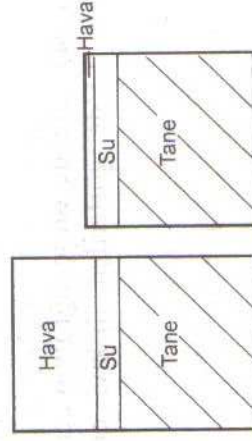


Şekil 7.3 Kompaksiyon

**Kompaksiyon:** zeminin, tabaka tabaka serilerek, silindireme, vibrasyon (titreşim) uygulama, tokmaktama gibi işlemlerle sıkıştırılmasına denir. Bu işlemlerle, zemin taneleri daha az boşluklu yerleşerek (Boşluklar azalır.), zeminin boşluk oranı azalır. Zemin taneleri ve taneler arasındaki su pratik olarak sıkışmazdır. Sıkışma boşluklardaki havanın sıkışması veya dışarı çıkması ile boşlukların azalması sonucu olur (Şekil 7.4). Sıkışma, kısa sürede (ani) olur.



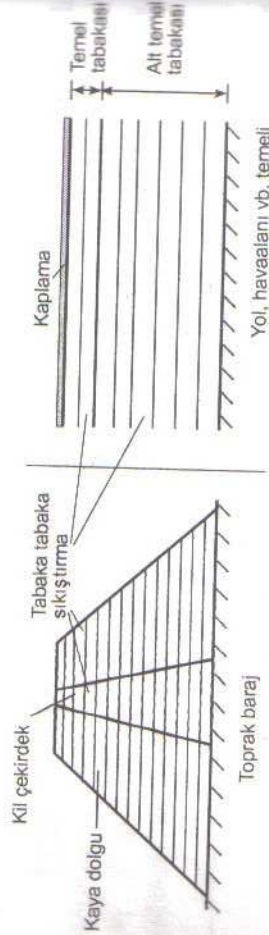
Şekil 7.4 Kompaksiyondan önce ve sonra bileşenler şemaları

Yol, havaalanı, toprak baraj, toprak dolgu inşaatlarında (Şekil 7.1), zemin belli bir kalınlıkta (0.2-0.4 m vb.) serilerek, belli bir su içeriğinde, uygun bir sıkıştırma aracı ve bir kaç geçiş ile sıkıştırılır (Şekil 7.3). Diğer yandan serbestçe dökülen ve hiçbir sıkıştırma uygulanmayan dolgular, gevşektirler (Şekil 7.2).

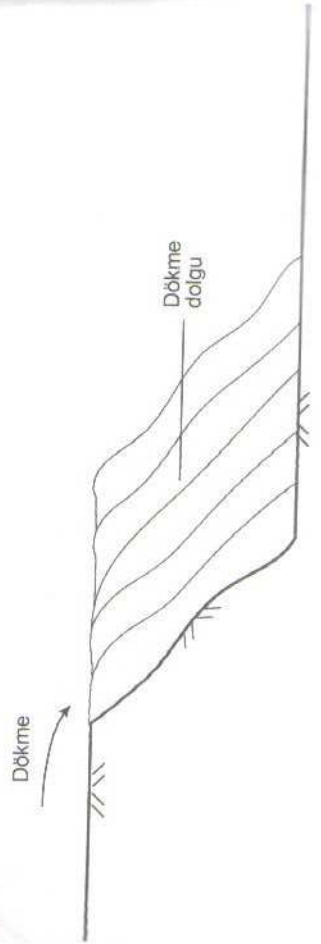
## 7. BÖLÜM

### KOMPAKSİYON (SIKIŞTIRMA)

#### 7.1 Giriş



Şekil 7.1 Kompaksiyonun uygulanma alanlarına örnekler



Şekil 7.2 Kontrolsüz (gevşek dolgu) (Taşıma gücü düşük, oturma eğilimi yüksek)

**Kompaksiyonla genel olarak şu yararlar sağlanır.** 1) Zeminin taşıma gücü artırılır. 2) Zeminin geçirimsizliği azaltılır, zemine daha kararlı bir yapı kazandırılır. Böylece zeminin su alarak, hacim değişikliklerine uğraması azaltılır. 3) Zeminin sabit, hareketli, dinamik yükler altında yapacağı oturmalar, çökmeler azaltılır.

