ترکیب خاک

روابط وزنی-حجمی

روابط وزنی–حجمی

در شکل ۲ ـ ۱ ـ الف، یک تودهٔ خاک با حجم V و وزن W به‌همان صورتی که در طبیعت یافت می‌شود، نشان داده شده است. برای حصول روابط وزنی ـ حجمی، سه قسمت خاک (یعنی مواد جامد، آب و هوا) مطابق شکل ۲ ـ ۱ ـ ب از یکدیگر جدا می‌شوند. در نتیجه حجم کل نمونهٔ خاک به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \qquad (۲ - ۱)$$

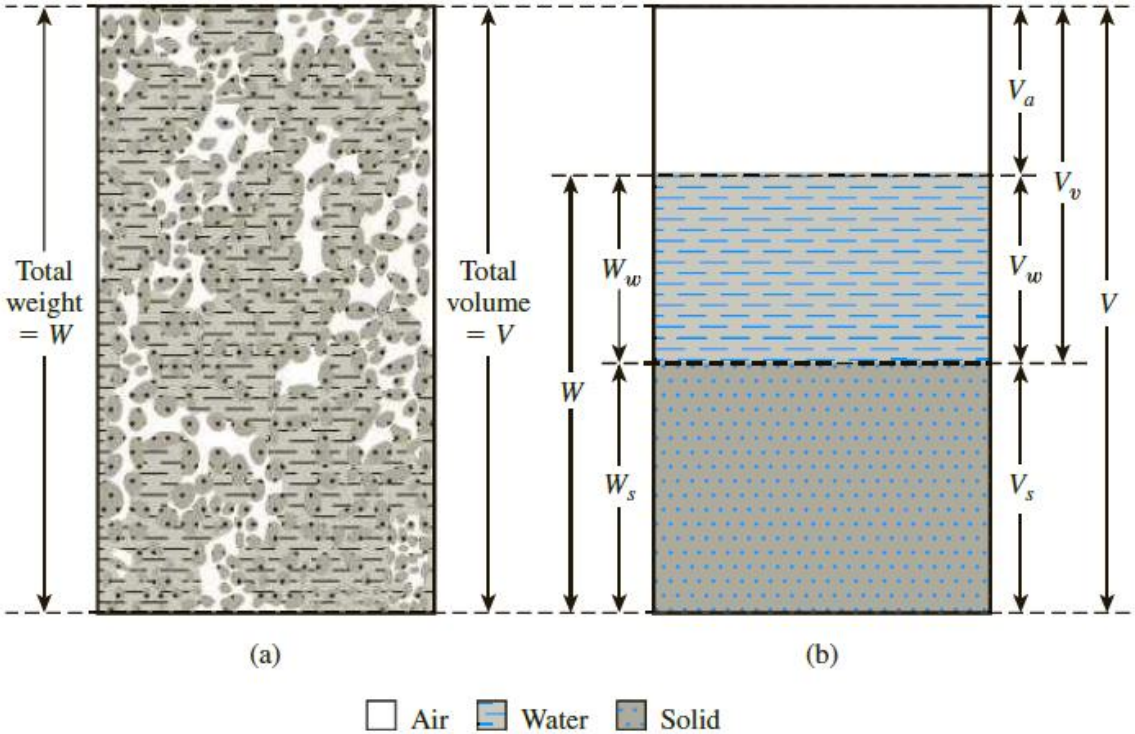
که در آن:

V_s = حجم قسمت جامد

V_v = حجم حفرات

V_w = حجم آب درون حفرات

V_a = حجم هوای درون حفرات



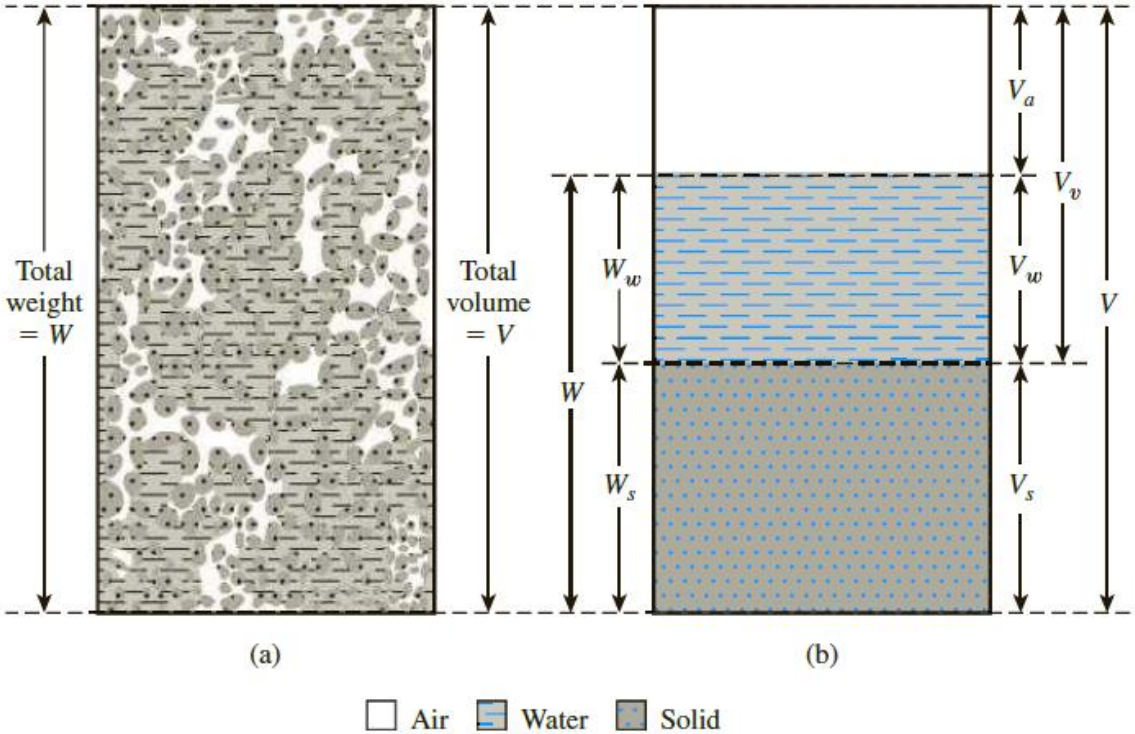
با صرفنظر کردن از وزن هوا، وزن کل نمونه را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$W = W_s + W_w \qquad (۲ - ۲)$$

که در آن:

W_s = وزن قسمت جامد

W_ω = وزن آب



روابط حجمی معمول در مکانیک خاک، عبارتند از نسبت تخلخل[۲]، پوکی[۳] و درجهٔ اشباع[۴]. نسبت تخلخل به‌صورت نسبت حجم حفرات به‌حجم قسمت جامد تعریف می‌شود:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad (۲-۳)$$

که در آن e نسبت تخلخل می‌باشد.

پوکی، نسبت حجم حفرات به‌حجم کل است:

$$n = \frac{V_v}{V} \qquad (۲-۴)$$

که در آن n پوکی می‌باشد.

درجهٔ اشباع به‌صورت نسبت حجم آب به‌حجم حفرات تعریف می‌شود:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \qquad (۲-۵)$$

که در آن S درجهٔ اشباع است که معمولاً برحسب درصد بیان می‌شود. رابطهٔ بین نسبت تخلخل و

که در آن S درجهٔ اشباع است که معمولاً برحسب درصد بیان می‌شود. رابطهٔ بین نسبت تخلخل و پوکی را می‌توان از روابط ۲ ـ ۱، ۲ ـ ۳ و ۲ ـ ۴ به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{\left(\frac{V_v}{V}\right)}{1 - \left(\frac{V_v}{V}\right)} = \frac{n}{1 - n} \qquad (۲ ـ ۶)$$

و به‌طور معکوس، از رابطهٔ ۲ ـ ۶ می‌توان نتیجه گرفت:

$$n = \frac{e}{1 + e} \qquad (۲ ـ ۷)$$

روابط وزنی معمول در مکانیک خاک، عبارتند از میزان رطوبت[۵] و وزن مخصوص[۶]. میزان رطوبت (w) که میزان آب نیز گفته می‌شود، به‌صورت نسبت وزن آب به‌وزن قسمت جامد تعریف می‌شود:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \qquad (۸ - ۲)$$

وزن مخصوص γ نیز وزن واحد حجم خاک می‌باشد:

$$\gamma = \frac{W}{V} \qquad (۹ - ۲)$$

وزن مخصوص را می‌توان برحسب وزن قسمت جامد، میزان رطوبت و حجم کل نوشت:

برای این کار از روابط ۲ ـ ۲، ۲ ـ ۸ و ۲ ـ ۹ می‌توان نوشت:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s\left[1 + \left(\frac{W_w}{W_s}\right)\right]}{V} = \frac{W_s(1 + w)}{V} \qquad (۱۰ - ۲)$$

مهندسین خاک اغلب به‌وزن مخصوص تعریف شده طبق رابطهٔ ۲ ـ ۹، وزن مخصوص مرطوب[۷] می‌گویند. در مقابل، وزن مخصوص خشک[۸]، γ_d به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \qquad (۲ - ۱۱)$$

با استفاده از روابط ۲ ـ ۱۰ و ۲ ـ ۱۱، رابطهٔ بین وزن مخصوص مرطوب (یا وزن مخصوص) و وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} \qquad (۲ - ۱۲)$$

وزن مخصوص در دستگاه آحاد SI معمولاً برحسب نیوتن بر متر مکعب (N/m^3) یا کیلونیوتن بر مترمکعب (kN/m^3) و در دستگاه MKS عملی برحسب کیلوگرم نیرو بر مترمکعب (kgf/m^3) و یا تن بر مترمکعب (T/m^3) بیان می‌شود.

به‌طریق مشابه با روابط ۲ ـ ۹ و ۲ ـ ۱۱، جرم مخصوص[۹] مرطوب و جرم مخصوص خشک[۱۰] خاک به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}$$

در روابط فوق:

ρ = جرم مخصوص مرطوب خاک برحسب کیلوگرم جرم بر مترمکعب (kg/m^3)

ρ_d = جرم مخصوص خشک خاک (kg/m^3)

m = جرم کل نمونهٔ خاک برحسب کیلوگرم جرم (kg)

m_s = جرم قسمت جامد نمونهٔ خاک (kg)

وزن مخصوص خاک برحسب N/m^3 با استفاده از روابط زیر از جرم مخصوص به‌دست می‌آید:

$$\gamma\,(kN/m^3) = \frac{g\rho\,(kg/m^3)}{1000}$$

$$\gamma_d\,(kN/m^3) = \frac{g\,\rho_d(kg/m^3)}{1000}$$

که در روابط فوق، g شتاب ثقل زمین مساوی $9.81\ m/sec^2$ می‌باشد (برای کارهای عملی با دقت مناسب می‌توان g را مساوی $10\ m/sec^2$ در نظر گرفت).

۲ ـ ۲ روابط بین وزن مخصوص، نسبت تخلخل، میزان رطوبت و چگالی دانه‌ها

برای تعیین روابطی بین وزن مخصوص (یا جرم مخصوص)، نسبت تخلخل و میزان رطوبت مطابق شکل ۲ ـ ۲، حجمی از خاک در نظر بگیرید که در آن حجم قسمت جامد مساوی واحد است. اگر حجم قسمت جامد مساوی ۱ باشد، حجم حفرات از لحاظ عددی مساوی نسبت تخلخل e خواهد بود (طبق رابطهٔ ۲ ـ ۳).

وزن قسمت جامد و آب را می‌توان طبق روابط زیر نوشت:

$$W_s = G_s \gamma_w$$

$$W_w = wW_s = wG_s \gamma_w$$

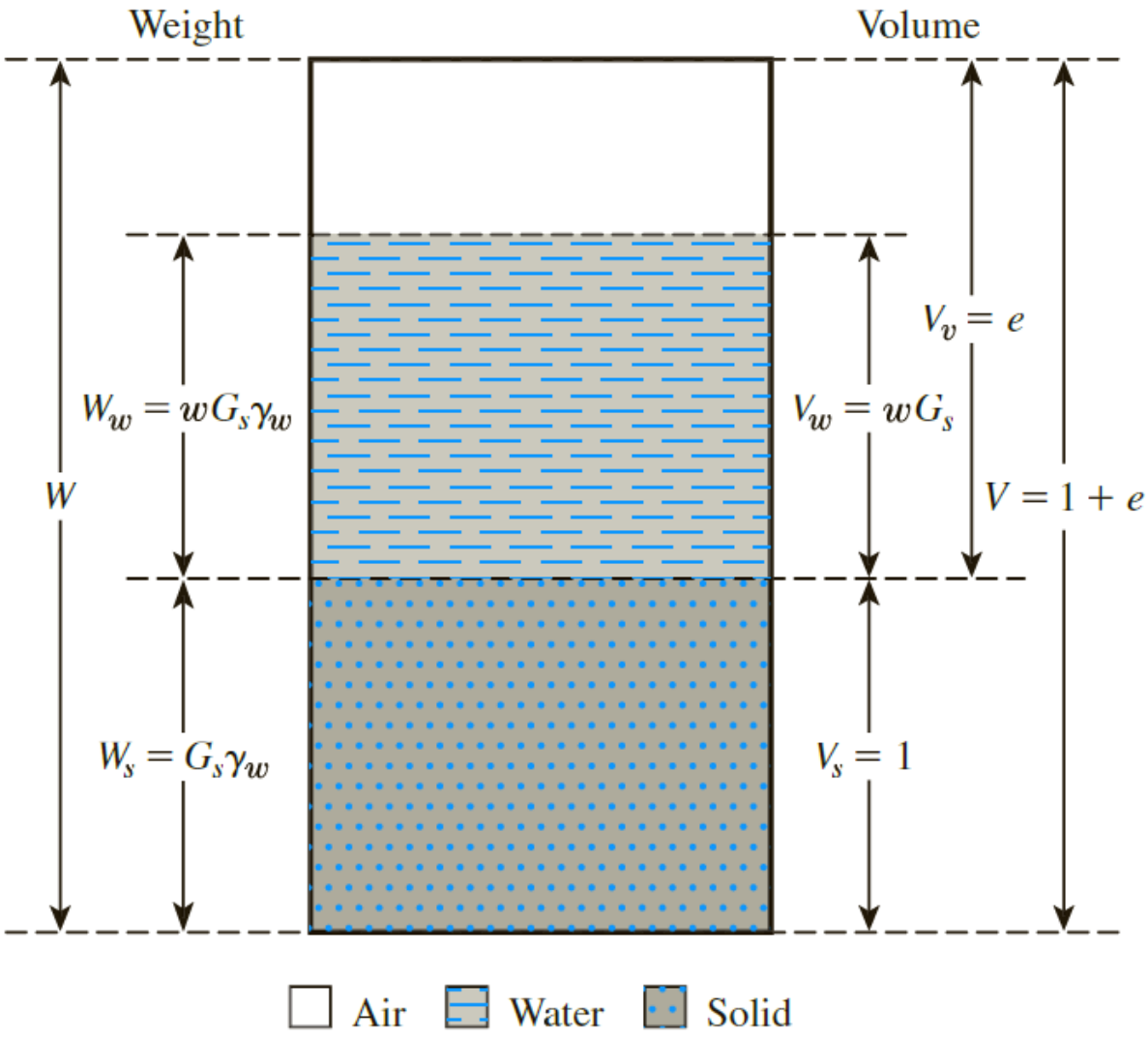
که در آن:

G_s = چگالی دانه‌ها

w = میزان رطوبت

γ_w = وزن مخصوص آب

در آحاد SI، وزن مخصوص آب $9.81\ kN/m^3$* و در دستگاه MKS مساوی $1\ T/m^3$ می‌باشد.



