

خاک از دیدگاه علوم مهندسی، مخلوطی غیر یک‌پارچه از دانه‌های کانی‌ها و مواد آلی فاسد شده‌ای است که بین آن‌ها فضای خالی وجود دارد و این فضا، توسط آب و هوا پر شده است. شالوده اکثر سازه‌های ساختمانی بر روی خاک متکی می‌باشد.

برای نخستین بار، مطالعه طبیعت و خواص مهندسی خاک در آغاز قرن بیستم، توسط شخصی به نام ترزاقی در سال ۱۹۲۵ با انتشار کتاب Erdbaumechanik شروع شده است. انتشار این کتاب، موجب تولد مکانیک خاک مدرن گردید و از این‌رو، در برخی کتاب‌ها از وی به عنوان پدر مکانیک خاک یاد می‌کنند.

دانه‌های خاک

در یک دامنه گسترده، اندازه دانه‌های تشکیل دهنده‌ی خاک، متغیر است. براساس اندازه دانه‌ها، معمولاً خاک را شن، ماسه، لای و رس می‌نامند. سازمان‌های مختلف، مرزهای جدا کننده اندازه‌ی دانه‌های خاک را برای تشریح خاک‌ها پیشنهاد کرده‌اند. مرز پیشنهادی چند سازمان گوناگون در پیرامون جدا کننده‌ی اندازه دانه‌ها در جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول ۱-۱. مقدار K در (ابطه $ASTM-1982$)

نام سازمان	اندازه‌ی دانه‌ها (mm)			
	شن	ماسه	لای	رس
انستیتو تکنولوژی ماساچوست (MIT)	> ۲	۲ تا ۰٫۰۶	۰٫۰۶ تا ۰٫۰۰۲	< ۰٫۰۰۲
سازمان کشاورزی آمریکا (USDA)	> ۲	۲ تا ۰٫۰۵	۰٫۰۵ تا ۰٫۰۰۲	< ۰٫۰۰۲
انجمن ادارات راه و ترابری آمریکا (AASHTO)	۲ تا ۷۶٫۲	۲ تا ۰٫۰۷۵	۰٫۰۷۵ تا ۰٫۰۰۲	< ۰٫۰۰۲
سیستم طبقه‌بندی متحد	۴٫۷۵ تا ۷۶٫۲	۰٫۰۷۵ تا ۴٫۷۵	ریزدانه‌ها (رس و لای) < ۰٫۰۷۵	

دانه‌بندی خاک

مشخص کردن دامنه‌ی اندازه ذرات موجود در خاک و توزیع وزنی دانه‌ها، براساس درصدی از وزن کل خشک خاک، دانه‌بندی خاک گفته می‌شود. معمولاً، برای مشخص نمودن منحنی دانه‌بندی مورد استفاده، از دو روش استفاده می‌شود:

۱- آزمایش دانه‌بندی برای ذراتی با قطر بزرگ‌تر از ۰٫۰۷۵mm؛

۲- آزمایش هیدرومتری برای ذراتی با قطر کوچکتر از ۰.۰۷۵mm؛

۱- آزمایش دانه بندی

این آزمایش، عبارت است از لرزندان نمونه خاک بر روی الک‌هایی که اندازه‌های آن‌ها به ترتیب از بالا به پایین کاهش می‌یابند. در جدول (۱-۲)، شماره الک‌ها و اندازه روزنه آن‌ها آورده شده است.