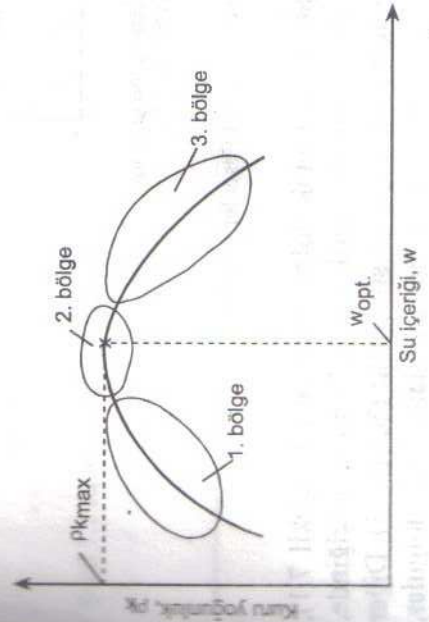
### 7.2 Proktor (kompaksiyon) Deneyi

Sıkıştırılmış (kompaksiyona tabi tutulmuş) bir yaş zeminde, kompaksiyonun (sıkıştırılmışlık durumunun) ölçüsü, o zemine ait kuru yoğunluğudur. Bir yaş zemine ait kuru yoğunluk ne kadar büyükse, o yaş zemin o kadar iyi sıkıştırılmış demektir. Sıkıştırılmış bir zemin için  $w_{opt}$  ve kuru yoğunluklar yazılıp (Bkz. Şekil 2.12), birbirine bölünürse, kompaksiyonun temel bağıntısı elde edilir.

$$P_n = \frac{P_s(1+w)}{1+e}, P_k = \frac{P_s}{1+e}, \frac{P_n}{P_k} = 1+w \quad (7.1)$$

$$P_k = \frac{P_n}{1+w} \quad (7.2)$$

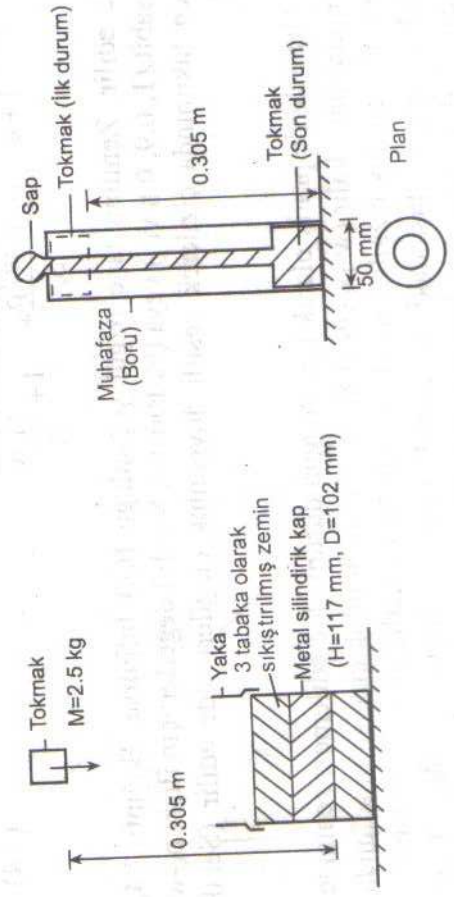
Proctor (1933), sıkıştırılmış bir yaş zeminde, su içeriği ile o zemine ait kuru yoğunluk arasında, Şekil 7.5'de gösterilen ilişkiyi ortaya çıkarmıştır.



Şekil 7.5 Sıkıştırılmış bir zeminde  $P_k$ - $w$  ilişkisi.

Bir zemin, sabit (belli) bir kompaksiyon enerjisi ile değişik su içeriklerinde sıkıştırıldığında, Şekil 7.5'de görüleceği üzere artan su içeriği ile, kuru yoğunluğu önce artmakta, maksimum bir değere ulaşmakta, sonra da azalmaktadır. Bu ilişki şöyle açıklanabilir. 1. Bölgede, zeminde yeterli su bulunmadığı için, tanelerin daha az boşluklu yerleşmek üzere hareket etmeleri, taneler arası sürtünme kuvvetlerinden dolayı zordur. Zira, su taneler arası bir tür yağlama etkisi yapmaktadır. 3. Bölgede zeminde fazla su bulunduğu için, tanelerin boşluk hacmi fazla sıkışmaz olmasından dolayı, zeminin boşluk hacmi fazla azaltılmamaktadır. 2. Bölgede sıkışma en yüksek olmakta, kuru yoğunluk maksimum değere ulaşmaktadır. Kuru yoğunluğun (diğer bir deyişle sıkıştırmanın) en yüksek olduğu (**maksimum kuru yoğunluk**,  $P_{kmax}$ ) durumdaki su içeriğine, **optimum su içeriği** ( $w_{opt}$ ) denilir. En iyi sıkıştırma, optimum su içeriğinde elde edildiği için, arazideki sıkıştırma; sıkıştırılacak zeminin optimum su içeriğine sahip olması sağlanarak yapılır. Bir zeminin optimum su içeriği, laboratuvarla yapılan Proktor (Kompaksiyon) Deneyi ile belirlenir.

