فصل چهارم

تراکم خاک

Soil Compaction

تراکم

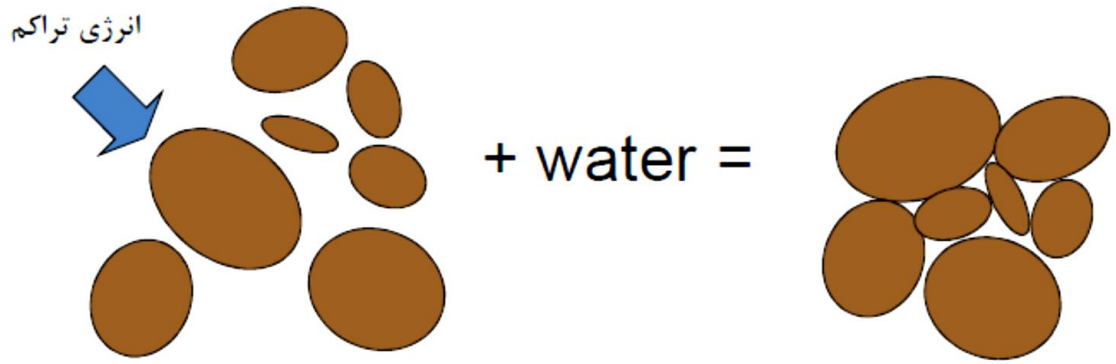
- در ساخت خاکریز بزرگ‌راه‌ها، سدهای خاکی و بسیاری از سازه‌های مهندسی دیگر، خاک‌های سست بایستی برای بهبود مقاومت آنها با افزایش وزن واحد آنها تراکم یابند.
- تراکم - متراکم کردن خاک با از بین بردن حفرات هوا با استفاده از تجهیزات مکانیکی
- درجه تراکم بر حسب وزن واحد خشک سنجیده می‌شود.

اهداف تراکم

- افزایش ظرفیت باربری پی‌ها
- کاهش نشست نامطلوب سازه‌ها
- کنترل تغییرات حجم نامطلوب
- کاهش نفوذپذیری
- افزایش پایداری شیب‌ها

تراکم

تراکم به طور کلی یعنی چگالش خاک با خارج ساختن هوا که خود نیازمند انرژی مکانیکی است. درجهٔ تراکم خاک بر حسب وزن مخصوص خشک آن سنجیده می‌شود. آبی که در زمان متراکم ساختن خاک به آن افزوده می‌شود، به عنوان مادهٔ نرم کننده بر روی ذرات خاک عمل می‌کند. ذرات خاک با لغزش بر روی یکدیگر، آرایش متراکم‌تری به خود می‌گیرند. وزن مخصوص خشک خاک نخست با افزایش میزان رطوبت افزایش پیدا می‌کند



در میـزان
رطوبت $w = 0$ ، وزن مخصوص مرطوب (γ) با وزن مخصوص خشک (γ_d) برابر است، یا:

$$\gamma = \gamma_{d(w=0)} = \gamma_1$$

با افزایش تدریجی رطوبت و با همان میزان تلاش مورد استفاده در تـراکم، وزن واحـد حجـم بخـش جامد خاک به تدریج افزایش پیدا می‌کند. برای مثال در $w = w_1$ داریم:

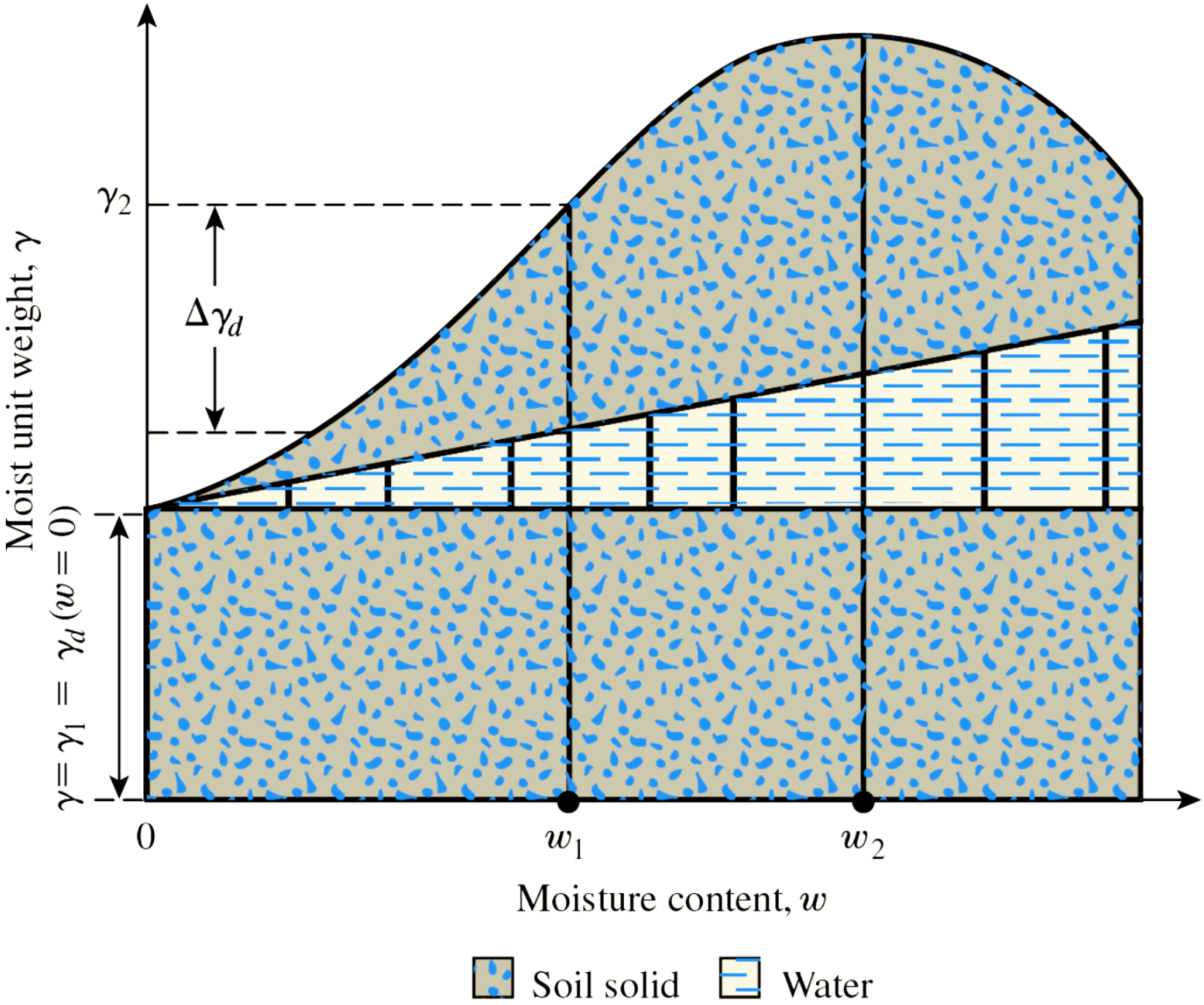
$$\gamma = \gamma_2$$

اما وزن مخصوص خشک در همین میزان از رطوبت چنین بیان می‌شود:

$$\gamma_{d(w=w_1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

فراتر از میزان رطوبت مشخص $w = w_2$ ، با هر افزایش میـزان رطوبـت، وزن مخـصوص خشک کاهش پیدا می‌کند. دلیل این پدیده آن است که آب در فضاهایی جای مـی‌گیـرد کـه ذرات جامـد اشغال کرده بودند. میزان رطوبتی که در آن حـداکثر وزن مخـصوص خـشک حاصـل مـی‌شـود، معمـولاً *میزان رطوبت بهینه* نامیده می‌شود.

