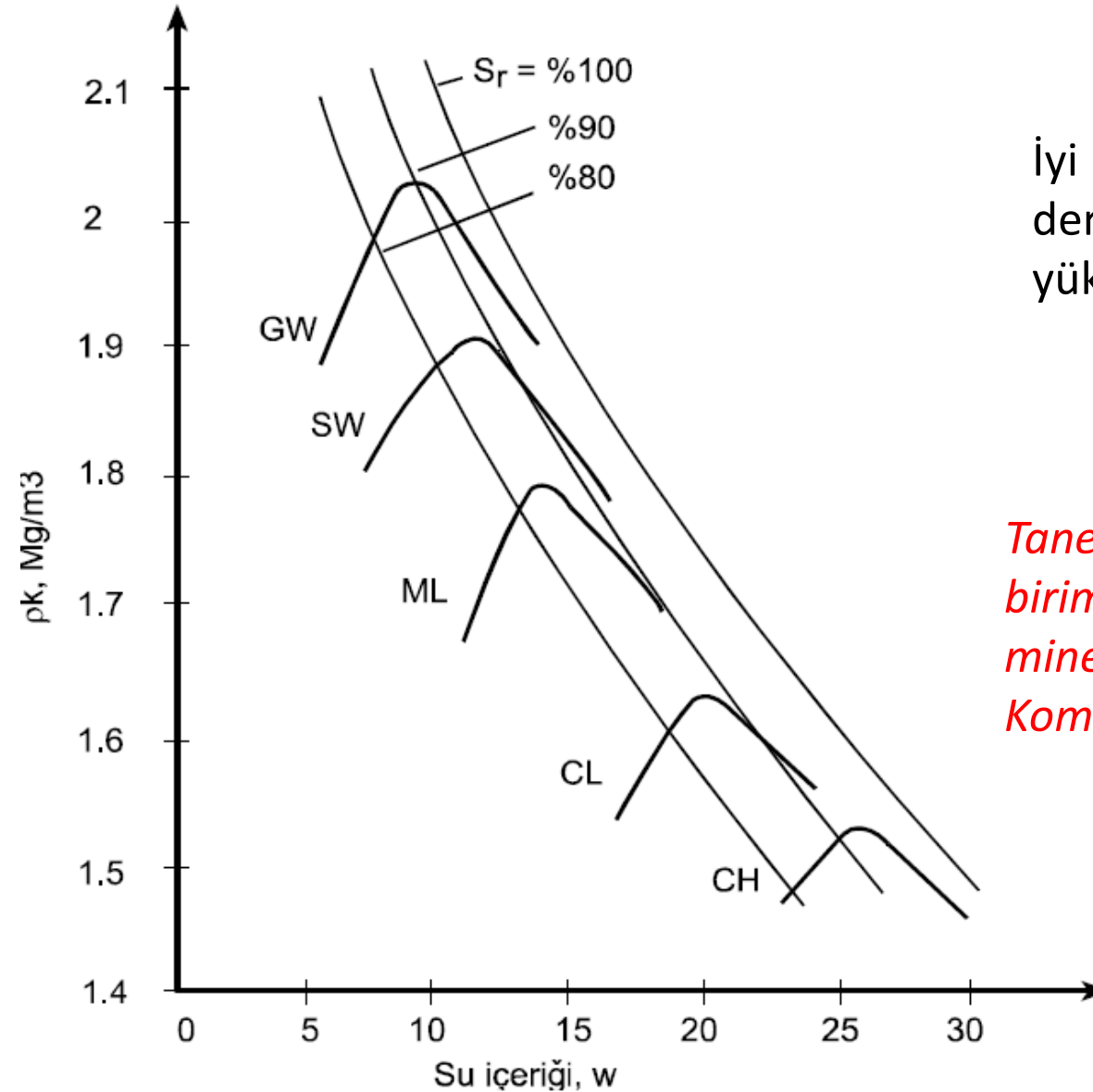
UYGUNLUK EĞRİLERİ Optimumlar Eğrisi

Farklı durumlardaki kompaksiyon eğrisi



Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarının birleştirilmesi ile elde edilen eğriye **Optimumlar Çizgisi** adı verilir.

ZEMİN CİNSİ VE DANE DAĞILIMININ KOMPAKSIYONA ETKİSİ



İyi derecelenmiş zemin, kötü derecelenmiş zemine göre daha yüksek γ_{kmax} 'a sahip olur

Tane çapı dağılımı, Tane şekli, Tane birim hacim ağırlığı, Mevcut kil minerallerinin miktarı ve özellikleri Kompaksiyon derecesini etkiler.