جدول ۱-۲. اندازه الک‌های استاندارد آمریکایی

شماره الک	اندازه روزنه (mm)
۴	۴۷۵۰
۶	۳۳۵۰
۸	۲۳۶۰
۱۰	۲۰۰۰
۱۶	۱۱۸۰
۲۰	۰۸۵۰
۳۰	۰۶۰۰
۴۰	۰۴۲۵
۵۰	۰۳۰۰
۶۰	۰۲۵۰
۸۰	۰۱۸۰
۱۰۰	۰۱۵۰
۱۴۰	۰۱۰۶
۱۷۰	۰۰۸۸
۲۰۰	۰۰۷۵
۲۷۰	۰۰۵۳

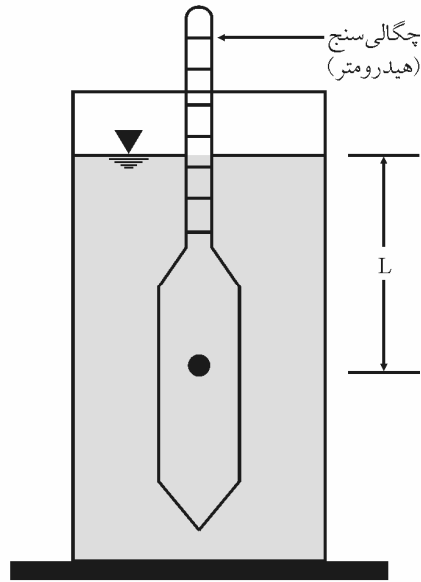
۲- آزمایش هیدرومتری

این آزمایش براساس اصول ته‌نشینی دانه‌های خاک در آب انجام می‌شود. این آزمایش، با فرض کروی بودن تمام دانه‌های خاک و بیان سرعت ته‌نشینی براساس قانون استوکس، صورت می‌گیرد. چون دانه‌های مختلف براساس وزن، اندازه و سرعت، ته‌نشین می‌شوند، لذا می‌توان قطر "D" کوچک‌ترین اندازه ذره‌ای که در حین اندازه‌گیری از نقطه اندازه‌گیری عبور می‌کند را به دست آورد.

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}}$$



چگالی‌سنج (هیدرومتر)
ASTM152H



شکل (۱-ا) تعریف طول مؤثر L در آزمایش
هیدرومتری

در رابطه فوق، K ثابت است که تابعی از درجه حرارت آزمایش و چگالی دانه‌های خاک می‌باشد؛ که مقادیر K ، در جدول (۱-۳) آورده شده است، L ، طول مؤثر برحسب سانتی‌متر و t ، زمان بعد از آغاز ته‌نشینی که برحسب دقیقه می‌باشد.