**Standart Proktor Deneyi**nde; iç çapı 102 mm, yüksekliği 117 mm olan metal bir silindir kullanılır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6 Standart Proktor Deneyi

Bu kabın üzerine, geçici olarak bir yaka (ek) eklenir. Deney için, kurutulmuş, tanelenmiş birkaç kg'lık zemin kullanılır. Zemine bir miktar su katılarak iyice karıştırılır. Böylece hazırlanan zemin, 3 tabaka halinde ve her bir tabaka, 0.305 m'den serbestçe düşen 2.5 kg kütledeki bir tokmakla (Şekil 7.6), 25 vuruş ile sıkıştırılır. Sonra yaka çıkarılır; fazla zemin kesilerek uzaklaştırılır. Kabın üzeri düzlenir. Kabın içindeki zeminin yaş kütlesi belirlenir. Buradan yaş yoğunluk ( $\rho_{n1}$ ) hesaplanır. Kap içindeki zemin çıkarılır. Bundan bir miktar alınarak, su içeriği belirlenir ( $w_1$ ). Bağntı 7.2'den kuru yoğunluk ( $\rho_{k1}$ ) hesaplanır. Deney, aynı zemin üzerinde, değişik (artan) su içeriklerinde 4-5 kez tekrarlanır. Deney sonuçları,  $\rho_k$ - w eksen takımında işaretlenerek, ilgili eğri çizilir. Bu eğrinin tepe noktasından,  $w_{opt}$  ve  $\rho_{kmax}$  elde edilir.

$\rho_k$ -w eksen takımında sabit bir doygunluk derecesi ( $S_r$ =sabit) için teorik olarak çizilen eğri çizgiye, **doygunluk çizgisi** denilir (Şekil 7.7). Bağntı 2.33'ten e çekilirse,

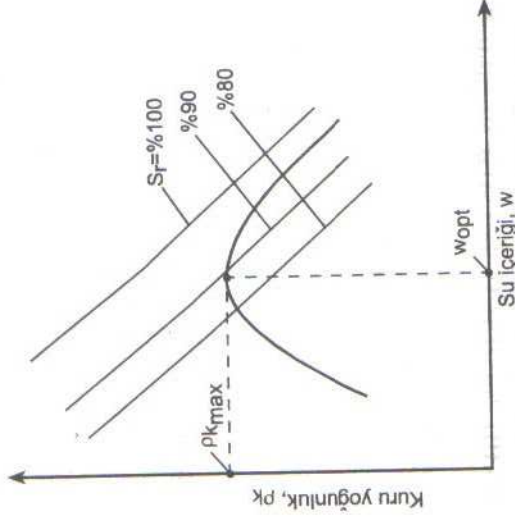
$$e = \frac{\rho_s w / \rho_{su}}{S_r} \quad (7.3)$$

elde edilir. Bağntı 7.3, Bağntı 2.30'da yerine konulursa,

$$\rho_k = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_s}{1 + \frac{\rho_s w / \rho_{su}}{S_r}} = \frac{\rho_s}{1 + \frac{G_s w}{S_r}} \quad (7.4)$$

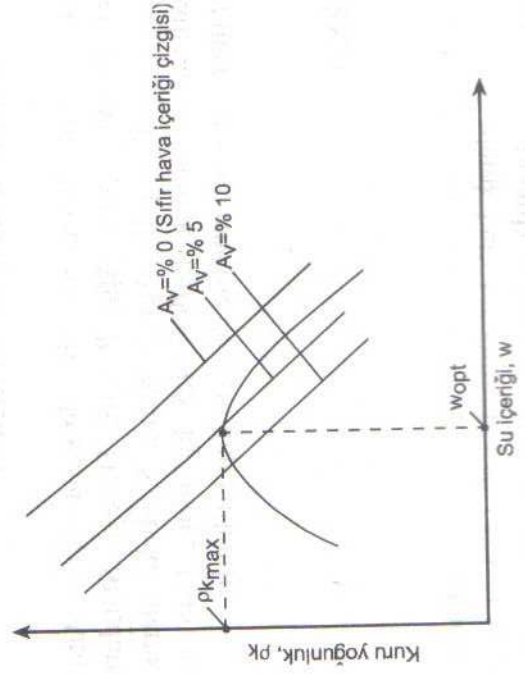
elde edilir. Zeminin tane özgül yoğunluğu ( $G_s$ ) biliniirse, Bağntı 7.4,  $S_r$ =sabit (1, 0.9, 0.8 vb.) veya (% 100, 90, 80 vb.) değerler için ilişki  $\rho_k$ -w eksen takımında çizilerek çeşitli doygunluk çizgileri elde edilir (Şekil 7.7).

Deneylerde pratik olarak tam doygün durum elde edilemez, zeminde bir miktar hava kalır ( $w$ - $\rho_k$  eğrisi  $S_r$ =% 100 doygunluk çizgisinin solunda kalır.). Doygunluk çizgileri ile, deneysel eğrinin herhangi bir noktasında, özellikle tepe noktasındaki doygunluk durumu öğrenilmiş olur. Tepe noktasında doygunluk derecesi ne kadar yüksek ise, sıkıştırmanın o kadar iyi olduğu düşünülür.



Şekil 7.7 Doygunluk çizgileri.

Benzer şekilde hava içeriği çizgileri çizilebilir (Şekil 7.8).



Şekil 7.8 Hava içeriği çizgileri.

Şekil 2.12'den hava içeriği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$A_v = \frac{e - \rho_s w / \rho_{su}}{1 + e} = \frac{e - G_s w}{1 + e} \quad (7.5)$$

Bağıntı 7.5'ten e çekilirse,

$$e = \frac{A_v + G_s w}{1 - e} \quad (7.6)$$

elde edilir.