خاک اشباع با حجم قسمت جامد مساوی واحد

حال با استفاده از تعریف وزن مخصوص و وزن مخصوص خشک (روابط ۲ ـ ۹ و ۲ ـ ۱۱)، می‌توان نوشت:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s\gamma_w + wG_s\gamma_w}{1+e} = \frac{(1+w)\,G_s\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$$

$$e = \frac{G_s\gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

از آنجایی‌که وزن آب برای خاک تحت مطالعه مساوی $wG_s\gamma_w$ می‌باشد، حجم اشغال‌شده توسط آن برابر است با:

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{wG_s\gamma_w}{\gamma_w} = wG_s$$

حال با استفاده از تعریف درجهٔ اشباع (رابطهٔ ۲ ـ ۵) می‌توان نوشت:

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{wG_s}{e}$$

$$Se = wG_s$$

رابطهٔ به‌دست آمده برای حل مسائلی که شامل روابط سه‌قسمتی می‌باشند، بسیار مفید است.

اگر نمونهٔ خاک اشباع باشد، بدین‌معنی که فضای حفرات کاملاً پر از آب باشد (شکل ۲ ـ ۳)، روابط مربوط به‌وزن مخصوص اشباع می‌تواند به‌طریق مشابه به‌دست آید:

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s\gamma_w + e\gamma_w}{1+e} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e}$$

که در آن:

γ_{sat}= وزن مخصوص اشباع خاک

همان‌طور که در قبل توضیح داده شد، به‌علت سهولت کار با جرم مخصوص در آحاد SI، روابط جرم مخصوص زیر که مشابه روابط وزن مخصوص ۲ ـ ۱۵، ۲ ـ ۱۶ و ۲ ـ ۱۸ هستند، می‌توانند در عمل مفید باشند:

$$\text{جرم مخصوص} = \rho = \frac{(1 + w)G_s\rho_w}{1 + e}$$

$$\text{جرم مخصوص خشک} = \rho_d = \frac{G_s\rho_w}{1 + e}$$

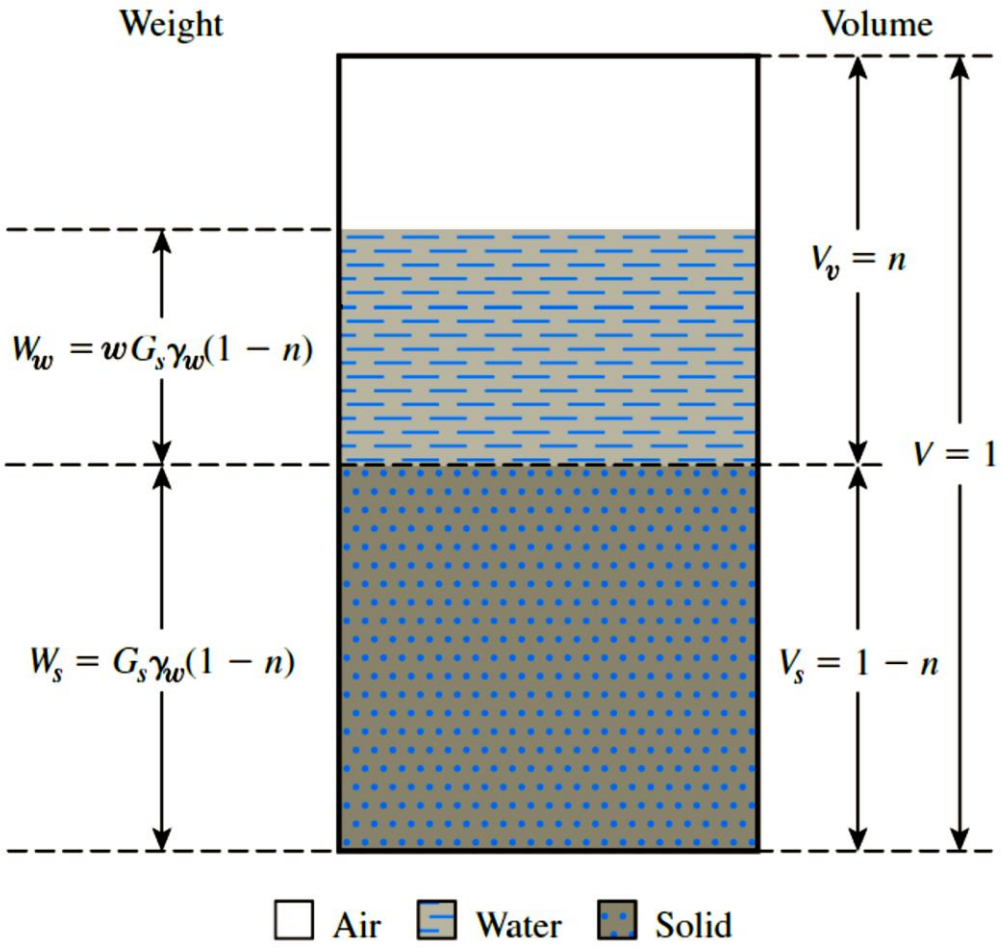
$$\text{جرم مخصوص اشباع} = \rho_{\text{sat}} = \frac{(G_s + e)\,\rho_w}{1 + e}$$

که در آن جرم مخصوص ρ_w آب مساوی $1000\ \text{kg/m}^3$ می‌باشد.

۲ ـ ۳ رابطهٔ بین وزن مخصوص، پوکی و میزان رطوبت

رابطهٔ بین وزن مخصوص، پوکی و میزان رطوبت را می‌توان به‌روشی مشابه روش ارائـه شـده در بخش قبل به‌دست آورد. مطابق شکل ۲ ـ ۵، نمونهٔ خاکی با حجم کل واحد در نظر بگیرید. با استفاده از رابطهٔ ۲ ـ ۴ می‌توان نوشت:

$$n = \frac{V_v}{V}$$



نمونهٔ خاک با حجم کل V=1

اگر V مساوی ۱ باشد، V_v مساوی n خواهد شد. بنابراین خواهیم داشت:

$$V_s = 1 - n$$

وزن قسمت جامد خاک (W_s) و وزن آب (W_w) را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$W_s = G_s \gamma_w (1 - n) \qquad (۲۰ - ۲)$$

$$W_w = wW_s = wG_s \gamma_w (1 - n) \qquad (۲۱ - ۲)$$

بنابراین، وزن مخصوص خشک برابر می‌شود با:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \gamma_w (1 - n)}{1} = G_s \gamma_w (1 - n) \qquad (۲۲ - ۲)$$

وزن مخصوص مرطوب نیز برابر است با:

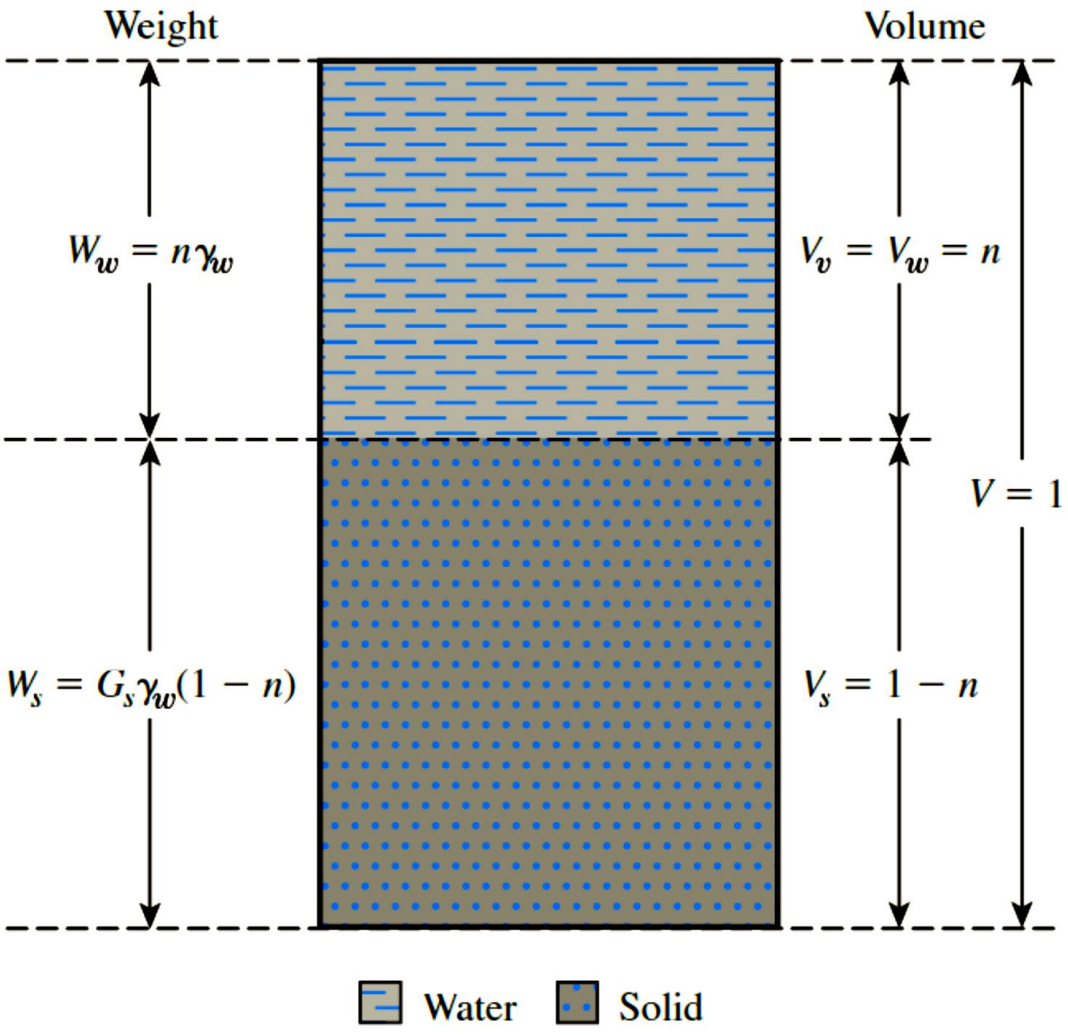
$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V} = G_s \gamma_w (1 - n)(1 + w) \qquad (۲۳ - ۲)$$

شکل ۲ ـ ۶ نمونهٔ خاکی را نشان می‌دهد که اشباع بوده و دارای حجم $V=1$ است. باتوجه به‌شکل می‌توان نوشت:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{(1 - n)G_s \gamma_w + n\gamma_w}{1} = [(1 - n)G_s + n]\gamma_w \qquad (۲۴ - ۲)$$

میزان رطوبت یک نمونهٔ خاک اشباع را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$w_{\text{sat}} = \frac{W_w}{W_s} = \frac{n\gamma_w}{(1-n)\gamma_w G_s} = \frac{n}{(1-n)G_s}$$



نمونهٔ خاک اشباع با V=1

۲ـ۵ تراکم نسبی

تراکم نسبی[11] معمولاً برای نشان دادن میزان تراکم و یا سستی[12] (شلی) خاکهای دانه‌ای در محل، مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

که در آن:

D_r = تراکم نسبی که معمولاً به‌صورت درصد بیان می‌شود

e = نسبت تخلخل در محل

$e_{\max}$ = نسبت تخلخل خاک در شل‌ترین وضعیت

$e_{\min}$ = نسبت تخلخل در متراکم‌ترین وضعیت

دامنهٔ تغییرات D_r از ۰ برای خاکهای خیلی شل تا حداکثر ۱ برای خاکهای خیلی متراکم می‌باشد. با توجه به‌تراکم نسبی، خاکهای دانه‌ای مطابق جدول ۲ ـ ۲ توصیف می‌شوند. در جدول ۲ ـ ۳ نیز برای بعضی از خاکها در حالت طبیعی، مقادیر نمونه برای نسبت تخلخل، میزان رطوبت در شرایط اشباع و وزن مخصوص خشک ارائه شده است.