جدول ۱-۳. مدود جدا کننده اندازه دانه‌های خاک

درجه حرارت (C)	G_s							
	۲,۴۰	۲,۴۵	۲,۵۰	۲,۵۵	۲,۶۰	۲,۶۵	۲,۷۵	۲,۸۰
۱۶	۰,۱۵۱۰	۰,۱۵۰۵	۰,۱۴۸۱	۰,۱۴۵۷	۰,۱۴۳۵	۰,۱۴۱۴	۰,۱۳۹۴	۰,۱۳۷۴
۱۷	۰,۱۵۱۱	۰,۱۴۸۶	۰,۱۴۶۲	۰,۱۴۳۹	۰,۱۴۱۷	۰,۱۳۹۶	۰,۱۳۷۶	۰,۱۳۵۶
۱۸	۰,۱۴۹۲	۰,۱۴۶۷	۰,۱۴۴۳	۰,۱۴۲۱	۰,۱۳۹۹	۰,۱۳۷۸	۰,۱۳۵۹	۰,۱۳۳۹
۱۹	۰,۱۴۷۴	۰,۱۴۴۹	۰,۱۴۲۵	۰,۱۴۰۳	۰,۱۳۸۲	۰,۱۳۶۱	۰,۱۳۴۲	۰,۱۳۲۳
۲۰	۰,۱۴۵۶	۰,۱۴۳۱	۰,۱۴۰۸	۰,۱۳۸۶	۰,۱۳۶۵	۰,۱۳۴۴	۰,۱۳۲۵	۰,۱۳۰۷
۲۱	۰,۱۴۳۸	۰,۱۴۱۴	۰,۱۳۹۱	۰,۱۳۶۹	۰,۱۳۴۸	۰,۱۳۲۸	۰,۱۳۰۹	۰,۱۲۹۱
۲۲	۰,۱۴۲۱	۰,۱۳۹۷	۰,۱۳۷۴	۰,۱۳۵۳	۰,۱۳۳۲	۰,۱۳۱۲	۰,۱۲۹۴	۰,۱۲۷۶
۲۳	۰,۱۴۰۴	۰,۱۳۸۱	۰,۱۳۵۸	۰,۱۳۳۷	۰,۱۳۱۷	۰,۱۲۹۷	۰,۱۲۷۹	۰,۱۲۶۱
۲۴	۰,۱۳۸۸	۰,۱۳۶۵	۰,۱۳۴۲	۰,۱۳۲۱	۰,۱۳۰۱	۰,۱۲۸۲	۰,۱۲۶۴	۰,۱۲۴۶
۲۵	۰,۱۳۷۲	۰,۱۳۴۹	۰,۱۳۲۷	۰,۱۳۰۶	۰,۱۲۸۶	۰,۱۲۶۷	۰,۱۲۴۹	۰,۱۲۳۲
۲۶	۰,۱۳۵۷	۰,۱۳۳۴	۰,۱۳۱۲	۰,۱۲۹۱	۰,۱۲۷۲	۰,۱۲۵۳	۰,۱۲۳۵	۰,۱۲۱۸
۲۷	۰,۱۳۴۲	۰,۱۳۱۹	۰,۱۲۹۷	۰,۱۲۷۷	۰,۱۲۵۸	۰,۱۲۳۹	۰,۱۲۲۱	۰,۱۲۰۴
۲۸	۰,۱۳۲۷	۰,۱۳۰۴	۰,۱۲۸۳	۰,۱۲۶۴	۰,۱۲۴۴	۰,۱۲۲۵	۰,۱۲۰۸	۰,۱۱۹۱
۲۹	۰,۱۳۱۲	۰,۱۲۹۰	۰,۱۲۶۹	۰,۱۲۴۹	۰,۱۲۳۰	۰,۱۲۱۲	۰,۱۱۹۵	۰,۱۱۷۸
۳۰	۰,۱۲۹۸	۰,۱۲۷۶	۰,۱۲۵۶	۰,۱۲۳۶	۰,۱۲۱۷	۰,۱۱۹۹	۰,۱۱۸۲	۰,۱۱۶۹

اندازه مؤثر، ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی

برای مقایسه‌ی خاک‌های مختلف، می‌توان از منحنی دانه‌بندی استفاده نمود. سه پارامتر زیر در خصوص خاک قابل بررسی است:

۱- اندازه مؤثر: قطری که بر روی منحنی دانه‌بندی مربوط به درصد عبوری ۱۰ می‌باشد و با D_{10} نشان داده می‌شود.

۲- ضریب یکنواختی: این ضریب، با C_u نشان داده می‌شود و به صورت زیر قابل بیان است:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

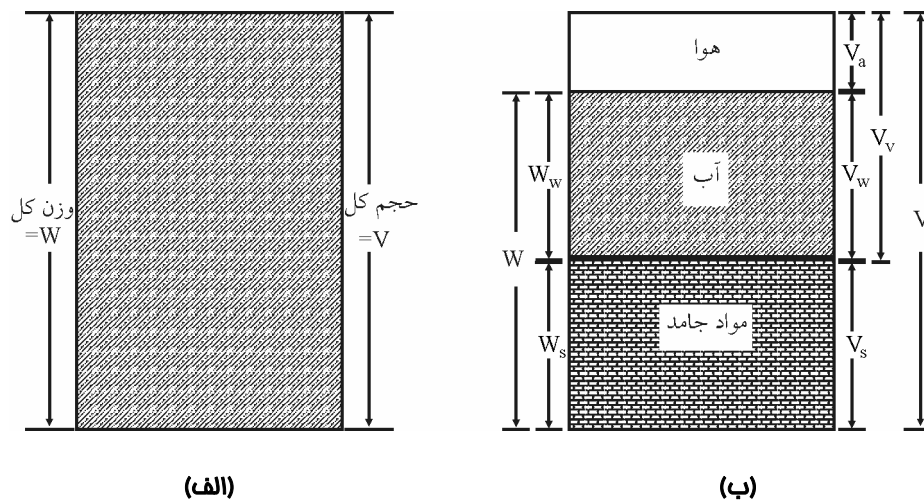
در رابطه فوق، D_{60} قطر مربوط به درصد عبوری ۶۰ درصد بر روی منحنی دانه‌بندی می‌باشد.

