به نام آنکه جان را فکرت آموخت

دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی- گروه عمران-گرایش مکانیک خاک وپی

موضوع درس:

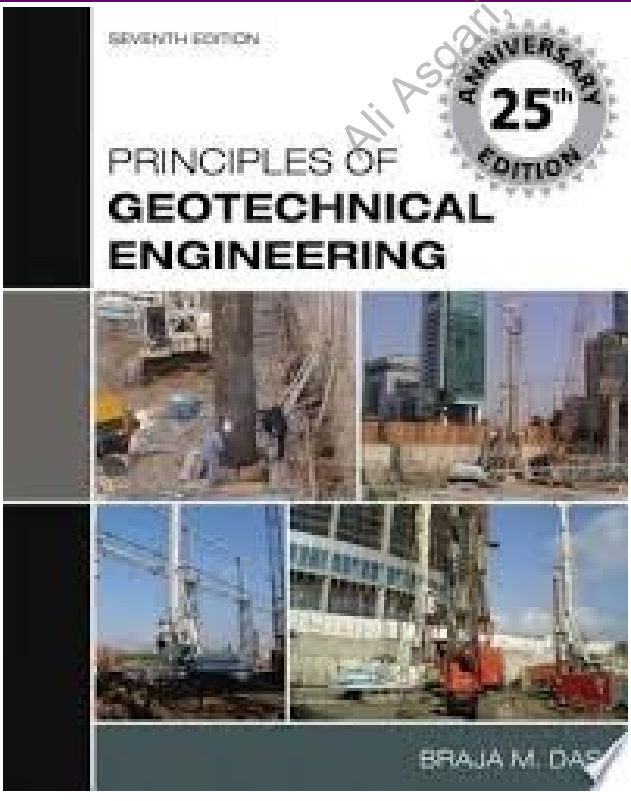
مکانیک خاک(Soil Mechanics)

مدرس: علی عسگری (Ali Asgari)

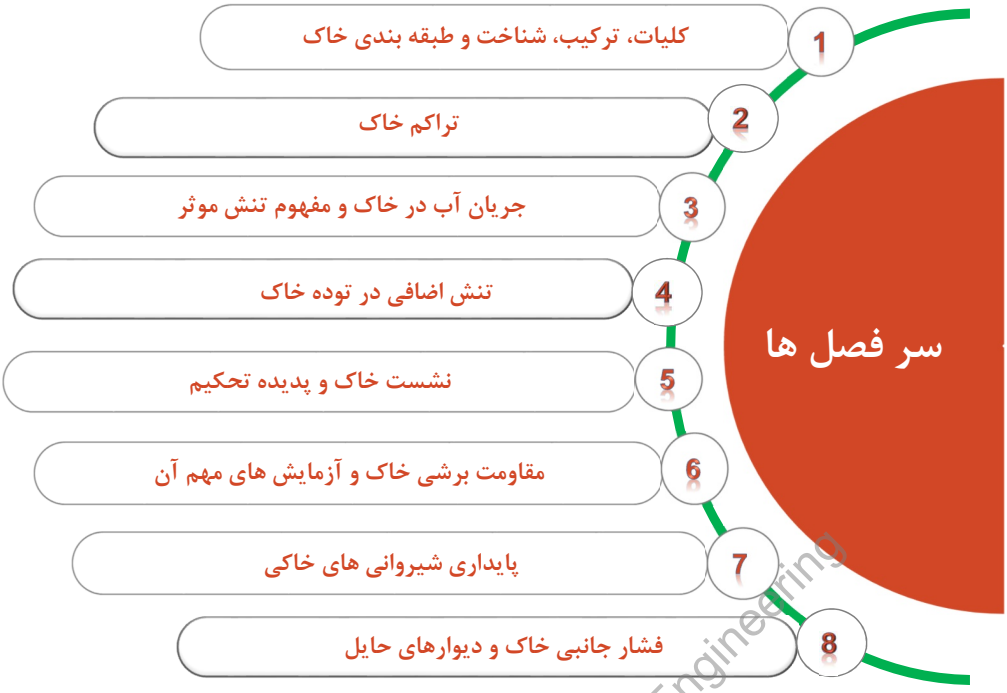
نیمسال اول تحصیلی ۹۹-۹۸

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

مراجع مهم مکانیک خاک (Soil Mechanics)



- جزوه درسی
- اصول مهندسی ژئوتکنیک(Principle of Geotechnical Engineering) Braja M. Das ترجمه شاپور طاحونی
- اساس مکانیک خاک (Soil Mechanics Fundamentals) M. Budhu, 2000 ترجمه دکتر میکائیل یوسف زاده فرد
- مکانیک خاک پیشرفته (Advanced Soil Mechanics) Braja M. Das ترجمه مهدی یزدچی
- مکانیک خاک (Soil Mechanics) Karl Terzaghi
- مکانیک خاک (Soil Mechanics) R.V. Whitman , V. Lambe ترجمه دکتر محمد حسن بازیار
- مکانیک خاک (Craig's Soil Mechanics) ترجمه دکتر بهنیا و طباطبایی



Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

مکانیک خاک Soil Mechanics

علمی که در مورد شناخت خواص فیزیکی و رفتار خاکها در مواجهه با تنش‌ها و تغییر شکل‌ها بحث می‌کند.

خاک: توده هایی از ذرات کانی هستند که همراه با هوا و آب موجود در فضاهای خالی، سیستمهای سه فازی را تشکیل می‌دهند. ممکن است برخی از خاک‌ها به صورت دو فازی باشند. یعنی دانه های خاکی(بخش جامد) و آب در فضای خالی آن، که در این صورت خاک اشبا است و یا دانه های خاکی با فضای خالی هوا که در اینصورت خاک کاملا خشک است.

تاریخچه خاک و مکانیک خاک: خاک از قدیمی ترین و پیچیده ترین مصالح مهندسی است. نیاکان ما از خاک جهت ساختن مقبره ها، ساخت سدها در مقابل سیل‌ها و پناهگاه‌ها به کار می بردند. مهندسان رومی (ویتروویوس Vitruvis) در اولین قرن قبل از میلاد خدمت می‌کرد که به انواع خاک ها و طراحی پی های صلب ساختمان ها توجه زیادی داشت. در آن زمان مبنای تئوریکی وجود نداشت و طراحی بر اساس تجربه و صحیح الخطا بود.

کولمب(سال ۱۷۷۳) به نوان اولین کسی شناخته شد که جهت حل مسائل خاک از علم مکانیک استفاده کرد. او علاقمند به حفظ دژهای قدیمی بود که به سهولت در اثر آتش توپ‌ها فرو ریخته می‌شد. برای محافظت این دیوارهااز توده‌های خاکی شیب دار استفاده می کرد. توده خاک یک نیروی جانبی به دژ(دیوار) وارد می کرد که می توانست موجب واژگونی و یا لغزش دیوار شود. ک.لمب توانست با کمک علم مکانیک میزان این نیروی جانبی را تعیین کند و در نتیجه پایداری دیوار را ارزیابی کند.

بعدها کارال ترزاقی(۱۸۸۳-۱۹۶۳) با انتشار کتابی از مکانیک خاک در سال ۱۹۲۵ علم مکانیک خاک را پی ریزی کرد و ایشان به نوان پدر علم مکانیک خاک شناخته شد.

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

تشکیل خاک: خاکها از هوازدگی فیزیکی و شیمیایی سنگها تشکیل می‌شوند.

هوازدگی فیزیکی شامل کاهش اندازه، بدون تغییر در ترکیب اولیه سنگ مادر است که عوامل اصلی آن پوسته پوسته شدن، باربرداری، فرسایش، یخ زدگی و ذوب(تغییرات دما) و سایش هستند. معمولا خاکهای حاصل از هوازدگی فیزیکی دانه هستند: مانند: شن، ماسه و لای

هوازدگی شیمیایی هم موجب کاهش اندازه و هم باعث تغییرات شیمیایی خصوصیات سنگ مادر می‌شود. هوازدگی شیمیایی عبارت است از: هیدراسیون، کربناسیون و اکسیداسیون. خاک حاصل از این نو هوازدگی معمولا خاکهای ریزدانه (چسبنده) از انواع کانیهای رسی هستند.

انواع خاک‌ها: بطور کلی خاکها بر چندین اساس طبقه بندی می‌شوند.

۱- از لحاظ خواص فیزیکی	۲- از لحاظ اندازه دانه ها	۳- از لحاظ شکل دانه ها	۴- از لحاظ مبانی زمین شناسی
• چسبنده (رس و لای) • غیر چسبنده (ماسه و شن)	• درشت دانه مثل شن و ماسه • ریزدانه مانند رس و لای	• سوزنی • صفحه ای • کروی	• خاک‌های آهکی، نهشته های یخچالی و رس های یخچالی • خاکهای آجری و لوم (Loam) • نهشته های رسوبی (Loess) وگل (Mud)

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

نکته: مطابق با تقسیم بندی انجمن تکنولوژی ماساچوست(MIT) از لحاظ اندازه دانه ها به ذرات بزرگتر از ۶۰ میلیمتر قلوه سنگ، بین ۲تا ۶۰ میلیمتر شن، بین ۰.۰۶ تا ۲ میلیمتر ماسه، بین ۰.۰۰۲ تا ۰.۰۶ میلیمتر سیلت، بین ۰.۰۰۱ تا ۰.۰۰۲ رس و کوچکتر از ۰.۰۰۱ ذرات معلق یا کلوئید گفته می شود. جدول زیر تقسیم بندی های سیستم های دیگر را از لحاظ اندازه‌ی دانه شان می‌دهد.

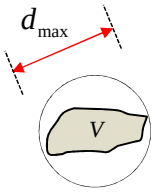
Name of organization	Grain size (mm)			
	Gravel	Sand	Silt	Clay
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 to 0.06	0.06 to 0.002	<0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 to 0.05	0.05 to 0.002	<0.002
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76.2 to 2	2 to 0.075	0.075 to 0.002	<0.002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation, and American Society for Testing and Materials)	76.2 to 4.75	4.75 to 0.075	Fines (i.e., silts and clays) <0.075	

برخی از فاکتورهای هندسی دانه ها در مکانیک خاک:

۱- ضریب کروی، S_p:

$$S_p = \frac{\text{مساحت جانبی یک کره هم حجم}}{\text{مساحت جانبی دانه}}$$

۲- ضریب حجمی، V_c:



$$V_c = \frac{\text{حجم دانه}}{\text{حجم کره ای که دور دانه را بگیرد}} = \frac{6V}{\pi\, d_{max}^{3}}$$

۳- فاکتور شکل، F:

$$F_c = \frac{\text{کوچکترین بُعد دانه} \times \text{بزرگترین بُعد دانه}}{\text{مجذور قطر متوسط همان دانه}} = \frac{A \times C}{B^2}$$

۴- سطح ویژه یا سطح مخصوص، Specific Area/Surface:

$$S_A = \frac{\text{مساحت جانبی دانه}}{\text{جرم همان دانه}}$$

فرمولهای مورد نیاز:

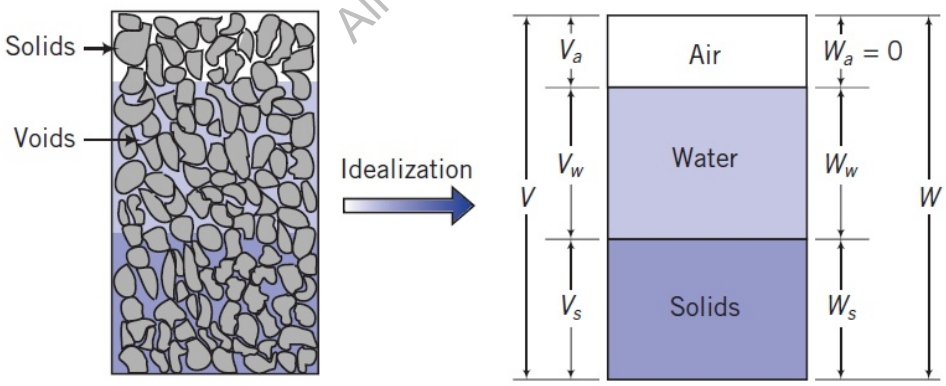
حجم کره و سطح کره به شعاع r و یا قطر d :

$$V_{Sphere} = \frac{\pi\, d^3}{6} = \frac{4}{3}\pi\, r^3, \quad A_{Sphere} = 4\pi\, r^2$$

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

روابط وزنی-حجمی خاک: یک توده خاک به حجم کلی V و وزن کلی W در شکل زیر نشان داده شده است. همانطورکه اشاره شد، هر توده خاک از سه فاز جامد(دانه های جامد خاک)، مایع (معمولا آب) و هوا تشکیل شده است.