با استفاده از تعریف وزن مخصوص خشک (رابطهٔ ۲ ـ ۱۶)، تراکم نسبی را می‌توان برحسب وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر بیان کرد. بنابراین:

$$D_r = \frac{\left[\frac{1}{\gamma_{d(\min)}}\right] - \left[\frac{1}{\gamma_d}\right]}{\left[\frac{1}{\gamma_{d(\min)}}\right] - \left[\frac{1}{\gamma_{d(\max)}}\right]} = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(\min)}}{\gamma_{d(\max)} - \gamma_{d(\min)}}\right]\left[\frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_d}\right]$$

که در آن:

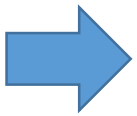
$\gamma_{d(\min)}$= وزن مخصوص خشک در شل‌ترین وضعیت (متناظر با نسبت تخلخل $e_{\max}$)

γ_d= وزن مخصوص خشک در محل (متناظر با e)

$\gamma_{d(\max)}$= وزن مخصوص خشک در متراکم‌ترین وضعیت (متناظر با نسبت تخلخل $e_{\min}$)

$$e_{\max} = \frac{n_{\max}}{1 - n_{\max}}$$

$$e_{\min} = \frac{n_{\min}}{1 - n_{\min}}$$



$$D_r = \frac{(1 - n_{\min})(n_{\max} - n)}{(n_{\max} - n_{\min})(1 - n)}$$

توصیف خاکهای دانه‌ای برحسب تراکم نسبی

Relative density (%)	Description of soil deposit
0–15	Very loose
15–50	Loose
50–70	Medium
70–85	Dense
85–100	Very dense

برای تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل، از روش توصیه‌شده در ASTM-D-2049 استفاده می‌شود. برای ماسه این کار با استفاده از یک قالب به‌حجم ۰/۱ فوت‌مکعب (۲۸۳۰ سانتیمتر مکعب) انجام می‌شود. برای تعیین وزن مخصوص خشک حداقل، ماسه به‌صورت شل با استفاده از یک قیف به‌قطر لوله $\frac{1}{2}$ اینچ (۱۲/۷ میلیمتر) در داخل قالب ریخته می‌شود. ارتفاع متوسط ریزش ماسه در حدود ۱ اینچ (۲۵/۴ میلیمتر) حفظ می‌شود. مقدار $\gamma_{d(\min)}$ را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\gamma_{d(\min)} = \frac{W_{s(\text{mold})}}{V_m}$$

که در آن:

W_s = وزن ماسهٔ لازم برای پر کردن قالب

V_m = حجم قالب (مساوی ۰/۱ فوت مکعب یا ۲۸۳۰ سانتیمتر مکعب)

وزن مخصوص خشک حداکثر، با لرزاندن ماسهٔ موجود در قالب به‌مدت ۸ دقیقه به‌دست می‌آید. برای این کار، یک سربار با فشار 2 lb/in.^{2} (13.8 kN/m^2) در بالای ماسهٔ موجود در قالب قرار گرفته و قالب در روی میز لرزان که با فرکانس ۳۶۰۰ سیکل بر دقیقه و با دامنهٔ ۰/۰۲۵ اینچ (۰/۶۳۵ میلیمتر) می‌لرزد، قرار داده می‌شود. پس از اتمام عمل لرزاندن، با داشتن وزن و حجم ماسه می‌توان $\gamma_{d(\max)}$ را به‌دست آورد. عوامل متعددی بر روی مقدار $\gamma_{d(\max)}$ تأثیر می‌گذارند. این عوامل عبارتند از مقدار سربار، دامنه و فرکانس ارتعاش. بنابراین می‌توان به $\gamma_{d(\max)}$ بزرگتری نسبت به‌مقدار به‌دست آمده طبق روش استاندارد ASTM دست یافت.

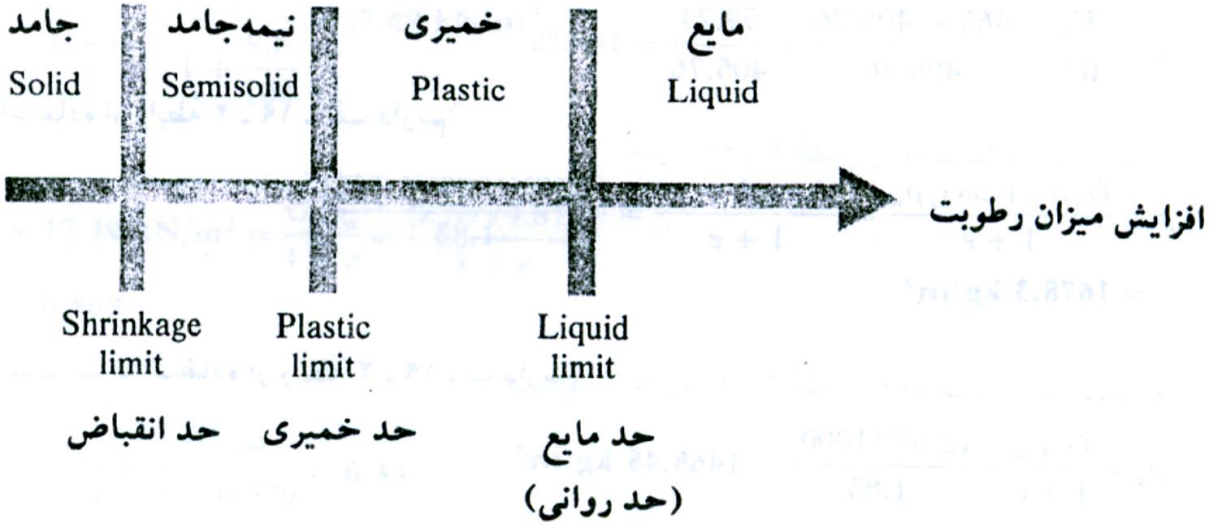
۲ـ۶ سفتی (قوام) خاک[۱۳]

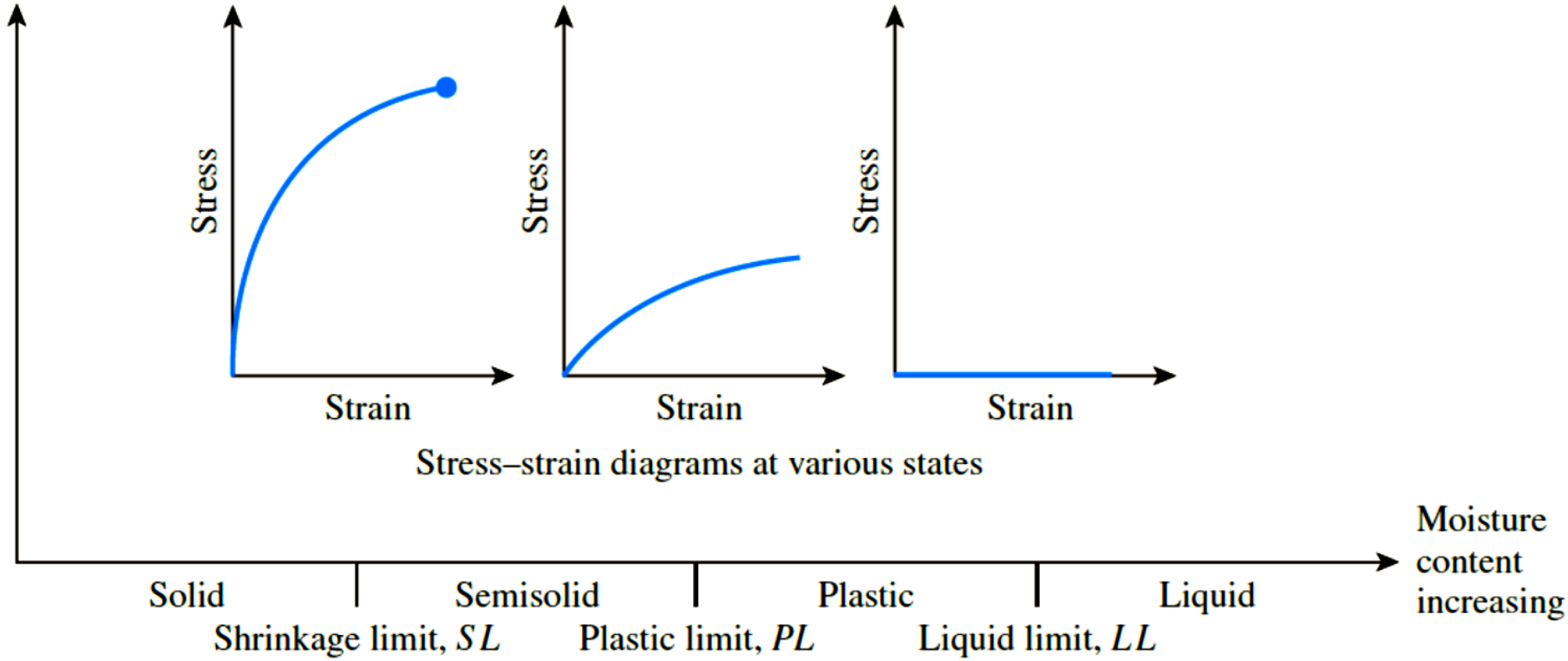
وقتی در خاکهای ریزدانه، کانیهای رسی ظاهر شود، با مرطوب کردن، خاک حالت خمیری به‌خود می‌گیرد و آن را می‌توان بدون خرد شدن شکل داد. این خاصیت چسبندگی به‌علت آب جذب شده‌ای است که ذرات رس را احاطه کرده است. در اوایل دهۀ ۱۹۰۰، دانشمند سوئدی، اتربرگ[۱۴]، روشی برای توصیف سفتی خاکهای ریزدانه برحسب میزان رطوبت ابداع نمود. در میزان رطوبت خیلی کم، خاک مثل یک جسم جامد عمل می‌کند. در رطوبت خیلی بالا، مخلوط آب و خاک می‌تواند به‌صورت یک مایع جاری شود. به‌طور کلی همانند شکل ۲ ـ ۸، برحسب میزان رطوبت، طبیعت رفتار خاک به‌یکی از چهار حالت جامد، نیمه‌جامد، خمیری و مایع خواهد بود.

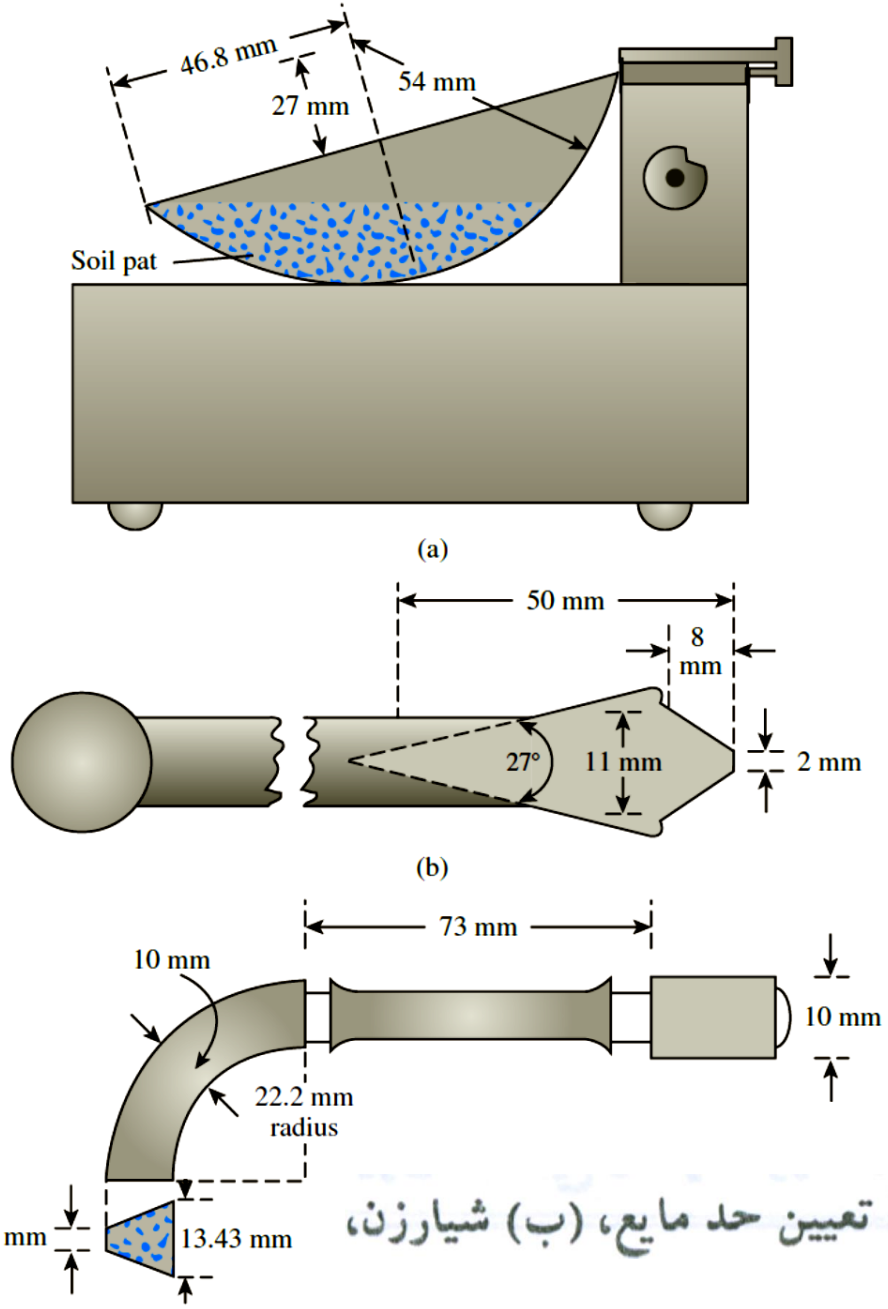
میزان رطوبت (برحسب درصد) در نقطۀ انتقال از جامد به‌نیمه‌جامد، حد انقباض و در نقطۀ انتقال از نیمه‌جامد به‌خمیری، حد خمیری و از خمیری به‌مایع، حد مایع یا حد روانی نامیده می‌شود. حدود نامبرده، به‌حدود اتربرگ معروف هستند.