۳- ضریب دانه‌بندی: این ضریب، با C_c نشان داده می‌شود و به صورت زیر قابل بیان است:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

در رابطه یاد شده بالا، D_{30} قطر مربوط به درصد عبوری ۳۰ درصد بر روی منحنی دانه‌بندی می‌باشد.

در فصل اول، به آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری خاک پرداخته شد. در حالت طبیعی، خاک به صورت یک سیستم سه قسمتی مرکب بوده که از مواد جامد، آب و هوا تشکیل شده است. در شکل (۱-۲) اجزای خاک در حالت طبیعی و سه قسمت خاک نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. الف) اجزای خاک در وضعیت طبیعی، ب) سه قسمت خاک

در شکل فوق، یک توده‌ی خاک با حجم V و وزن W ، به همان حالت طبیعی آورده شده است. بنابراین،

در مورد حجم کل نمونه خاک داریم:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

در رابطه فوق V_s حجم قسمت جامد، V_v حجم حفرات، V_w حجم آب درون حفرات، V_a حجم هوای درون حفرات می‌باشد. در خصوص وزن کل نمونه با صرف‌نظر از وزن هوا، داریم:

$$W = W_s + W_w$$

در رابطه فوق W_s وزن قسمت جامد و W_w وزن آب است.

در مکانیک خاک، روابط حجمی شامل موارد زیر می‌باشد:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{نسبت تخلخل:}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \text{نسبت پوکی:}$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad \text{درجه‌ی اشباع:}$$

در این رابطه، درجه‌ی اشباع معمولاً برحسب درصد بیان شده، برای خاک کاملاً خشک صفر و برای خاک کاملاً اشباع که در آن آب تمامی حفرات آن را پر کرده است، برابر یک یا 100% می‌باشد. برای رابطه بین نسبت تخلخل و پوکی داریم:

$$e = \frac{n}{1-n} \Rightarrow n = \frac{e}{1+e}$$

در مکانیک خاک، روابط وزنی معمول شامل موارد زیر است:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \text{۱- میزان رطوبت:}$$

$$\text{۲- وزن مخصوص:}$$

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \text{۱- ۲- وزن مخصوص مرطوب خاک:}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V} \quad \text{۲- ۲- وزن مخصوص دانه‌های جامد:}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_s} \quad \text{۲- ۳- وزن مخصوص خشک خاک:}$$

در پیرامون رابطه بین وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت، داریم:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{(1+\omega)}$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_w + V_s} \quad \text{۲- ۴- وزن مخصوص اشباع:}$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad \text{۲- ۵- وزن مخصوص غوطه‌وری:}$$

حال، با استفاده از تعریف وزن مخصوص و وزن مخصوص خشک، داریم:

$$\gamma = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1+e}$$

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

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1+e}$$

در رابطه‌های مشروحه بالا، G_s چگالی دانه و برابر $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ است. بین رابطه حجمی و وزنی، رابطه زیر

$$\omega \times G_s = e \times S \Rightarrow e = \frac{\omega \times G_s}{S}$$

برقرار می‌باشد:

خلاصه‌ای از این روابط در جدول (۴-۱) آورده شده است:

جدول ۴-۱. اشکال مختلفی از روابط γ ، γ_d و γ_{sat}

شماره رابطه	رابطه
(۱۵-۲)	$\gamma = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1+e}$
(۲۶-۲)	$\gamma = \frac{(G_s + Se)\gamma_w}{1+e}$
(۲۷-۲)	$\gamma = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1 + \frac{\omega G_s}{S}}$
(۲۸-۲)	$\gamma = G_s \gamma_w (1-n)(1+\omega)$
وزن مخصوص خشک	
(۱۲-۲)	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$
(۱۶-۲)	$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}$
(۲۲-۲)	$\gamma_d = G_s \gamma_w (1-n)$
(۲۹-۲)	$\gamma_d = \frac{G_s}{1 + \frac{\omega G_s}{S}} \gamma_w$
(۳۰-۲)	$\gamma_d = \frac{eS\gamma_w}{(1+e)\omega}$
(۳۱-۲)	$\gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$
(۳۲-۲)	$\gamma_d = \gamma_{sat} - \left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$
وزن مخصوص اشباع	
(۱۸-۲)	$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e}$
(۲۴-۲)	$\gamma_{sat} = [(1-n)G_s + n]\gamma_w$
(۳۳-۲)	$\gamma_{sat} = \left(\frac{1+\omega}{1+\omega G_s}\right)G_s \gamma_w$

$\gamma_{sat} = \left(\frac{e}{\omega}\right)\left(\frac{1+\omega}{1+e}\right)\gamma_w$	(۳۴-۲)
$\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$	(۳۵-۲)
$\gamma_{sat} = \gamma_d + \left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$	(۳۶-۲)

تراکم نسبی

معمولاً، برای نشان دادن میزان و یا سستی خاک‌های دانه‌ای در محل، از تراکم نسبی استفاده می‌شود که به صورت زیر می‌باشد:

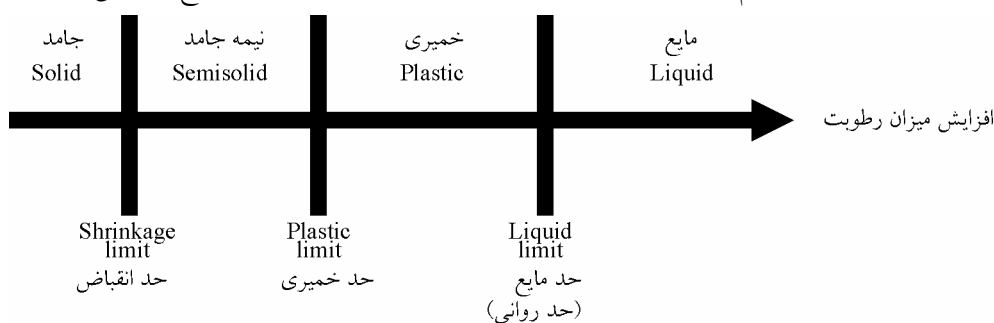
$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

در رابطه فوق e_{min} و e_{max} به ترتیب نسبت تخلخل خاک در شل‌ترین و متراکم‌ترین وضعیت خاک می‌باشد. محدوده D_r ، برای خاک‌های خیلی شل از صفر تا حداکثر و برای خاک‌های خیلی متراکم برابر یک است. با استفاده از تعریف وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر در خصوص تراکم نسبی، داریم:

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

سفتی خاک: (حدا تربرگ)

این روش، برای توصیف سفتی خاک‌های ریزدانه براساس میزان رطوبت می‌باشد. در صورت مقدار پایین رطوبت در خاک به صورت یک جسم جامد و در صورت مقدار بالای رطوبت، به صورت یک مایع رفتار می‌کند.