(a) Soil (b) Idealized soil

$$W = W_s + W_w + \cancel{W_a}^{=0}$$

$$V = V_s + V_w + V_a$$

الف: ضرایب حجمی

۱- نسبت تخلخل (نسبت منفذی- نسبت پوکی- نشانه خلاء-void ratio):

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\text{حجم منافذ}}{\text{حجم دانه های جامد خاک}}$$

۲- پوکی: نسبت حجم فضای خالی به کل حجم خاک

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s} + \frac{V_s}{V_s}} = \frac{e}{e+1}$$

الف: ادامه ضرایب حجمی

۳- درجه اشباع (Saturated Ratio): نسبت حجم آب به حجم منافذ

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\text{حجم آب}}{\text{حجم منافذ}}$$

ب: ضریب وزنی

۴- درصد رطوبت (ω): عبارتست از نسبت وزن آب موجود در خاک به وزن دانه های جامد خاک که اغلب بصورت درصد بیان می‌شود.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

ج: روابط وزنی-حجمی تواما

۵- جرم مخصوص، وزن مخصوص و چگالی دانه‌های جامد خاک:

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s g}, \quad \gamma_s = \frac{W_s}{V_s}, \quad G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w}, \quad \gamma_w = 9.81\,\text{kN/m}^3, \quad \rho_w = 1\,\text{gr/cm}^3$$

رابطه طلایی:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{W_w}{V_w}} = \frac{W_s V_w}{W_w V_s} = \frac{1}{\omega}\frac{V_w}{V_s} \times \frac{V_v}{V_v} = \frac{1}{\omega}\frac{V_w}{V_v} \times \frac{V_v}{V_s} = \frac{1}{\omega} S_r \times e \Rightarrow$$

$$\omega G_s = e S_r$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

ج: ادامه‌ی روابط وزنی-حجمی تواما

۶- جرم مخصوص و وزن مخصوص مرطوب خاک:

$$\rho_{wet} = \frac{W_s + W_w}{Vg}, \quad \gamma_{wet} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s\left(1 + \frac{W_w}{W_s}\right)}{V} = \frac{W_s(1+\omega)}{V},$$

ارتباط وزن مخصوص مرطوب و دانه‌های جامد خاک:

$$\gamma_{wet} = \frac{W_s(1+\omega)}{V} = \frac{W_s(1+\omega)}{V_s + V_v} = \frac{W_s(1+\omega)}{V_s\left(1 + \frac{V_v}{V_s}\right)} = \frac{W_s}{V_s}\frac{(1+\omega)}{1+e} = \frac{\gamma_s(1+\omega)}{1+e} = \frac{G_s\gamma_w(1+\omega)}{1+e},$$

۷- جرم مخصوص و وزن مخصوص خشک خاک:

$$\rho_d = \frac{W_s}{Vg}, \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V},$$

ارتباط وزن مخصوص خشک و مرطوب خاک:

$$\begin{cases} \gamma_d = \frac{W_s}{V}, \\ \gamma_{wet} = \frac{W_s(1+\omega)}{V}, \end{cases} \Rightarrow \quad \gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1+\omega},$$

ارتباط وزن مخصوص خشک خاک و و دانه‌های جامد خاک:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{W_s}{V_s\left(1 + \frac{V_v}{V_s}\right)} = \frac{W_s}{V_s}\frac{1}{1+e} = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e},$$

ج: ادامه‌ی روابط وزنی-حجمی تواما

۸- وزن مخصوص اشباع خاک($S_r = 1$ یا $V_a = 0$):

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

وزن مخصوص اشباع خاک همان وزن مخصوص مرطوب یا تر است که در آن درجه اشباع برابر با یک است بنابراین داریم:

$$\gamma_{wet} = \frac{G_s\gamma_w(1+\omega)}{1+e} \xrightarrow{\omega = eS_r/G_s} \gamma_{wet} = \frac{G_s\gamma_w(1+eS_r/G_s)}{1+e} \xrightarrow{S_r=1} \gamma_{wet} = \gamma_{sat} = \frac{G_s\gamma_w(1+e/G_s)}{1+e} = \frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w,$$

۹- وزن مخصوص غوطه وری خاک:

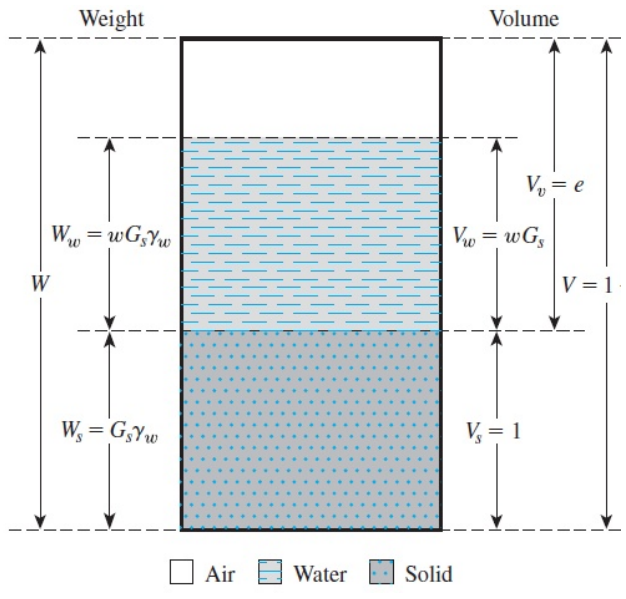
$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w - \gamma_w = \frac{G_s-1}{1+e}\gamma_w,$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

نکته کلیدی برای تعیین روابط: با توجه به شکل زیر اگر $V_S = 1$ فرض شود، آنگاه حجم فضای منافذ برابر با نسبت تخلخل خواهد شد و وزن دانه های جامد و وزن آب نیز از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$W_s = \gamma_s \times V_s = G_s\gamma_w \cancel{V_s}^{1} = G_s\gamma_w$$

$$W_w = \omega W_s = \omega G_s\gamma_w$$



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

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

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

تمرین: روابط زیر را به کمک ۹ رابطه اصلی اشاره شده اثبات کنید؟

1) $\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$

2) $\gamma_d = G_s\gamma_w(1-n)$

مثال ۱: برای خاکی در حالت طبیعی داریم: $G_s = 2.68$ ، $\omega = 24\%$ ، $e = 0.8$. مطلوبست تعیین: الف) وزن مخصوص مرطوب و خشک و درجه اشباع خاک. ب)اگر با افزودن آب به خاک آن را کاملا اشباع کنیم در آن صورت در صد رطوبت خاک در حالت اشباع چقدر است. در ادامه وزن مخصوص اشباع را نیز محاسبه کنید.

حل الف:

$$\gamma_{wet} = \frac{G_s\gamma_w(1+\omega)}{1+e} = \frac{2.68\times 9.81(1+0.24)}{1+0.8} = 18.11\ \text{kN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{2.68\times 9.81}{1+0.8} = 14.61\ \text{kN/m}^3, \qquad S_r = \frac{\omega G_s}{e} = \frac{0.24\times 2.68}{1+0.8} = 0.804$$

حل ب:

$$\omega_{sat} = \frac{eS_r}{G_s} = \frac{0.8}{2.68}\times 100 = 29.85\%, \qquad \gamma_{sat} = \frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.68+0.8}{1+0.8}\times 9.81 = 18.97\ \text{kN/m}^3$$

مثال ۲: برای خاکی در حالت طبیعی داریم: $G_s = 2.65$ ، $\omega = 24\%$ ، $n = 0.28$. مطلوبست تعیین: الف) وزن مخصوص خشک خاک. ب)اگر درجه اشباع خاک ۰.۵۶ باشدآنگاه وزن مخصوص مرطوب، اشباع و غوطه وری را محاسبه کنید.

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.28}{1-.28} = 0.39$$

حل الف:

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{2.65\times 1000}{1+0.39} = 1906.5\ \text{kg/m}^3,$$

حل ب:

$$\gamma_{wet} = \frac{G_s\gamma_w(1+\omega)}{1+e} = \frac{G_s+eS_r}{1+e}\gamma_w = \frac{2.65+0.39\times 0.56}{1+0.39}\times 1000 = 2063.6\ \text{kg/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.65+0.39}{1+0.39}\times 1000 = 2187.1\ \text{kg/m}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 2187.1 - 1000 = 1187.1\ \text{kg/m}^3$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

مثال ۳: اگر۲۱۰ cc آب به خاکی به حجم ۶۰۰ cc اضافه کنیم، حجم ثانویه خاک به ۷۰۰ cc می‌رسد. مطلوبست:

الف) تعیین درجه اشباع اولیه خاک؟ $G_s = 2.6$ ، $\omega = 14\%$ ، ب)اگر با افزودن آب به خاک آن را کاملا اشباع کنیم در آن صورت در صد رطوبت خاک در حالت اشباع چقدر است؟

حل الف:

$$\omega_1 = \frac{W_{w1}}{W_{s1}} = \frac{V_{w1}\gamma_w}{V_{s1}\gamma_{s1}} = \frac{V_{w1}}{V_{s1}G_{s1}} = 0.14 \Rightarrow \frac{V_{w1}}{V_{s1}} = 0.14\times 2.6 = 0.364 \qquad (1)$$

طبق داده مسئله چون به ۶۰۰ سی‌سی خاک ۲۱۰ سی‌سی آب اضافه کردیم و حجم ثانویه کل خاک ۱۰۰ سی‌سی افزایش یافت و به ۷۰۰ سی‌سی رسید؛ به‌عبارتی می‌توان گفت که حجم هوا خاک اولیه برابر با ۱۱۰ سی‌سی است. بنابراین داریم:

$$V_{T1} = V_{a1} + V_{w1} + V_{s1} = 600\,\text{cc} \xrightarrow{V_{a1}=110\text{cc}} V_{w1} + V_{s1} = 490\,\text{cc} \qquad (2)$$

با کمک دو رابطه ۱ و ۲ می‌توان حجم بخش جامد خاک و حجم آب در حالت اول را تعیین کرد:

$$\begin{cases} V_{w1} = 0.364V_{s1} & (1) \\ V_{w1} + V_{s1} = 490\,\text{cc} & (2) \end{cases} \Rightarrow 0.364V_{s1} + V_{s1} = 490,\ V_{s1} = 359.24\text{cc},\ V_{w1} = 130.76\text{cc}$$

$$S_{r1} = \frac{V_{w1}}{V_{v1}} = \frac{V_{w1}}{V_{w1}+V_{a1}} = \frac{130.76}{130.76+110} = 0.543 = 54.3\%$$

حل ب:

$$e = \frac{V_{v1}}{V_{s1}} = \frac{V_{w1}+V_{a1}}{V_{s1}} = \frac{130.76+110}{359.24} = 0.67$$

$$e\times S_r = \omega_{sat}\times G_s \Rightarrow 0.67 = \omega_{sat}\times 2.6 \Rightarrow \omega_{sat} = 0.258 = 25.8\%$$

چند نکته:

۱- اگر در خاکی رطوبت آن تغییر کند ولی حجم آن تغییر نکند آنگاه وزن مخصوص خشک خاک هیچ تغییری نخواهد کرد.

$$\gamma_{d1}=\gamma_{d2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\gamma_{wet1}}{1+\omega_1}=\frac{\gamma_{wet2}}{1+\omega_2}$$

۲- اگر خاکی با حجم V_1 و ضریب تخلخل e_1 داشته باشیم و بخواهیم بدون تغییر در درصد رطوبت و وزن دانه های جامد خاک از آن خاک با حجم V_2 و ضریب تخلخل e_2 داشته باشیم، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\gamma_{d1}=\gamma_{d2} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_1}{V_2}=\frac{\gamma_{wet2}}{\gamma_{wet1}}=\frac{\gamma_{d2}}{\gamma_{d1}}=\frac{1+e_1}{1+e_2}$$

فرمول فوق برای حمل خاک از قرضه در مواقع احداث خاکریز کاربرد دارد. اگر شما بخواهید حجم V_1 از خاکی که در قرضه است و نسبتا متراکم است یعنی ضریب تخلخل کمتری دارد، تا محل خاکریز را با کامیون جابجا کنید، در موقع بارگیری با بیل زدن لودر، ضریب تخلخل خاک افزایش می یابد؛ در نتیجه حجم ثانویه خاک افزایش می‌یابد و بایددر برآورد و متره این موضوع مدنظر گرفته شود.

۳- **معمولا** در حل مسائل یکی از مهمترین پارامترهایی که به آن احتیاج است ضریب تخلخل خاک می‌باشد. پس ابتدا برای حل مسئله سی شود ضریب تخلخل تعیین شود.

۴-تغییرات در ضریب تخلخل به هیچ وجه باعث تغییرات رابطه وزنی مانند در صد رطوبت نمی‌شود. اگر دروزن ثابتی از خاک ضریب تخلخل افزایش پیدا کند، γ_s، ω ، G_s و V_s ثابت می ماند ولی باعث کاهش مقدار γ_d ، γ_{wet} و S_r خواهد شد.

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

دانسیته نسبی(Relative Density): این پارامتر مخصوص خاک دانه ای است و رابطه آن بصورت زیر است:

که در آن e_{min} و e_{max} به ترتیب ضریب تخلخل در متراکم ترین و سست ترین حالت و e ضریب تخلخل کنونی خاک(در محل) است. از لحاظ تئوری دانسیته نسبی بین ۰ تا ۱۰۰٪ است.

$$D_r=\frac{e_{\max}-e}{e_{\max}-e_{\min}}\times 100$$

تمرین) رابطه روبرو را با توجه به روابط وزنی-حجمی اثبات کنید؟

$$D_r=\frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d}\times\frac{\gamma_d-\gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max}-\gamma_{d\min}}\times 100$$

تراکم نسبی(Relative Compaction): رابطه آن بصورت مقابل است:

$$R_c=\frac{\gamma_d}{\gamma_{d\max}}\times 100$$

رابطه بین دانسیته نسبی و تراکم نسبی:

رابطه روبرو را به عنوان تمرین اثبات کنید؟

$$R_c=\frac{\gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max}}\times\frac{1}{1-D_r\left(1-\gamma_{d\min}/\gamma_{d\max}\right)}$$

$$R_c=80+0.2\,D_r\,(\%)$$

رابطه تجربی لی و سینگ(Lee & Singh, 1971)

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

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

دامنه تغییرات چگالی دانه های جامد خاک(G_s): این پارامتر برای خاک معمولا بین ۲.۶ تا ۲.۸ متغییر است و متوسط آن ۲.۷ است جدول زیر دامنه تغییرات برای چند نمونه خاک را نشان می‌دهد:

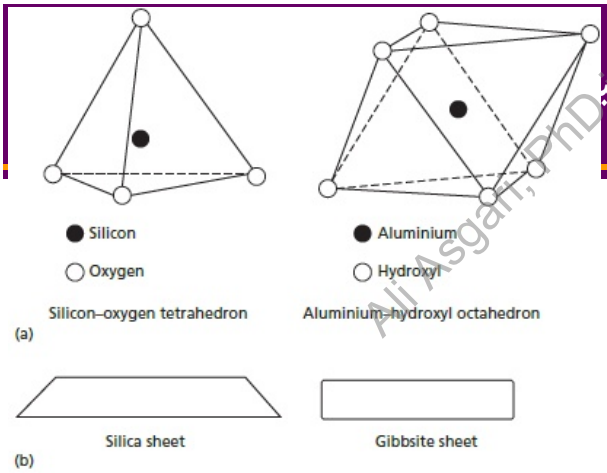
نوع خاک	شن	ماسه کوارتزی	لای	رس	گچ	مایه بادی
چگالی	۲.۶۸-۲.۶۵	۲.۶۶-۲.۶۴	۲.۷۳-۲.۶۷	۲.۹-۲.۷	۲.۷۵-۲.۶	۲.۷۳-۲.۶۵

ضریب تخلخل، درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک برخی از خاک‌ها

Type of soil	Void ratio, e	Natural moisture content in a saturated state (%)	Dry unit weight, γ_d lb/ft³	Dry unit weight, γ_d kN/m³
Loose uniform sand	0.8	30	92	14.5
Dense uniform sand	0.45	16	115	18
Loose angular-grained silty sand	0.65	25	102	16
Dense angular-grained silty sand	0.4	15	121	19
Stiff clay	0.6	21	108	17
Soft clay	0.9–1.4	30–50	73–93	11.5–14.5
Loess	0.9	25	86	13.5
Soft organic clay	2.5–3.2	90–120	38–51	6–8
Glacial till	0.3	10	134	21

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

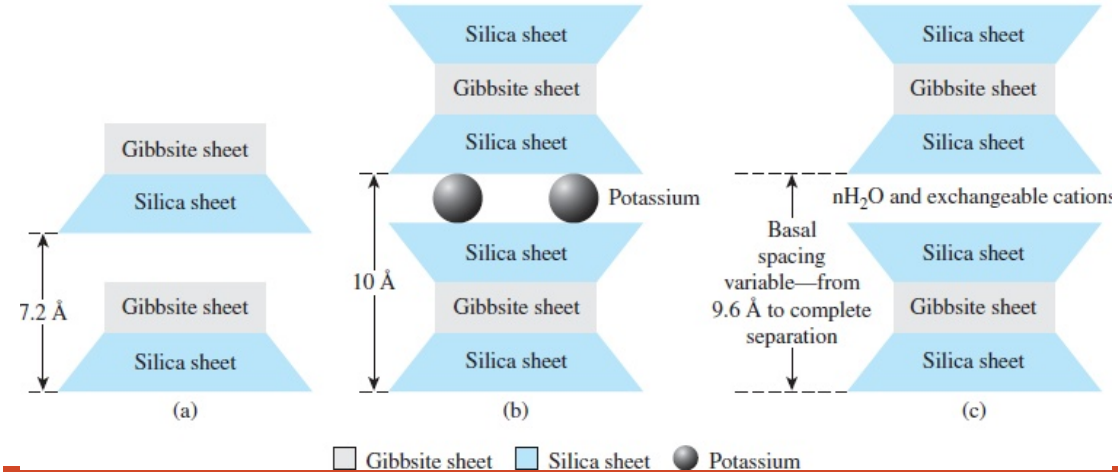
کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک



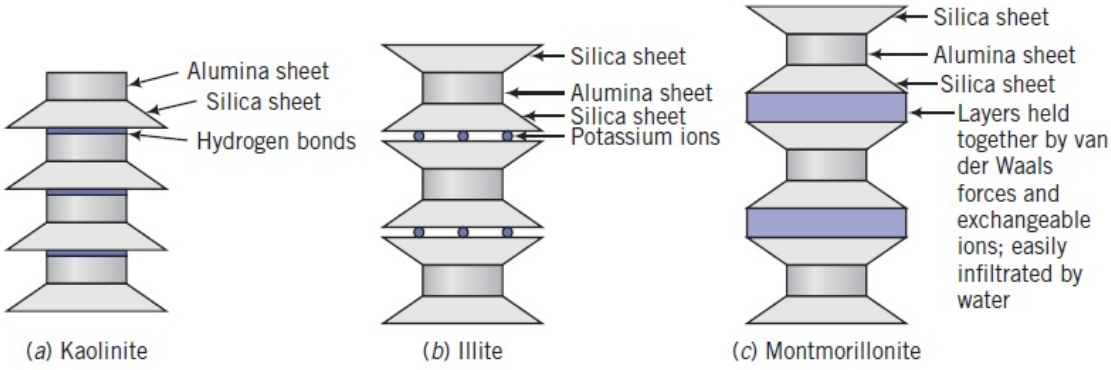
کانی‌های رس: ترکیبات اصلی رس عبارتند از: ۱- چهار وجهی سیلیسیوم-اکسیژن ۲- هشت وجهی آلومینیوم یا منیزیم

ترکیب واحدهای هشت وجهی آلومینیوم یک صفحه گیبسیت Gibbsite sheet را تشکیل می دهد و ترکیب واحدهای چهار وجهی سیلیسیوم-اکسیژن یک صفحه سیلیکا Silica sheet را تشکیل می دهد. اگر بجای واحدهای هشت وجهی آلومینیوم، منیزیم باشد تشکیل صفحه بروسیت را می دهد.

مهمترین کانیهای رس:
۱- کائولینیت(دولایه‌ای)
۲- ایلیت یا میکای رس (سه لایه‌ای)
۳- مونت موریونیت (سه لایه‌ای)



مقایسه سه کانی رس



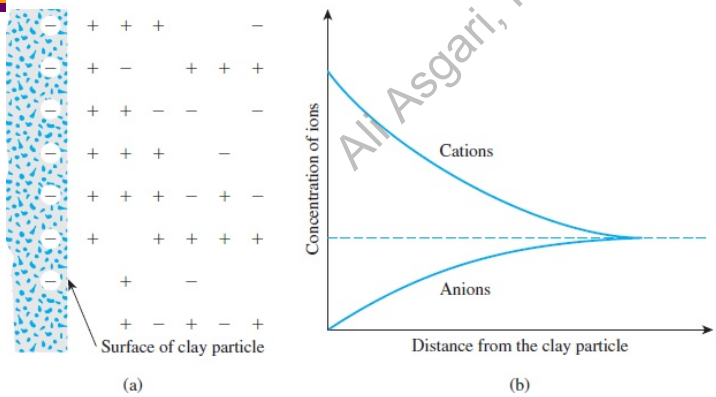
نام کانی	نوع پیوند	ابعاد جانبی(A)	ضخامت	سطح ویژه m^2/gr
کائولینیت	هیدروژنی	۲۰۰۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۱۰۰	۱۵
ایلیت	فلزی	۵۰۰۰-۱۰۰۰	۵۰۰-۵۰	۸۰
مونت موریونیت	کووالانسی	۵۰۰۰-۱۰۰۰	۵۰-۱۰	۸۰۰

نکته: سطح ویژه ماسه تمیز حدودا ۰.۰۰۰۲ مترمربع بر گرم است که در مقابل کانیهای رسی بسیار ناچیز است.

نکته بعدی: مونت موریونیت بدلیل پیوند ضعیف ناپایدار هستند که گل حفاری یا بنتونیت از این نوع رس ها تهیه می شود.

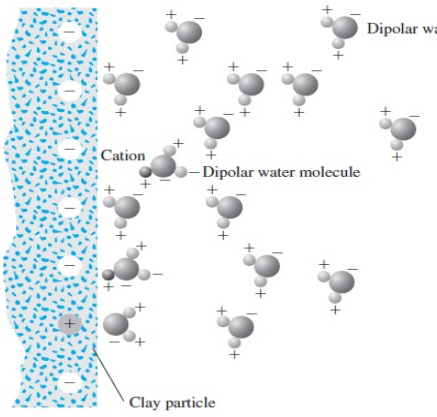
کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

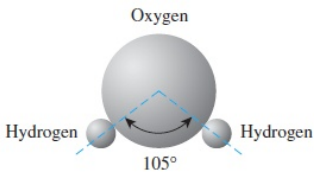
Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

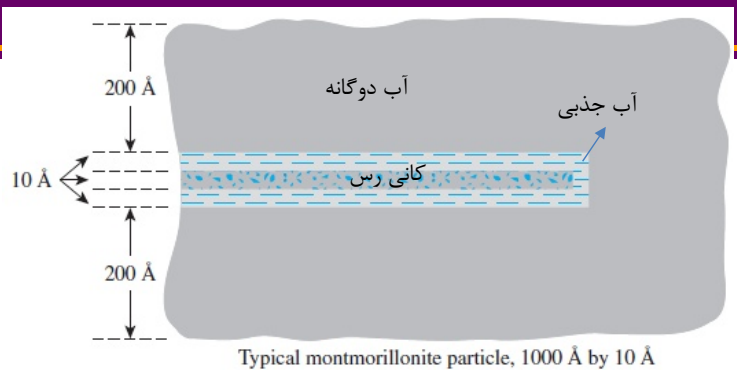


ماهیت آب در خاک رس:

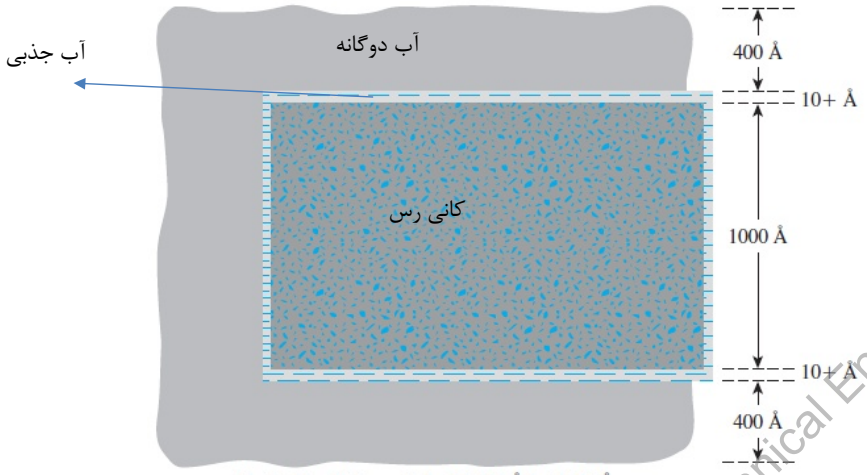
ذرات کانی های رس دارای بار منفی خالص هستند و از طرفی آب دو قطبی است؛ جون دو اتم هیدروژن بطور متقارن به عنصر اکسیژن متصل نیست بنابراین وقتی آب به کانی رس اضافه می‌شود سمت مثبت آن بشدت به سطح کانی می.چسبد. بنابراین هر چه به سطح کانی رس نزدیک شویم غلظت کاتیون بیشتر است.







Typical montmorillonite particle, 1000 Å by 10 Å



Typical kaolinite particle, 10,000 Å by 1000 Å

ادامه ماهیت آب در خاک رس:

مولکولهای آبی که جذب سطح کانی رس شده‌اندتشکیل لایه دوگانه را می‌دهند. خاصیت خمیری خاک رسی در اثر وجود همین آب لایه دوگانه است.

لایه داخلی آب دوگانه به طور بسیار محکمی توسط کانی رس نگه داشته می‌شود و هیچ حرکتی ندارد. این لایه آب جذبی نامیده می‌شود که لزجت آن نیز زیاد است.

ضخامت لایه دوگانه در کائولینیت حدودا ۴۰۰ آنگستروم و برای مونت موریونیت حدودا ۲۰۰ آنگستروم است و ضخامت لایه جذبی برای انواع رس ها حدودا ۱ نانومتر است.

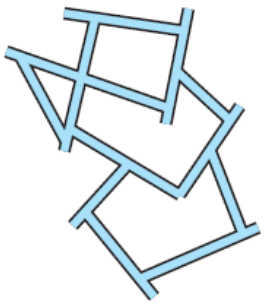
Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

ساختمان خاک رس:

(a)

۱- ساختمان پراکنده یا موازی: قرارگیری ذرات خاک رس را به اصطلاح ساختمان می گویند. این ساختمان بستگی به نیروی برآیند بین ذرات دارد. یعنی؛ اگر برآیند نیروهای بین ذرات دافعه باشددراینصورت ساختمان خاک رس به صورت موازی یا پراکنده می‌شود.در این نوع ساختمان مقاومت برشی و نفوذپذیری خاک کم است.


(b)

۲- ساختمان درهم یا مجتمع: اگر برآیند نیروهای سطحی بین ذرات جاذبه باشددراین‌صورت ساختمان خاک رس به صورت درهم یا مجتمع می‌شود. ضخامت لایه آب دوگانه در این حالت کم است. آب‌های شور که دارای الکترولیت‌های قوی هستند و این الکترولیت‌ها نیروی دافعه بین ذرات را کم می‌کنند و سبب می‌شود که نیروی بین ذرات رس به سمت جاذبه میل کند. بنابراین ذرات رسی که در کف آب‌های شور دریاها رسوب می‌کنند دارای ساختمان درهم هستند.

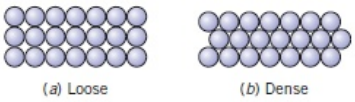
ساختمان خاک دانه ای:

قرارگیری خاک‌های درشت دانه و دانه‌ای برخلاف خاکهای ریزدانه به میزان زیادی تحت تاثیر نیروهای وزنی است، در حالیکه در خاک‌های ریزدانه، نیروهای سطحی(بدلیل بالا بودن سطح ویژه) کنترل کننده‌ی نوع ساختمان خاک رس است.

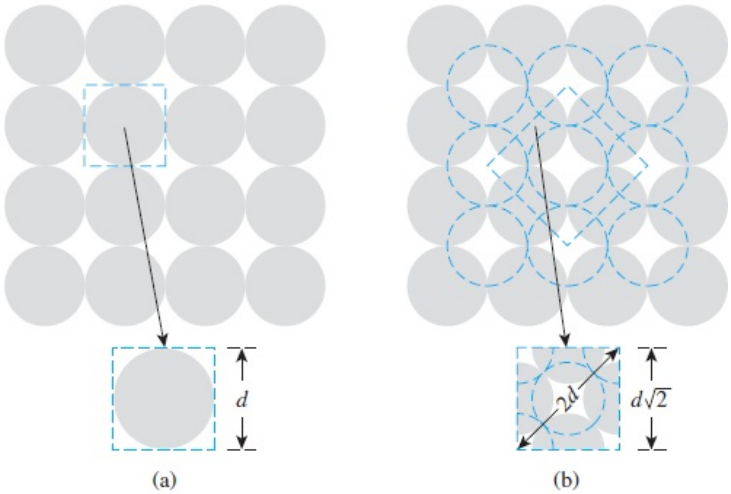
ادامه ساختمان خاک دانه‌ای:

در خاک‌های دانه‌ای وزن یک ذره باعث نحوه قرارگیری آن در میان ذرات دیگر می‌شود. انواع ساختمانها در خاک دانه‌ای عبارتند از:

۱- ساختمان تکدانه: خود به دو دسته سست و متراکم(به ترتیب مطابق شکل aو b)دسته بندی می‌شوند.



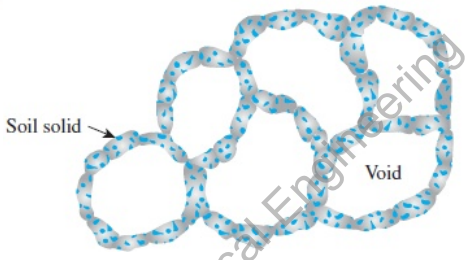
تمرین: ضریب تخلخل را در حالت متراکم برای شکلb تعیین کنید؟



$$V = d^3, \quad V_s = \frac{\pi d^3}{6}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{d^3 - \frac{\pi d^3}{6}}{\frac{\pi d^3}{6}} = 0.91$$

۲- ساختمان لانه زنبوری این ساختمان موقعی به وجود می‌آیدکه خاک علاوه بر نیروی ثقل، تا اندازه‌ای تحت تاثیر نیروی سطحی قرار گیرد. این حالت در مورد لای‌ها و ماسه‌های ریزدانه به وجود می‌آید.



Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

دانه‌بندی خاک(Grain Size Distribution):

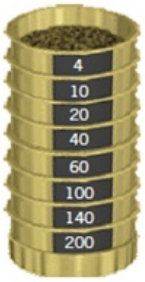
منظور از دانه‌بندی عبارتنداز جداسازی دانه‌های خاک در اندازه‌های مختلف از لحاظ قطری که هر قسمت به صورت درصد وزنی از ذرات به کل نمونه خاک بیان می‌شود. دو نوع دانه‌بندی خاک وجود دارد:

۱-سیستم الک (Sieve Analysis) برای خاک‌های درشت دانه تر از ۰.۰۷۵ میلیمتر

۲- روش هیدرومتری(Hydrometer Method) برای خاک‌های ریزدانه

❖ **دانه‌بندی به روش الک مطابق استاندارد ASTM D422-63 (American Society for Testing and Materials)**

ابزار این آزمایش الک است. اندازه‌ی قطر دانه از روی شماره‌ی الک تشخیص داده می‌شود. انواع اندازه‌ی الک ها در آزمایشگاه از سه اینچ (۷۶.۴ میلی متر) شروع می‌شود و به ۰.۰۷۴ میلی متر ختم می‌شود.دانه بندی خاک در مقیاس بزرگ با ابزار سرند در عملیات صحرایی انجام می‌شود.



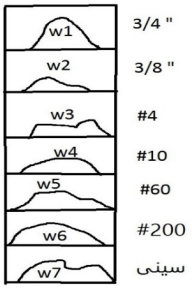
نمره و شماره‌های الک‌های معمول:

شماره الک	3 in	1.5 in	3/4 in	3/8 in	#4	#10	#20	#40	#60	#100	#140	#200
قطر(mm)	76.4	3.81	19.1	9.52	4.76	2	0.85	0.425	0.25	0.15	0.106	0.074

نکته: الک نمره‌ی #4 یعنی دارای ۴ سوراخ در یک اینچ و یا ۱۶ سوراخ در یک اینچ مربع است.

❖ **ادامه‌ی دانه‌بندی به روش الک مطابق استاندارد ASTM D422-63 (American Society for Testing and Materials)**

الک‌های خالی را وزن کرده و از ریز به درشت بر روی هم قرار می‌دهیم زیر آن سینی می‌گذاریم. سپس مقداری نمونه(معمولا ۲ کیلو) را در اون به مدت ۲۴ ساعت خشک در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد خشک می‌کنیم و آنرا در درشت ترین الک می‌ریزیم. درپوش را روی بزرگترین الک قرار می‌دهیم. سپس آن ها را در لرزاننده(Shaker) به مدت ۲۰ دقیقه الک می‌کنیم. سپس وزن مانده بر روی هر الک را محاسبه می‌کنیم. با کمک روابط زیر درصد مانده تجمعی و درصد عبوری تجمعی را تعیین می‌کنیم:



$$\text{درصد مانده تجمعی الک i} = \frac{\text{مجموع وزن خاک مانده بر روی الک i و الک‌های درشت تر از آن}}{\text{وزن کل نمونه}} \times 100$$

$$\text{درصد عبوری تجمعی الک i} = 100 - \text{درصد مانده تجمعی الک i}$$

❖ نکته: هرچه تعداد بیشتری از الک در آزمایش دانه بندی استفاده شود، نتیجه دقیق تر خواهد شد.

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

مثال تمرینی مهم: پس از آزمایش دانه بندی از ۲ کیلوگرم نمونه، نتایج به صورت جدول زیر است. مطلوبست رسم منحنی دانه بندی خاک به کمک نرم افزار Excel ؟

شماره الک	3/4 in	3/8 in	#4	#10	#40	#100	#200	Pan
قطر(mm)	19.1	9.52	4.76	2	0.425	0.15	0.074	0
وزن مانده روی الک به گرم	0	158	308	608	652	224	42	8

$$\text{درصد مانده تجمعی الک i} = \frac{\text{مجموع وزن خاک مانده بر روی الک i و الک‌های درشت تر از آن}}{\text{وزن کل نمونه}} \times 100$$

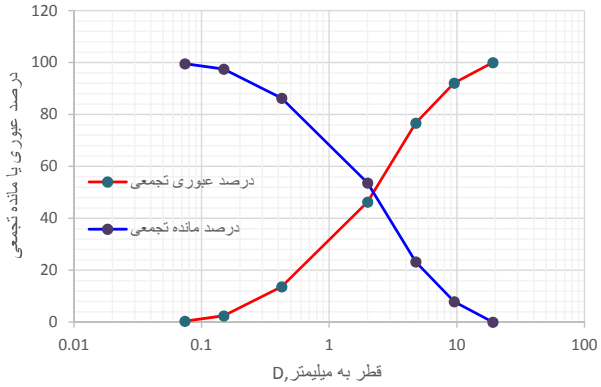
$$\text{درصد عبوری تجمعی الک i} = 100 - \text{درصد مانده تجمعی الک i}$$

$$\text{درصد مانده تجمعی الک 3/4in} = \frac{0}{2000} \times 100 = 0\%$$

$$\text{درصد مانده تجمعی الک 3/8in} = \frac{158}{2000} \times 100 = 7.9\%$$

$$\text{درصد مانده تجمعی الک \#4} = \frac{158 + 308}{2000} \times 100 = 23.3\%$$

Excel



سه پارامتر مهم که می‌توان از منحنی دانه بندی و یا اطلاعات جدولی استخراج کرد:

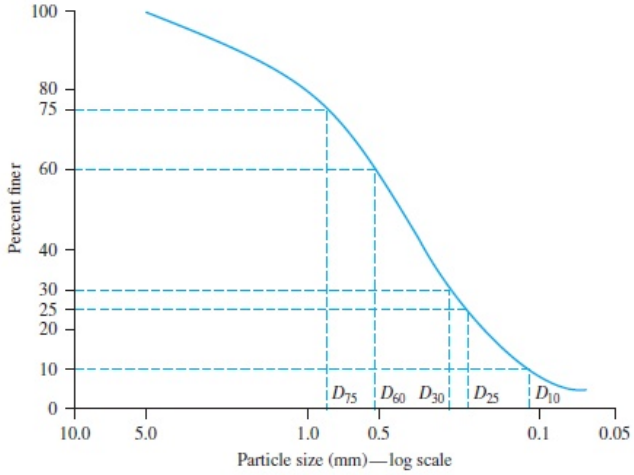
۱-قطر موثر: قطری است که ۱۰٪ دانه های موجود در یک نمونه از آن کوچکتر هستند و آن را با D_{10} نمایش می‌دهند.

۲- ضریب یکنواختی: این ضریب نشان دهنده یکنواخت بودن یا نبودن دانه ها را در یک نمونه نشان می دهد و همواره بزرگتر مساوی یک است. هر چه قدر به یک نزدیکتر باشد دانه ها هم اندازه هستند و بصورت زیر تعریف می‌شود:

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

۳- ضریب دانه بندی یا خمیدگی: با نمایش C_c می‌دهند و از رابطه زیر تعیین می‌شود:

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



تمرین بسیار مهم: داده های فرضی از آزمایش دانه بندی (مشابه مثال حل شده) بسازید و سپس منحنی دانه بندی آن را مطابق با فایل آموزشی اکسل رسم کنید و سپس سه پارامتر فوق را هم بصورت دستی و هم با اکسل تعیین نمائید؟

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کیفیت دانه بندی: ۱- خوب دانه بندی(Well-graded) ۲- بددانه بندی(Poorly graded)

۱- خوب دانه بندی(Well-graded): یعنی همه اندازه ها در خاک وجود داشته باشد و هیچ یک از اندازه ها بیش از حد در آن نباشد. برای تشخیص خوب دانه بندی دو روش وجود دارد: الف) از طریق تطابق دادن با منحنی استاندارد فولر(Fuller Curve) ب) از طریق ضرایب یکنواختی و خمیدگی

الف) از روش منحنی استاندارد فولر(Fuller Curve): منحنی فولر، منحنی است که همه‌ی قطرها در نمونه وجود داشته باشد و از رابطه روبرو تبعیت کند:

$$PP_i\% = \sqrt{\frac{D_i}{D_{95}}} \times 100$$

که در آن PP_i در صد عبوری قطر مورد نظر D_i و D_{95} قطرایست که ۹۵٪ دانه ها از آن ریزترند.

ب) از طریق ضرایب یکنواختی و خمیدگی: خاکی که دو شرط زیر را دارا باشد جزء دسته خاک‌های خوب دانه بندی محسوب می‌شود.

$$\begin{cases} C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 6 \\ C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 4 \end{cases} \qquad 1 \leq C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} \leq 3$$

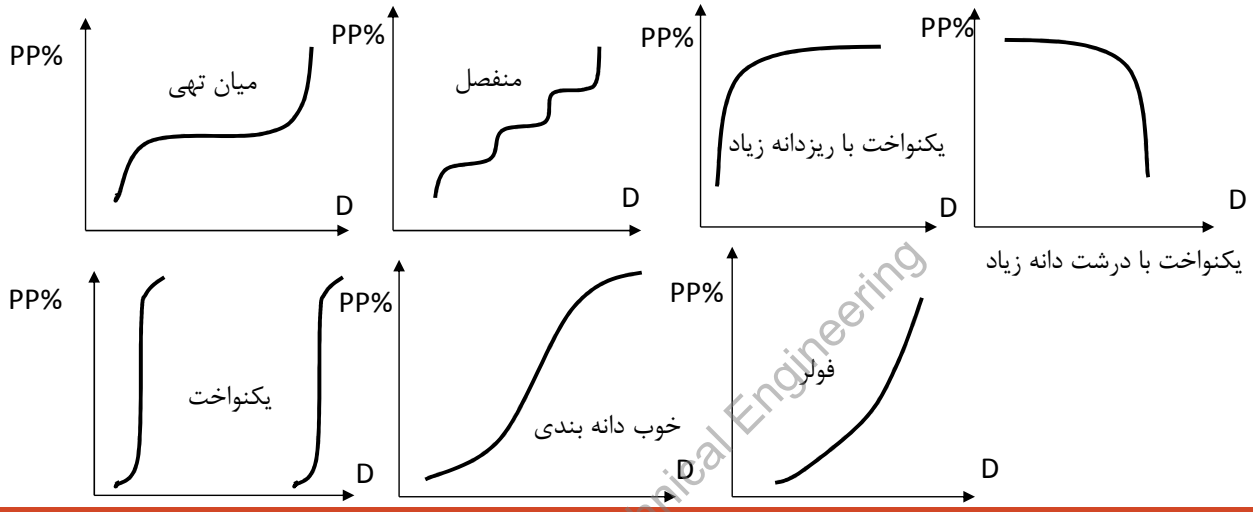
Excel

ادامه تمرین بسیار مهم: منحنی فولر را در کنار منحنی دانه بندی ترسیم کنید و همچنین بگویید که منحنی خوب دانه بندی هست یاخیر؟ از طریق ضرایب ها نیز بررسی کنید؟؟

کیفیت دانه بندی: ۱- خوب دانه بندی(Well-graded) ۲- بددانه بندی(Poorly graded)

- بددانه بندی(Poorly graded): یعنی برخی از اندازه ها بیش از حد در خاک وجود داشته باشد و یا بعضی از قطرها اصلا وجود نداشته باشد. برخی از نمونه نمودارها بد دانه بندی در زیر وجود دارد.

- انواع شکل های منحنی بد دانه بندی: الف) میان تهی (gap-graded) ب) منفصل ج) یکنواخت (uniform-graded)



کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

دانه‌بندی خاک(Grain Size Distribution):

۱-سیستم الک (Sieve Analysis) برای خاک‌های درشت دانه تر از ۰.۰۷۵ میلیمتر

۲- روش هیدرومتری(Hydrometer Method) برای خاک‌های ریزدانه

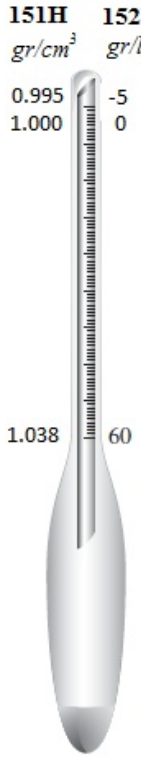
❖ **دانه‌بندی به روش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63**

برای دانه بندی خاکهای ریزدانه مانند رس،لای و ماسه خیلی ریز دانه بکار گرفته می‌شود.

ابزار اصلی این آزمایش هیدرومتر است که دو نوع 151H و 152H دارد.

151H: با این ابزار می‌توان جرم مخصوص مایع را در بازه ۱.۰۳۸ تا ۰.۹۹۵ gr/cm^3 اندازه گیری کرد.

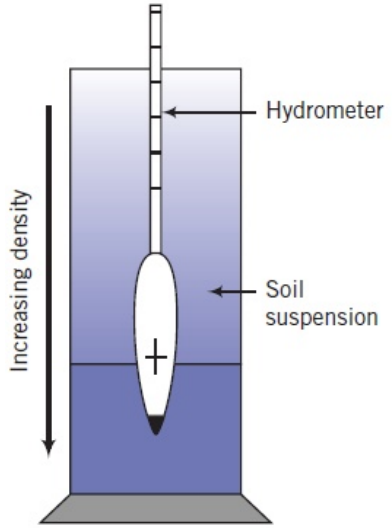
152H : این نوع هیدرومتر بر مبنای gr/lit می‌باشد و از ۵- تا ۶۰+ درجه بندی شده است. اگر در یک ۱ لیتر آب ۲۵گرم خاک وجود داشته باشد، عددی که هیدرومتر نشان می‌دهد ۲۵+ است.



از لحاظ ظاهری این دو هیدرومتر تفاوتی ندارند.فرق آن‌ها در درجه بندی آن‌هاست.

تذکر : موارد گفته شده برای حالتی که وزن مخصوص خاک ۲.۶۵ و وزن مخصوص آب ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و در حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد (۶۸ فارنهایت) باشد ،صحیح است، در غیر این‌صورت باید اعداد قرائت شده اصلاح شوند.

❖ **ادامه دانه‌بندی به روش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63**



شرح آزمایش : این آزمایش برای تکمیل کردن آزمایش الک است. ۵۰ تا ۱۰۰ گرم از خاک رس یا لای (عبوری از الک ۲۰۰ یا ۱۰۰) انتخاب می‌کنیم و آن را در ۲۰۰ تا ۳۰۰ سی سی آب همراه با مقداری ماده‌ی جداساز (مثل: هگزامتا فسفات سدیم)، به مدت ۱ الی ۵ دقیقه با همزن مخلوط می‌کنیم. به جای ماده هگزا متافسفات می‌توان از محلول استوکس استفاده کرد که مقدار آن بسته به غلظت آن متغیر است و مقدار مصرفی آن بر روی قوطی آن درج شده است.

۲۴ ساعت صبر می‌کنیم. این ماده به عنوان جدا کننده ذرات نسبت به هم بکار گرفته می‌شود تا ذرات رس بهم نچسبند و ذره بزرگتری را تشکیل ندهند. ماده باعث خنثی شدن بار الکتریکی ذرات رس می‌شود. سپس حجم مخلوط را به ۱ لیتر می‌رسانیم و بعد از آن محلول را ۹۰ بار بصورت رفت و برگشتی تکان می‌دهیم و وقتی آن را خوب هم زدیم، بر روی میز کار قرار می‌دهیم. در همین لحظه دکمه استارت کرنومتر را فشار می‌دهیم.رسپس یکی از هیدرومترها را به آرامی داخل مخلوط قرار می‌دهیم و رها می‌کنیم.

سپس هیدرومتر را قرائت می‌کنیم (زمان کرنومتر را در این لحظه در جدول ثبت می‌کنیم) و آن را R_a می‌نامیم. هم‌زمان دمای مخلوط را نیز اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. قرائتها را تا ۲۴ ساعت و یا بیشتر ادامه می‌دهیم. با گذشت زمان، چگالی یا وزن مخصوص مخلوط با ته نشین شدن ذرات کاهش می یابد و از طرفی مطابق با قانون استوکس هر چه قطر دانه ها بزرگتر باشد، سرعت ته‌نشین شدن آن بیشتر است. بنابراین می‌توان از این قانون جهت دانه‌بندی کردن ریزدانه‌ها استفاده کرد.

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

❖ **ادامه دانه‌بندی به روش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63**

قانون استوکس برای سرعت سقوط یک کره در سیال :

$$V=\frac{\gamma_s-\gamma_w}{18\mu}\times D^2 \Rightarrow D=\sqrt{\frac{18\mu V}{\gamma_s-\gamma_w}} \qquad \gamma_s=G_s\gamma_w,\ \gamma_w=9810\ \mathrm{N/m^3}$$

$$V(\mathrm{m/s})=\frac{L(\mathrm{m})}{t(\mathrm{s})} \qquad k\left(\sqrt{\mathrm{m.s}}\right)=\sqrt{\frac{18\mu\left(\mathrm{Pa.s\ or\ N.s/m^2}\right)}{(G_s-1)\gamma_w\left(\mathrm{N/m^3}\right)}}$$

$$D(\mathrm{m})=k\left(\sqrt{\mathrm{m.s}}\right)\sqrt{\frac{L(\mathrm{m})}{t(\mathrm{s})}}$$

که در آن V سرعت سقوط کره یا ذره، D قطر کره، μ گرانروی سیال، γ_w و γ_s به ترتیب وزن مخصوص آب و کره، L طول سقوط ذره و t زمان سقوط ذره هستند.

فرضیات و محدودیات استوکس :

- ذرات کاملا کروی فرض میشوند که دانه های خاک رس صفحه ای هستند.
- مایع یا سیال نامتناهی فرض می‌شود که ظرف باعث محدود شدن سیال می‌شود.
- ممکن است ذرات کمی با هم متفاوت باشند که در این آزمایش یکسان در نظر گرفته می‌شود.
- ذرات با هم برخورد دارند و بر سرعت و جهت حرکت همدیگر اثر میگذارند که در قانون استوکس برای یک ذره تعریف می‌شود
- قانون استوکس برای ذرات $0.2\ \mu m < D < 0.2\ mm$ کاربردی است.

❖ **ادامه دانه‌بندی به روش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63**

دو تمرین: ۱- با گذشت زمان، ذرات خاک رس در سیال ته‌نشین می‌شوند و هیدرومتر نیز در سیال فرو می‌رود. چرا؟ پاسخ خود را به کمک قانون شناوری اثبات کنید؟

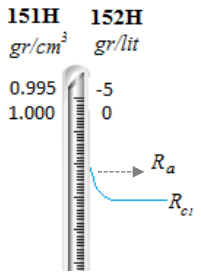
۲- قانون استوکس برای سقوط گوی در سیال را به کمک قانون شناوری و نیروی دراگ اثبات کنید؟

اصلاحات بر روی قرائت انجام شده بر روی هیدرومتر:

۱- درجه حرارت(C_t): اگر درجه حرارت سیال ۲۰ درجه سانتیگراد نباشد باید اصلاح انجام شود. مقادیر اصلاحی برای دو نوع هیدرومتر از روابط زیر تعیین می‌شود. لازم به ذکر است رابطه پایین از یک رگرسیون غیرخطی تعیین شده است و ممکن است در مراجع دیگر به صورت دیگر باشد. شما می‌توانید از محاسبگر آنلاین نیز محاسبه کنید، بطور مثال از طریق لینک مقابل:

$$152H: \quad C_t = -7.6338851 + T^\circ \times \left(1.51062059 + T^\circ \times \left(-0.06923056 + T^\circ \times 0.00122483\right)\right)$$

https://www.vinolab.hr/calculator/hydrometer-temperature-correction-en31



۲- تصحیح خاصیت موئینگی یا ساق(C_m): به علت خاصیت موئینگی آب، مقدار رویتی کمی بالاتر از مقدار واقعی است بنابراین باید مقدار رویتی را اصلاح کرد.

$$R_{c1} = R_a + C_m$$

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

❖ **ادامه دانه‌بندی به روش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63**

اصلاحات بر روی قرائت انجام شده بر روی هیدرومتر:

۱- درجه حرارت(C_t)

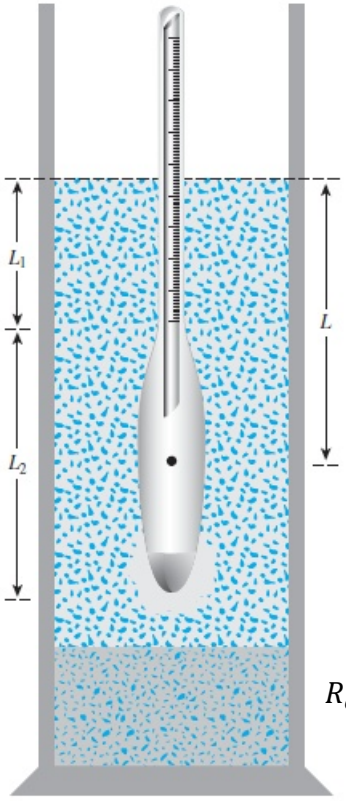
۲- تصحیح خاصیت موئینگی یا ساق(C_m)

۳- تصحیح ماده جداساز یا تصحیح صفر(C_d): علاوه بر هگزامتافسفات سدیم می‌توان از مواد جداساز دیگر نیز استفاده کرد که همگی نیاز به اصلاح دارند برای تعیین C_d می‌توان محلولی از آب مقطر و هگزامتافسفات به میزان یک لیتر در استوانه مندرج تهیه نمود و اختلاف قرائت هیدرومتر در آب+هگزا و آب خالص همان C_d است. توجه شود که در تمام زمان های که مخلوط آب+خاک+هگزا قرائت می‌شود نیاز است قرائت‌های آب+هگزا و آب خالص نیز انجام شود. این روش برای تعیین ضریب اصلاح صفر کاملا دقیق نیست.

$$C_m = \text{قرائت هیدرومتر در آب با محلول جداساز} - \text{قرائت هیدرومتر در آب خالص}$$

۴- تصحیح چگالی خاک (a): اگرچگالی دانه‌های جامد خاک، G_s، برابر با ۲.۶۵ نباشد نیاز به اصلاح دارد که از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$a = \frac{2.65 - 1}{2.65} \frac{G_s}{G_s - G_w}$$



❖ **ادامه دانه‌بندی به روش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63**

چگونگی تعیین طول سقوطی یا فرورفته‌ی هیدرومتر(L):

برای تعیین L شکل مقابل را در نظر بگیرید. طول L برابر با فاصله مرکز ثقل هیدرومتر تا سطح واقعی آب است که از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$L = L_1 + \frac{1}{2}\left(L_2 - \frac{V_B}{A}\right),$$

L_2 : طول حباب هیدرومتر که برابر با ۱۴ سانتیمتر است.
V_B: حجم حباب هیدرومتر که برابر با ۶۷ سانتیمتر مکعب است.
A: سطح مقطع استوانه که برابر با 27.8 سانتیمتر مربع است.

$$L = L_1 + 5.795,$$

بنابراین رابطه فوق به صورت مقابل در می‌آید:

در هیدرومتر 152H اگر قرائت $R_{c1} = 0$ باشد مقدار L_1 برابر با ۱۰.۵ است و برای قرائت $R_{c1} = 50$ مقدار L_1 برابر با ۲.۳ است بنابراین می توان به رابطه زیر رسید:

$$L_1 = 10.5 - \frac{10.5 - 2.3}{50} R_{c1}(cm) = 10.5 - 0.164 R_{c1}(cm)$$

$$L = 16.295 - 0.164 R_{c1}(cm)$$

بطور مشابه در هیدرومتر 151H اگر قرائت $R_{c1} = 1$ باشد مقدار L_1 برابر با ۱۰.۵ است و برای قرائت $R_{c1} = 1.031$ مقدار L_1 برابر با ۲.۳ است بنابراین می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$L_1 = 275.37 - 264.55 R_{c1}, \quad L = 280.85 - 264.55 R_{c1}$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

❖ **ادامه دانه‌بندی به روش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63**

درصد عبوری اصلاحی برای دو نوع هیدرومتر:

$$R_{c2} = R_a + C_t - C_d$$

151H: $$\text{P.P\%} = \frac{160600(R_{c2} - 1)a}{W_s}$$

152H: $$\text{P.P\%} = \frac{R_{c2} a}{W_s} \times 100$$

t	Ra	T(C)	C_t	C_m	C_d	γ_w	μ	G_s	$k(\sqrt{ms})$	a	R_{c1}	R_{c2}	L(cm)	D(mm)	p.p%
15 sec															
30															
1 min															
2															
4															
8															
15															
30															
1 hr															
2															
4															
8															
....															
48															

مثال: آزمایش هیدرومتر در دما ۲۰ درجه سانتیگراد انجام پذیرفت. اگر قرائت خام در دقیقه ۶۰ برابر با ۱.۰۱۰ باشد، مطلوبست الف) قطر متناظر با قرائت انجام شده ب) چند درصد از کل خاک از این قطر کوچکترند؟ ج) نوع هیدرومتر استفاده شده چیست و این نوع از هیدرومتر چه پارامتری را اندازه‌گیری می‌کند؟

$w_s = 50\,\text{gr},\quad c_m = 0.0008,\quad c_d = 0.005,\quad G_s = 2.65,\quad \rho_w = 1\text{gr/cm}^3\ ,\mu = 0.001\text{Pa.s},$

الف) چون دما ۲۰ درجه است بنابراین اصلاح دما ندارد.

$$R_a = 1.010 \ \Rightarrow\ R_{c1} = R_a + c_m = 1.010 + 0.0008 = 1.0108$$
$$R_{c2} = R_a + c_t - c_d = 1.010 + 0 - 0.005 = 1.005$$
$$R_{c1} = -0.00378L(\text{cm}) + 1.0616 = 1.0108 \ \Rightarrow\ L = 13.439\,\text{cm}$$
$$\gamma_w = 9810\,\text{N/m}^3,\ k = \sqrt{\frac{18\mu}{(G_s-1)\gamma_w}} = \sqrt{\frac{18\times 0.001(\text{Pa.s or N.s/m}^2)}{(2.65-1)\times 9810(\text{N/m}^3)}} = 1.0545\times 10^{-3}\sqrt{\text{m.s}}$$
$$D(\text{m}) = k\left(\sqrt{\text{m.s}}\right)\sqrt{\frac{L(\text{m})}{t(\text{s})}} = 1.0545\times 10^{-3}\times\sqrt{\frac{0.13439}{60\times 60}} = 6.44\times 10^{-6}\,\text{m} = 6.44\,\mu\text{m}$$

ب) چون چگالی نسبی خاک ۲.۶۵ است پس $a = 1$ است.

$$\text{PP\%} = \frac{1606(R_{c2}-1)a}{w_s} = \frac{1606(1.005-1)\times 1}{50} = 0.1606 = 16.06\%,$$

ج) این نوع هیدرومتر از نوع 151H است و جرم مخصوص را بر حسب gr/cm^3 است.

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

آزمایش تعیین درصد رطوبت ASTM D2216-71

درصد رطوبت یکی از خواص فیزیکی مهم است . در خاک های ریزدانه پایداری و مقاومت خاک به درصد رطوبت خاک بستگی دارد.

محدودیت آزمایش : برای مصالح دارای مقدار قابل توجهی کانی های هالوزیت، مونت موریونیت، مواد آلی و گچ کاربردی نیست.

شرح آزمایش: برای تعیین درصد رطوبت خاک، ابتدا خاک را وزن می‌کنیم و سپس آن را در دمای 110 ± 5 به مدت ۲۴ ساعت در oven قرار می‌دهیم تا خاک کاملا خشک شود. سپس مجددا آن را وزن می‌کنیم ، درصد رطوبت از رابطه زیر تعیین می‌شود. که در آن W_w وزن آب، W_s وزن خشک خاک، W_1وزن مرطوب خاک با ظرف، W_2 وزن خشک خاک با ظرف و W_c وزن ظرف است. این آزمایش حداقل باید سه بار تکرار شود.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}\times 100 = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c}\times 100$$

نکات: ۱- برای خشک کردن نمونه های بزرگ باید از سینی استفاده کنیم و خاک را روی آن پهن کنیم تا قسمت های داخلی آن خشک شود

۲- برای خشک کردن خاک های گچ دار یا کانی های نظیر ، بهتر است درجه حرارت oven را 60 ± 5 °C ثابت نگه داشته باشیم یا از دستگاه خشک کننده مکشی استفاده شود. (در دمای ۶۰ کانی های آلی یا گچ دار نمی‌سوزند)

۳- اگر خاک بسوزد ، درصد رطوبت خاک بیشتر از حالت عادی می‌شود

۴- وقتی نمونه خشک شد (وزن در ۲ نوبت متوای تقریبا ثابت باشد) ، اجازه می‌دهیم که نمونه سرد شود و سپس نمونه را وزن میکنیم (در مرحله سرد شدن باید نمونه در محلی باشد که رطوبت محیط را جذب نکند)

۵- دقت ترازو برای نمونه های کمتر از ۲۰۰ گرم ، باید با حساسیت ۰.۰۱ گرم باشد و برای نمونه های ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم باید با حساسیت ۰.۱ گرم باشد.

۶- هرچه قدر مصالح درشت دانه‌تر باشد باید نمونه بزرگتر بگیریم. مثلا برای ماسه ریزدانه ۲ میلیمتری ، ۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم نمونه کافی است و برای مصالح درشت دانه مانند شن ۲ سانتیمتری ، ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم نونه در نظر می‌گیریم.

مثال: یک نمونه خاک مرطوب دارای وزن ۵۰۰گرم می‌باشد. پس از خشک کردن آن در گرمخانه در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد، وزن آن به ۴۵۰ گرم تغییر کرد. وزن مخصوص مرطوب خاک و دانه‌های جامد خاک به ترتیب برابر است با ۱.۹ و ۲.۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب.
مطلوبست تعیین ۱- درصد رطوبت ۲- ضریب تخلخل ۳- درجه اشباع

حل:

$$\omega = \frac{W_{wet} - W_s}{W_s} \times 100 = \frac{500-450}{450} \times 100 = 11.11$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} = \frac{450}{2.65} = 169.81\,\text{cm}^3, \quad V_T = \frac{W_{wet}}{\gamma_{wet}} = \frac{500}{1.9} = 263.16\,\text{cm}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_s} = \frac{263.16-169.81}{169.81} = 0.55,$$

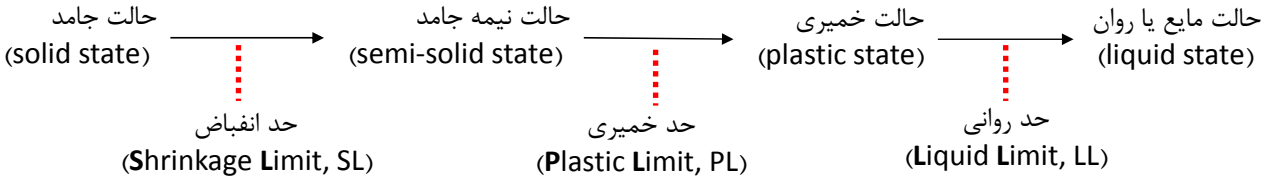
$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w}}{V_v} \times 100 = \frac{500-450}{1 \times (263.16-169.81)} = 53.56\%$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

حدود اتربرگ (Atterberg Limits)

در خاکهای ریزدانه رفتار خاک تا اندازه زیادی به درصد رطوبت طبیعی آن وابسته است . اگر به خاک آب اضافه شود ، حالت های زیر بوجود می آید:



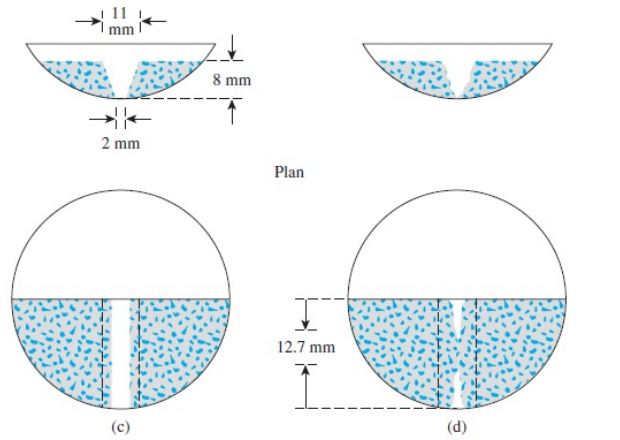
1. **حد روانی،LL** : به درصد رطوبتی از خاک گفته می‌شود که خاک حالت سیال بسیار ویسکوز به‌خود بگیرد. در اینصورت اندرکنش بین ذرات کمتر می‌شود و مقاومت خاک در این حالت ناچیز است .

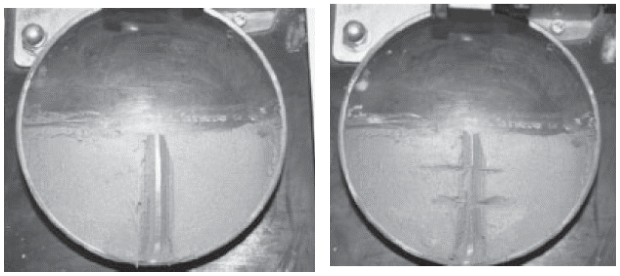
نحوه محاسبه حد روانی : دو روش وجود دارد (روش ASTM D423-66 و روش British Standard)

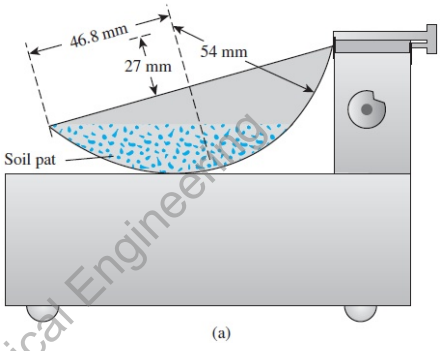
روش ASTM D423-66: مقداری نمونه خاک خمیر شده را داخل یک پیاله برنجی دستگاه کازاگرانده به قطر تقریباً 54 mm میلیمتر قرار می‌دهیم. سپس در نمونه با یک میله‌ی شیاردهنده ، شکافی با مقطع ذوزنقه ای شکل که قاعده کوچک آن در پایین به عرض 2mm و قاعده بزرگ آن 11mm و ارتفاع آن 8mm است، شیاری ایجاد می‌کنیم. سپس با استفاده از حرکت دسته ی دستگاه کازاگرانده با سرعت ۲ دور بر ثانیه (2 cyc/s)این جام بلند خواهد شد و از ارتفاع 1cm به پایه برخورد خواهد کرد. اگر با ۲۵ بار ضربه زدن، 12.7 mm از شیار بسته شود، آنگاه درصد رطوبت خاک همان حد روانی است.

ادامه‌ی حد روانی LL :

مسلماً به ندرت پیش می آید که بر روی خاکی در بار اول با درصد رطوبت خاص آزمایش حد روانی انجام دهیم و درست تحت ۲۵ ضربه 12.7 mm بسته شود. بنابراین بهتر است حداقل این آزمایش را ۳ بار تکرار کنیم. اگر تعداد ضربات برای بسته شدن 0.5 inch ، بیشتر از ۳۵ و یا کمتر از ۱۵ ضربه باشد، آزمایش باید مجددا تکرار شود. حال وقتی ۳ یا ۴ بار آزمایش انجام شد، نمودار نیمه لگاریتمی را با محور افقی تعداد ضربه (N) و محور قائم درصد رطوبت رسم می‌کنیم. این نمودار در محدوده $15 < N < 35$خطی است. بنابراین با رسم این نمودار می‌توان برای تعداد ضربه $N = 25$ ، درصد رطوبت که همان حد روانی است را درونیابی یا برونیابی کرد.





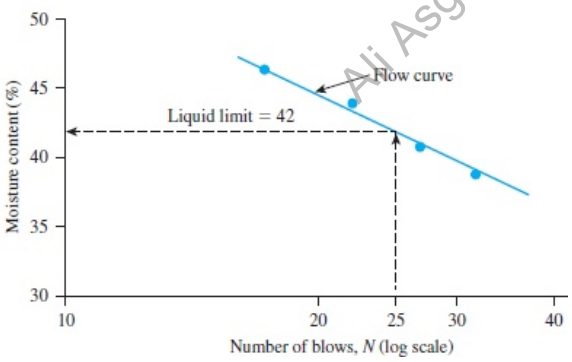


Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

ادامه‌ی حد روانی LL :

مسلماً به ندرت پیش می آید که بر روی خاکی در بار اول با درصد رطوبت خاص آزمایش حد روانی انجام دهیم و درست تحت ۲۵ ضربه 12.7 mm بسته شود. بنابراین بهتر است حداقل این آزمایش را ۳ بار تکرار کنیم. اگر تعداد ضربات برای بسته شدن 0.5 inch ، بیشتر از ۳۵ و یا کمتر از ۱۵ ضربه باشد، آزمایش باید مجددا تکرار شود. حال وقتی ۳ یا ۴ بار آزمایش انجام شد، نمودار نیمه لگاریتمی را با محور افقی تعداد ضربه (N) و محور قائم درصد رطوبت رسم می‌کنیم. این نمودار در محدوده $15 < N < 35$خطی است. بنابراین با رسم این نمودار می‌توان برای تعداد ضربه $N = 25$ ، درصد رطوبت که همان حد روانی است را درونیابی یا برونیابی کرد.



شیب خط $\omega - LogN$ را نشانه روانی می‌گویند که از رابطه‌ی مقابل تعیین می‌شود:

$$I_f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\log \frac{N_2}{N_1}}$$

به پیشنهاد مهندسان ارتش آمریکا با انجام ۲ آزمایش نیز می‌توان LL را پیدا کرد:

$$LL = \omega_N \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$$

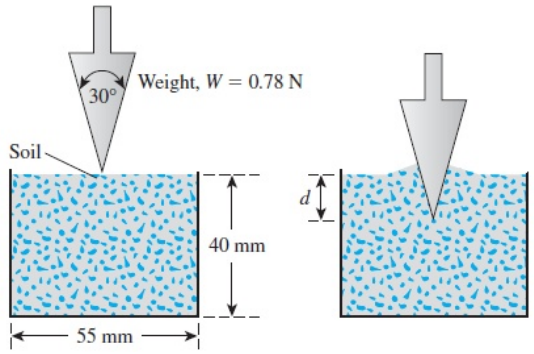
آزمایش به ۲ روش انجام می‌شود: ۱-روش خشک به تر ۲-روش تر به خشک

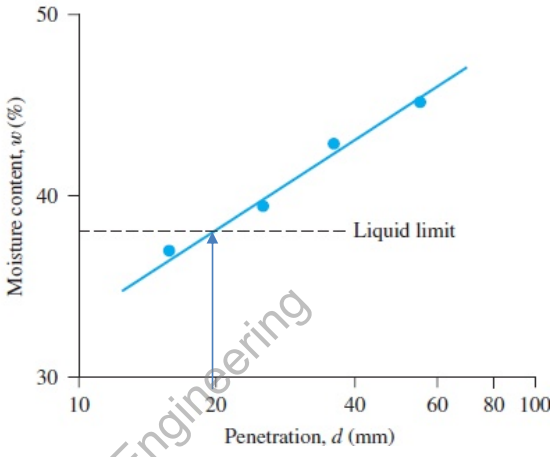
روش اول توصیه می‌شود.چون ایتدا خمیر خاکی با رطوبت کم تهیه می‌شود و سپس برای مراحل بعدی آب به آن اضافه می‌شود. در روش دوم اگر از یک نمونه خاک استفاده شود، باید برای آزمایش بعدی خاک را خشک کنیم. بنابراین روند آزمایش را کندتر و مشکل تر می‌کند.

تعیین حد روانی LL از روش استاندارد انگلیسی(British Standard):

این آزمایش در آسیا و اروپا متداول تر است و به نظر می‌رسد که روش دقیق‌تری است.

روش انجام آزمایش : مخروط به جرم ۸۰ گرم بطور آزاد برای پریود زمانی ۵ ثانیه رها می‌شود، رطوبت نظیر 20mm نفوذ را حد روانی می‌گویند. این روش همان استاندارد ASTM ، حداقل ۳ یا ۴ مرتبه با درصد رطوبت‌های مختلف تکرار شود و نهایتاً مقدار حد روانی تعیین می‌شود.





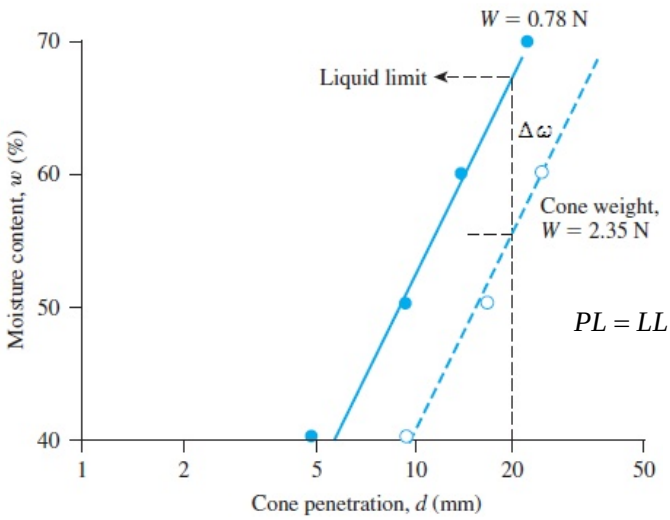
Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

۲-حد خمیری PL: درصد رطوبتی است که در آن خاک به حالت خمیر شکل‌پذیر باشد و کمتر از این حد خاک ترک برمی‌دارد.

حد خمیری از دو روش تعیین می‌شود: الف) از روش استاندارد انگلیسی(British Standard) ب: از روش استاندارد ASTM

الف)تعیین حد خمیری از روش استاندارد انگلیسی(British Standard

برای تعیین حد خمیری از این روش، ابتدا باید حد روانی را از استاندارد انگلیسی تعیین کرد و سپس بجای مخروط ۸۰ گرمی از مخروط ۲۴۰ گرمی استفاده شود و آزمایش را تکرار کنیم. حد خمیری از رابطه زیر تعیین می‌شود:



$$PL = LL - \frac{2\Delta\omega}{\log_{10}\left(\frac{m_2}{m_1}\right)} = LL - 4.2\Delta\omega, \qquad m_1 = 80\,\text{gr},\ m_2 = 240\,\text{gr}$$

ب)تعیین حد خمیری از روش استاندارد ASTM D424

به مقداری از خاک ریزدانه، آب اضافه می‌کنیم تا به حالت خمیری درآید. سپس خاک را با استفاده از انگشتان دست بر روی یک سطح صاف می غلتانیم تا به شکل فتیله تا به شکل فیتیله با قطر 3.2 mm درآید. اگر ترک بخورد، آنگاه درصد رطوبت خاک همان PL است. اگر در این قطر ترک نخورد ، آن را به ۶ تا ۸ قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم و سپس بین انگشتان فشرده و به شکل تقریبا بیضی درمی‌آوریم و دوباره روی سطوح شیشه ای صاف می‌غلتانیم ، با این کار خاک رطوبت خود را از دست می‌دهد . این کار را آنقدر ادامه می‌دهیم تا خاک در قطر 3.2 mm ترک بخورد. درصد رطوبت نمونه ترک خورده همان حد خمیرست.

۳-دامنه یا نشانه خمیری Plasticity Index: اختلاف عددی بین حد روانی و حد خمیری خاک است و مشخص کننده درصد رطوبتی است که در آن حد خاک، به حالت خمیری می‌ماند. درصد رطوبتی است که در آن خاک به حالت خمیر شکل‌پذیر باشد و کمتر از این حد خاک ترک برمی‌دارد.

$$PI = LL - PL,$$

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

نکته: PI برای خاک‌های ریزدانه مطرح است و برای خاک‌های درشت دانه بدون رس این مقدار اهمیتی ندارد برابر با صفر است.

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

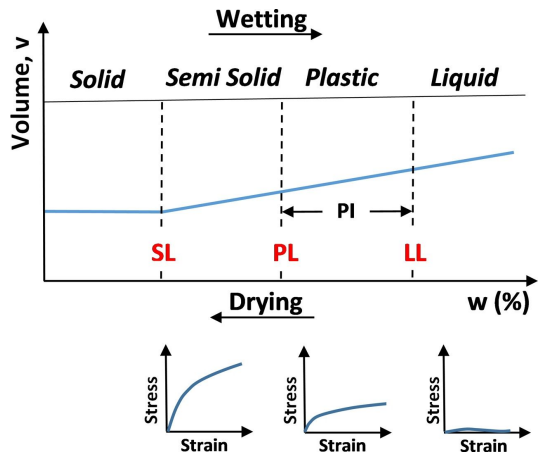
Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

۴-نشانه روانی Liquidity Index: نشانه روانی از رابطه‌ی روبرو تعیین می‌شود:

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

که در آن PL حد خمیری، LL حد روانی و درصد رطوبت فعلی خاک است. مطابق رابطه اگر $LI \geq 1$ باشدیعنی $\omega \geq LL$ است که نشان می‌دهد که خاک در حد روانی یا بالاتر از آن حد قرار دارد. اگر $LI = 0$ باشدیعنی $\omega = PL$ است که نشان می‌دهد که خاک در حد خمیری قرار دارد. در این حالت خاک می‌تواند تا اندازه‌ای مقاومت برشی خوبی داشته باشد.

اگر $LI < 0$ باشدیعنی $\omega < PL$ است که نشان می‌دهد که خاک در حالت نیمه جامد یا جامد قرار دارد. در این حالت خاک مقاومت برشی خوبی دارد.



۵-حد انقباض SL: درصد رطوبتی است که کمتر از آن حد، اضافه یا کم کردن آب به خاک تاثیری در تغییر حجم خاک ندارد. به عبارت دیگر اگر به خاک در حالت جامد آب اضافه یا کم کنیم، آنگاه خاک تغییر حجم نمی‌دهد. اما اگر به خاک در حالت نیمه جامد آب اضافه یا کم کنیم، آنگاه خاک به ترتیب افزایش و یا کاهش حجم می‌دهد. در این حد خاک اشباع است.

حالت نیمه جامد (semi-solid state) با اضافه یا کاهش آب، حجم خاک زیاد یا کم می‌شود. ⟵ حالت جامد (solid state) با اضافه یا کاهش آب، حجم تغییری نمی‌کند.

حد انقباض (Shrinkage Limit, SL)

$S_r = 100\%$

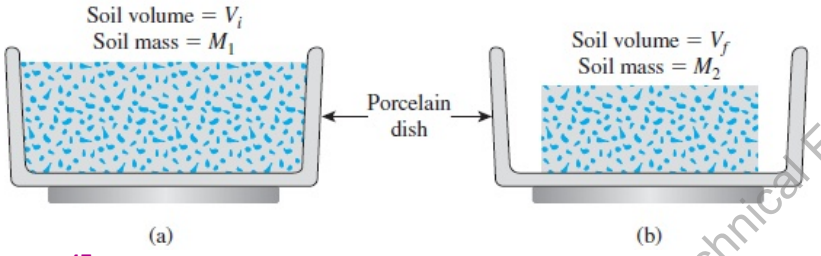
۵-آزمایش تعیین حد انقباض SL (ASTM D427)

خاک خمیر شده را با رطوبت بالا درون ظرف چینی به قطر ۴۴.۵ و ارتفاع ۱۲.۵ میلیمتر می‌ریزیم به طوری که ظرف کاملاً پر شده و سطح خاک را با کاردک صاف می‌کنیم. در اینصورت حجم اولیه خاک(V_1) برابر با حجم درون ظرف است. توجه شود که قبل از ریختن خمیر در ظرف، باید ظرف خالی بهمراه درب آن را وزن کنیم (W_C)، سپس وزن ظرف پر شده از خاک خمیر شده(W_1) بهمراه درب آن را نیز وزن می‌کنیم. سپس ظرف پر از خمیر را برای مدت ۲۴ ساعت درون اون قرار می‌دهیم تا خاک کاملاً خشک شود و سپس مجددا آن را بهمراه درب وزن می‌کنیم (W_2) و با داشتن وزن خمیر مرطوب و وزن خشک شده‌ی آن می‌توانیم در صد رطوبت آن را از رابطه زیر محاسبه کنیم:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}\times 100 = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c}\times 100$$

بعد از خشک کردن خاک، حجم خاک خشک شده (V_2) را به کمک جیوه تعیین می‌کنیم. خمیر خاک پس از خشک شدن کاهش حجم دارد. اگر حجم از کاهش یافته را دوباره با جیوه پر کنیم آنگاه حجم جیوه و حجم از دست رفته ΔV باهم برابر خواهد بود. انتخاب جیوه برای تعیین حجم کاهش یافته به دو دلیل است: اولاً سیال باست، ثانیاً به داخل ذرات خاک نفوذ نمی‌کند. نهایتا حد انقباض $S.L$ از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$SL = \omega - \frac{\Delta V \gamma_w}{W_2 - W_c}\times 100 = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} - \frac{V_1 - V_2}{W_2 - W_c}\gamma_w\right)\times 100 = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} - \frac{V_i - V_f}{M_2}\rho_w\right)\times 100$$



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

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

کلیات، ترکیب، شناخت و طبقه بندی خاک

مثال) یک نمونه خاک اشباع دارای حجم $55\ cm^3$ و جرم $100\ gr$ است. اگر خاک را کاملا خشک کنیم حجم آن $50\ cm^3$ و جرم آن $85\ gr$ می‌شود. حد انقباض این نمونه از خاک چند درصد است؟

$$SL = \left(\frac{100-85}{85} - \frac{55-50}{85}\times 1\right)\times 100 = 11.8$$

مثال بعدی) حد انقباض یک نمونه ۱۰٪ و چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک برابر با ۲.۶۵ است. مطلوبست تعیین درصد تخلخل خاک در رطوبت حد انقباض؟

$$Sr\times e = \omega G_s \Rightarrow 1\times e = 0.1\times 2.65 \Rightarrow e = 0.265$$

تمرین با Excel– نتایج آزمایش سقوط در جدول زیر نشان داده شده است. مطلوبست تعیین حدود روانی و خمیری و نشانه روانی و خمیری در صورتی که درصد رطوبت طبیعی خاک برابر با ۳۲٪ باشد.

پارامتر	مخروط ۸ گرمی				مخروط ۲۴۰ گرمی			
نفوذ (mm)	۵.۵	۷.۸	۱۴.۸	۲۲	۳۲	۸.۵	۱۵	۲۱	۳۵
رطوبت ٪	۳۹	۴۴.۸	۵۲.۵	۶۰.۳	۶۷	۳۶	۴۵.۱	۴۹.۸	۵۸.۱

فعالیت خاک رس، A (clay activity) و پتانسیل تورم S: فعالیت خاک رس تابعی از خاصیت خمیری خاک رس است که خود وابسته به نوع کانی و مقدار درصد وزنی ذرات ریزتر از ۰.۰۰۲ میلیمتر (C) در خاک است.

$$A = \frac{PI}{C}$$

$$S\left(\text{lb/ft}^2\right) = 3.6\times 10^{-5}\times A^{2.44}\times C^{3.44}$$

مثال	میزان فعالیت	A
کائولینیت	غیرفعال	$A < 0.75$
ایلیت	فعال عادی	$0.75 < A < 1.25$
مونت موریونیت	فعال	$A > 1.25$

درجه تورم	S
کم	0-1.5
متوسط	1.5-5
زیاد	5-25
خیلی زیاد	>25

طبقه بندی خاک (Soil Classification)

یک طرح طبقه بندی روشی را فراهم می‌آورد که خاکها، با خصوصیات مشابه را در یک گروه خاص قرار دهد. چندین روش برای طبقه بندی خاکها به دلیل کاربردهای مختلف طراحی شده است که مهمترین آن ها عبارتنداز:

۱- روش یونیفاید،USCS (Unified Soil Classification System): یک روش کلی است که ASTM پیشنهاد می‌کند.

۲- روش آشو، AASHTO (American Association of State Highway & Transportation Officials): این روش در راهسازی ها کاربرد فراوانی دارد.

۳- سیستم طبقه بندی اداره‌ی کشاورزی آمریکا(USDA)

۱- روش یونیفاید: این سیستم خاک را به سه گروه اصلی درشت دانه، ریزدانه و آلی تقسیم بندی می‌کند. در این سیستم هر خاک معمولا به صورت دوحرفی نمایش داده می‌شود که حرف اول آن جزء گروه اصلی و حرف دوم آن بعنوان گروه فرعی است.

نوع خاک(گروه اصلی)	علامت	گروه فرعی	علامت
شن (Gravel)	G	خوب دانه بندی(well-graded)	W
ماسه (Sand)	S	بد دانه بندی(poorly-graded)	P
لای یا سیلت (Silt)	M	حد روانی کم(Low Liquid Limit)	L
رس (Clay)	C	حد روانی زیاد(High Liquid Limit)	H
آلی (Organic Soil)	O		

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

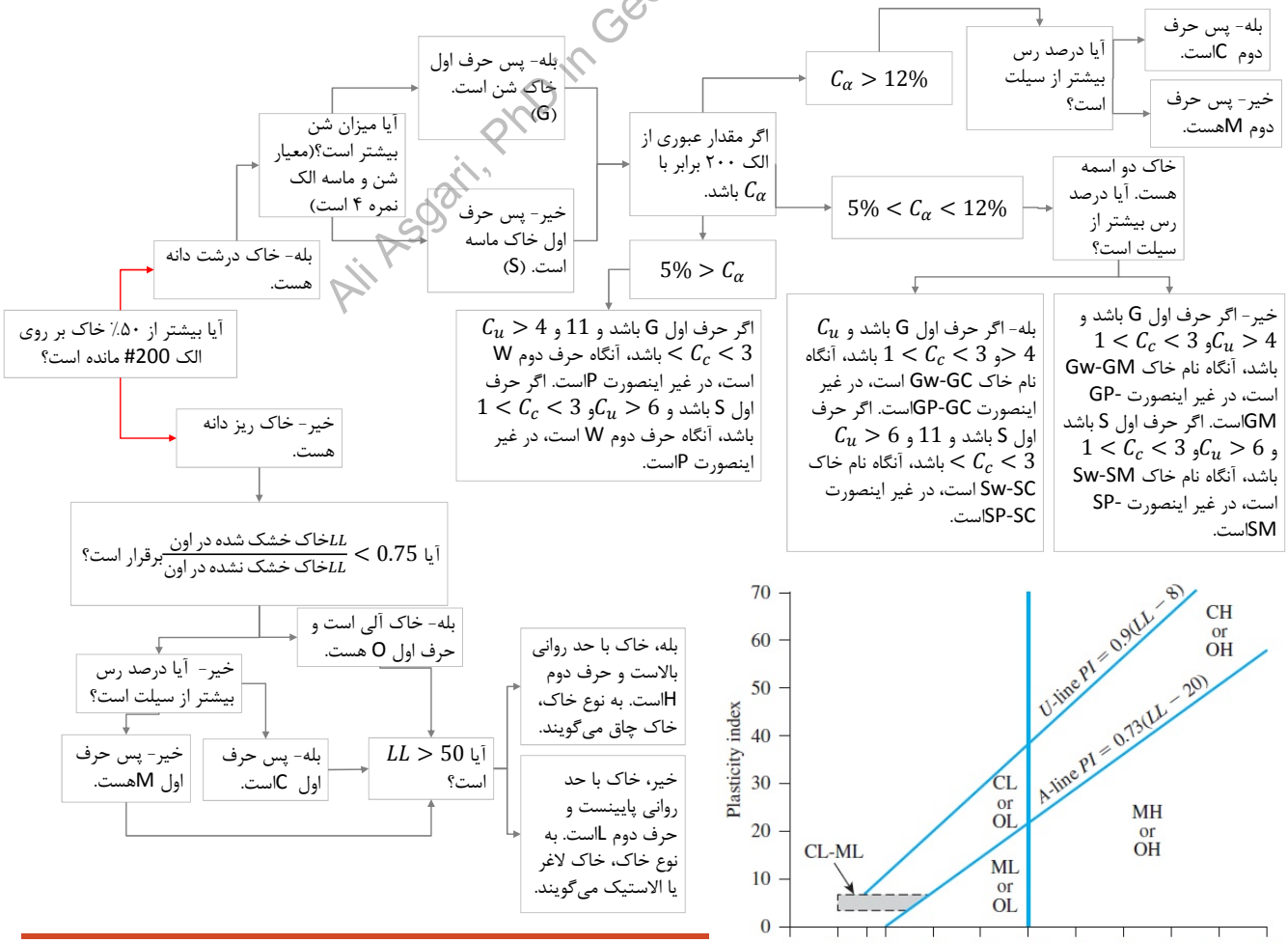


Figure 5.3

طبقه بندی خاک (Soil Classification)

۱- روش یونیفاید،USCS

۲- روش آشو، AASHTO (American Association of State Highway & Transportation Officials):همانطور که اشاره شد، این روش در راهسازی ها کاربرد فراوانی دارد. گروهها از A-1 تا A-8 تقسیم بندی می‌شوند که بهترین و از خاکهای آلی هستند که اصلا برای راهسازی مناسب نیستند. بنابراین هرچه شماره بیشتر باشد از مرغوبیت آن برای زیرسازی‌ها کاسته می‌شود. برای اینکه مرغوبیت خاک در یک گروه خاص سنجیده شود، از ضریب گروه که تابعی از حدود اتربرگ و درصد رد شده از الک #200 است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$G_I = (C_\alpha - 35)\big(0.2 + 0.005(LL - 40)\big) - 0.01(C_\alpha - 15)(PI - 10)$$

باید مقدار G_I به عدد صحیح گرد شود و هر چقدر این مقدار کوچکتر باشد نشانه مرغوبیت بیشتر خاک جهت راهسازی است. ممکن از برای برخی از خاکها عدد منفی شود که در آن صورت برابر با صفر می‌گیریم.

- درشت دانه
  - $A-1$ ماسه و شن با قلوه سنگ $G_I = 0$
    - $A-1-a$
    - $A-1-b$
  - $A-2$ ماسه و شن رس دار یا لای دار
    - $A-2-4$
    - $A-2-5$
    - $A-2-6$
    - $A-2-7$
  - $A-3$ ماسه ریز یکنواخت
- ریز دانه
  - $A-4,\ A-5$ خاک لای دار
  - $A-6,\ A-7$ خاک رس دار
  - $A-8$ خاک آلی

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

General classification	Granular materials (35% or less of total sample passing No. 200)						
	A-1			A-2			
Group classification	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve analysis (percentage passing)							
No. 10	50 max.						
No. 40	30 max.	50 max.	51 min.				
No. 200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
Characteristics of fraction passing No. 40							
Liquid limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel, and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General subgrade rating	Excellent to good						

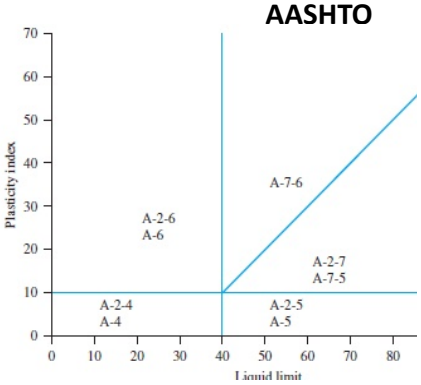
General classification	Silt-clay materials (more than 35% of total sample passing No. 200)			
Group classification	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5[a] A-7-6[b]
Sieve analysis (percentage passing)				
No. 10				
No. 40				
No. 200	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Characteristics of fraction passing No. 40				
Liquid limit	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual types of significant constituent materials	Silty soils		Clayey soils	
General subgrade rating	Fair to poor			

[a] For A-7-5, $PI \le LL - 30$
[b] For A-7-6, $PI > LL - 30$

طبقه بندی خاک (l Classification

۱- روش یونیفاید،USCS

۲- روش آشو، AASHTO



مثال۱: نام خاک را در سیستم آشو، AASHTO تعیین کنید؟ در صورتیکه درصد عبوری از الک #10 برابر با۱۰۰٪و از الک #40 برابر با ۸۰٪ و از الک #200 برابر با ۵۸٪ است. حد روانی و نشانه خمیری به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۰ است.

حل: با توجه به درصد عبوری الک الک #200 بیشتر از ۳۵٪ است بنابراین خاک می تواند در رده کروه A-4 به بالا قرار بگیرد. از طرفی حد چون حد روانی برابر با ۳۰ است پس فقط می تواند A-4 یا A-6 باشد ولی چون نشانه خمیری ۱۰ هست پس نام خاک فقط می تواند A-4 باشد.

$$G_I = (C_\alpha - 35)\left(0.2 + 0.005(LL - 40)\right) - 0.01(C_\alpha - 15)(PI - 10) = (58 - 35)\left(0.2 + 0.005(30 - 40)\right) = 3.45 \approx 3$$

نام خاک A-4(3) است.

نکته: همراه با نام خاک گروه آن آورده شود.

تمرین: نام خاک را در سیستم آشو، AASHTO تعیین کنید؟ در صورتیکه درصد عبوری از الک #200 برابر با ۹۵٪ است. حد روانی و نشانه خمیری به ترتیب برابر با ۶۰ و ۴۰ است.

تمرین بعدی: نام خاک را در سیستم آشو، AASHTO تعیین کنید؟ در صورتیکه درصد عبوری از الک #10 برابر با۶۰٪و از الک #40 برابر با ۳۰٪ و از الک #200 برابر با ۱۵٪ است. حد روانی و حد خمیری به ترتیب برابر با ۲۸ و ۱۶ است.

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering

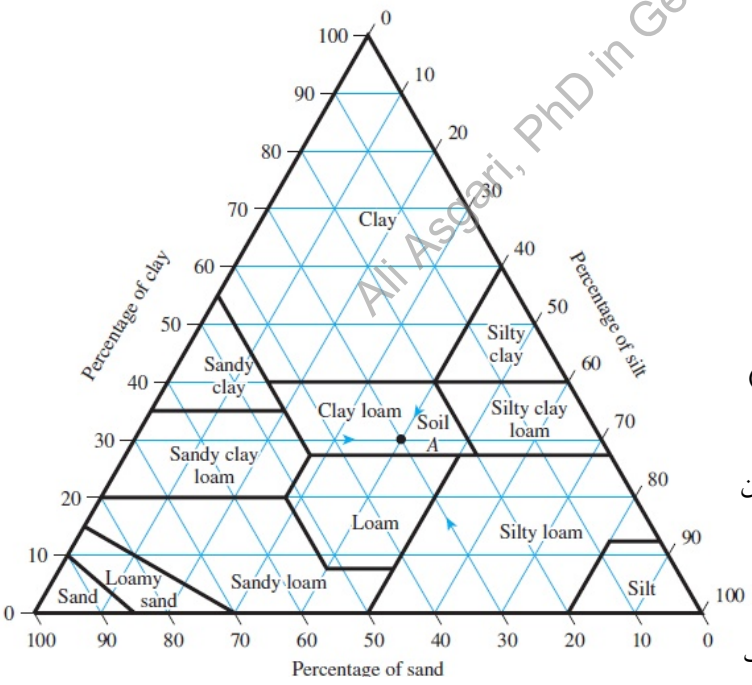
طبقه بندی خاک (Soil Classification)

۱- روش یونیفاید،USCS

۲- روش آشو، AASHTO

۳- سیستم طبقه بندی اداره‌ی کشاورزی آمریکا(USDA)

در این سیستم درشت دانه ها مانند قلوه سنگ و شن جایگاهی ندارند.اگر در خاکی شن و جود دارد در نامگذاری باید درصد شن را از کل خاک کم کرد و درصد های خاکهای دیگر را مطابق با مثال اصلاح کرد و سپس با کمک گراف مقابل خاک نامگذاری می شود. در این سیستم خاک ماسه‌ای دارای اندازه 0.05-2.0mm ، خاک سیلتی دارای قطر 0.002-0.05mm و خاک رسی در اندازه‌ی کوچکتر از 0.002mm می‌باشد.



مثال) نام خاک با مشخصات مقابل در سیستم USDA چیست؟

درصد شن	٪۱۰
ماسه	٪۲۰
سیلت	٪۴۱
رس	٪۲۹

مطابق با گراف درصدهای خاکها را روی اضلاع مشخص می کنیم و موازی با خطوط لوزی ادامه می‌دهیم تا در یک نقطه بهم برسند. سپس نام خاک تعیین می شود که در اینجا **خاک لوم رسی شن دار** است. این خاک یک خاک بسیار مناسب برای کشاورزی است.

$$\text{درصد اصلاح شده‌ی ماسه} = \frac{20}{100-10}\times 100 = 22.2\%$$

$$\text{درصد اصلاح شده‌ی سیلت} = \frac{41}{100-10}\times 100 = 45.6\%$$

$$\text{درصد اصلاح شده‌ی رس} = \frac{29}{100-10}\times 100 = 32.2\%$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnical Engineering