Bağıntı 7.6,  $\rho_k = \frac{\rho_s}{1 + e}$ 'de yerine konulursa,

$$\rho_k = \frac{\rho_s (1 - A_v)}{1 + G_s w} \quad (7.7)$$

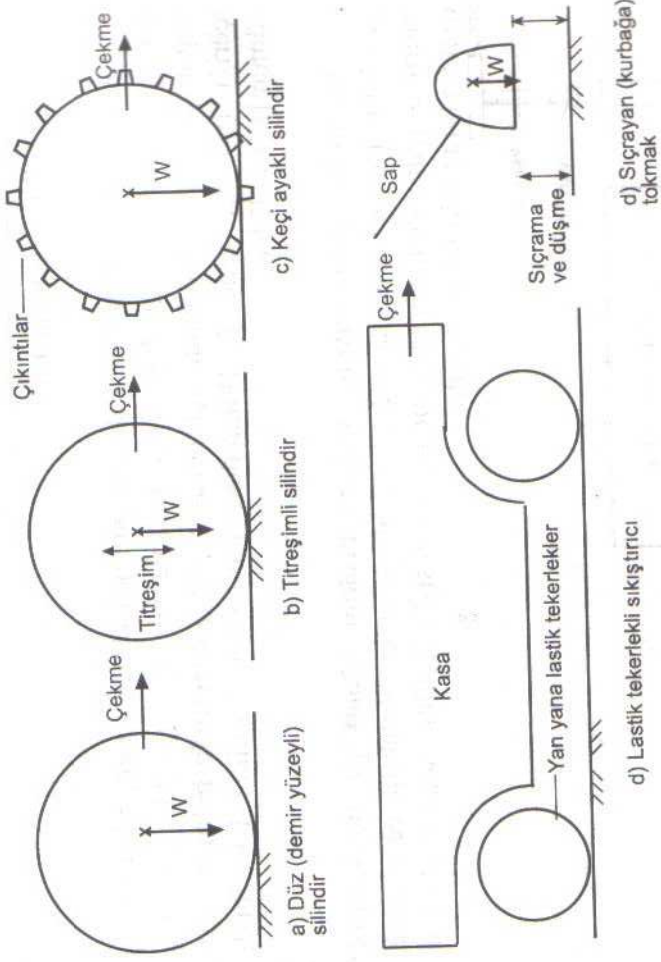
elde edilir. Bağıntı 7.7'de  $A_v$  yerine 0 (% 0), 0.05 (% 5), 0.10 (% 10) vb. sabit değerler konularak ve  $\rho_k - w$  arasında eğriler çizilerek, ilgili hava içeriği çizgileri elde edilir (Şekil 7.8). Deneylerde gene 0 (sıfır) (% 0) hava içeriği elde edilemez, zemin örneğinde bir miktar hava kalır ( $w - \rho_k$  eğrisi,  $A_v = 0$  çizgisinin solunda kalır.). Bu grafikten kompaksiyon eğrisinin tepe noktasının hava içeriği durumu öğrenilmiş olur. Gene bu noktadan düşük hava içeriği değerine sahip olması istenilir.

Ağır yüklerle maruz yol, havaalanı vb. dolgular için, **Ağır (Değiştirilmiş) Proktor Deneyi** yapılır. Ağır Proktor Deneyi, Standart Proktor Deneyine benzer olarak yapılır. Ağırda zemin 5 tabaka olarak sıkıştırılır. Ağırda kullanılan tokmak kütlesi 4.5 kg olup, 0.45 m yükseklikten serbestçe düşer. Her iki deneyde de, aynı kap kullanılır.

### 7.3 Arazide kompaksiyon

Sıkıştırma için belirlenen veya hazırlanan zemin, kullanılacak sıkıştırma aracına vb.'e bağlı olarak belli bir kalınlıkta (0.2-0.4 m vb.) serilir. Zeminin su içeriği laboratuvarla belirlenen optimum su içeriğine getirilir. Bunun için zemine bir miktar su katılır veya zemin karıştırılarak,

havada bir miktar kurutulur. Sonra, zemin cinsine uygun bir sıkıştırma aracı ile uygun sayıda geçişlerle sıkıştırma yapılır. Sıkıştırma araçları başlıca 3 tip olabilir (Şekil 7.9). 1) Silindirler (düz, keçi ayaklı, lastik tekerlekli vb.), 2) Vibratörler (silindir, plaka, kırıç vb.), 3) Tokmaklar (sıçrayan kurbaga tokmaklar vb.). Genel olarak taneli zeminler için düz silindirler, vibratörler; kohezyonlu zeminler için, keçi ayaklı silindirler, lastik tekerlekli (pnömatik) sıkıştırıcılar; her iki cins zeminler için ise tokmaklar, sınırlı alanlarda uygundur.



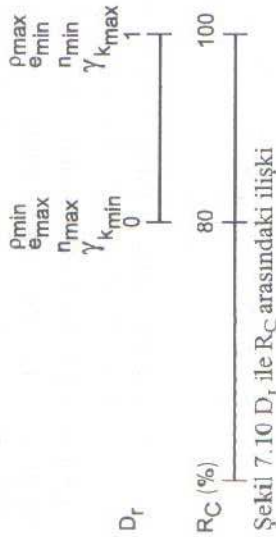
Şekil 7.9 Çeşitli sıkıştırma araçları

Arazide yapılan kompaksiyon, **rölatif (görelî, izafi) kompaksiyon**a kontrol edilir. Rölatif kompaksiyon,  $R_c$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$R_c = \frac{\rho_k(\text{arazi})}{\rho_{k_{\max}}(\text{lab.})} \times 100 \quad (7.8)$$

$R_c$ , yüzdeli birimsiz bir sayıdır. İşin özelliğine göre uygulamada seçilerek (% 90, 95 vb.), kontrol edilir. Uygulamada bu değerin yüksek

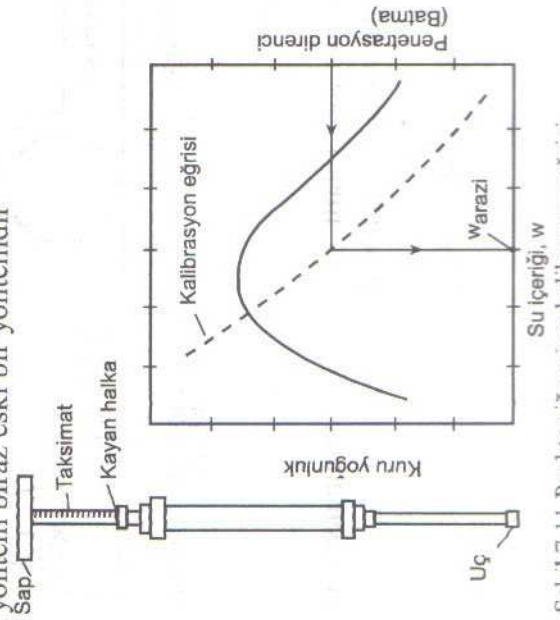
olması istenir. Taneli zeminlerde, rölatif sıklık ile rölatif kompaksiyon arasında bazı ilişkiler verilmiştir (Şekil 7.10).



Şekil 7.10  $D_r$  ile  $R_C$  arasındaki ilişki

Arazideki sıkıştırmanın kalitesini kontrol etmek üzere, sıkıştırılmış zemine ait kuru yoğunluğu ( $\rho_k$ ) hesaplamak için gerekli olan yaş yoğunluk ( $\rho_n$ ), 2. Bölümde açıklanan çeşitli yöntemlerle belirlenir. Su içeriği ( $w$ ) de, gene 2. Bölümdeki gibi veya özellikle bazı hızlı yöntemlerle belirlenir.

Arazideki kompaksiyon, başkaca **Proktor İğnesi** ile de kontrol edilebilir. Bu aletin ucuna değişik uç alanlı uçlar takılabilir ve zemine batarmak için uygulanan yük, bir yay vasıtasıyla ölçülür (Şekil 7.11). Bu yöntem biraz eski bir yöntemdir



Şekil 7.11 Proktor iğnesi ve kalibrasyon eğrisi.

Laboratuvarda yapılan proktor (kompaksiyon) deneyleri sırasında, iğne, kalıpta sıkıştırılmış zemine belli miktarda sokularak, batma direnci ölçülür. Böylece,  $w$ -batma direnci ilişkisi çizilir (Şekil 7.11, kalibrasyon eğrisi). Bu kalibrasyon ilişkisi kullanılarak, arazide ölçülen batma direncinden, arazideki su içeriği kolayca belirlenir.

#### 7.4 Kompaksiyonun bağlı olduğu etmenler

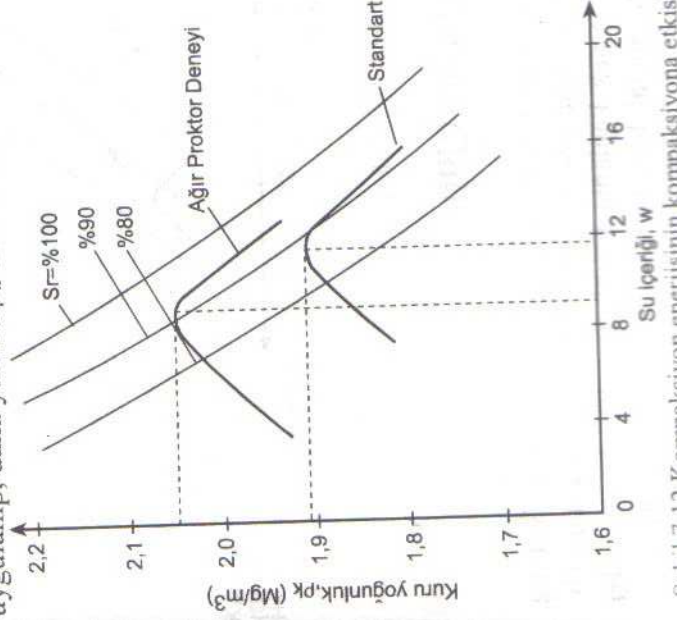
Kompaksiyon bir çok etmene bağlıdır. Bunlardan başlıcalar, aşağıdaki gibi açıklanabilir.

##### a) Su içeriği

$\rho_k$ - $w$  ilişkisi, Kısım 7.2'de açıklandı.

##### b) Kompaksiyon enerjisi

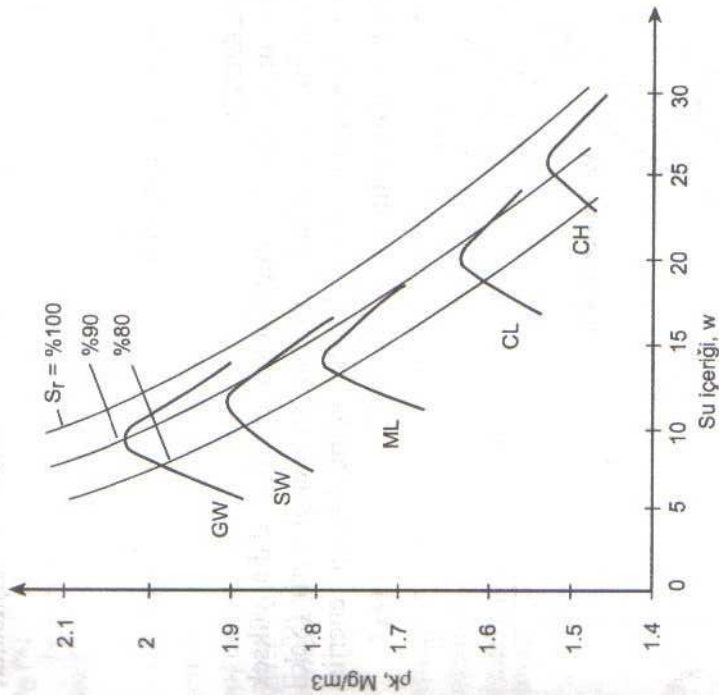
Aynı zemin için daha büyük kompaksiyon enerjisi; daha yüksek maksimum kuru yoğunluk, daha düşük optimum su içeriği verir (Şekil 7.12). Ağır Proktor Deneyinde daha büyük kompaksiyon enerjisi uygulanıp, daha yüksek  $\rho_k$  elde edilir.



Şekil 7.12 Kompaksiyon enerjisinin kompaksiyona etkisi.

### c) Zemin cinsi ve granülometri eğrisi

Çeşitli zeminler için ortalama kompaksiyon eğrileri, Şekil 7.13'de görülmektedir. Genel olarak taneli veya iri taneli zeminlerde düşük su içeriği, yüksek kuru yoğunluk; ince taneli zeminlerde ise daha yüksek su içeriği, daha düşük kuru yoğunluk elde edilir. İyi derecelenmiş zemin, kötü derecelenmiş zemine göre daha yüksek  $\rho_{kmax}$ 'a sahip olur.



Şekil 7.13 Çeşitli zeminler için tipik  $\rho_k$ -w ilişkileri

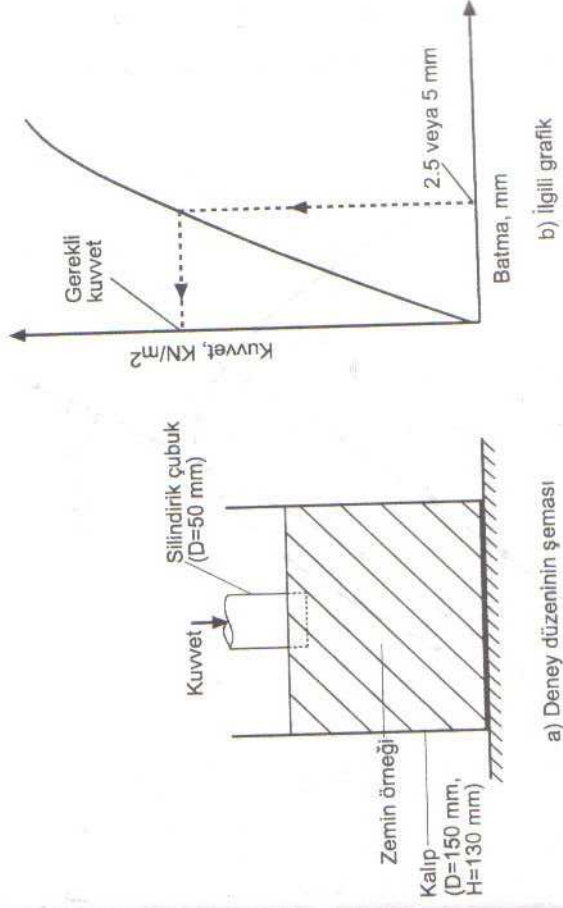
### 7.5 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Tanıtım amacıyla Kaliforniya Taşıma Oranı (California Bearing Ratio, CBR) aşağıda kısaca açıklanmaktadır. Bu oran, yol, havaalanı vb. tasarımında ( özellikle de esnek kaplama kalınlığının belirlenmesinde) kullanılan bir terimdir. Bir metal kalıpta sıkıştırılmış zemin örneğine daire uçlu bir metal çubuğun (D=50 mm), sabit bir hızla (1.25 mm/dak.

vb.) batırılması için gerekli olan kuvvetin, standart olarak sıkıştırılmış (standart kırma taş, çakıl) zemine batırılması için uygulanan kuvvete oranı olarak tanımlanır.

$$CBR = \frac{\text{Örneğe, batırmak için uygulanan kuvvet}}{\text{Standart örneğe, batırmak için gereken kuvvet}} \times 100 \quad (7.9)$$

Deney için standartlar vardır ve deney laboratuvarında yapılır. Deney sırasında belli zaman aralıkları ile (her 0.25 mm'de bir vb.) kuvvet gözlenerek kaydedilir. İlgili grafik (Şekil 7.14) çizilerek, belli bir batmaya karşılık gelen kuvvet belirlenir. Bağlantı 7.6'dan CBR belirlenir. Standart örnek için gerekli kuvvet standartça belirlidir.



Şekil 7.14 CBR için şematik deney düzeni

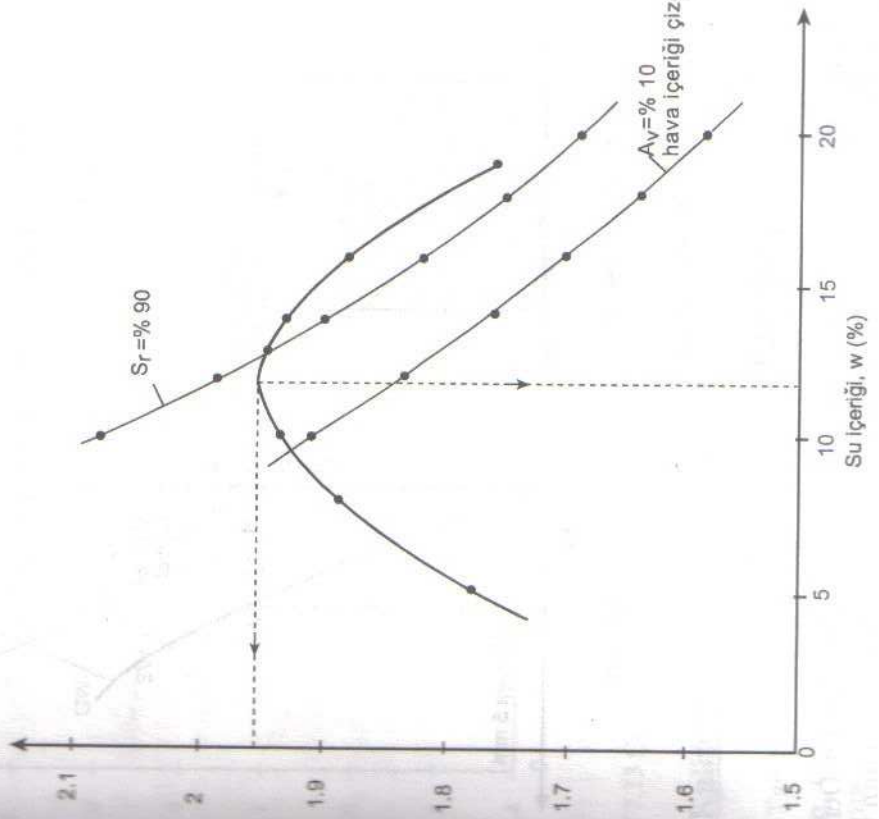
### 7.5 Çözümlü örnek problemler

**Problem 7.1)** Kumlu kil bir zemin üzerinde, Standart Proktor Deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 7.1'de verildiğine göre, bu zemin için optimum su içeriğini belirleyiniz.  $S_r = \% 90$  doygunluk çizgisini çiziniz.

Zeminin  $A_v = \% 10$  hava içeriği çizgisini çiziniz. Zeminin tane yoğunluğu  $2.70 \text{ Mg/m}^3$  tür.

### Çözüm

Her bir deneyde, sıkıştırılmış, zemine ait kuru yoğunluklar, Bağntı 7.2'den hesaplanır. Hesaplanan değerler Tablo 7.1'de toplu olarak görülmüştür. Bu sonuçlarla çizilen proktor eğrisi, Şekil 7.15'de görülmektedir. Eğrinin tepe noktasında, optimum su içeriği  $\% 11.8$  ve maksimum kuru yoğunluğu  $1.96 \text{ Mg/m}^3$  olarak belirlenir.



Şekil 7.15 Problem 7.1

Tablo 7.1 Problem 7.1.

Deney No.	Yaş yoğunluk, $\rho_n$ Mg/m <sup>3</sup>	Su içeriği, w %	Kuru yoğunluk, $\rho_k$ Mg/m <sup>3</sup>
1	1.87	5	1.78
2	2.04	8	1.89
3	2.13	10	1.94
4	2.20	13	1.95
5	2.16	16	1.86
6	2.09	19	1.76

Problem

Çözüm

$S_r = \% 90$  doygunluk çizgisini çizmek için, Bağntı 7.4'de,  $S_r = 0.90$  ve  $\rho_s = 2.70 \text{ Mg/m}^3$  konularak,

$$\rho_k = \frac{2.70}{1 + \frac{2.70 \times w}{0.90}}$$

elde edilir. Yukarıdaki ilişkide, su içeriğine çeşitli değerler vererek, bunlara karşılık gelen kuru yoğunluklar hesaplanır (Tablo 7.2) ve eğri çizilir (Şekil 7.15).

Tablo 7.2 Problem 7.1

Su içeriği $\rho_k$ , Mg/m <sup>3</sup>	%	10	12	14	16	18	20
		2.08	1.99	1.90	1.82	1.75	1.69

$A_v = \% 10$  hava içeriği çizgisini çizmek için, Bağntı 7.7'de  $A_v = 0.10$  ve  $G_s = 2.70$  konularak

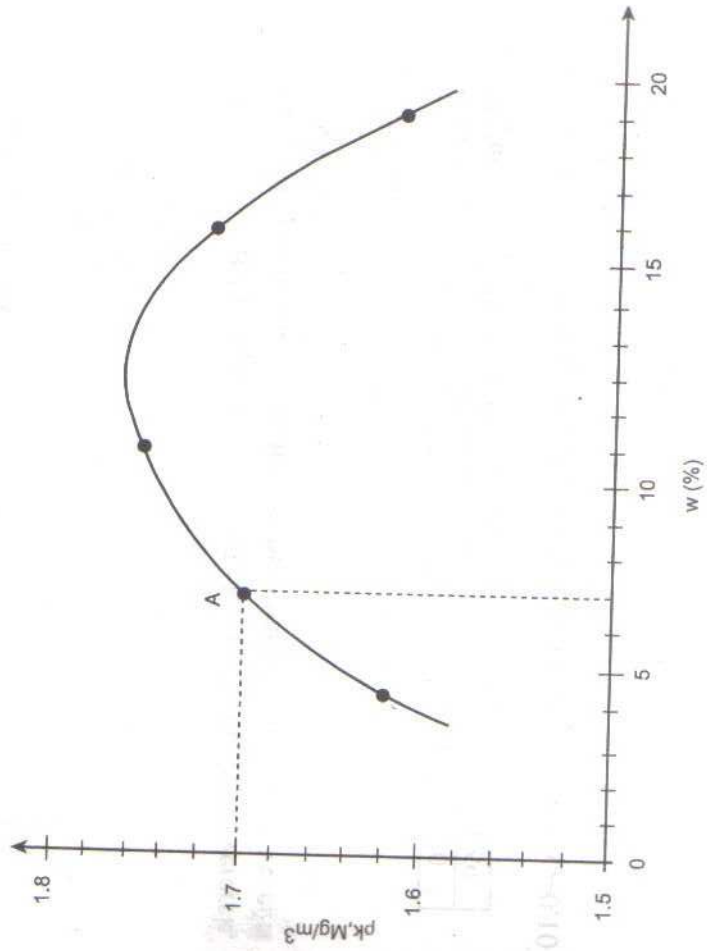
$$\rho_k = \frac{2.70 \times (1 - 0.10)}{1 + 2.70w} = \frac{2.43}{1 + 2.7w}$$

elde edilir. Bu ilişkide, su içeriğine çeşitli değerler vererek, bunlara karşılık gelen kuru yoğunluklar hesaplanır (Tablo 7.3) ve eğri çizilir (Şekil 7.15).

Tablo 7.3 Problem 7.1

Su içeriği, %	10	12	14	16	18	20
$\rho_w$ , Mg/m <sup>3</sup>	1.91	1.84	1.76	1.70	1.64	1.58

**Problem 7.2)** İç çapı 0.102 m, iç yüksekliği 0.117 m olan kompaksiyon kabı ile bir zemin üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılmış ve Şekil 7.16'daki kompaksiyon eğrisi elde edilmiştir. Şekildeki A noktasına ait deneyde, kompaksiyon kabında ne kadar yaş zemin bulunmaktaydı?



Şekil 7.16 Problem 7.2

### Cözüm

Kabın hacmi,

$$V = \frac{\pi \times 0.102^2}{4} \times 0.117 \approx 956 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 956 \text{ ml}$$

A noktasına ait  $w = \% 7$ ,  $\rho_k = 1.7 \text{ Mg/m}^3$  elde edilerek,

$$\rho_n = \rho_k (1 + w) = 1.70 \times (1 + 0.07) \approx 1.82 \text{ Mg/m}^3$$

$$M_n = \frac{1.82 \times 956 \times 10^{-6}}{10^{-6}} \approx 1740 \text{ g bulunur.}$$