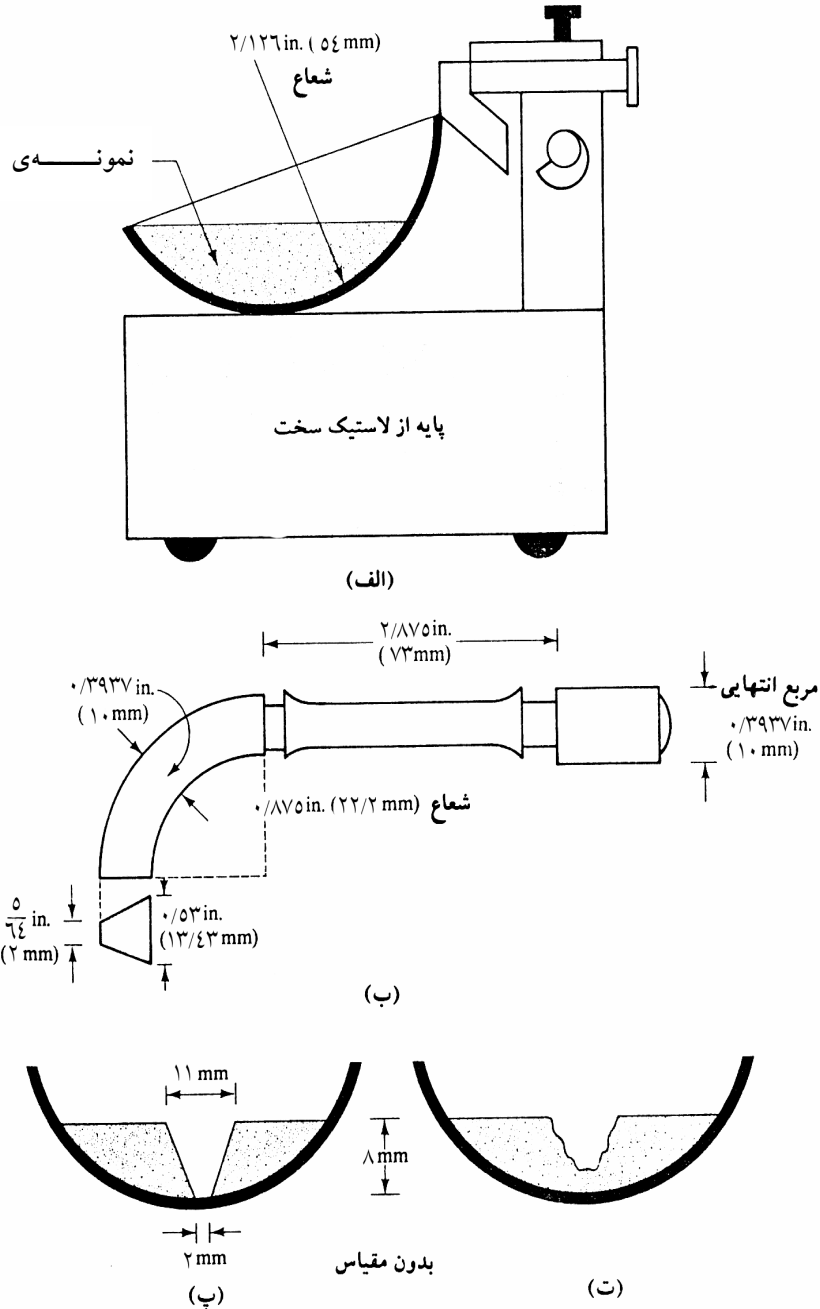
شکل ۱-۳- محدوده اتر برگ

آزمایش‌های مختلف خاک

۱- آزمایش حد مایع

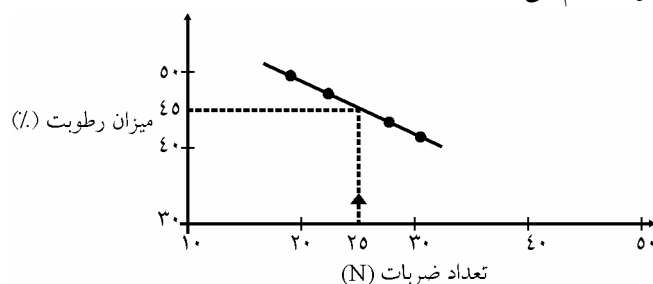
در شکل (۱-۴)، وسیله اندازه‌گیری حد مایع آورده شده است. این وسیله، دارای یک فنجان برنجی و یک پایه از جنس لاستیک می‌باشد. برای انجام این آزمایش، ابتدا مقداری خاک روی فنجان ریخته و با استفاده از شیپارزن استاندارد، شیاری در وسط نمونه خمیری خاک ایجاد می‌کنیم. حال، با پیچاندن دسته دستگاه،

فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰ میلی متری روی پایه می افتد. میزان رطوبتی که به ازای آن به علت ۲۵ ضربه فنجان، موجب بسته شدن شیار می شود، حد مایع یا روانی به دست می آید.