حد مایع (حد روانی)

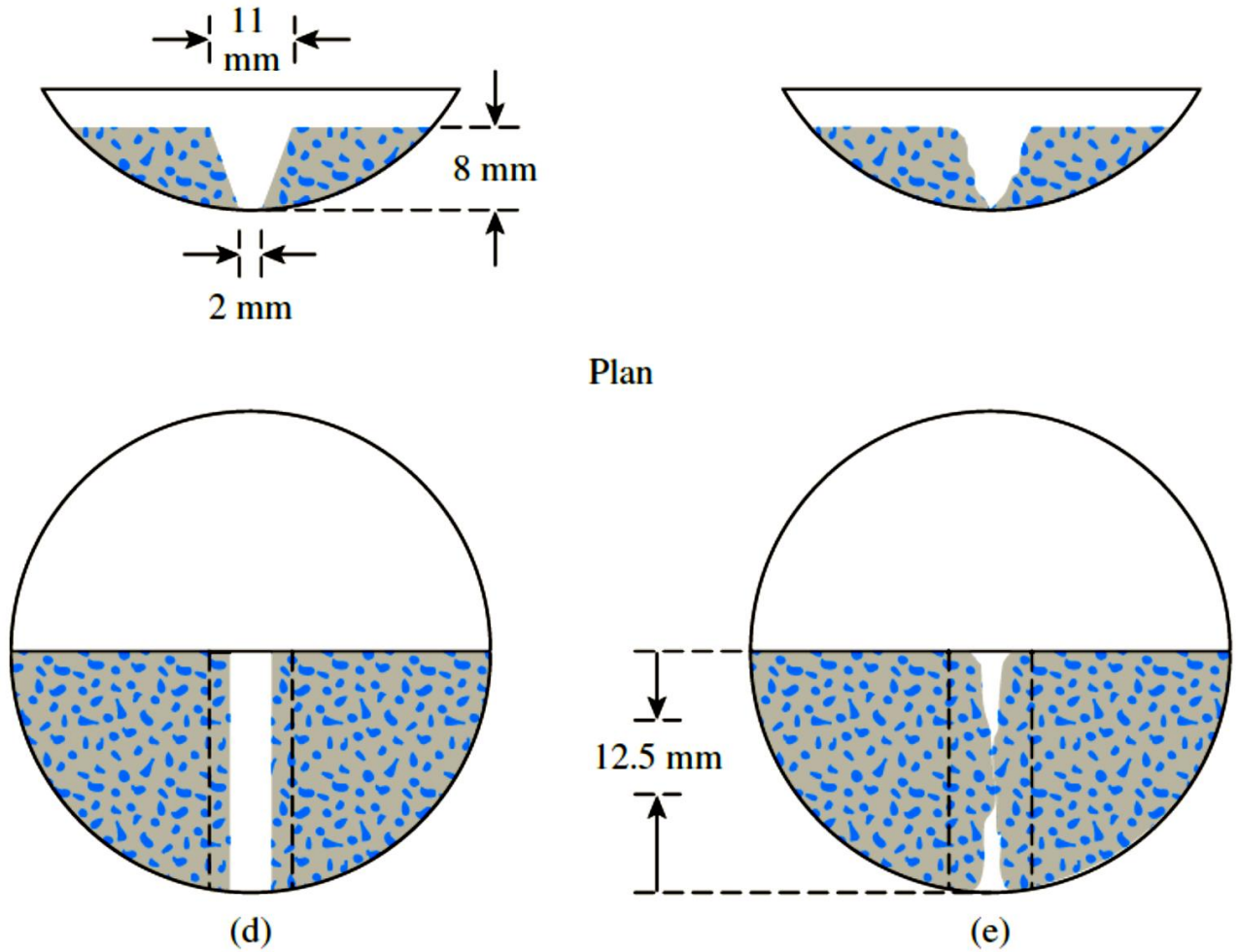
در شکل ۲ ـ ۹ ـ الف، نمای جانبی وسیلهٔ اندازه‌گیری حد مایع نشان داده شده است. این وسیله شامل یک فنجان برنجی و یک پایه از لاستیک سخت می‌باشد. با پیچاندن دسته‌ای، فنجان از روی پایه قدری بلند شده و به‌طور ناگهانی روی آن می‌افتد. برای انجام آزمایش تعیین حد مایع (حد روانی)، خمیر خاک در فنجان قرار داده شده و با استفاده از شیارزن استاندارد (شکل ۲ ـ ۹ ـ ب)، شیاری در وسط نمونهٔ خمیری خاک ایجاد می‌شود. سپس با پیچاندن دستهٔ دستگاه، فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰ میلیمتری بر آن می‌افتد. درصد رطوبتی که به‌ازای آن به‌علت ۲۵ ضربهٔ فنجان، شیار ایجاد شده در نمونهٔ داخل فنجان، بسته می‌شود، حد مایع (حد روانی) خوانده می‌شود. در شکل ۲ ـ ۱۰ تصویر وسیلهٔ آزمایش نشان داده شده است.




Stress
Strain
Stress
Strain
Stress
Strain
Stress–strain diagrams at various states
Moisture content increasing
Solid
Semisolid
Plastic
Liquid
Shrinkage limit, SL
Plastic limit, PL
Liquid limit, LL

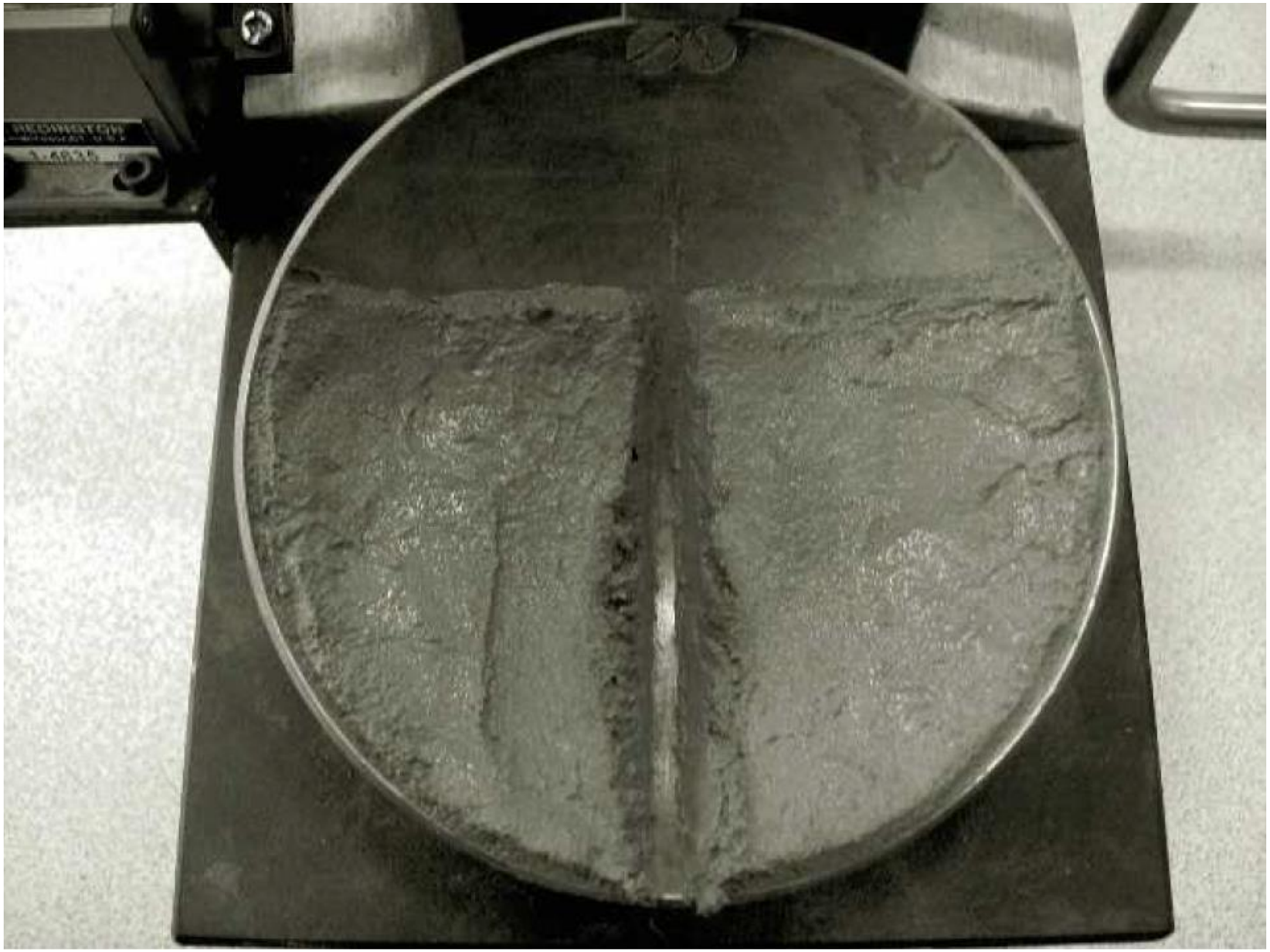


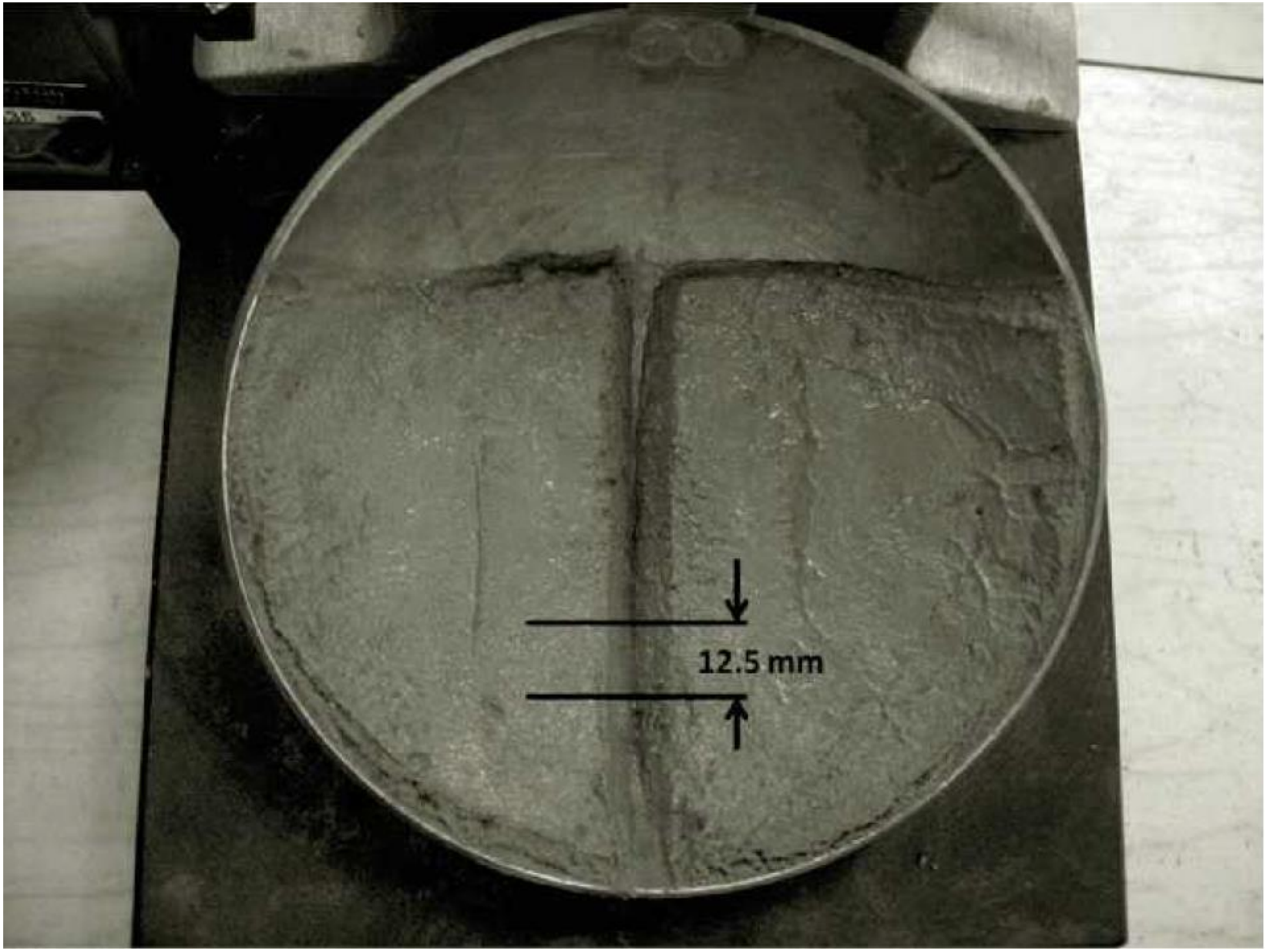
آزمایش حد مایع. (الف) وسیلهٔ تعیین حد مایع، (ب) شیارزن،



(پ) شیار خاک قبل از آزمایش، (ت) شیار خاک بعد از آزمایش

وسیلهٔ اندازه‌گیری حد مایع و نمونهٔ درون آن قبل از شروع آزمایش




12.5 mm

تنظیم رطوبت خاک به‌طوری که دقیقاً به‌علت ۲۵ ضربه، عرض شیار بسته شود، مشکل است. بنابراین حداقل چهار آزمایش برای خاک مورد مطالعه با رطوبتهای مختلف انجام شده و تعداد ضربات لازم برای بستن شیار اندازه‌گیری می‌شود. میزان رطوبت باید طوری باشد که تعداد ضربات N بین ۱۵ تا ۳۵ قرار گیرد. سپس مطابق شکل ۲ ـ ۱۱، میزان رطوبت برحسب درصد، در مقابل تعداد ضربات N در روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی رسم می‌شود. رابطهٔ بین میزان رطوبت و $\log N$ تقریباً به‌صورت خط مستقیم است و به‌نمودار آن، نمودار جریان[15] می‌گویند. با داشتن نمودار، می‌توان درصد رطوبت نظیر $N=25$ راکه همان حد مایع می‌باشد، به‌دست آورد (شکل ۲ ـ ۱۱). شیب خط جریان، نشانهٔ جریان[16] نامیده شده و به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}$$

که در آن:

I_F= نشانهٔ جریان

w_1= میزان رطوبت (برحسب درصد) نظیر تعداد ضربات N_1

w_2= میزان رطوبت (برحسب درصد) نظیر تعداد ضربات N_2

بنابراین رابطهٔ منحنی جریان در شکل کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$w = -I_F \log N + C \qquad (۴۱ - ۲)$$

رابطهٔ تجربی برای تعیین حد مایع به‌صورت زیر پیشنهاد شده است:

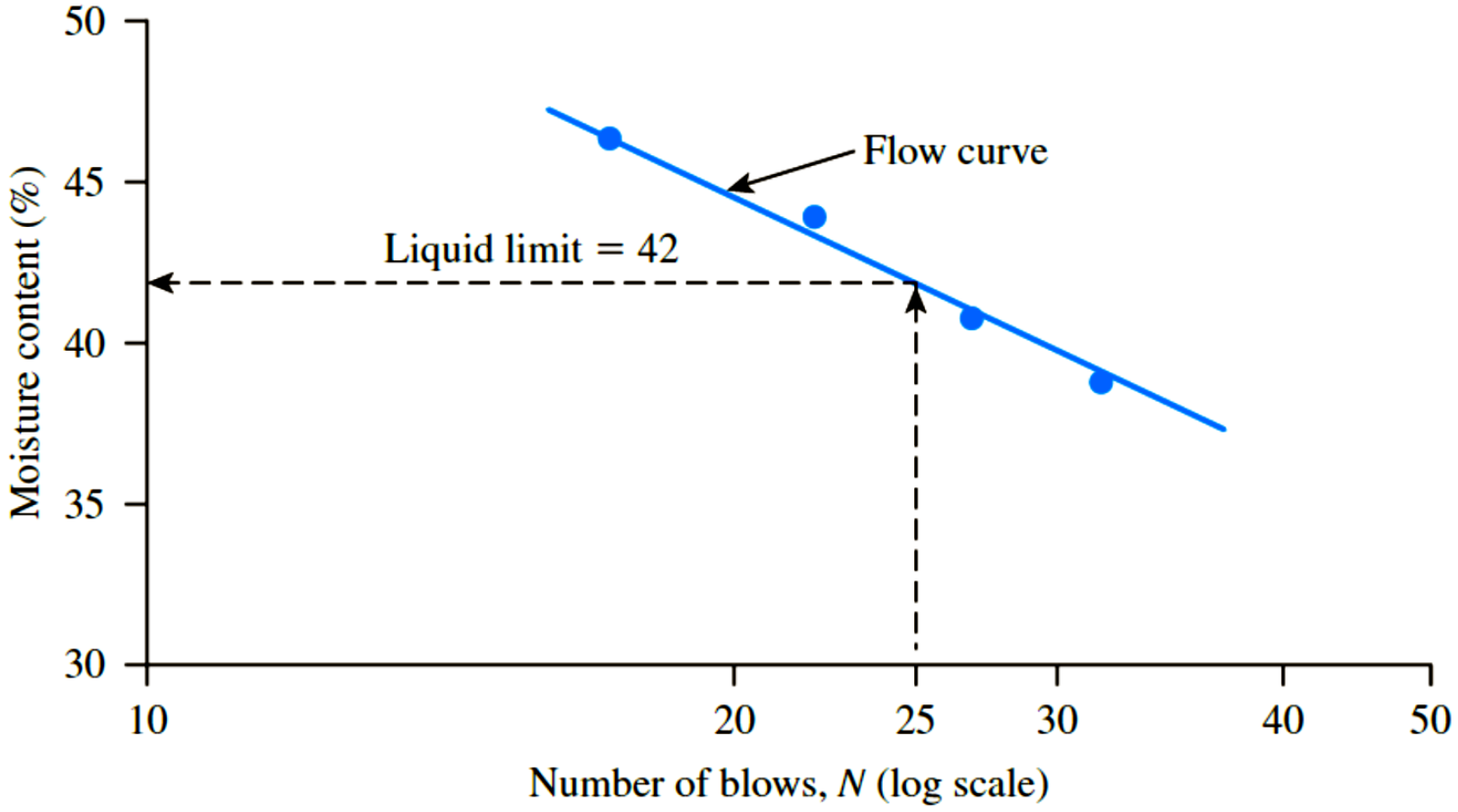
$$LL = w_N \left(\frac{N}{25}\right)^{\tan \beta} \qquad (۴۲ - ۲)$$

که در آن:

N= تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار استاندارد در وسیلهٔ تعیین حد مایع

w_N= میزان رطوبت مربوطه برحسب درصد

$\tan\beta$ = 0.121 (توجه شود که برای تمام خاکها، $\tan\beta$ مساوی ۰/۱۲۱ نیست)



منحنی جریان برای تعیین حد مایع

گازاگرانده (۱۹۳۲)، چنین نتیجه‌گیری کرد که هر ضربه در وسیلهٔ استاندارد تعیین حد مایع، متناظر با مقاومت برشی خاک در حدود $0.1\ kN/m^2$ می‌باشد. بنابراین حد مایع برای خاک‌های ریزدانه، میزان رطوبتی را به‌دست می‌دهد که مقاومت برشی به‌ازای آن تقریباً مساوی $2.5\ kN/m^2$ است.

حد خمیری (PL)

حد خمیری میزان رطوبتی (برحسب درصد) است که به‌ازای آن اگر فیتیله‌ای به‌قطر ۳/۲ میلیمتر از خمیر خاک نمونه (با روش غلتاندن) ساخته شود، خرد گردد. حد خمیری پایین‌ترین میزان رطوبت مربوط به‌حالت خمیری خاک است. روش آزمایش ساده است و مطابق اشکال ۲ ـ ۱۲ ـ پ و ت، با غلتاندن تکه‌ای از خمیر خاک بر روی یک صفحهٔ شیشه‌ای به‌وسیلهٔ دست صورت می‌گیرد.

نشانهٔ خمیری (PI) اختلاف بین حد مایع و حد خمیری خاک می‌باشد:

$$PI = LL - PL$$

روش تعیین حد خمیری طبق ASTM-D-424 استاندارد شده است.

PI	Description
0	Nonplastic
1–5	Slightly plastic
5–10	Low plasticity
10–20	Medium plasticity
20–40	High plasticity
>40	Very high plasticity

آزمایش تعیین حد خمیری

حد انقباض (SL)

با از دست دادن رطوبت، خاک منقبض می‌شود (حجم آن کم می‌گردد). با کاهش پیوستهٔ رطوبت، مرحله‌ای می‌رسد که از آن به‌بعد، کاهش رطوبت دیگر سبب کاهش حجم نمی‌شود. میزان رطوبت، برحسب درصد، که در آن کاهش حجم خاک متوقف می‌گردد، حد انقباض نامیده می‌شود.

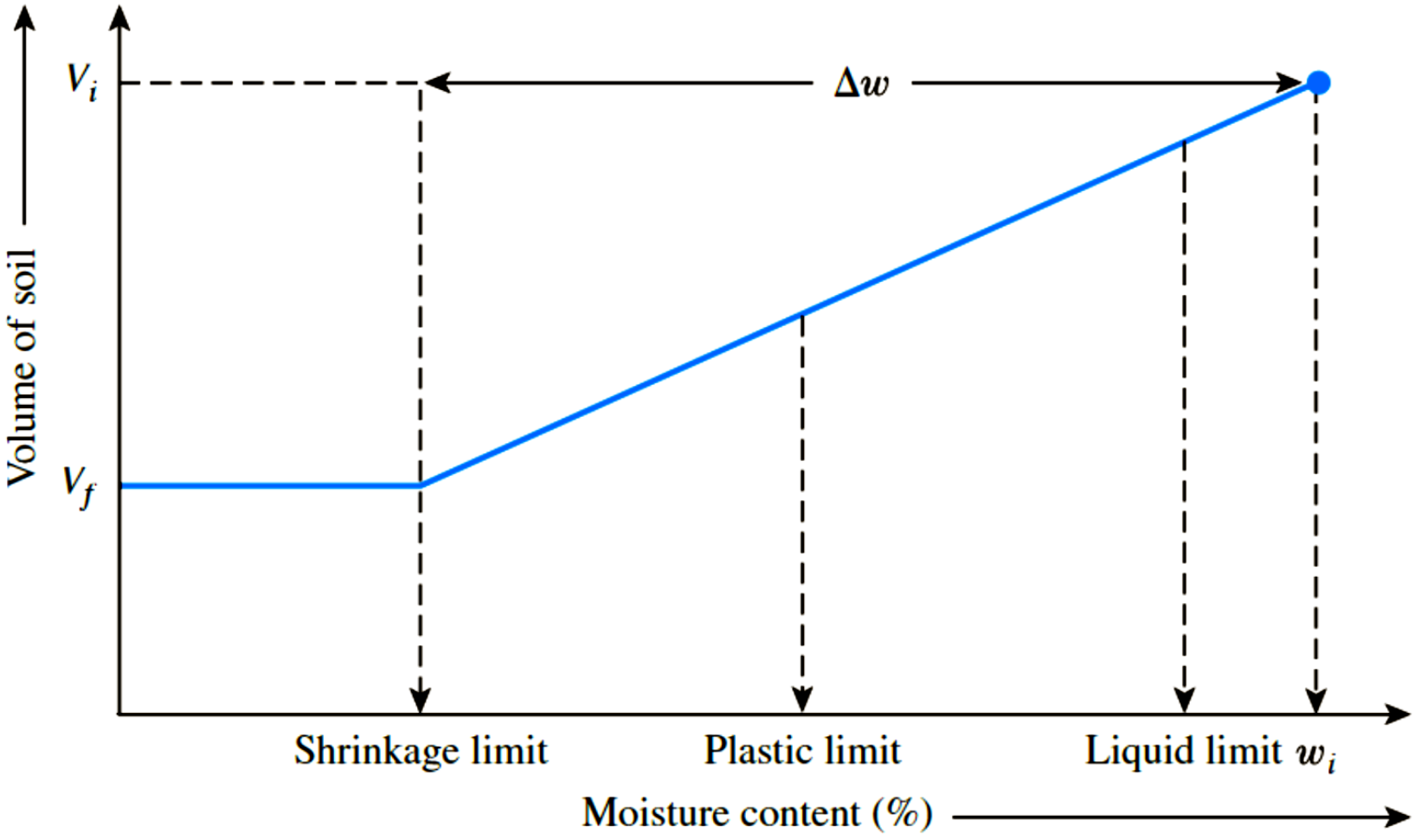
آزمایش حد انقباض (ASTM-D-427) در آزمایشگاه درون یک ظرف چینی به‌قطر ۱/۷۵ اینچ (۴۴/۴ میلیمتر) و عمق ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلیمتر) انجام می‌شود. داخل ظرف توسط یک روغن مخصوص چرب شده و سپس با خاک مرطوب کاملاً پر می‌شود. با یک وسیلهٔ لب‌تیز، سطح نمونه هم‌تراز با لبه‌های ظرف، صاف می‌گردد. جرم خاک داخل ظرف یادداشت‌شده و سپس توسط کوره خشک می‌شود. پس از درآوردن از کوره، کاهش حجم خاک با ریختن جیوه اندازه‌گیری می‌گردد. با مراجعه به‌شکل ۲ ـ ۱۳، حد انقباض را می‌توان به‌روش زیر محاسبه نمود:

$$SL = w_i\,(\%) - \Delta w\,(\%)$$

که در آن:

w_i = میزان رطوبت اولیه وقتی که خاک درون ظرف آزمایش قرار داده می‌شود.

Δw = تغییر درمیزان رطوبت (اختلاف بین‌میزان رطوبت اولیه و میزان‌رطوبت درحد انقباض)



تعریف حد انقباض

مقادیر مذکور با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$w_i\,(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

که در آن:

m_1= جرم خاک مرطوب در ظرف در شروع آزمایش (گرم)

m_2= جرم خاک خشک در ظرف (به‌شکل ۲ ـ ۱۴ مراجعه شود) (گرم)

همچنین

$$\Delta w\,(\%) = \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{M_2} \times 100$$

که در آن:

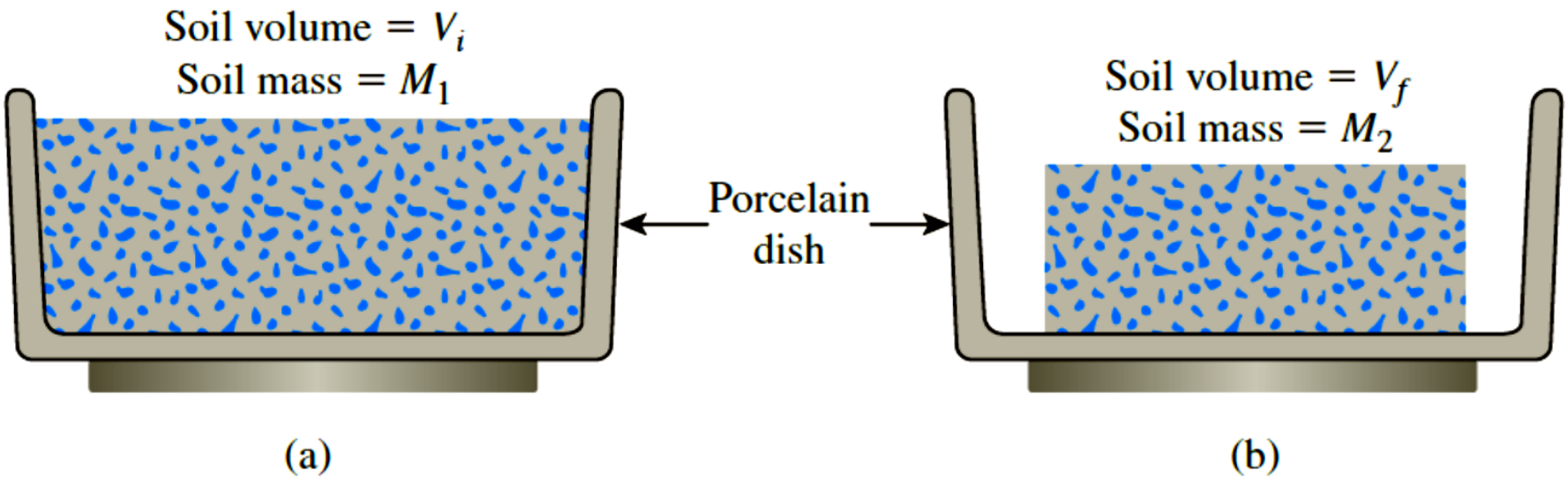
V_i= حجم اولیهٔ خاک مرطوب (که همان حجم داخلی ظرف است cm^3)

V_f= حجم خاک خشک‌شده در کوره (cm^3)

ρ_w= جرم مخصوص آب (g/cm^3)

حال با ترکیب روابط ۲ ـ ۳۳، ۲ ـ ۳۴ و ۲ ـ ۳۵ خواهیم داشت:

$$SL = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2}\right)(100) - \left(\frac{V_i - V_f}{M_2}\right)(\rho_w)\,(100)$$



قبل از خشک شدن

بعد از خشک شدن

آزمایش حد انقباض

Mineral	Shrinkage limit
Montmorillonite	8.5–15
Illite	15–17
Kaolinite	25–29

۲ـ۷ نشانهٔ مایع

سفتی نسبی[۱۸] یک خاک چسبنده در وضعیت طبیعی را می‌توان توسط نسبتی که نشانهٔ مایع[۱۹] (LI) نامیده می‌شود، بیان نمود:

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$$

که در آن w میزان رطوبت درجای[۲۰] خاک می‌باشد.

میزان رطوبت درجای یک نهشتهٔ خاکی تحکیم‌نیافته می‌تواند بزرگتر از حد مایع باشد. در این حالت:

$$LI > 1$$

در صورت بهم‌خوردگی، چنین خاکهایی می‌توانند به‌شکل یک مایع غلیظ روان شوند (آبگونگی).

در نهشته‌های خاکی پیش‌تحکیم‌یافته، میزان رطوبت طبیعی می‌تواند کمتر از حد خمیری گردد. در این حالت:

$$LI < 1$$

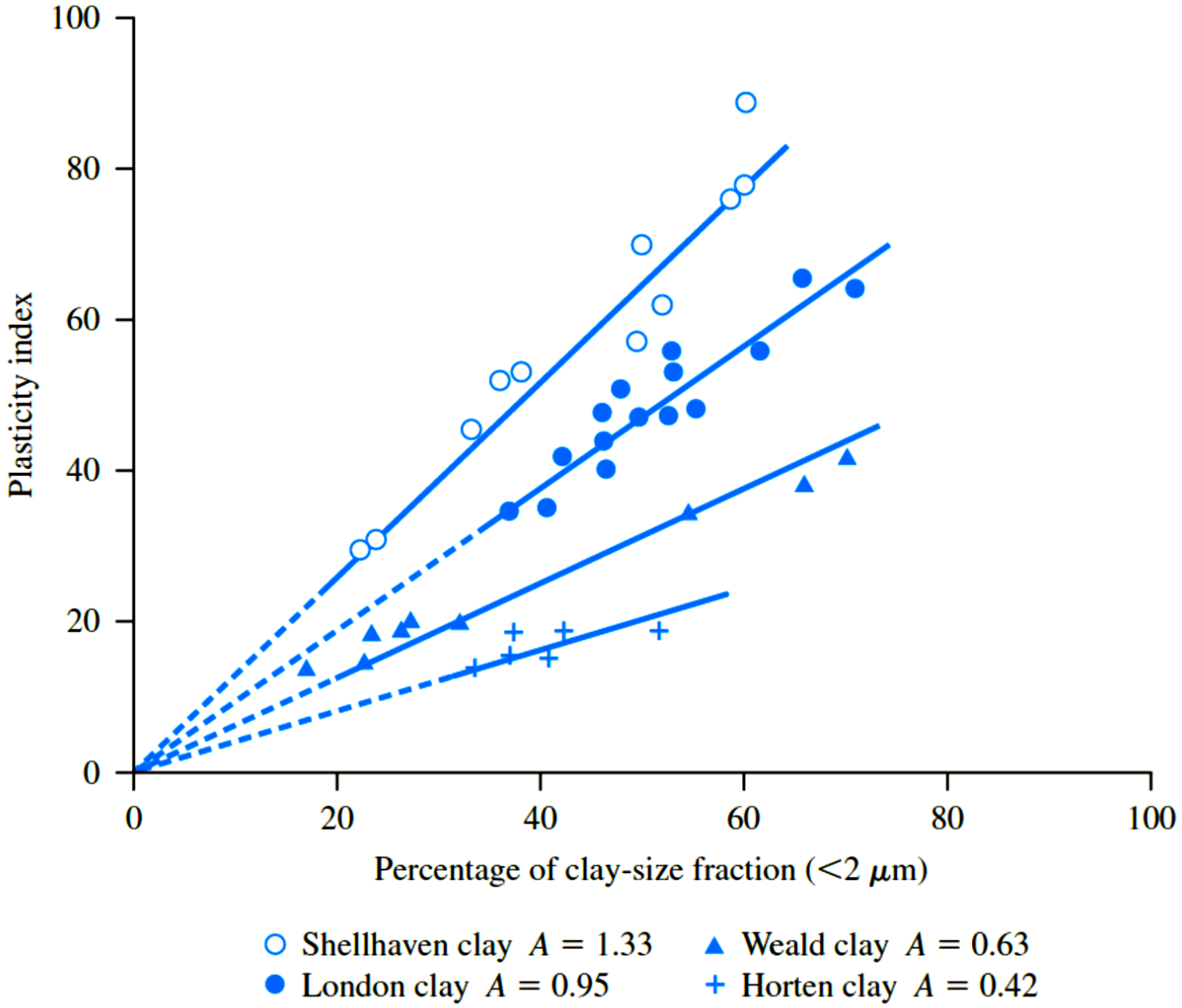
نشانهٔ مایع چنین خاکهایی می‌تواند نزدیک به‌صفر یا منفی گردد.

۲ـ۸ فعالیت[۲۱]

از آنجایی‌که خواص خمیری خاک به‌علت آب جذب سطحی است که ذرات رس را احاطه می‌کند، می‌توان انتظار داشت که نوع کانی رس و درصد آن در یک خاک، در روی حدهای مایع (روانی) و خمیری تأثیر بگذارد. اسکمتون[۲۲] (۱۹۵۳) مشاهده کرد که نشانهٔ خمیری یک خاک به‌طور کلی با درصد ذرات رسی[۲۳] (درصد وزنی کوچکتر از ۲ میکرون) افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۲ ـ ۱۶ این رابطه به‌طور ترسیمی نشان داده شده است. خطوط متوسط تمام خاکها از مرکز مختصات می‌گذرد. روابط بین نشانهٔ خمیری و درصد ذرات رسی برای خاکهای رسی مختلف، خطوط مختلفی به‌دست می‌دهد که ناشی از نوع کانی رس موجود در آن خاک می‌باشد. بر پایهٔ این نتایج، اسکمتون کمیتی به‌نام فعالیت تعریف نمود که همان شیب نمودار خطی PI در مقابل درصد ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون است. فعالیت را می‌توان طبق رابطهٔ زیر نشان داد:

$$A = \frac{PI}{(\%\text{of clay-size fraction, by weight})}$$

که در آن A، فعالیت خاک می‌باشد.

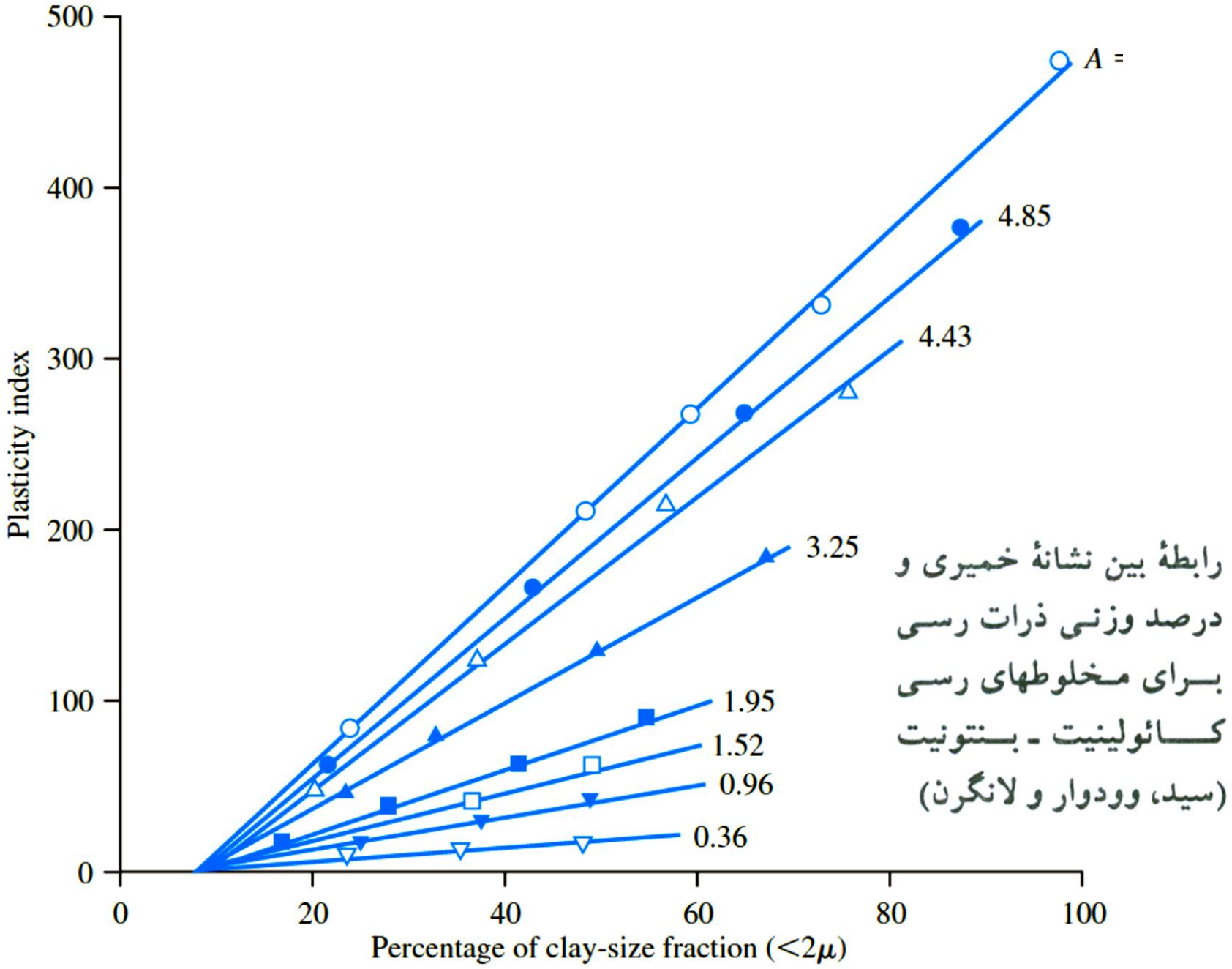


رابطهٔ بین نشانهٔ خمیری و درصد وزنی ذرات رسی

فعالیت به‌عنوان نشانه‌ای برای شناسایی پتانسیل تورم[۲۴] خاکهای رسی است. در جدول ۲ ـ ۶، مقادیر فعالیت برای انواع کانیهای رسی ارائه شده‌است. سید، وودوارد، و لانگرن[۲۵] (۱۹۶۴)، خواص خمیری نمونه‌های ساختگی متعددی را که مخلوطی از ماسه و رس بودند، مورد مطالعه قرار دادند. آنها چنین نتیجه‌گیری کردند که مطابق نظر اسکمتون رابطهٔ بین نشانهٔ خمیری و درصد ذرات رسی خطی است، لیکن منحنی خطی آنها همواره از مرکز مختصات عبور نمی‌کند. این مسئله در اشکال ۲ ـ ۱۷ و ۲ ـ ۱۸ نشان داده شده است. در نتیجه فعالیت را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود:

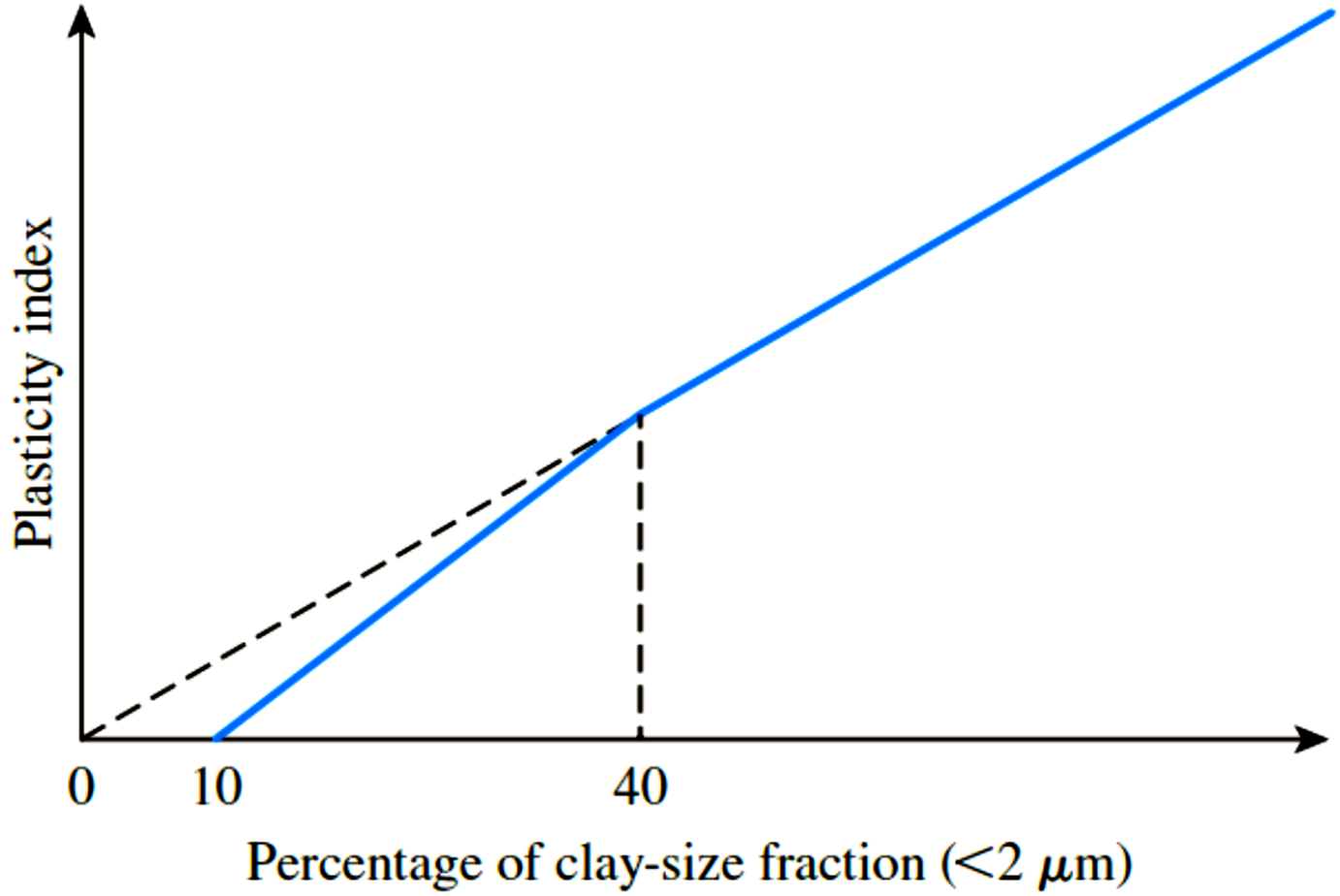
$$A = \frac{PI}{\%\text{of clay-size fraction} - C'}$$

که در آن C' ثابتی برحسب نوع خاک است.