معمولاً برای دستیابی به حداکثر وزن مخـصوص خـشک خـاک متـراکم و میـزان رطوبـت بهینـه از آزمونی آزمایشگاهی به نام *آزمایش تراکم Proctor* استفاده می‌شـود (Proctor ، ۱۹۳۳).


Moist unit weight, γ
γ2
Δγd
γ = γ1 = γd (w = 0)
0
w1
w2
Moisture content, w
Soil solid
Water

آزمایش Proctor استاندارد

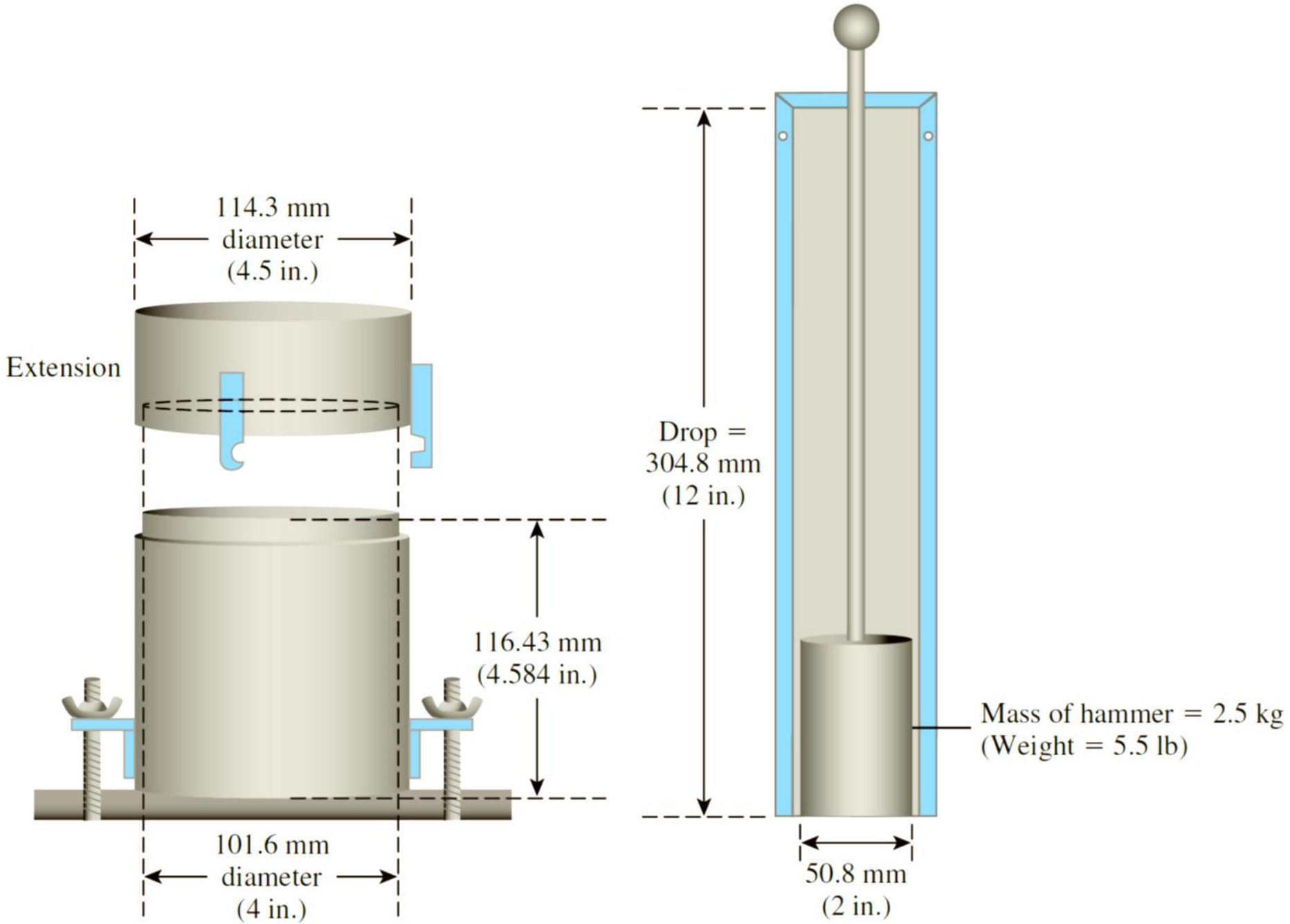
در آزمایش Proctor ، خاک در قالبی به حجم $۹۴۴\ cm^3$ متراکم می‌شود. قطر این قالب $۱۰۱/۶\ mm$ است. در ضمن آزمایش، قالب از قسمت پایین به صفحهٔ پایه و از قسمت بالا به یک قطعهٔ اضافی متصل می‌شود . خاک با مقادیر مختلف آب مخلوط شده و سپس توسط چکش در سه لایهٔ مساوی متراکم می‌گردد. تراکم هر لایه با استفاده از ۲۵ ضربهٔ چکش انجام می‌شود . جرم چکش $۲/۵\ kg$ است و از فاصلهٔ $۳۰/۵\ cm$ فرود می‌آید.

در هر آزمایش، وزن مخصوص مرطوب خاک متراکم یعنی γ را می‌توان چنین محاسبه کرد:

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}} \qquad (۶-۱)$$

که در این جا: W = وزن خاک متراکم درون قالب

$V_{(m)}$ = حجم قالب ($۹۴۴\ cm^3$).


114.3 mm
diameter
(4.5 in.)
Extension
116.43 mm
(4.584 in.)
101.6 mm
diameter
(4 in.)
Drop =
304.8 mm
(12 in.)
Mass of hammer = 2.5 kg
(Weight = 5.5 lb)
50.8 mm
(2 in.)

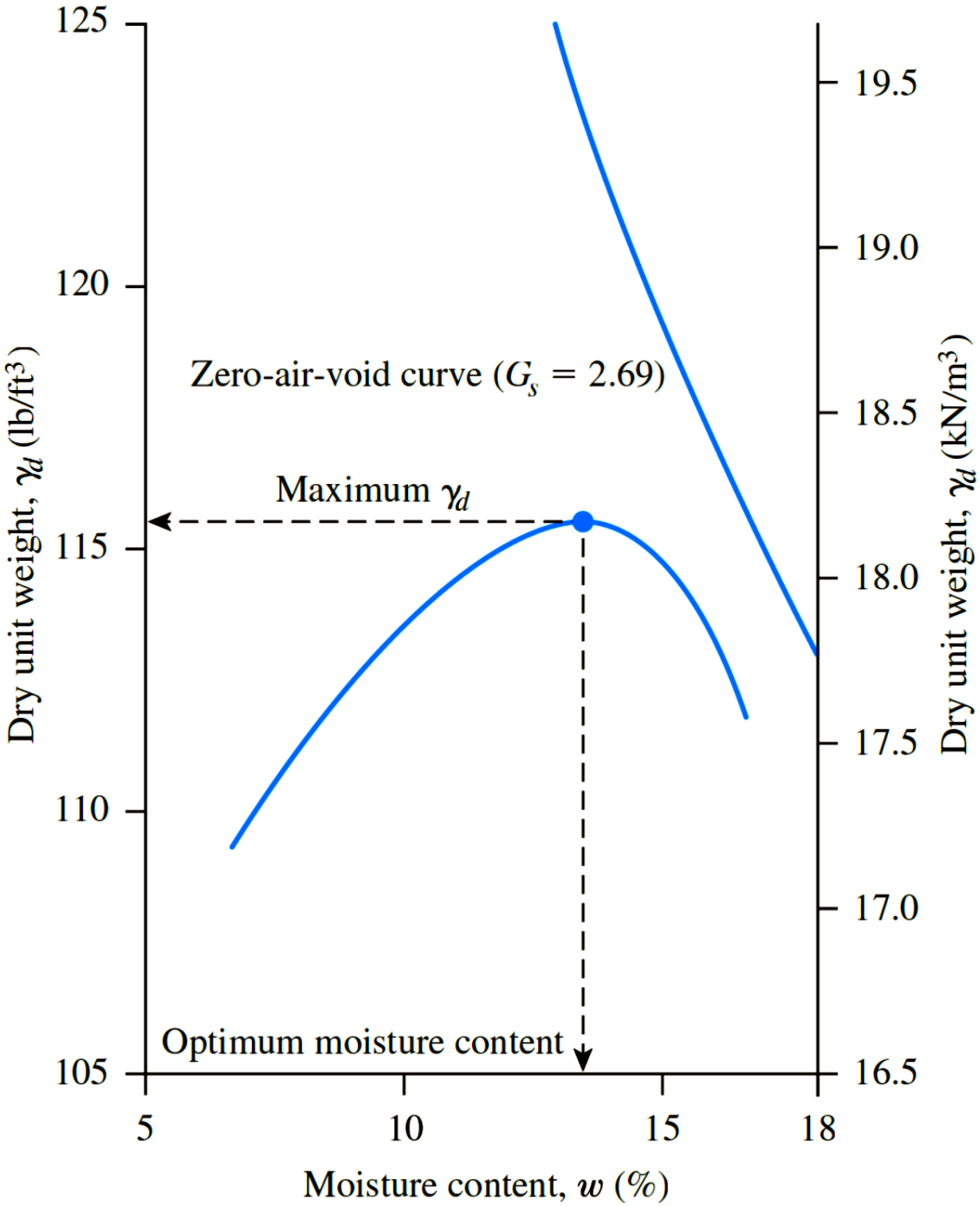
در هر آزمایش، میزان رطوبت خاک متراکم در آزمایشگاه تعیین می‌شود. با مشخص شدن میزان رطوبت، وزن مخصوص خشک را می‌توان به صورت زیر حساب کرد:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w\,(\%)}{100}}$$

که در این جا: w (%)= درصد میزان رطوبت.

مقادیر γ_d مشخص شده را می‌توان بر حسب میزان رطوبت متناظر ترسیم کرد تا حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت بهینهٔ خاک به دست آید. در شکل نمونه‌ای از این نمودار برای خاک رس لای‌دار نشان داده شده است.

روش آزمایش Proctor استاندارد در ASTM D-698 (ASTM، ۲۰۰۷) و AASHTO T-99 (AASHTO، ۱۹۸۲) آمده است.


125
120
115
110
105
19.5
19.0
18.5
18.0
17.5
17.0
16.5
Zero-air-void curve (G_s = 2.69)
Maximum γ_d
Optimum moisture content
Dry unit weight, γ_d (lb/ft^3)
Dry unit weight, γ_d (kN/m^3)
5
10
15
18
Moisture content, w (%)

وزن مخصوص خشک متراکم را می‌توان بر حسب ***میزان رطوبت مشخص*** w و ***درجهٔ اشباع*** S به صورت زیر محاسبه کرد. برای هر خاک داریم:

$$\gamma_d = \frac{G_S \gamma_w}{1 + e}$$

که در این جا: G_s = چگالی بخش جامد خاک

γ_w = وزن مخصوص آب

e = نسبت تخلخل.

و داریم:

$$Se = G_s w$$

یا

$$e = \frac{G_s w}{S}$$

بدین ترتیب:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{G_s w}{S}}$$

در یک میزان رطوبت مشخص، حداکثر وزن مخصوص خشک نظری زمانی حاصل می‌شود که هیچ هوایی در منافذ خاک وجود نداشته باشد ـ یعنی درجهٔ اشباع ۱۰۰% . بدین ترتیب حداکثر وزن مخصوص خشک در یک میزان رطوبت معین با منافذ هوایی صفر را می‌توان با جایگزین کردن $S = 1$ به دست آورد:

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + wG_s} = \frac{\gamma_w}{w + \frac{1}{G_s}}$$

که در این جا: γ_{zav} = وزن مخصوص در حالت منافذ هوایی صفر.

برای به دست آوردن تغییرات γ_{zav} نسبت به میزان رطوبت، از روش زیر استفاده کنید:

۱- چگالی بخش جامد خاک را تعیین کنید.

۲- وزن مخصوص آب (γ_w) را مشخص کنید.

۳- برای w مقادیر مختلفی همچون ۵% ، ۱۰% ، ۱۵% و غیره در نظر بگیرید.

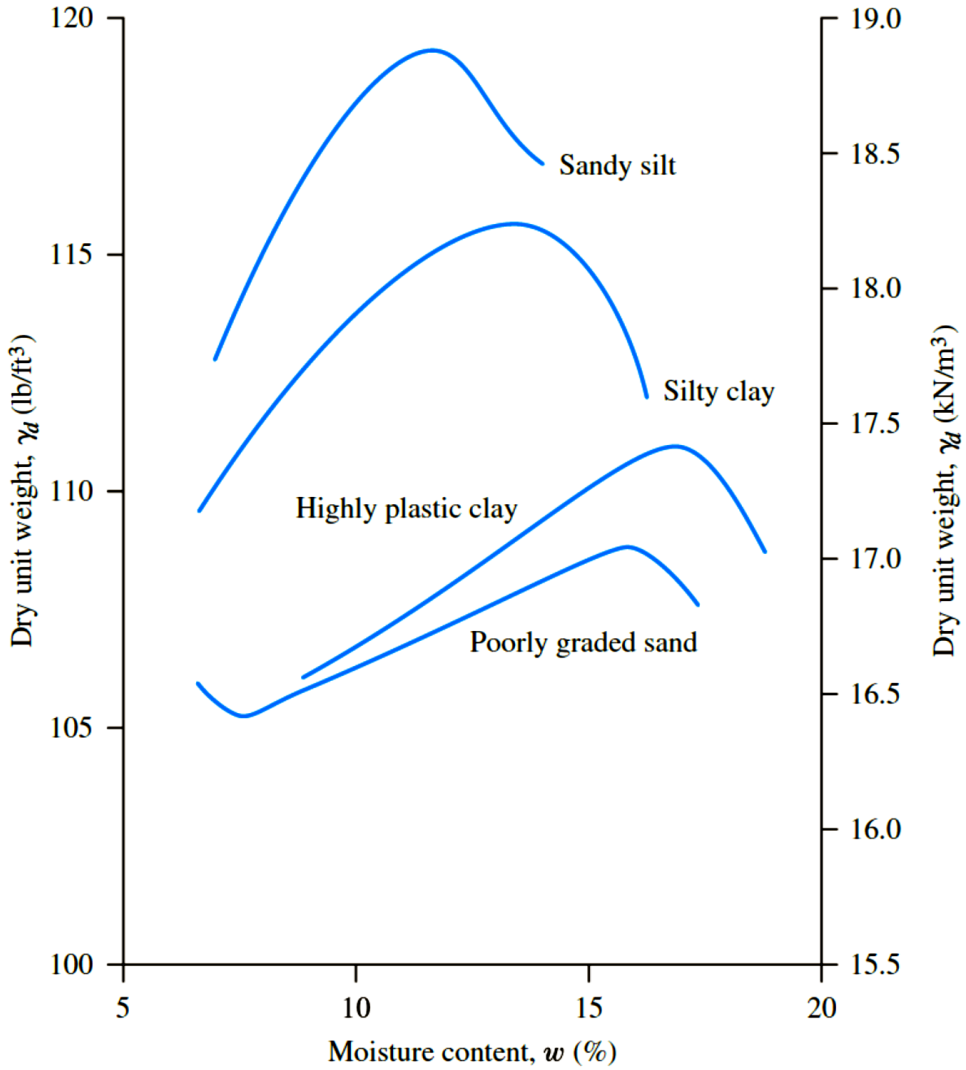
٤- با استفاده از معادلهٔ ، γ_{zav} را به ازای مقادیر مختلف w حساب کنید.

عوامل تأثیرگذار بر تراکم

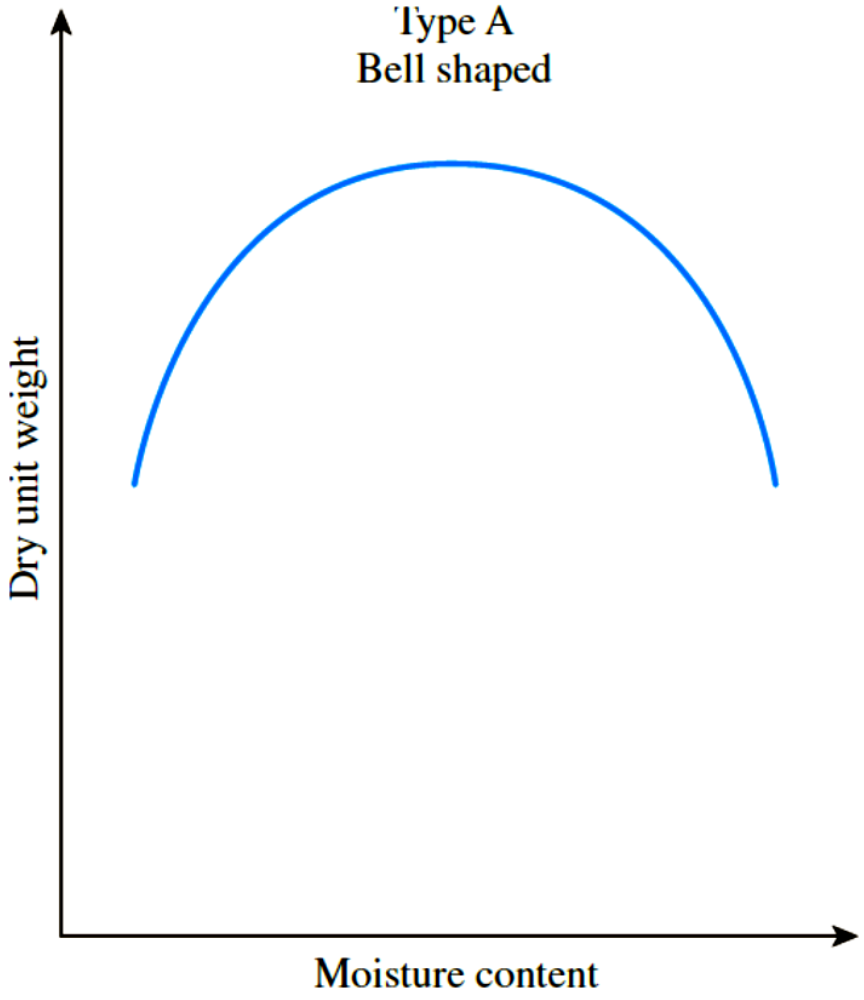
در بخش پیش نشان داده شد که میزان رطوبت تأثیر شدیدی بر درجهٔ تراکم حاصل از یک خاک معین دارد. علاوه بر میزان رطوبت، دیگر عوامل مهم تأثیرگذار بر تراکم عبارتند از: نوع خاک و تلاش تراکم (انرژی بر واحد حجم).

تأثیر نوع خاک

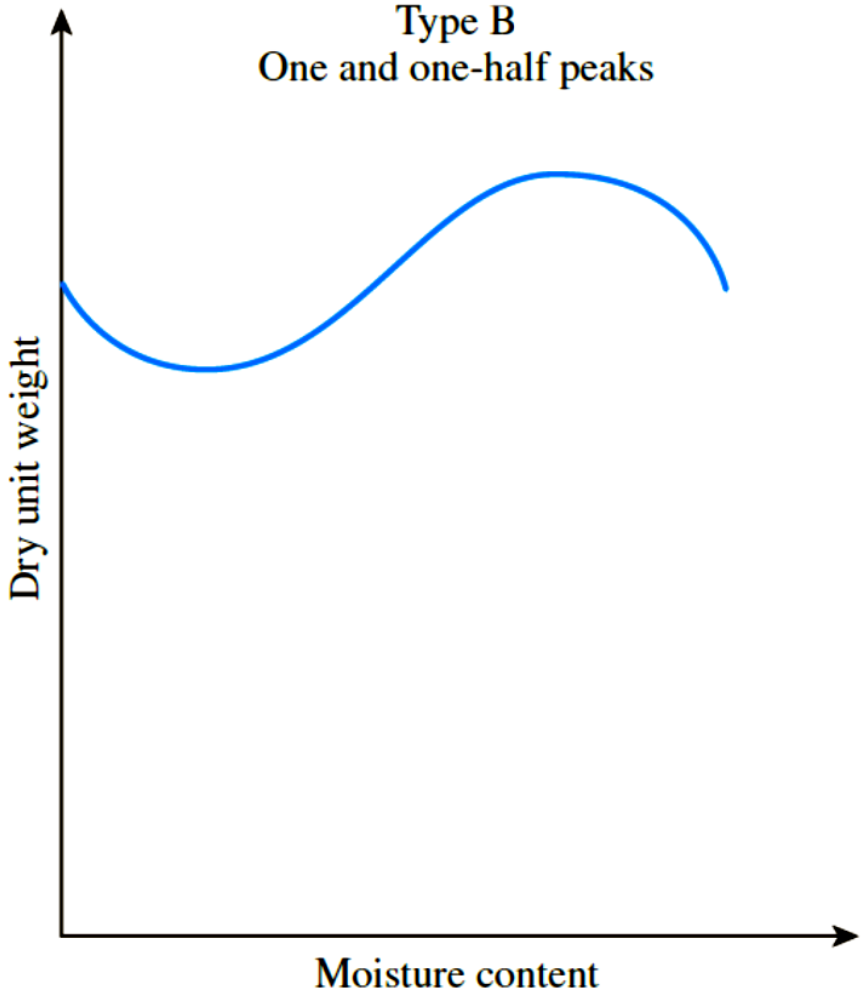
نوع خاک (یعنی دانه‌بندی، شکل دانه‌های خاک، چگالی بخش جامد خاک و مقدار و نوع کانی‌های رس موجود) تأثیر زیادی بر حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت بهینه دارد.



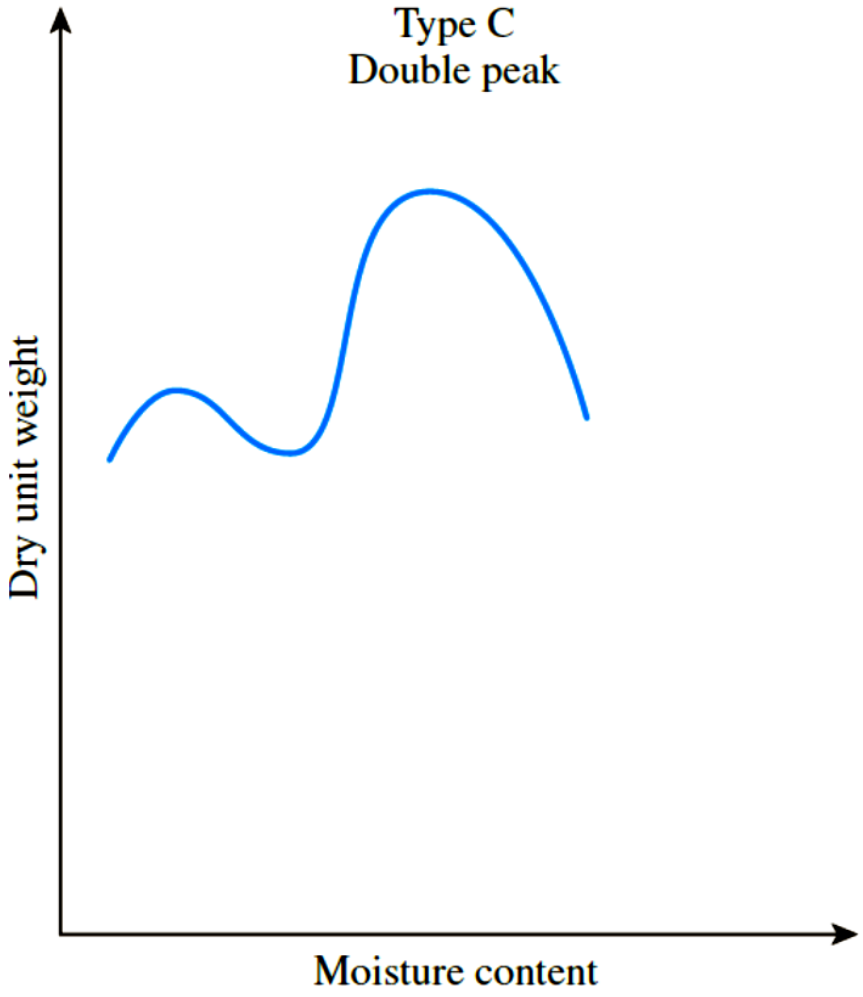
Lee و Suedkamp (۱۹۷۲) با بررسی منحنی‌های تراکم ۳۵ نمونه خاک دریافتند که چهار نوع منحنی تراکم را می‌توان تشخیص داد.



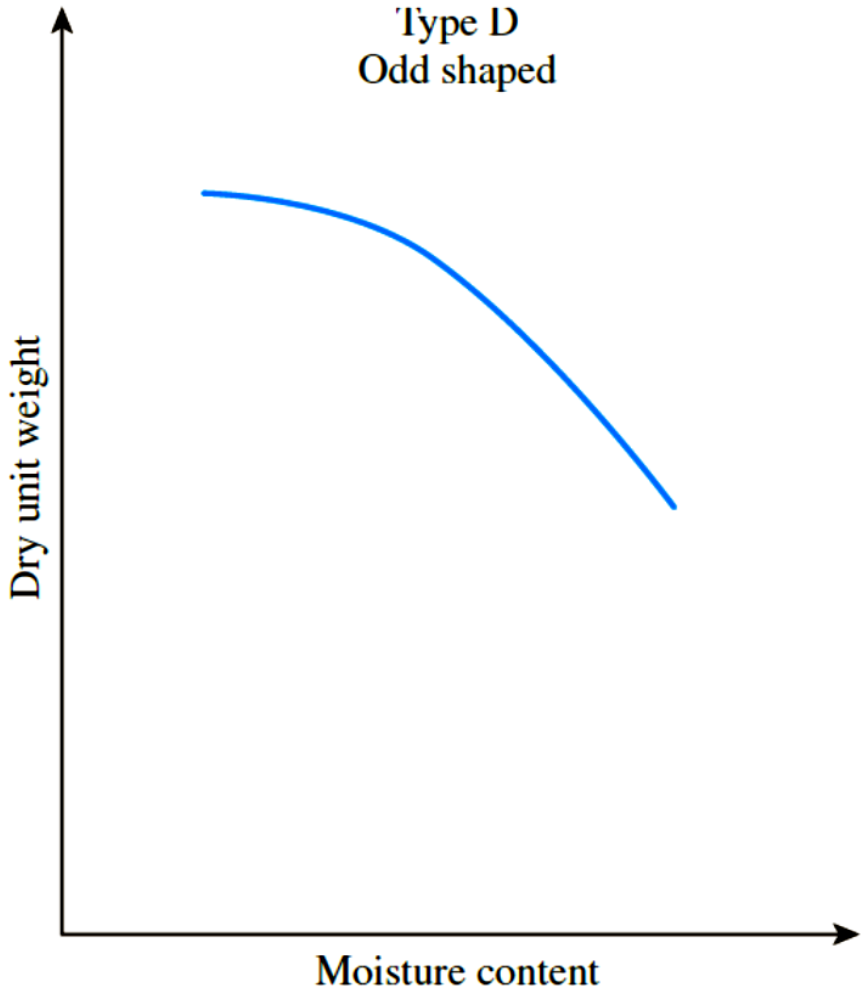
(a)



(b)


Type C
Double peak
Dry unit weight
Moisture content

(c)


Type D
Odd shaped
Dry unit weight
Moisture content

(d)

خلاصه‌ای از نوع منحنی‌های تراکم ممکن در خاک‌های مختلف با توجه به شکل

Type of compaction curve (Figure 6.6)	Description of curve	Liquid limit
A	Bell shaped	Between 30 to 70
B	1-1/2 peak	Less than 30
C	Double peak	Less than 30 and those greater than 70
D	Odd shaped	Greater than 70

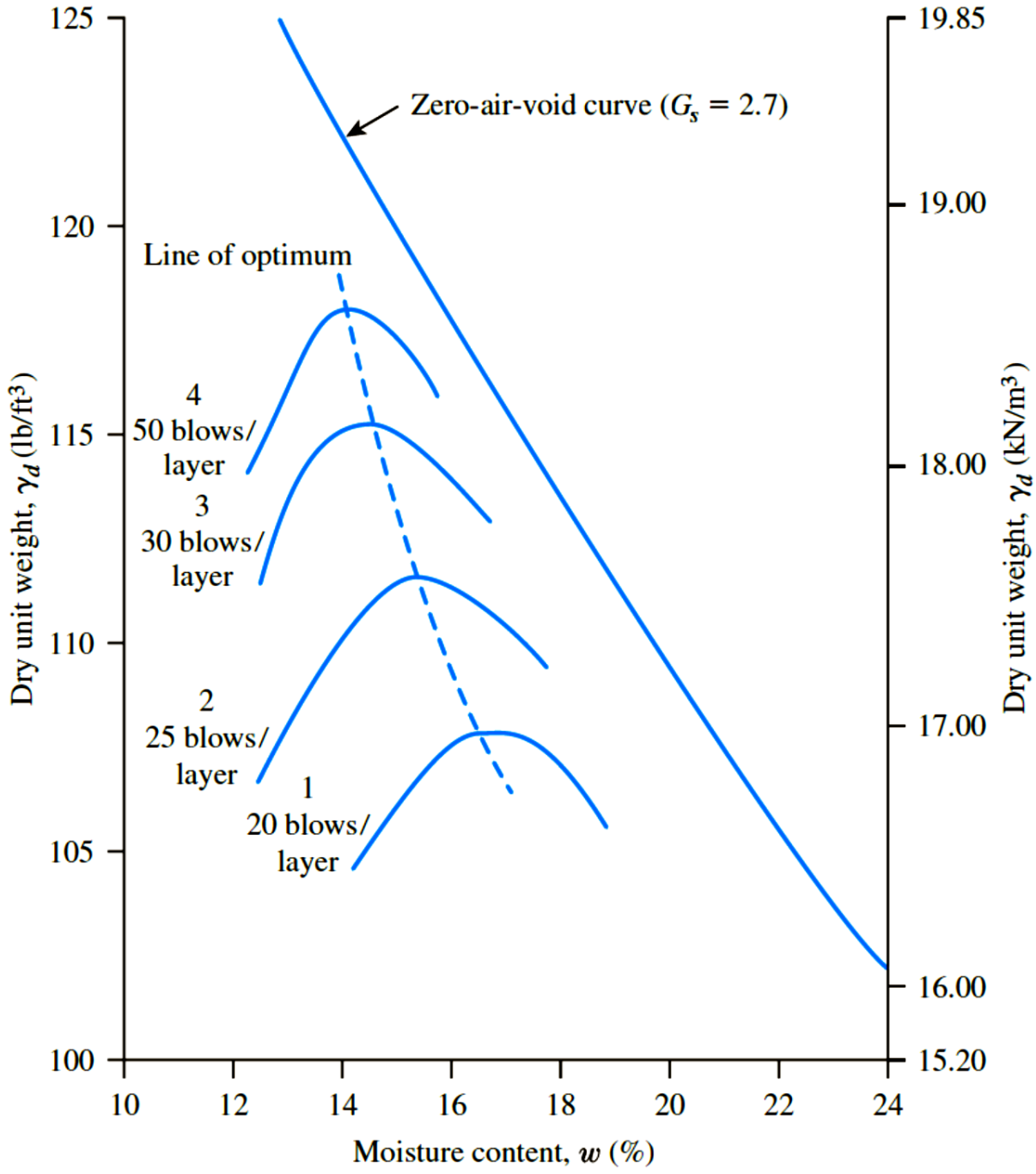
تأثیر تلاش تراکم

میزان انرژی تراکم بر واحد حجم مورد استفاده در آزمایش Proctor استاندارد مطرح شده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$E = \frac{\left[\begin{array}{c}\text{تعداد ضربه به}\\ \text{ازای هر لایه}\end{array}\right] \times \left[\begin{array}{c}\text{تعداد}\\ \text{لایه}\end{array}\right] \times \left[\begin{array}{c}\text{وزن}\\ \text{چکش}\end{array}\right] \times \left[\begin{array}{c}\text{ارتفاع سقوط}\\ \text{چکش}\end{array}\right]}{\text{حجم قالب}}$$

$$E = \frac{(25)(3)\left(\frac{2.5 \times 9.81}{1000}\ \text{kN}\right)(0.305\ \text{m})}{944 \times 10^{-6}\ \text{m}^3} = 594\ \text{kN-m/m}^3 \approx 600\ \text{kN-m/m}^3$$

در صورت تغییر انرژی تراکم واحد حجم خاک، منحنی رطوبت ـ وزن مخصوص نیز تغییر خواهد کرد. این واقعیت را می‌توان به کمک شکل نشان داد که در آن چهار منحنی تراکم خاک ماسه‌دار نشان داده شده است. برای به دست آوردن این منحنی‌های تراکم، از چکش و قالب Proctor استاندارد استفاده شده است. تعداد لایه‌های خاک مورد استفادهٔ تراکم در تمامی موارد سه لایه، اما تعداد ضربات چکش به ازای هر لایه از ۲۰ تا ۵۰ متفاوت بوده است که این خود به تغییر انرژی واحد حجم منجر می‌گردد.



Sandy clay: Liquid limit = 31 Plastic limit = 26

با توجه به مشاهدات می‌توان دید که:

۱- با افزایش تلاش تراکم، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک متراکم نیز افزایش پیدا می‌کند.

۲- با افزایش تلاش تراکم، میزان رطوبت بهینه تا حدودی کاهش پیدا می‌کند.

مطالب پیش گفته در مورد تمامی خاک‌ها صادق است. اما توجه داشته باشید که درجهٔ تراکم با تلاش تراکم نسبت مستقیم ندارد.

گسیختگی ظرفیت باربری در باند

در جنگ جهانی دوم، مهندسین ارتش آمریکا با خراب شدن و گسیختگی روسازی باندها برای هواپیماهای سنگین شدند.

- بمب‌افکن‌های عظیم منجر به توسعه آزمایش تراکم اصلاح‌شده پروکتور توسط مهندسین ارتش آمریکا در ۱۹۴۵ شدند. این آزمایش ابتدا در ۱۹۵۸ در ASTM D1557 وارد شد.

آزمایش Proctor اصلاح شده

برای
انجام آزمایش Proctor اصلاح شده، همانند آزمایش Proctor استاندارد، از همان قالب با حجم $944\ cm^3$ استفاده می‌شود. خاک در پنج لایه و با چکشی به جرم 4/54 kg متراکم می‌گردد. ارتفاع سقوط چکش 457 mm است. تعداد ضربات چکش به ازای هر لایه مانند حالت آزمایش Proctor استاندارد در حد ۲۵ ضربه حفظ می‌شود.

در آزمایش Proctor استاندارد به دلیل افزایش تلاش تراکم، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک نیز افزایش پیدا می‌کند. افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر با کاهش میزان رطوبت بهینه همراه است.

مقایسهٔ چکش Proctor استاندارد
(چپ) با چکش Proctor اصلاح شده (راست).

تراکم کارگاهی

تجهیزات تراکم

عملیات تراکم کارگاهی بیشتر با غلتک انجام می‌شود. متداول‌ترین انواع غلتک‌ها عبارتند از:

۱- غلتک صاف چرخ (یا غلتک چرخ استوانه‌ای صاف)

۲- غلتک چرخ لاستیکی بادی

۳- غلتک پاچه بزی

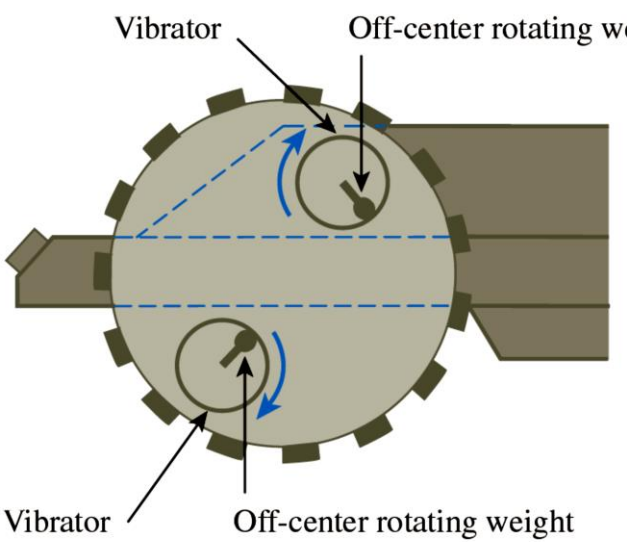
٤- غلتک لرزنده.

غلتک‌های چرخ استوانه‌ای صاف برای غلتک‌زنی آزمایشی زیراساس و عملیات نهایی خاکریزهای ماسه‌ای و رسی مناسب‌اند. چرخ‌های این نوع غلتک پوشش ۱۰۰ درصدی ایجاد می‌کنند و فشار تماسی با زمین به ۳۱۰ تا kN/m^2 ۳۸۰ می‌رسد. این غلتک‌ها برای ایجاد وزن مخصوص متراکم زیاد در زمان استفاده از لایه‌های ضخیم مناسب نیستند.

غلتک‌های چرخ لاستیکی بادی از جنبه‌های زیادی نسبت به غلتک‌های چرخ استوانه‌ای صاف بهتراند. این غلتک‌ها با داشتن چند ردیف چرخ لاستیکی بارگذاری سنگینی دارند. فاصلهٔ چرخ‌های لاستیکی از یکدیگر کم است ـ چهار تا شش چرخ در هر ردیف. فشار تماسی زیر چرخ‌ها از ۶۰۰ تا ۷۰۰ kN/m^2 متفاوت است و در حدود ۷۰% تا ۸۰% پوشش ایجاد می‌کنند. از غلتک‌های بادی می‌توان برای متراکم ساختن خاک ماسه‌ای و رسی استفاده کرد. تراکم حاصل از این نوع غلتک، ترکیبی است از عملیات فشاری و ورزدهی.

غلتک‌های پاچه بزی استوانه‌هایی با تعداد زیادی برجستگی‌اند. مساحت هر برجستگی از ۲۵ تا ۸۵ cm^2 متفاوت است. این غلتک‌ها مؤثرترین نوع غلتک در متراکم ساختن خاک‌های رسی‌اند. فشار تماسی زیر برجستگی‌ها از ۱۴۰۰ تا ۷۰۰۰ kN/m^2 متفاوت است. در طول عملیات متراکم سازی کارگاهی، عبورهای اولیهٔ غلتک باعث متراکم شدن بخش پایین‌تر هر لایه می‌شود. متراکم ساختن بخش بالایی و میانی هر لایه خاک در مرحلهٔ بعدی انجام می‌شود.

غلتک‌های لرزنده مؤثرترین غلتک در متراکم ساختن خاک‌های دانه‌ای محسوب می‌شوند. برای ایجاد لرزش در خاک می‌توان به غلتک‌های چرخ استوانه‌ای صاف، چرخ لاستیکی بادی یا پاچه بزی، لرزاننده متصل کرد. در شکل اصول غلتک‌های لرزنده نشان داده شده است. لرزش از طریق وزنه‌های برون مرکز چرخان ایجاد می‌شود.



برای متراکم ساختن مؤثر خاک‌های دانه‌ای در یک سطح محدود می‌توان از کوبهٔ لرزشی صفحه‌ای دستی استفاده کرد. کوبه‌های لرزشی صفحه‌ای به صورت گروهی نیز بر روی ماشین سوار می‌شوند. از این کوبه‌ها می‌توان در فضاهایی با محدودیت کمتر استفاده کرد.

مشخصات فنی تراکم کارگاهی

در بیشتر مشخصات فنی عملیات خاکی، پیمانکار ملزم می‌شود که به وزن مخصوص خشک متراکم شدهٔ کارگاهی معادل با ۹۰ تا ۹۵% وزن مخصوص خشک حداکثر تعیین شده آزمایشگاهی به روش آزمایش Proctor استاندارد یا اصلاح شده دست پیدا کند. این مشخصات فنی مربوط به میزان تراکم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d(\text{field})}}{\gamma_{d(\text{max}-\text{lab})}} \times 100$$

که در این جا: R = میزان تراکم.

تراکم نسبی را نباید با میزان تراکم اشتباه کرد.

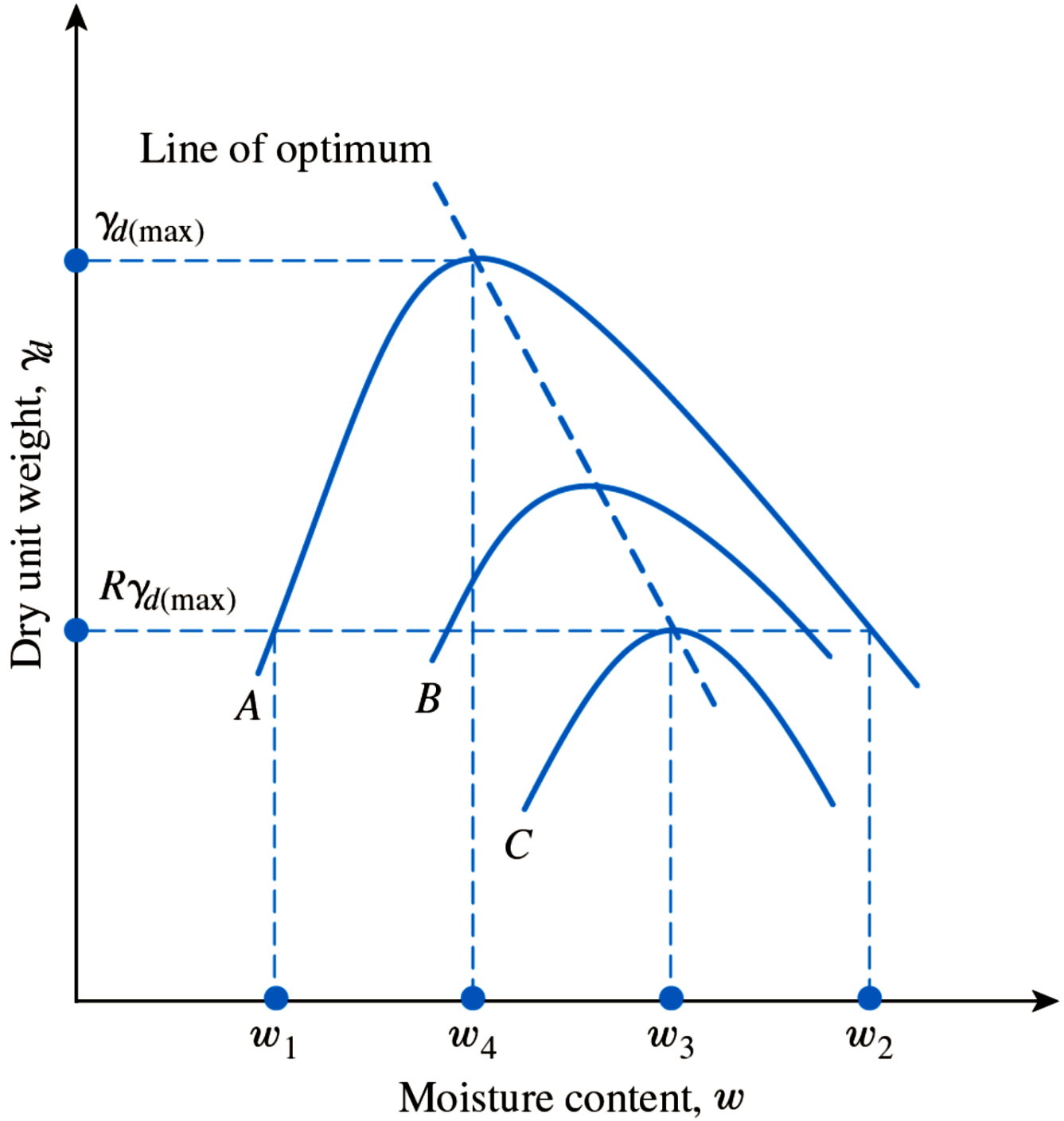
$$D_r = \left[\frac{\gamma_{d(\text{field})} - \gamma_{d(\text{min})}}{\gamma_{d(\text{max})} - \gamma_{d(\text{min})}}\right]\left[\frac{\gamma_{d(\text{max})}}{\gamma_{d(\text{field})}}\right]$$

با مقایسهٔ معادلات

$$R = \frac{R_0}{1 - D_r(1 - R_0)}$$

که

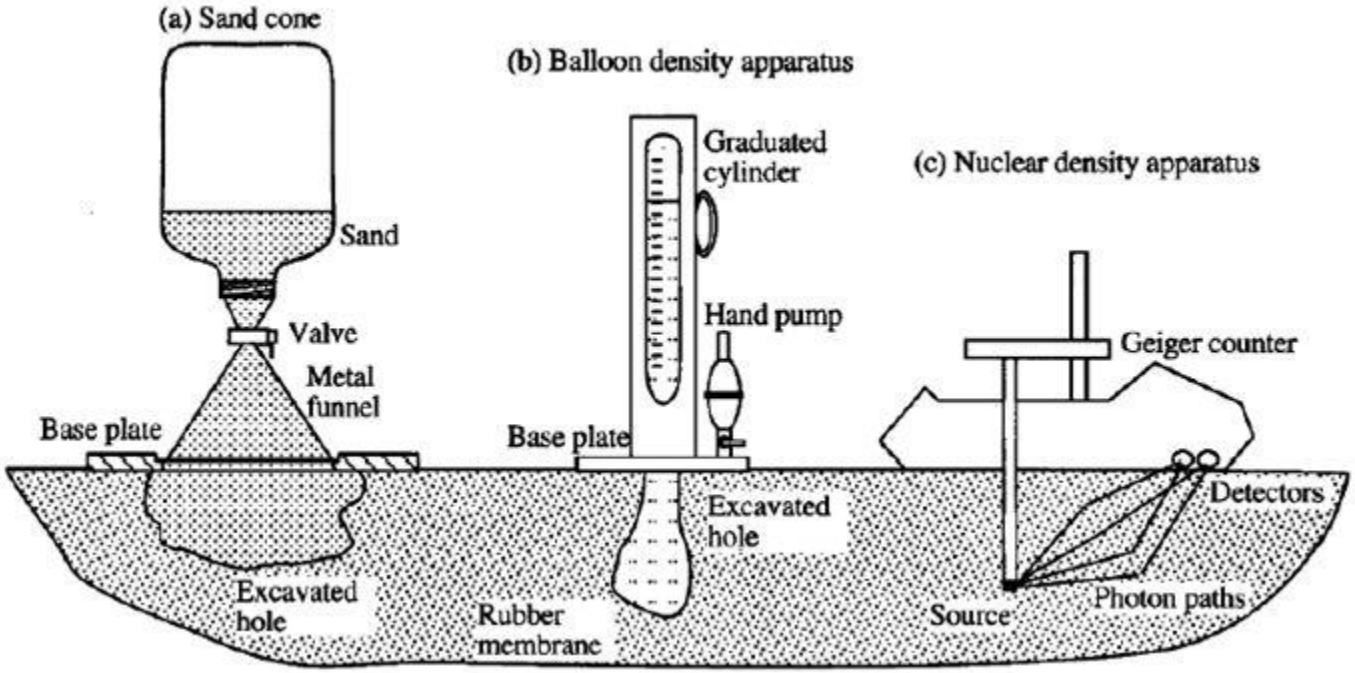
$$R_0 = \frac{\gamma_{d(\text{min})}}{\gamma_{d(\text{max})}}$$


Line of optimum
$\gamma_{d(max)}$
$R\gamma_{d(max)}$
Dry unit weight, γ_d
A
B
C
w_1
w_4
w_3
w_2
Moisture content, w

تعیین وزن مخصوص متراکم کارگاهی

در زمان انجام عملیات تراکم کارگاهی، آگاهی از دستیابی به وزن مخصوص مقرر سودمند است.
روش‌های استاندارد تعیین وزن مخصوص متراکم کارگاهی شامل موارد زیر است:

۱- روش مخروط ماسه
۲- روش بادکنک لاستیکی
۳- روش هسته‌ای.

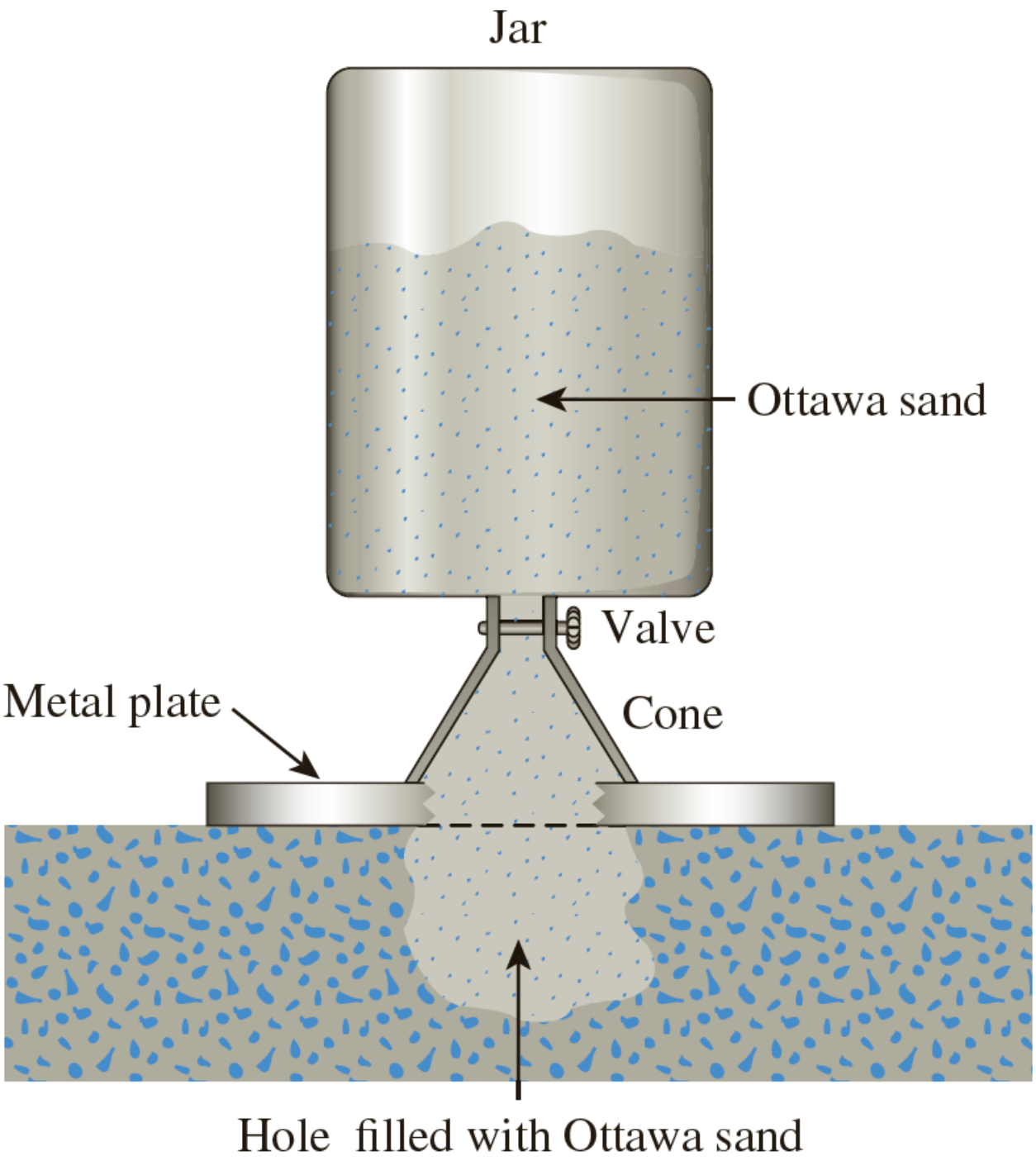


روش مخروط ماسه (ASTM D-1556)

وسیلهٔ آزمایش مخروط ماسه شامل یک ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی همراه با مخروط فلزی متصل به بالای آن است . ظرف با ماسهٔ خشک و یکنواخت Ottawa پر می‌شود. مجموع وزن ظرف، مخروط و ماسهٔ درون ظرف (W_1) مشخص می‌گردد. در کارگاه گودال کوچکی در ناحیهٔ خاک متراکم شده حفر می‌شود. در صورت تعیین وزن خاک مرطوب حفر شده از درون این گودال (W_2) و معلوم بودن میزان رطوبت خاک حفر شده، وزن خشک خاک را می‌توان چنین به دست آورد:

$$W_3 = \frac{W_2}{1 + \frac{w\ (\%)}{100}}$$

که در این جا: w = میزان رطوبت.


Jar
Ottawa sand
Valve
Metal plate
Cone
Hole filled with Ottawa sand