شکل ۱-۴- آزمایش مد مایع (الف) وسیله تعیین مد مایع، (ب) شیار زن، (پ) شیار خاک قبل از آزمایش، (ت) شیار خاک بعد از آزمایش

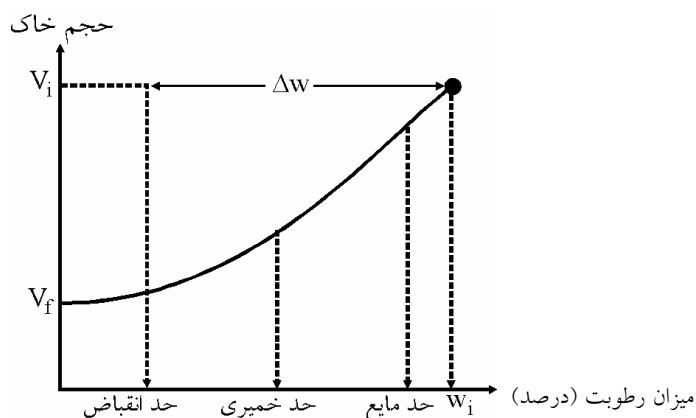
برای رسم منحنی جریان، با ثبت تعداد و ضربات لازم برای بسته شدن شیار و اندازه‌گیری رطوبت نمونه خاک، مختصات یک نقطه از منحنی جریان به دست می‌آید. در این منحنی، محور افقی تعداد ضربات به صورت لگاریتمی و محور عمودی میزان رطوبت برحسب درصد می‌باشد. معمولاً این آزمایش را در مورد یک خاک برای ۴ نمونه انجام می‌دهند.



۲- آزمایش حد انقباض

با کاهش رطوبت خاک، خاک منقبض می‌شود. این مسئله در واقع موجب کاهش حجم خاک می‌گردد. با ادامه این کار یعنی کاهش رطوبت، مقدار حجم ثابت بوده و برابر V_f می‌شود. بدین ترتیب، میزان رطوبت در این شرایط را حد انقباض می‌گویند و به صورت زیر می‌باشد:

$$S.L = \omega_i(\%) - \Delta\omega(\%)$$



حال در خصوص حد انقباضی، داریم:

$$S.L = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) \times 100 - \left(\frac{(V_i - V_f) \rho_w}{m_2} \right) \times 100$$

در رابطه فوق، m_1 جرم خاک مرطوب در شروع آزمایش، m_2 جرم خاک خشک، V_i حجم اولیه خاک مرطوب، V_f حجم خاک خشک در کوره و ρ_w جرم مخصوص آب است.

۳- آزمایش حد خمیری

میزان رطوبتی که به ازای آن در صورتی که فتیله‌ای به قطر ۳/۲ میلی‌متر به روش غلتاندن از خمیر خاک نمونه ساخته و آن خرد گردد، حد خمیری گفته می‌شود و با PL نشان می‌دهند. به عبارتی، حد خمیری حداقل میزان رطوبت مربوط به حالت خمیری خاک است.

نشانه خمیری

اختلاف بین حد مایع و حد خمیری خاک را نشانه‌ی خمیری می‌گویند.

$$PI = LL - PL$$

نشانه مایع

در یک خاک چسبنده در شرایط طبیعی، برای بیان سفتی نسبی از نشانه‌ی مایع (LI) استفاده می‌شود. نشانه مایع، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

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

در رابطه فوق، ω میزان رطوبت در جای خاک می‌باشد.