Plasticity index
Percentage of clay-size fraction (<2μ)
A =
4.85
4.43
3.25
1.95
1.52
0.96
0.36
رابطهٔ بین نشانهٔ خمیری و
درصد وزنی ذرات رسی
برای مخلوطهای رسی
کائولینیت ـ بنتونیت
(سید، وودوار و لانگرن)

۲ـ۹ نمودار خمیری[۲۶]

تعیین حدود مایع و خمیری، آزمایشهای نسبتاً سادهٔ آزمایشگاهی می‌باشند که اطلاعاتی در مورد طبیعت خاکهای چسبنده به‌دست می‌دهند که به‌طور وسیعی توسط مهندسان برای شناسایی خاک و ارتباط دادن پارامترهای فیزیکی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. گازاگرانده (۱۹۳۲) رابطهٔ بین نشانهٔ خمیری و حد مایع را برای حالات متنوعی از خاکهای طبیعی مورد مطالعه قرار داد. بر پایهٔ نتایج آزمایشگاهی، نامبرده نمودار خمیری را مطابق شکل ۲ ـ ۲۰ پیشنهاد کرد. وجه مشخص این نمودار، خط تجربی A می‌باشد که رابطهٔ آن را می‌توان به‌صورت $PI=0.73(LL-20)$ نشان داد. خط A رس غیرآلی را از لای غیرآلی جدا می‌کند. نقاط نشانهٔ خمیری در مقابل حد مایع برای رسهای غیرآلی در بالای خط A و برای لای‌های غیرآلی در پایین خط A قرار می‌گیرند. نقاط لای آلی در همان ناحیهٔ مربوط به‌لای‌های غیرآلی با قابلیت فشردگی متوسط قرار می‌گیرند (زیر خط A با حد مایع بین ۳۰ تا ۵۰). رسهای آلی در ناحیهٔ مربوط به‌لای غیرآلی با قابلیت فشردگی بالا قرار می‌گیرند (زیر خط A در حد مایع بزرگتر از ۵۰). اطلاعات فراهم‌آمده در نمودار خمیری بسیار باارزش است و پایه‌ای برای طبقه‌بندی خاکهای ریزدانه در سیستم طبقه‌بندی متحد خاک[۲۷] می‌باشد (فصل ۳).



رابطهٔ ساده‌شده بین نشانهٔ خمیری و درصد وزنی ذرات رسی (سید، وودوار و لانگرن)

در بالای خط A، خطی وجود دارد که به‌آن خط U می‌گویند. خط U به‌طور تقریبی حد بالای نقاط نشانهٔ خمیری در مقابل حد مایع هر نوع خاکی می‌باشد که تا به‌حال شناخته شده است. رابطهٔ خط U را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

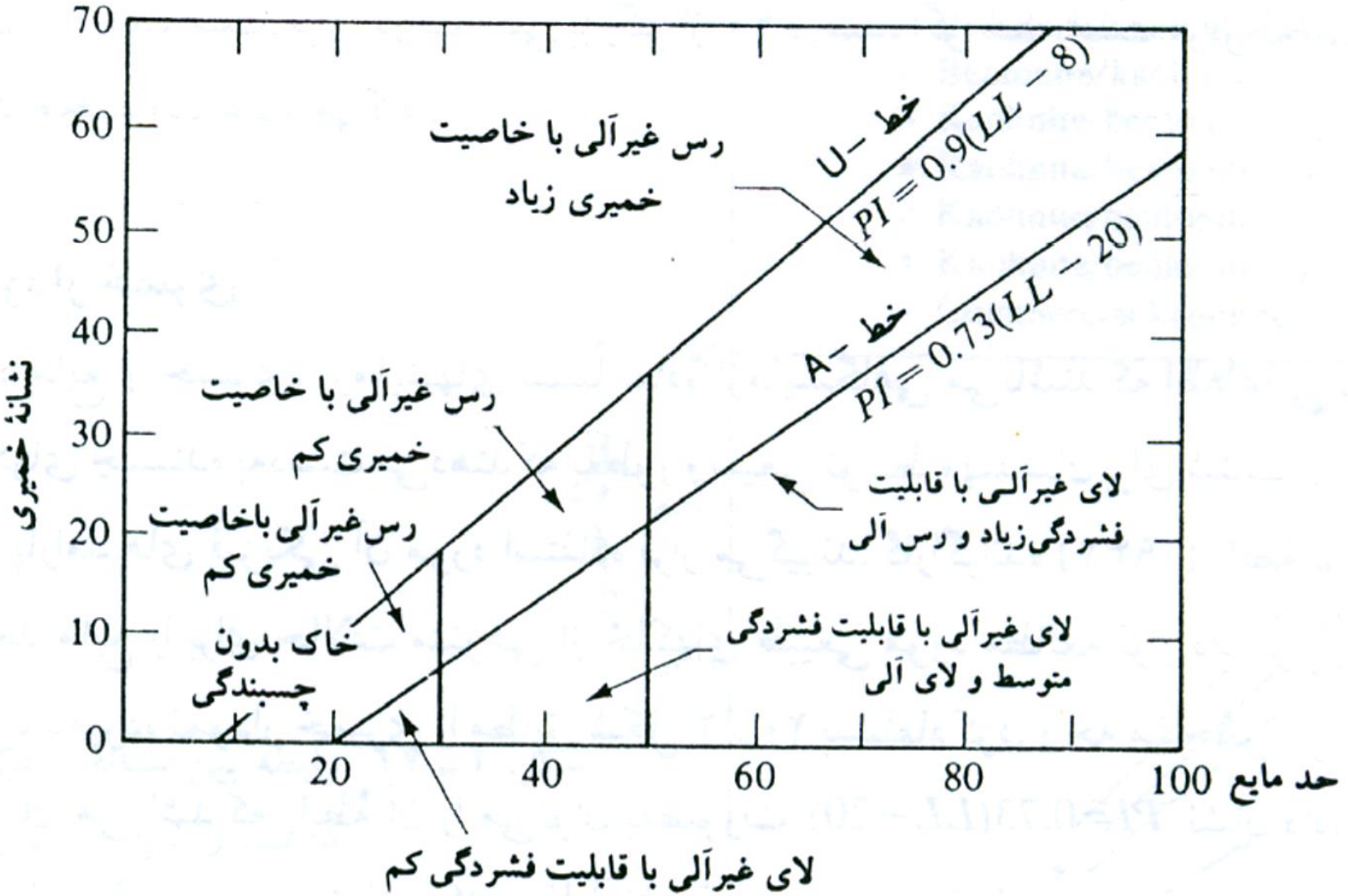
$$PI = 0.9(LL - 8)$$

استفادهٔ دیگری از خطوط A و U وجود دارد. گازاگرانده پیشنهاد کرده است که حد انقباض را می‌توان از نشانهٔ خمیری و حد مایع به‌دست آورد. با توجه به‌شکل ۲ ـ ۲۱، این کار را می‌توان به‌صورت زیر انجام داد:

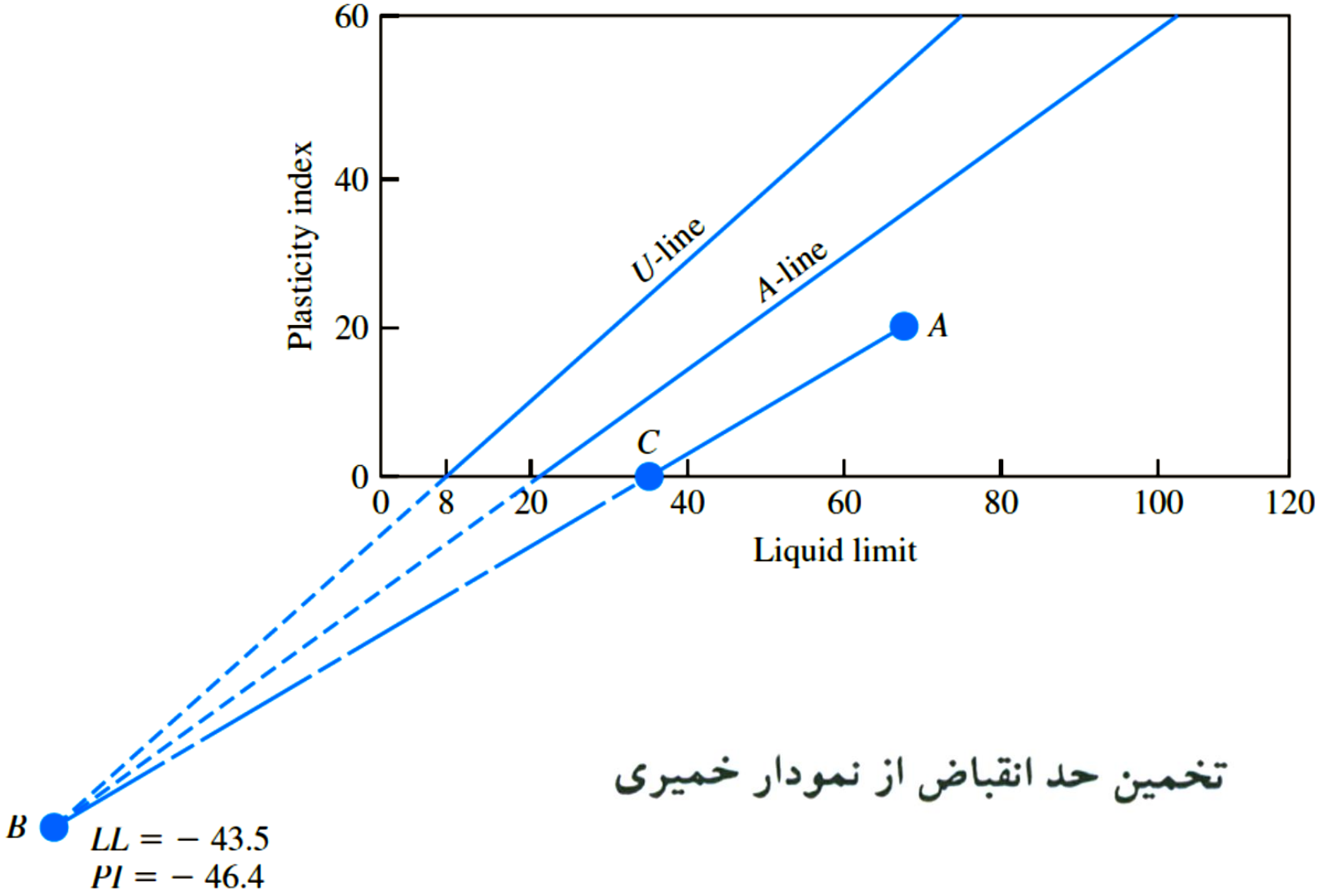
الف: نقطه‌ای با مختصات نشانهٔ خمیری و حد مایع برای خاک مورد نظر همانند نقطهٔ A در شکل ۲ ـ ۲۱ مشخص کنید.

ب: خطوط A و U را امتداد دهید تا یکدیگر را در نقطهٔ B قطع کنند. نقطهٔ B دارای مختصات $LL=-43.5$ و $PI=46.4$ خواهد بود.

پ: نقاط A و B را با یک خط مستقیم به‌هم وصل کنید. این خط محور مربوط به‌حد مایع را در نقطهٔ C قطع می‌کند. طول نقطهٔ C همان حد انقباض خواهد بود.



نمودار خمیری



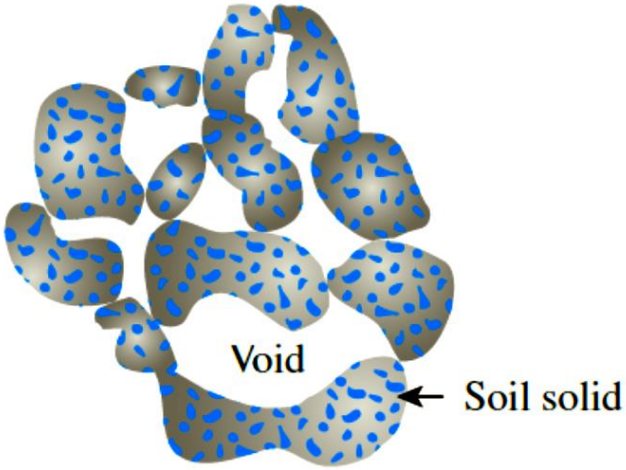
تخمین حد انقباض از نمودار خمیری

ساختار خاک soil structure

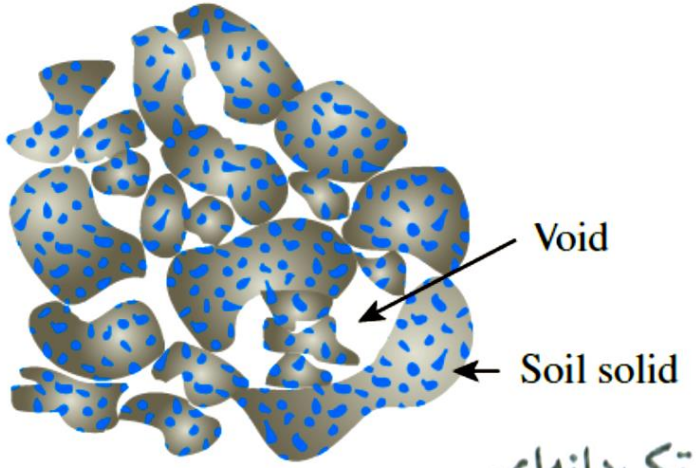
ساختار خاک عبارت است از نظم هندسی قرارگیری ذرات آن نسبت به‌یکدیگر. عواملی که ساختار خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند، عبارتند از: شکل، اندازه، ترکیب کانیهای[۲۹] ذرات خاک و طبیعت و ترکیب آب ـ خاک. از نقطه‌نظر بحث کلی، خاکها به‌دو گروه غیرچسبنده[۳۰] و چسبنده[۳۱] تقسیم می‌شوند.

ساختار خاکهای غیرچسبنده

دو نوع ساختار مهم در خاکهای غیرچسبنده وجود دارد: الف ـ ساختار تک‌دانه‌ای[۳۲] و ب ـ ساختار لانه‌زنبوری[۳۳]. در ساختار تک‌دانه‌ای، در تودهٔ ذرات در حال تعادل، هر ذرهٔ خاک در تماس با ذرات احاطه‌کنندهٔ خود می‌باشد. شکل و دانه‌بندی ذرات خاک و وضعیت نسبی آنها، در تراکم و در نتیجه در تخلخل خاک مؤثر می‌باشند (شکل ۲ ـ ۲۲). برای داشتن ایده‌ای از تغییرات نسبت تخلخل به‌علت وضعیت نسبی ذرات خاک، نحوهٔ قرارگیری گوی‌های هم‌اندازهٔ مطابق شکل ۲ ـ ۲۳ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شل‌ترین (سست‌ترین) وضعیت قرارگیری دانه‌ها، نسبت تخلخل مساوی ۰/۹۱ است. در حالی‌که اگر همان گوی‌ها در متراکم‌ترین وضعیت در کنار یکدیگر قرار گیرند، نسبت تخلخل به ۰/۳۵ کاهش پیدا می‌کند. خاکهای حقیقی از این نقطه‌نظر که ذرات آنها نه کروی و نه هم‌اندازه هستند، با مدل مورد مطالعه تفاوت دارند. در خاکهایی حقیقی، ذرات ریزتر در حفرات موجود بین ذرات بزرگتر جا گرفته و در مقایسه با مدل گوی‌های هم‌اندازه، باعث کاهش نسبت تخلخل می‌شوند. لیکن نامنظمی در شکل ذرات معمولاً تمایل به‌نمایش افزایشی در نسبت تخلخل دارد. به‌عنوان نتیجه‌ای از دو عامل فوق، دامنهٔ تغییرات نسبت تخلخل در خاکهای واقعی، تقریباً در همان محدودهٔ به‌دست آمده برای گوی‌های هم‌اندازه قرار دارد.



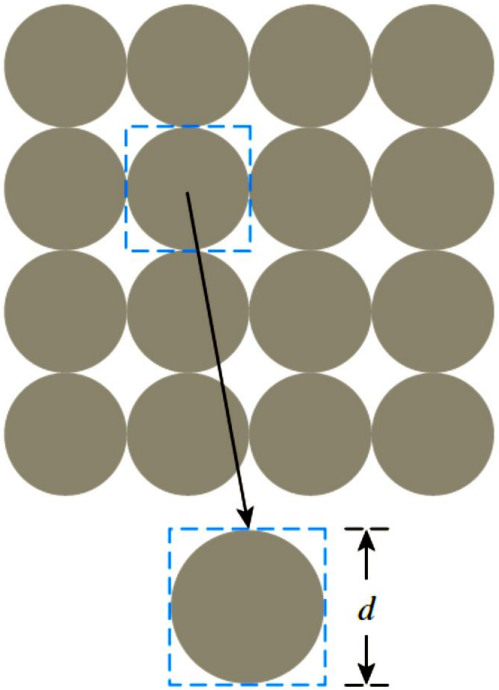
(a)



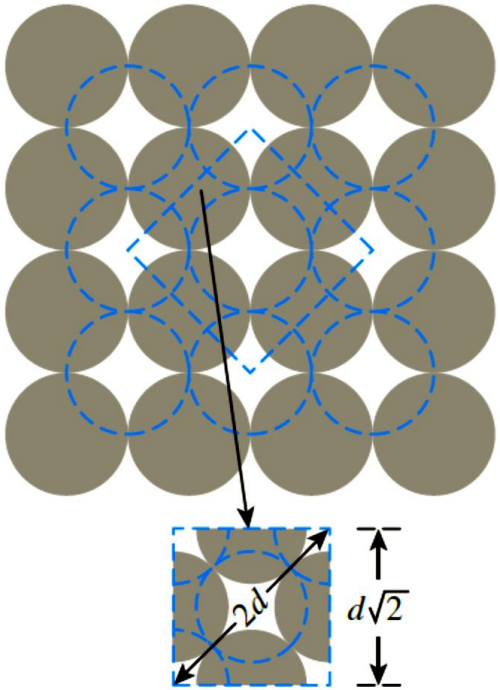
(b)

ساختار تک‌دانه‌ای

تأثیر نحوهٔ قرارگیری گوی‌های مساوی در روی نسبت تخلخل



حالت خیلی شل (e=0.91)



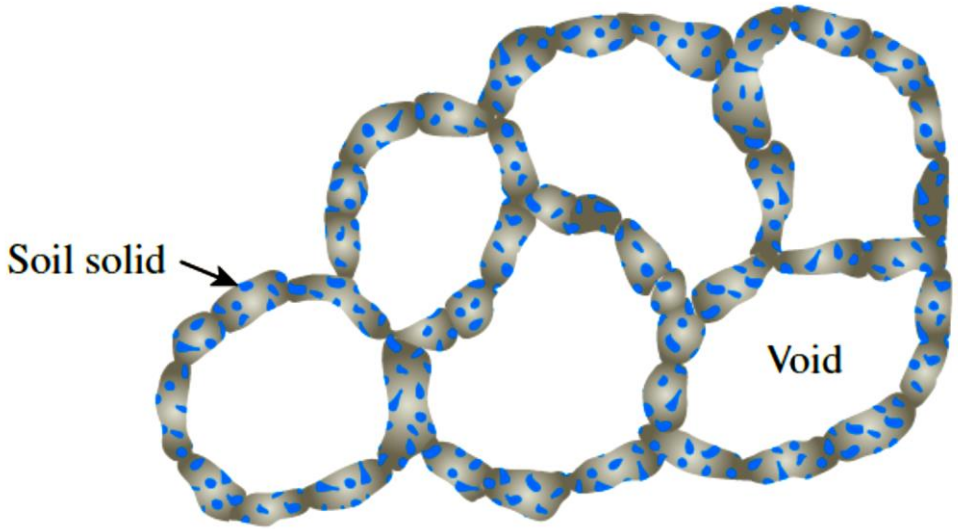
حالت خیلی متراکم (e=0.35)

$$V = d^3$$

$$V_s = \pi d^3/6$$

$$e = \frac{d^3 - \left(\frac{\pi d^3}{6}\right)}{\left(\frac{\pi d^3}{6}\right)} = 0.91$$

در ساختار لانه‌زنبوری (شکل ۲ ـ ۲۴)، ذرات ماسه و لای نسبتاً ریزدانه با تشکیل زنجیره‌ای از ذرات، تشکیل قوسهای کوچکی می‌دهند. خاکهایی که ساختار انها لانه‌زنبوری است، دارای نسبت تخلخل نسبتاً بزرگ هستند و تحت بارهای استاتیک معمولی می‌توانند ساختار خود را حفظ کنند. لیکن تحت بارهای استاتیک سنگین و یا بارهای دینامیکی، ساختار آنها شکسته شده و به‌علت کاهش زیاد تخلخل، نشست قابل توجهی در خاک به‌وجود می‌آید.



ساختار لانه‌زنبوری

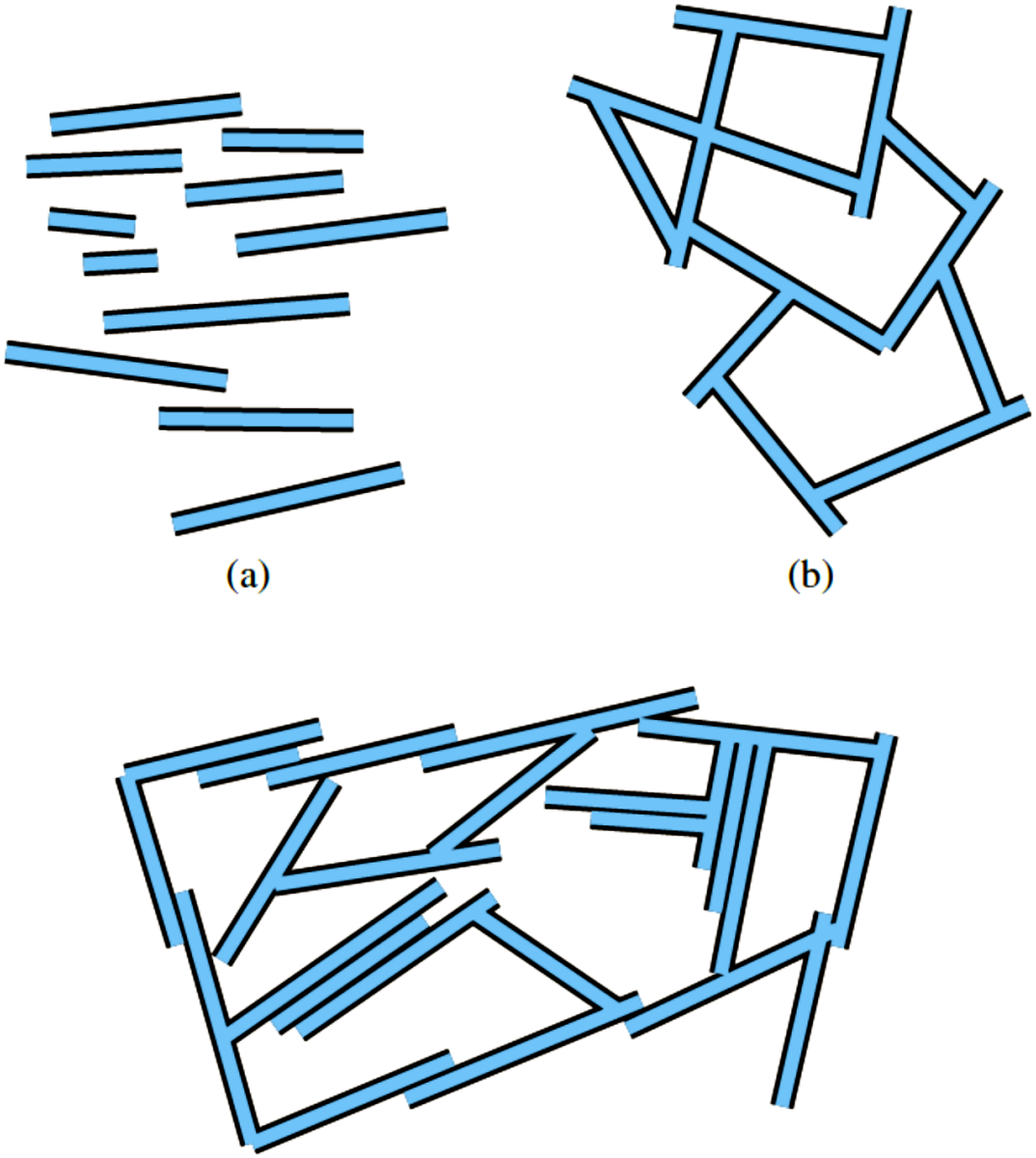
ساختار خاکهای چسبنده

برای فهم ساختار پایه در خاکهای چسبنده، باید نوع نیروهای متقابل بین ذرات رسی معلق در آب را بدانیم. در فصل گذشته، بار منفی موجود در سطح ذرات کانیهای رسی و لایهٔ مضاعف احاطه‌کنندهٔ هر ذره مورد بررسی قرار گرفت. وقتی که دو ذرهٔ رس در حالت معلق به‌یکدیگر نزدیک می‌شوند، به‌علت تمایل به‌رسوخ در لایهٔ مضاعف، یک نیروی دافعه[۳۴] بین دو ذره به‌وجود می‌آید. در همان زمان یک نیروی جاذبه به‌علت نیروهای واندروالس بین ذرات رسی وجود دارد که مستقل از مشخصه‌های آب می‌باشد. هر دو نیروی دافعه و جاذبه با کاهش فاصله بین ذرات، با نرخهای متفاوتی افزایش می‌یابند. وقتی که فاصلهٔ بین ذرات خیلی کوچک است، نیروی جاذبه بزرگتر از نیروی دافعه است. این نیروها توسط تئوری کلوئیدی قابل پیش‌بینی هستند.

تمرکز بارهای مثبت در لبه‌های ذرات رس در فصل ۱ مورد بحث قرار گرفت. اگر ذرات رس خیلی به‌یکدیگر نزدیک باشند، لبه‌های دارای بار مثبت می‌توانند توسط سطوح دارای بار منفی جذب شوند.

حال رفتار رس در حالت تعلیق رقیق مورد توجه قرار می‌گیرد. وقتی که ذرات در ابتدا در آب پراکنده می‌شوند، یکدیگر را دفع می‌کنند. این بدان‌علت است که در فواصل میان ذره‌ای بزرگ، نیروی دافعه از نیروی جاذبهٔ واندروالس بزرگتر است. نیروی گرانشی بین ذرات قابل صرفنظر کردن است. بنابراین ذرات جدا از هم به‌طور خیلی آهسته ته‌نشین می‌شوند و یا به‌حالت معلق باقی مانده و یک حرکت زیگ زاگ اتفاقی که از مشخصات ذرات کلوئیدی است، از خود نشان می‌دهند (حرکت براون[۳۵])، مواد ته‌نشین‌شده دارای یک‌ساختار پراکنده‌ای هستند و مطابق شکل ۲-۲۵-الف، کم و بیش به‌حالت موازی در روی یکدیگر قرار می‌گیرند.

اگر ذرات رس که در ابتدا در آب پراکنده می‌شوند، به‌علت حرکات زیگ‌زاگ به‌یکدیگر نزدیک شوند، به‌وسیلهٔ اتصالات لبه به‌سطح، تبدیل به‌لخته‌های قابل رؤیت می‌شوند. در این حالت ذرات به‌علت نیروهای جاذبهٔ الکتریکی بین لبه‌های دارای بار مثبت و سطوح دارای منفی در کنار یکدیگر نگه‌داشته می‌شوند. به‌این حالت لخته شدن (فولوکولاسیون[۳۶]) می‌گویند. وقتی که لخته‌ها بزرگ می‌شوند، به‌علت نیروی جاذبه ته‌نشین می‌گردند. رسوبی که از این راه حاصل می‌شود دارای ساختار لخته‌ای (فولوکوله) خواهد بود (شکل ۲-۲۵-ب).



ساختار خاکهای رسی. (الف) ساختار پراکنده، (ب) ساختار لخته‌ای (فولوکوله)، (پ) ساختار لخته‌ای (فولوکوله) متراکمتر در کنار یون نمکها

وقتی که به‌تعلیق آب و رس پراکنده، نمک اضافه شود، یونها باعث سست کردن لایهٔ مضاعف اطراف ذره می‌شوند. این مسئله از نیروی دافعهٔ بین ذره‌ای می‌کاهد. در نتیجه ذرات رس به‌یکدیگر جذب شده و پس از تشکیل لخته، رسوب می‌نمایند. در شکل ۲ ـ ۲۵ ـ پ ساختار لخته‌هایی که بدین‌ترتیب تشکیل می‌شوند، نشان داده شده است. در این حالت به‌علت نیروی جاذبهٔ واندروالس ذرات یک حالت توازی با یکدیگر پیدا کرده‌اند.

رس‌هایی که دارای ساختار لخته‌ای (فولوکوله) هستند، سبک بوده و دارای نسبت تخلخل بزرگی هستند. رسوبات رسی تشکیل شده در کف دریاها دارای ساختار لخته‌ای (فولوکوله) هستند. اغلب رسوبات تشکیل‌شده در آب تازه، دارای ساختار میانه‌ای بین ساختار پراکنده و ساختار لخته‌ای می‌باشند. رسوبات رسی خالص در طبیعت نادرند. وقتی که در یک خاک، مقدار ذرات با اندازهٔ مساوی و یا کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر، بزرگتر از ۵۰ درصد باشد، معمولاً به‌آن رس می‌گویند.