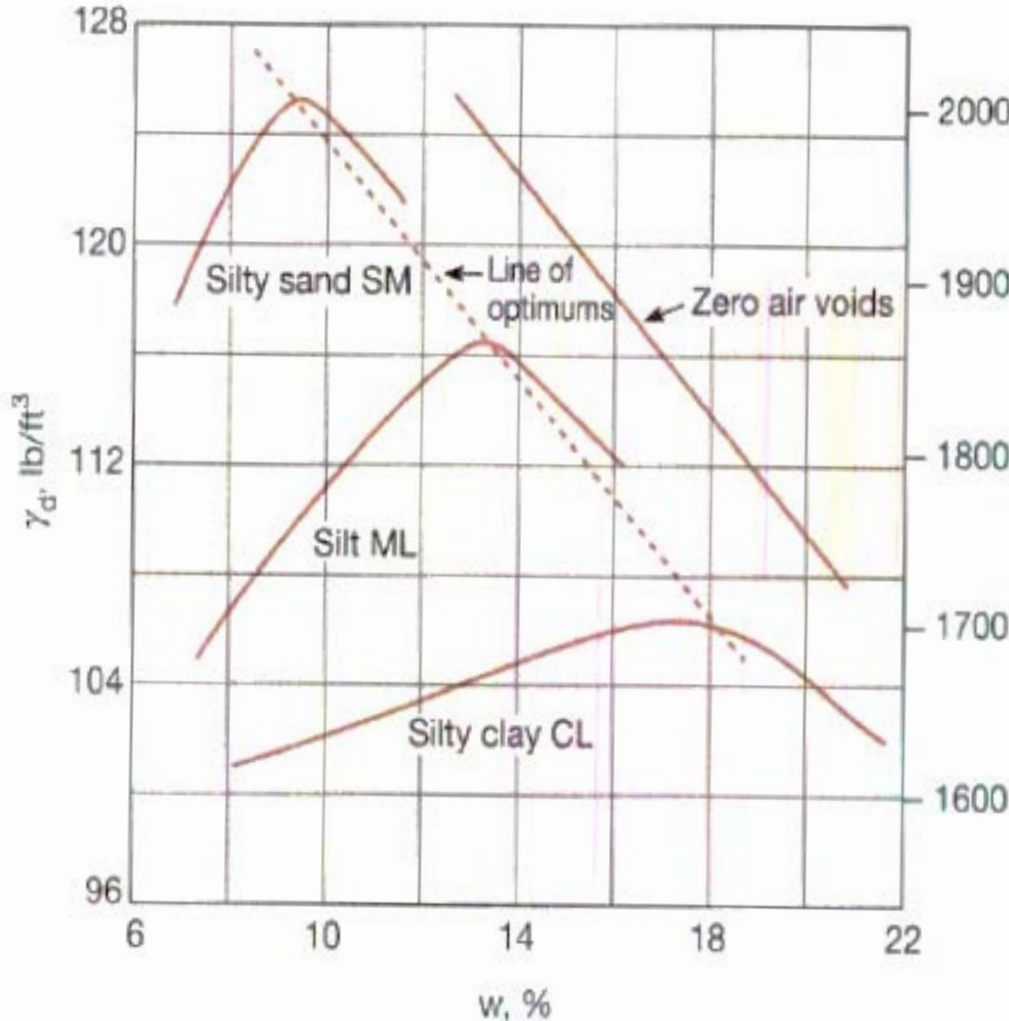
ZEMİN CİNSİ VE DANE DAĞILIMININ KOMPAKSİYONA ETKİSİ

İnce taneli zeminler optimuma ulaşmak için daha fazla suya ihtiyaç duyarlar,

Kaba raneli zeminler ise optimum su muhtevasına daha az bir su ile ulaşırlar.

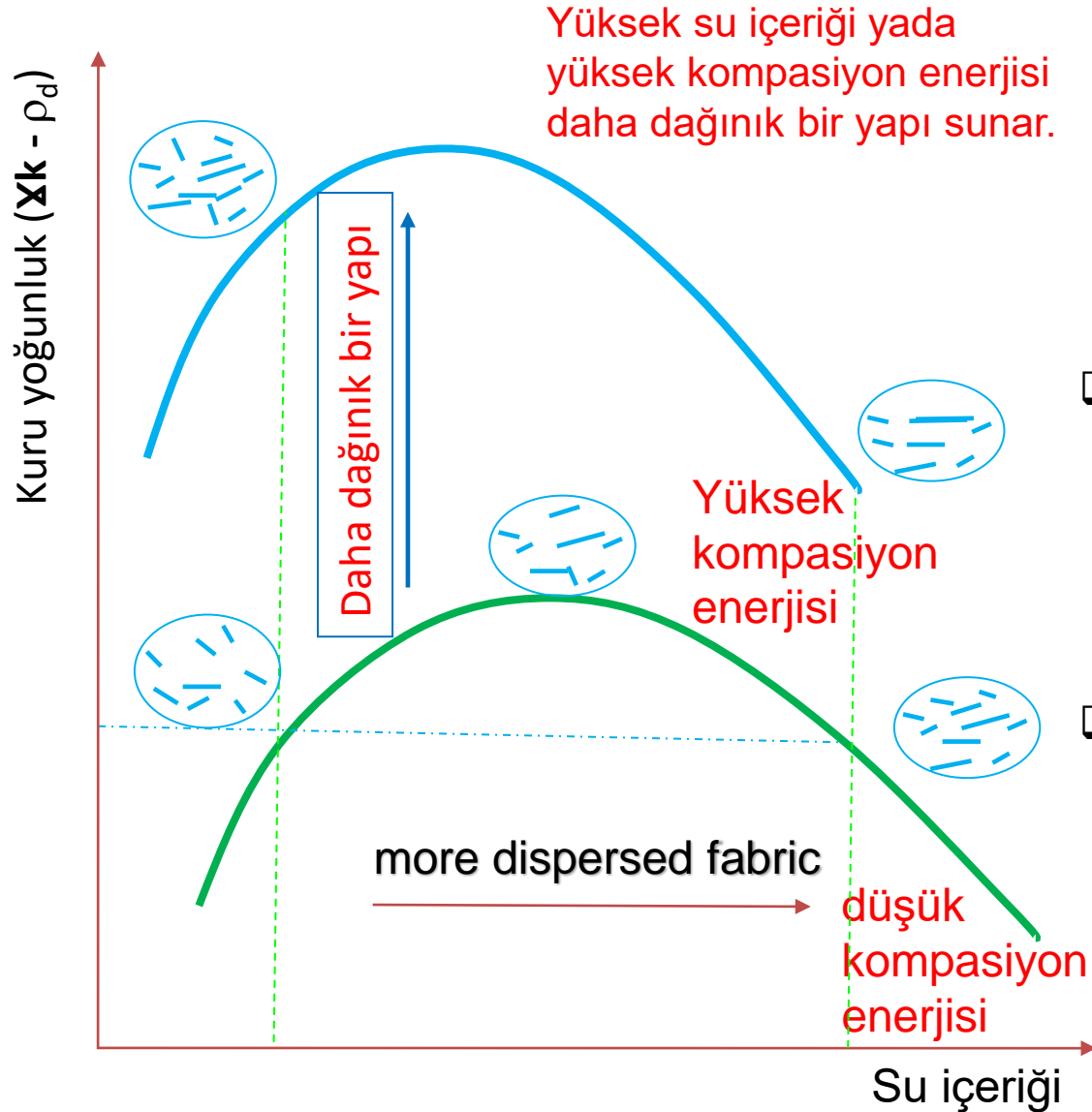
Kompaksiyon sonucu iri taneli zeminlerin sıkılık derecesi artmakta, bunun sonucu olarak da kayma mukavemetinde artışlar, yük altında sıkışmada (kompresibilitede) ise azalmalar meydana gelmektedir.

Böylece iri taneli zeminler kompaksiyon sonucu daha yüksek taşıma gücüne sahip olmakta ve daha az oturmaya uğramaktadır.



KOMPAKSİYON VE ZEMİN DOKUSU

Kompaksiyon su muhtevası ve sıkıştırma yöntemi sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin tane iç yapısını etkilemektedir.



- ❑ Optimum su muhtevasından daha düşük su muhtevalarında (**kuru tarafta**) **sıkıştırılan** kohezyonlu zeminlerin iç yapısı incelendiğinde, zemini oluşturan tanelerin genellikle birbirlerine göre **eğimli** olduğu ve taneler arasında kenar-yüzey temasının hakim bulunduğu,
- ❑ Optimum su muhtevasından daha yüksek su muhtevalarında (**ıslak tarafta**) **sıkıştırılan** zeminlerin ise hemen hemen birbirlerine **paralel** uzanan tanelerden oluştuğu gözlemlenmektedir
- ❑ Kompaksiyon enerjisinin artırılması ve yoğrulma etkisi gösteren kompaksiyon yöntemlerinin (keçi ayaklı silindir gibi) kullanılması da tanelerin birbirine paralellik derecesini artırıcı yönde etki yapmaktadır.

OPTİMUM SU MUHTEVASININ KURU VE ISLAK TARAFINDA SIKIŞTIRILAN ZEMİNLER

Özellik

Karşılaştırma

1. Zemin iç yapısı yapısı,

Kuru taraf gelişigüzel, Islak taraf eğimli tane
Kuru tarafın iç yapısı daha çabuk göçmeye müsait

2 .Permeabilite

Kuru taraf daha geçirgen

3. Sıkışabilirlik

Düşük basınçlarda ıslak taraf yüksek sıkışabilirlikte
Yüksek basınçlarda kuru taraf yüksek sıkışabilirlikte.
Kuru taraf basınç altında daha hızlı sıkışır ve
şişmeye daha yatkındır.

4. Mukavemet

Kompaksiyon Su muhtevasında

a-)Drenajsız Kuru tarafta daha yüksek

b-)Drenajlı Kuru taraf biraz daha yüksek

Suya doygun hale geldikten sonra

a-)Drenajsız Şişmeye izin verilmezse kuru taraf
aksi halde ıslak taraf daha yüksek

b-)Drenajlı Hemen hemen aynı

5. Boşluk suyu basıncı

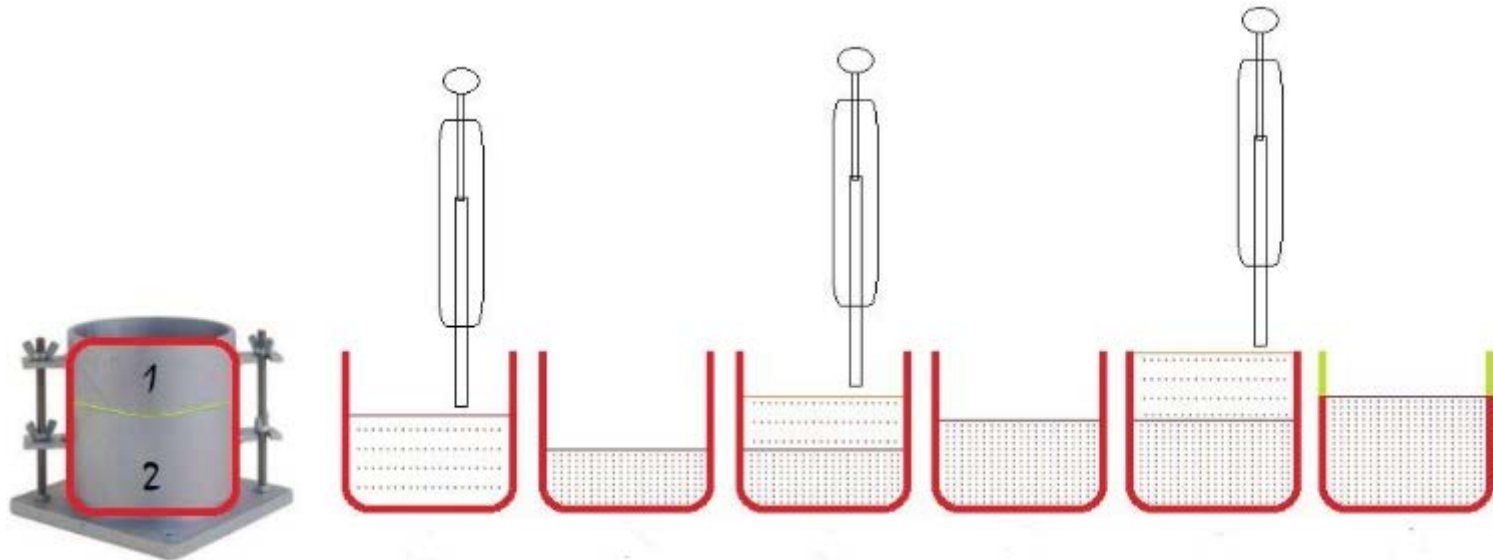
Islak tarafta daha yüksek

6. Sensitivite

Kuru taraf için daha yüksek

KOMPAKSİYON DENEY TÜRLERİ

	Standart Kompaksiyon Deneyi	Değiştirilmiş Kompaksiyon Deneyi
Standartlar	ASTM D 698 , AASHTO T-99	ASTM D 1557 ve AASHTO T-180
Tokmak Kütleli	2,5 kg	4,54 kg
Tokmak Düşü Yüksekliği	305 mm	457 mm
Zemin Katman Sayısı	3	5
Katman Başına Düşen Tokmak Düşüş Sayısı	25	25
Her Numuneye Uygulanan Enerji	600 kN-N/m ³	2700-N/m ³
Kalıp Hacmi	900 cm ³	900 cm ³



KOMPAKSİYON DENEY TÜRLERİ

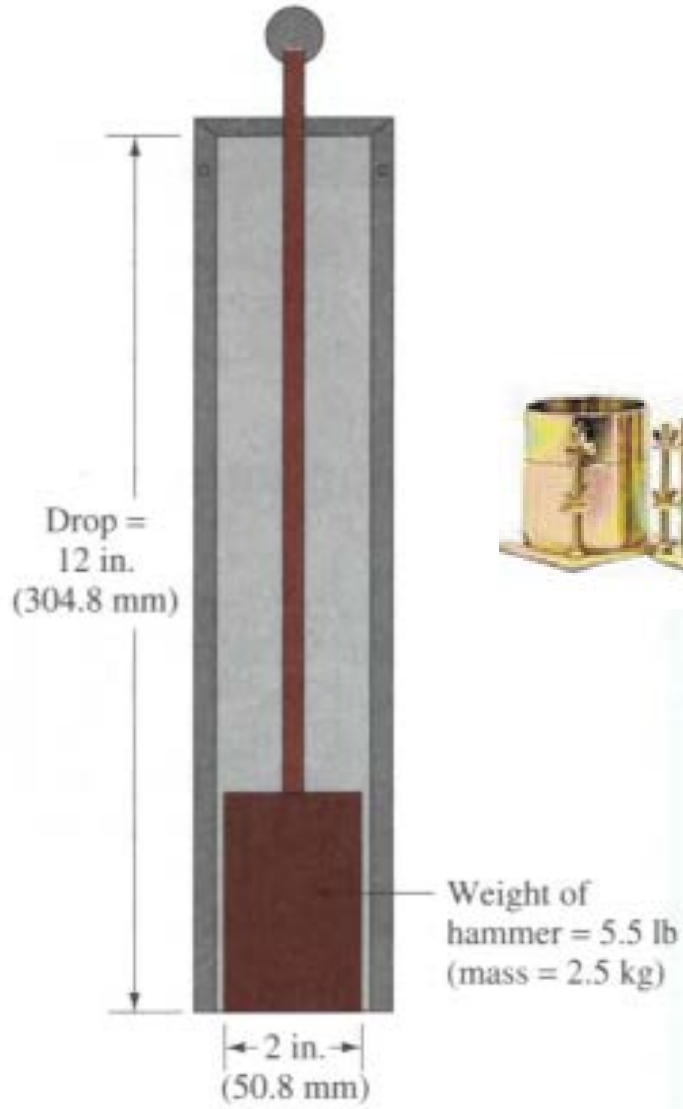
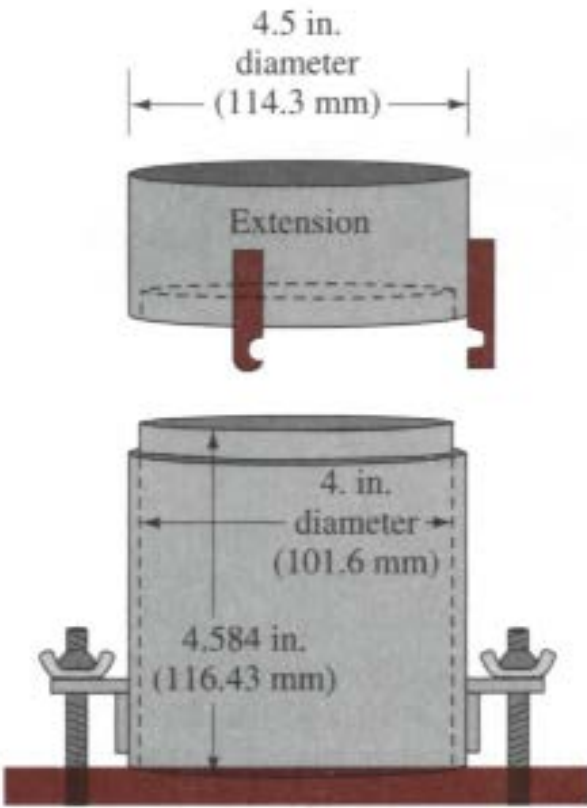
4.5 kg lık çekiç ile yapılan deney için kullanım şartları

Kullanım şartı	Kullanılan malzeme	Kalıp boyutları	Tabak a sayısı	Her tabak aya vuruş sayısı
%20 ve daha az malzeme 4.75 mm elek üzerinde kalıyor ise	4.75 mm elekten geçen	Çap: 105 mm Boy: 115.5 mm	3	25
%20 ve daha fazla malzeme 4.75 mm lik elek üzerinde kalıyor ve %20 ve daha az malzeme 9.5 mm lik elek üzerinde kalıyor ise	9.5 mm elekten geçen	Çap: 105 mm Boy: 115.5 mm	3	25
%20 den fazla malzeme 9.5 mm lik elek üzerinde kalıyor ve %30 ve daha az malzeme 20 mm lik elek üzerinde kalıyor ise	20 mm lik elekten geçen	Çap: 152.4 mm Boy: 115.5 mm	3	56

Kullanım şartı	Kullanılan malzeme	Kalıp boyutları	Tabak a sayısı	Her tabak aya vuruş sayısı
%20 ve daha az malzeme 4.75 mm elek üzerinde kalıyor ise	4.75 mm elekten geçen	Çap: 105 mm Boy: 115.5 mm	5	25
%20 ve daha fazla malzeme 4.75 mm lik elek üzerinde kalıyor ve %20 ve daha az malzeme 9.5 mm lik elek üzerinde kalıyor ise	9.5 mm elekten geçen	Çap: 105 mm Boy: 115.5 mm	5	25
%20 den fazla malzeme 9.5 mm lik elek üzerinde kalıyor ve %30 ve daha az malzeme 20 mm lik elek üzerinde kalıyor ise	20 mm lik elekten geçen	Çap: 152.4 mm Boy: 115.5 mm	5	56

2.5 kg lık çekiç ile yapılan deney için kullanım şartları

DENEY EKİPMANI



DENEY YÖNTEMİ

KOMPAKSİYON DENEY FORMU

$G_s = \dots\dots\dots$

Birim Hacim Ağırlık

Deneysel No	1	2	3	4	5
Kalıp Ağırlığı (g)					
Kalıp Hacmi (cm^3)					
Yağ Numune + Kalıp (g)					
Islak Numune (g)					
BHA (γ_w) (g/cm^3)					



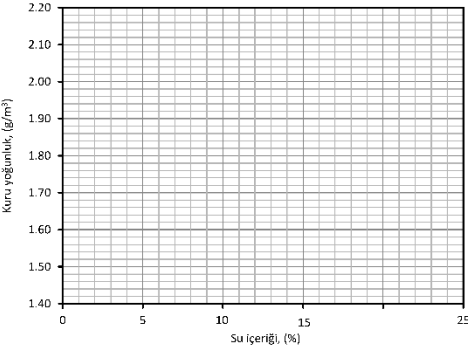
Su İçeriği

Kap No	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Yağ Num. + Kap (g)										
Kuru Num. + Kap (g)										
Kap ağırlığı (g)										
Suyun ağırlığı (g)										
Kuru num. ağı. (g)										
Su içeriği, w (%)										
Ortalama Su İçeriği (%)										
KBHA, γ_k (g/cm^3)										



INM308 ZEMİN MEKANİĞİ I

Doç. Dr. İnan KESKİN

 COMPAKSİYON TEST KURU YOĞUNLUK-SU İÇERİĞİ İLİŞKİSİ 						
İş No.	Yer	Sondaj no				
Proje		Numune No.				
Tarih		Derinlik (m)				
Zemin Tanımı	Tane yoğunluğu, ρ_s (g/m ³)					
	20mm elek üzerinde kalan (%)					
Test türü	2.5kg-1l kalıp	Çekiç	Kütle (kg)	2.5	Düşüş yüksekliği (mm)	300
	3 layers- 27 vuruş/tabaka	Kalıp	Çap. (mm)	105	Kalıp hacmi (ml)	1000
YOĞUNLUK	Test no.					
	Eklenen su hacmi (ml)					
	Kalıp kütlesi + taban (g)					
	Kalıp kütlesi + taban + zemin (g)					
	Sıkıştırılan zemin kütlesi(g)					
	Yoğunluk (g/m ³)					
SU İÇERİĞİ	Kab no.					
	Kabın kütlesi (g)					
	Kabın kütlesi + ıslak zemin (g)					
	Kabın kütlesi + kuru zemin (g)					
	Suyun kütlesi (g)					
	Kuru zemin kütlesi (g)					
	Su içeriği (%)					
Kuru Yoğunluk (g/m ³)						
KOMPAKSİYON EĞRİSİ			SONUÇ			
	Optimum Su İçeriği (%)		Maksimum Kuru Yoğunluk (g/m ³)			
	Uyarılar:					
	Testi yapan	Kontrol eden				
KARABÜK ÜNİVERSİTESİ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ						

ARAZİDE KOMPAKSİYON

Arazide kompaksiyon işlemi esnasında tabakalar halinde serilen zeminin yerinde sıkıştırılması yapılmaktadır.

- ❑ Bu sıkıştırma işleminin en randımanlı ve ekonomik olarak gerçekleştirilebilmesi amacı ile değişik türde birçok arazi kompaksiyon makinesi geliştirilmiştir.
- ❑ Proje amaçlarına en uygun kompaksiyon makinesinin seçimi kompaksiyon işleminin başarı ile yürütülmesinde en önemli unsurlardan birini oluşturmaktadır.
- ❑ Zeminin dolgu sahasına yerleştirilmesi sırasında kalınlıkları belirli sınırlar altında kalacak şekilde tabakalar halinde serilmesi gerekmektedir.
- ❑ Zeminin cinsine, uygulanacak kompaksiyon enerjisine ve elde edilmesi istenilen sıklık derecesine bağlı olarak seçilecek serilme kalınlığının genellikle 15-50 cm arasında kalmasına dikkat edilmelidir.



KOMPAKSİYON MAKİNELERİ



SIKIŞTIRMA ARACI	UYGUN ZEMİN SINIFI	UYGUN OLMAYAN ZEMİN SINIFI
Düz silindir	GW, SW, ML, CL	SP, SM, CH
Keçi ayaklı silindir	SC, GC, CL, CH	GP, GW, SP, SW
Lastik tekerlekli silindir	GW, SW, SM, ML, CL	CH, OH
Titreşimli silindir	GW, SW (Kil içermeyen)	CL, CH, ML, MH, OH



KOMPAKSİYON MAKİNELERİ

Düz silindirler



- Sıkıştırma etkisi yalnızca 200-300 mm dir bu nedenle, sığ tabakalarda kullanılır.
- Baskı temas oranı 100%
- Temas yükü 380 kP'a kadar çıkabilir
- Her zemin türünde ve asfalt kaplama ile dolgu sıkıştırmada yaygın olarak kullanılır
- Kompaksiyon şekli: Statik ağırlıkla

KOMPAKSİYON MAKİNELERİ

Lastik Tekerlekli Silindirler



Birbirine yakın çok sayıda lastik tekerleği olan ağır bir araçtan oluşan bir silindirler kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılmaktadır. Zeminin yüzeyi ile temas alanı yaklaşık % 80'e kadar olabilmektedir.



- Baskı temas oranı 80 %
- Temas yükü 700 kP'a kadar çıkabilir
- İri ve ince taneli zeminlerde kullanılabilir
- Kompaksiyon şekli: Statik ağırlık (kendi ağırlığıyla) ve yoğurma
- Karayolu ve toprak dolgu barajlarda kullanımı yaygın

KOMPAKSİYON MAKİNELERİ

Keçi ayaklı silindir



Killerde oldukça uygundur.

Çelik bir silindirik gövde üzerinde "ayak" biçiminde çok sayıda çıkıntıdan (alanları 30 - 80 cm²) oluşan bu silindirlerde temas alanı % 8 - % 12, uygulanan basınç 1400 - 7000 kPa arasında olup sıkıştırma basınç etkisi yanında yoğrulma etkisinden de yararlanarak sağlanır. Geçiş sayısı arttıkça tabaka kalınlığı boyunca aşağıdan yukarı doğru sıkışma gerçekleşir. Keçi ayaklı silindirler özellikle kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılır.

KOMPAKSİYON MAKİNELERİ

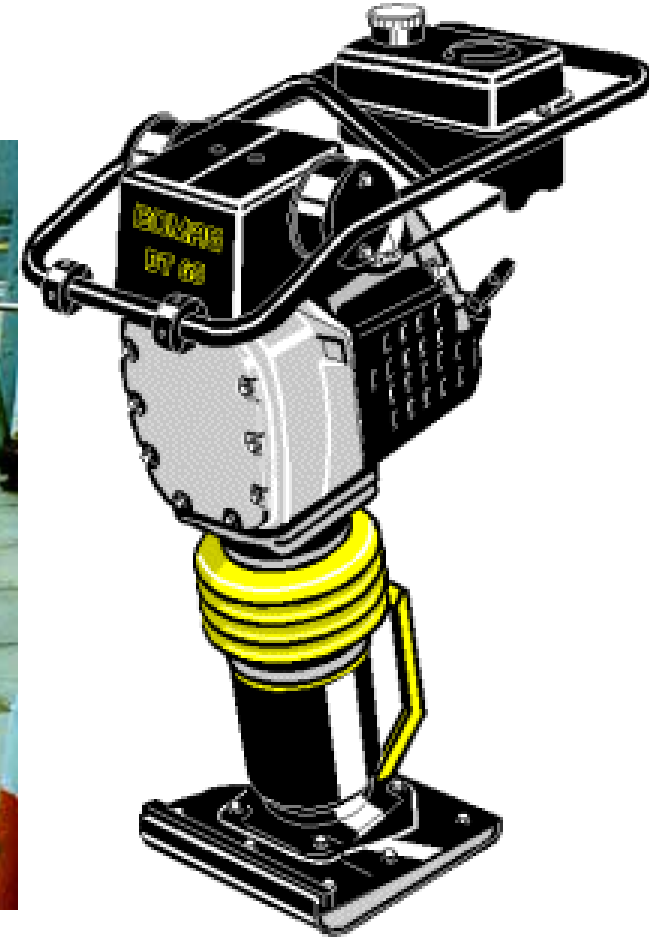
Çarpmalı silindirler



Derin bir sıkıştırma etkisi vardır (2-3m) hava alanları gibi büyük mühendislik yapılarında tercih edilir.

KOMPAKSİYON MAKİNELERİ

Vibratörler



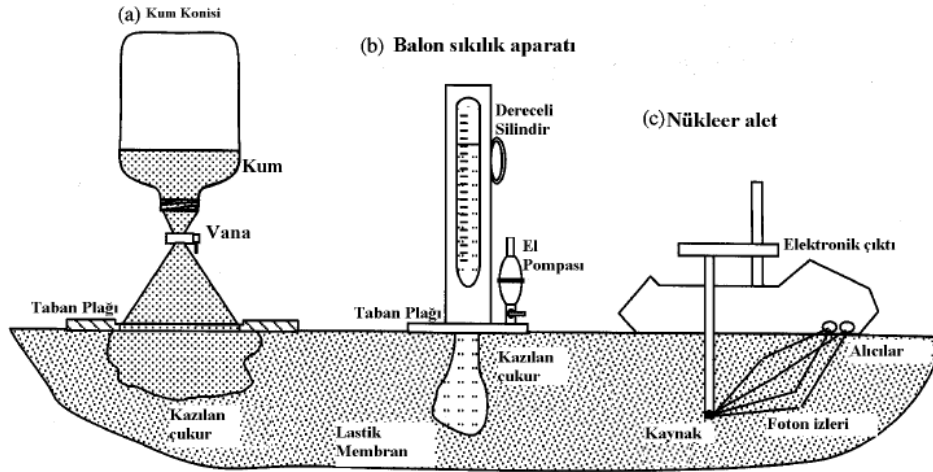
Küçük alanlarda kullanılmaktadır

Taneli zeminlerde etkilidir

ARAZİDE KOMPAKSİYONUN ÖLÇÜLMESİ (Kompaksiyonun Kontrolü)

Arazi sıkışmasını değerlendirmek için, arazideki kuru birim hacim ağırlık ve su içeriğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bazı yöntemler;

- Kum konisi yöntemi
- Su Balonu Balon yöntemi (Washington Densometer)
- Nükleer yöntem



Sıkışmanın uygulamada düzenli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir

1000 m³ sıkışmış zemine bir deney

Max. kuru bha
Su içeriği değişimi

ARAZİDE SIKIŞMA (KOMPAKSİYON) KONTROLÜ

- Arazide kompaksiyon sonucu istenen sıklığa ulaşıp ulaşılmadığı Relatif kompaksiyon değeri ile ölçülür.
- Laboratuarda yapılan Standart veya Modifiye Proktor Deney sonuçlarından elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerine arazide ne kadar yaklaşıldığı esas alınır.

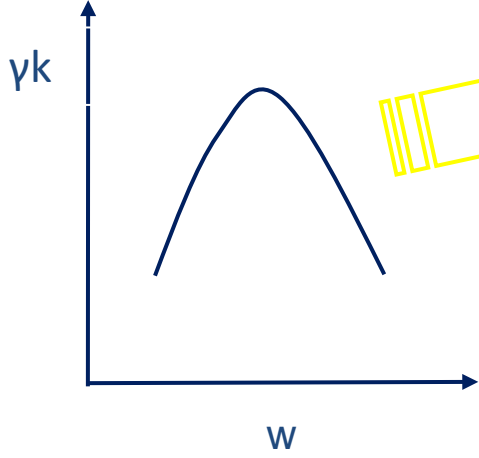
- % Relatif Kompaksiyon

R ~ (90 – 100%)

$$R(\%) = \frac{\gamma_{k(arazi)}}{\gamma_{k\max(lab)}} \times 100$$

- Şartnamelerde genellikle zeminin standart proktor deneylerinden elde edilen değerler doğrultusunda %95 relatif kompaksiyon değerine ulaşıncaya kadar sıkıştırılması istenir.
- Zemin su muhtevası ise ($w_{opt} \pm \%2$) olmalıdır.

ARAZİDE SIKIŞMA (KOMPAKSİYON) KONTROLÜ



Kompaksiyon
parametreleri

Karşılaştır!

$$\gamma_{k\text{arazi}} = ?$$

$$W_{\text{arazi}} = ?$$



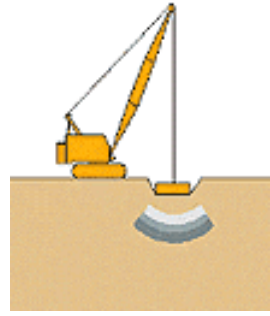
Sıkıştırılmış zemin

DİĞER ZEMİN SIKIŞTIRMA YÖNTEMLERİ

- Dinamik Kompaksiyon
- Vibro-flotasyon
- Patlatma

DİNAMİK KOMPAKSİYON

Zemine yüksekten ağırlık düşürülmesi ile yapılmaktadır



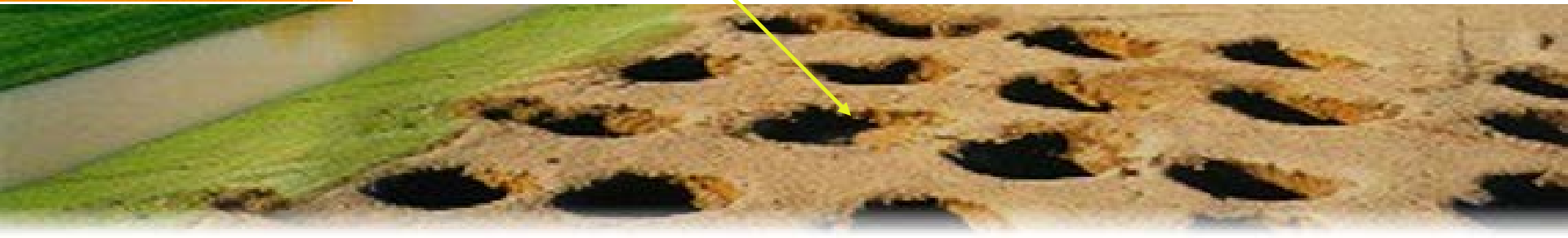
Granüler zeminler, dolgu alanları ve karstik ortamlar için uygundur.



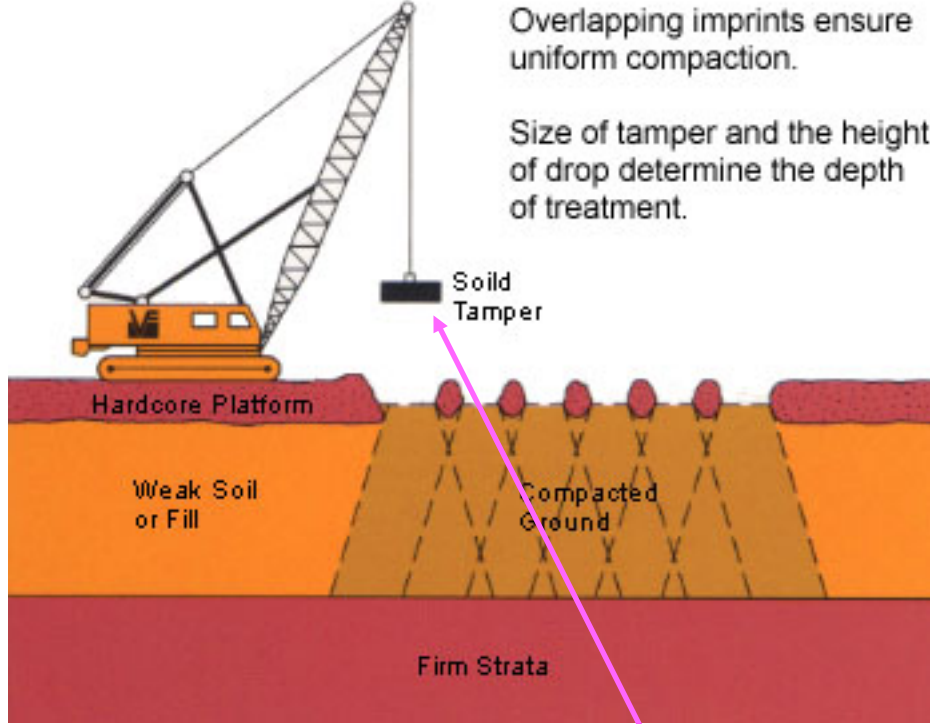
Ağırlık

Zemin cinsi	Enerji (kj/m ³)
Kumlu zemin	220-250
Suya doymun olmayan siltli/killi zemin	250-300
KontROLSUZ dolgu	600-1100

Düşme etkisi ile oluşan çukurlar



DİNAMİK KOMPAKSİYON



Ağırlık

Kütle = 5-30 ton

Yükseklik = 10-30 m



DİNAMİK KOMPAKSİYON



VİBROFLOTATION

Granüler zeminler için uygundur. Yeraltında titreşim yapılarak sıkıştırılma yapılır.

Vibroflot (vibrating unit)

Uzunlu = 2 – 3 m

Çap= 0.3 – 0.5 m

Kütle= 2 tonnes



Uygulama şekilleri

- vibro-kompaksiyon
- taş kolınlar
- titreşimli yer değiştirme

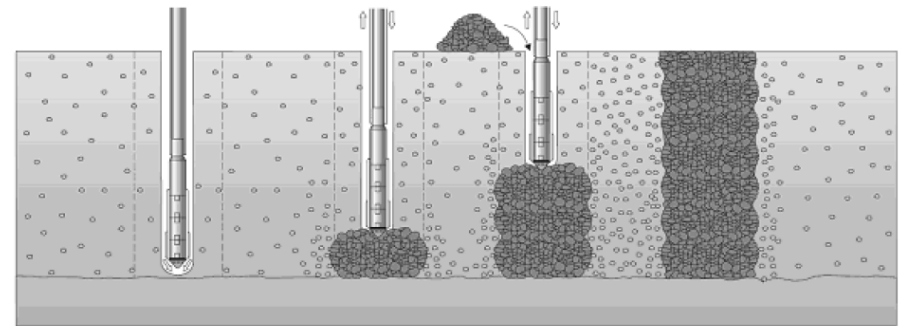
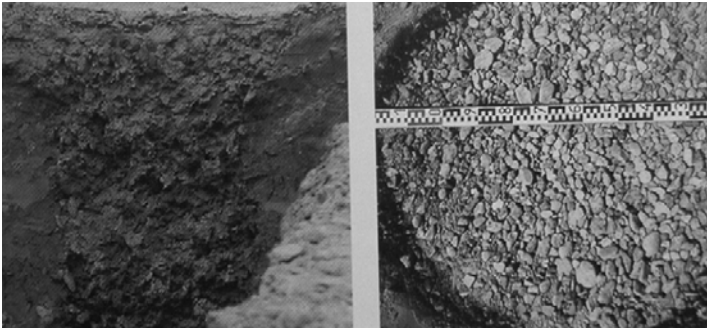
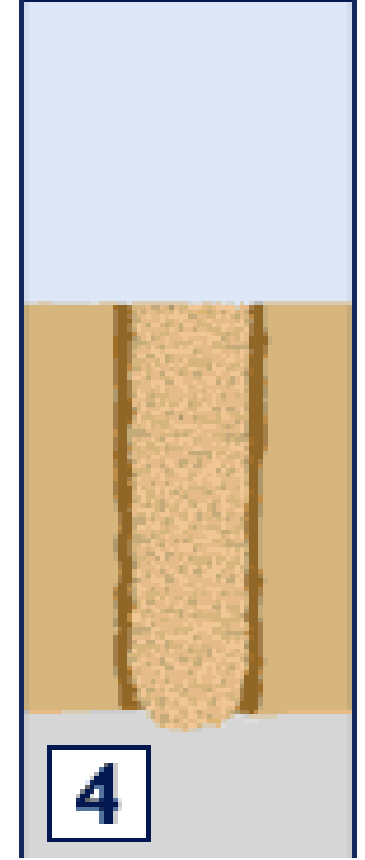
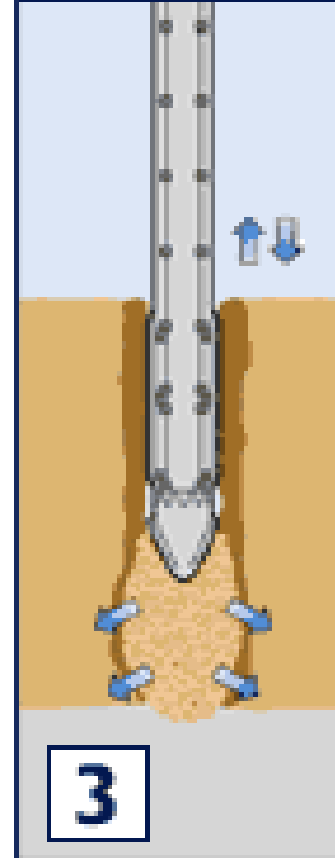
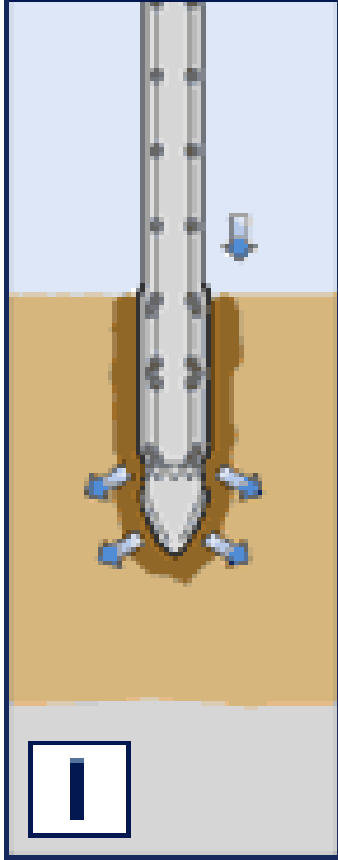
VIBROFLOTATION



VIBROFLOTATION



TAŞ KOLONLAR



Penetrasyon

Yerleştime

Tamamlama

PATLATMA