در جای نهشته خاکی تحکیم نیافته، میزان رطوبت می‌تواند بزرگ‌تر از حد مایع باشد.

$$LI > 1$$

در جای نهشته خاکی تحکیم یافته، میزان رطوبت می‌تواند کوچک‌تر از حد خمیری باشد.

$$LI < 1$$

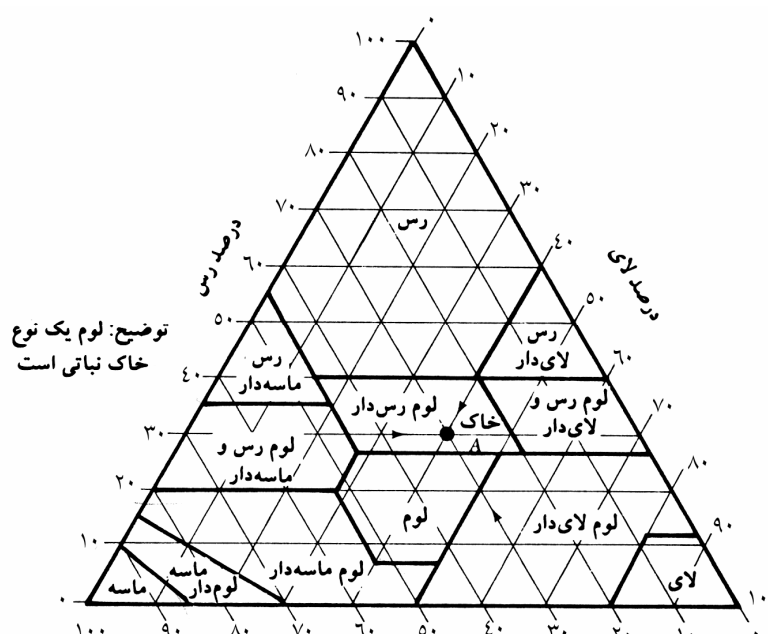
سیستم طبقه‌بندی خاک، شامل مرتب کردن خاک‌های گوناگون براساس کاربردشان به گروه‌ها و زیر گروه‌ها می‌باشد.

طبقه‌بندی بافت

منظور از بافت خاک از نقطه نظر عمومی، به ظاهر سطحی آن نسبت داده می‌شود. در طبقه‌بندی بافت خاک، ابتدا نام گروه اصلی و سپس نام گروه فرعی به صورت صفت بیان می‌شود. مانند: رس لای‌دار یا رس ماسه‌دار و... در این قسمت برخی از سیستم‌های طبقه‌بندی را معرفی می‌نماییم.

۱- سیستم طبقه‌بندی اداره کشاورزی ایالات متحده (USDA)

این سیستم طبقه‌بندی، در شکل (۵-۱) آورده شده است. اساس این نمودار برپایه قسمت عبوری از الک شماره ۱۰ یعنی قطر ۲mm می‌باشد، بنابراین در صورت بزرگ‌تر از ۲mm بودن ذرات خاک، می‌بایست اصلاحاتی انجام گیرد. این اصلاحات، در درصدهای ماسه، لای و رس با در نظر گرفتن مقدار صفر درصد شن، صورت می‌گیرد. پس از اصلاحات، صفت شن‌دار در طبقه‌بندی خاک به انتهای نام افزوده می‌گردد. در حالت عادی، با رسم خطوط بر روی نمودار (۵-۱) و محل تلاقی نوع بافت، خاک مشخص می‌شود.



شکل ۱-۵- طبقه‌بندی بافت خاک براساس طبقه‌بندی اداره کشاورزی ایالات متحده (USDA)

برای مشخص شدن اصلاحات، به مثال زیر توجه نمایید:

مثال) یک خاک دارای دانه‌بندی ۱۰ درصد شن، ۲۰ درصد ماسه، ۳۰ درصد لای، ۴۰ درصد رس می‌باشد. نوع طبقه‌بندی خاک را معلوم کنید.

✓ حل:

$$\frac{20 \times 100}{(100 - 10)} = 22,2\%$$

ذرات ماسه:

$$\frac{30 \times 10}{(100 - 10)} = 33,3\%$$

ذرات لای: