واحد شیراز

مکانیک خاک (1)

فصل اول

«روابط وزنی و حجمی»

استاد : دکتر علیرضا حاجیانی بوشهریان

@geomechanicsiau

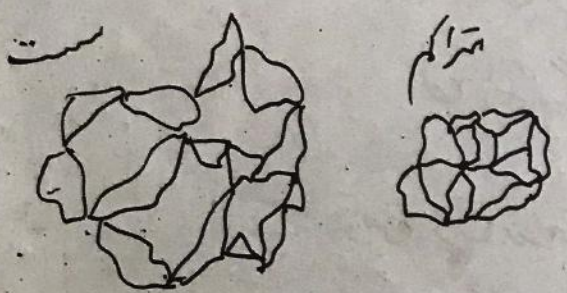
ـ ساختار و ساختمان خاک :

منظور آرایش هندسی ذرات خاک در ارتباط با یکدیگر می باشد. در بین عوامل زیادی که بر ساختار خاک اثر می گذارند: ـ شکل، اندازه و ترکیب کانیهای موجود در ذرات خاک
ـ ترکیب آن موجود در خاک

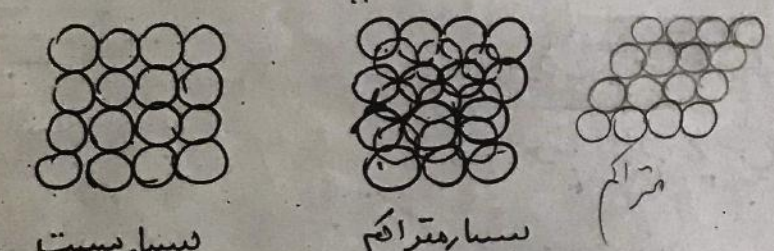
دسته بندی کلی خاکها :

یا ساختار غیر چسبنده
ـ " چسبنده

الف خاکهای غیر چسبنده : ـ تک دانه



ـ لانه زنبوری



ـ می توانند بارهای استاتیکی معمولی را تحمل کنند ولی در برابر بارهای سنگین و دینامیک بصاحتمان آنها شکسته و نشست زیادی می کند.

ـ البته این فرضی کاملاً دست بالا و محافظه کارانه است. زیرا دانه های خاک گردی نیستند و ذراتش یک اندازه نیستند کوچکترها بدرون فضای خالی بزرگ رفته و نسبت منفذ کمتر از مقادیر فوق

ـ از طرفی خوردی منظمی در شکل ذرات، افزایش نسبت منافذ را نشان می دهد.

ـ با در نظر گرفتن مجموع دو عامل فوق، نسبت منافذ مورد نظر در خاکهای واقعی تقریباً مانند نسبت منافذ بدست آمده در کره های یکسان می باشد.

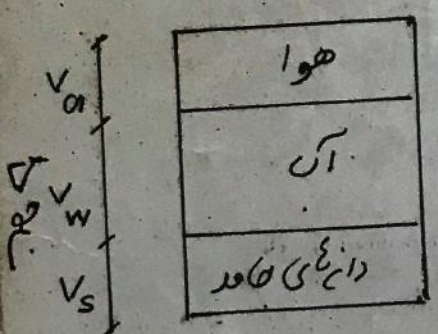
مکانیک خاک (کارشناسی ـ کارشناسی ارشد)

سرفصل‌ها:

۲ـ روابط وزنی حجمی
۲ـ طبقه بندی و دانه بندی
۲ـ تراکم
۳ـ حرکت آب در خاک
۱ـ تنش مؤثر
۱ـ تنش در توده خاک
۳ـ نشست خاک
۲ـ مقاومت برشی
۲ـ پایداری شیروانی‌ها
۱ـ فشار جانبی خاک و دیوارهای حائل

دکتری عمران علیرضا حاجیانی پرشیان
نظام مهندسی ۰۰۰-۰۰۵۰۲-۳-۳۲
علیرضا حاجیانی
کارشناسی ارشد
ژئوتکنیک

ـ روابط وزنی ـ حجمی (ترکیب خاک)



$$V = V_s + V_w + V_a$$

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

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

V_v حجم فضای خالی

نسبت تخلخل $e = \frac{V_v}{V_s}$

پوکی، تخلخل $n = \frac{V_v}{V}$

رابطه بین e و n :

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

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

روابط اصلی :

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

میزان رطوبت، $$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

درجه اشباع : $$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

وزن مخصوص دانه‌ها : $$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

چگالی توده‌ی خاک

روابط ترکیبی :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{V_w}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s}} = \frac{V_w}{V_s \cdot e}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_s \cdot e} \times \frac{W_w}{W_w} \times \frac{W_s}{W_s} \Rightarrow S_r = \frac{W_s}{V_s (W_w/V_w)} \times \frac{W_w}{W_s \cdot e}$$

$$S_r = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \times \frac{\omega}{e} \Rightarrow S_r \cdot e = \omega G_s$$

If soil is saturated: $S_r = 1 \Rightarrow e = \omega G_s$ ($V_w = V_v$)

γ_w ، وزن مخصوص آب بوده و مقدارش $9.81 \frac{KN}{m^3} \simeq 10$ می‌باشد.

or $1 \frac{gr}{cm^3}$; $1000 \frac{kg}{m^3}$

وزن مخصوص طبیعی :

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

" " تر :

" " ظاهری :

وزن مخصوص خشک :

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

رابطه بین وزن مخصوص تر و خشک :

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

$$\Rightarrow \gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$$

$$\Rightarrow \gamma_s = G_s \cdot \gamma_w$$

رابطه بین وزن مخصوص دانه‌های خاک و وزن مخصوص خشک:

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_d} = \frac{W_s/V_s}{W_s/V} = \frac{V}{V_s} \Rightarrow \gamma_d = \gamma_s\left(\frac{V_s}{V}\right)$$

وزن مخصوص اشباع: $(S_r = 1)$ $(V_w = V_v)$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + wG_s}{1+e} \times \gamma_w = \frac{G_s + e}{1+e}\cdot\gamma_w$$

$$= \underbrace{\frac{G_s}{1+e}}_{\gamma_d}\gamma_w + \underbrace{\frac{e}{1+e}}_{n}\gamma_w \Rightarrow \gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$$

وزن مخصوص موثر (غوطه وری)

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

تراکم نسبی $D_r = \dfrac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$; $e = e_{max}$ توده خاک در شل‌ترین حالت $\Rightarrow D_r = 0$

توده خاک در متراکم‌ترین وضعیت $e = e_{min} \Rightarrow D_r = 1$

برای کامپیکت کنید: تراکم خاکهای دانه‌ای

مثال: خاکی با درصد رطوبت ۱۵٪ و چگالی دانه‌های ۲٫۶۷ در شرایط کاملاً اشباع داریم. وزن مخصوص اشباع آنرا تعیین کنید. (γ_{sat})

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

$$wG_s = Se \Rightarrow 0.15 \times 2.67 = e \Rightarrow e = 0.4$$

$$\gamma_{sat} = \frac{9.81(2.67 + 0.4)}{1+0.4} = 21.9 \ KN/m^3$$

مثال: درصد رطوبت خاکی ۱۲٪ است. وزن بخش خاک ۱۵٫۵ KN است. برای رساندن درصد رطوبت به ۲۰٪ چند لیتر آب لازم است.

$$\Delta w = 0.2 - 0.12 = 0.08 = \frac{\Delta W_w}{W_s} \Rightarrow \Delta W_w = 0.08 \times 15.5 = 1.24 \ KN$$

وزن آب اضافه شده

W_s بدون تغییر مانده

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \Rightarrow V_w = \frac{1.24}{9.81} = 0.126 \ m^3$$

مثال: نمونه‌ای از رس اشباع، حجم $100\,cm^3$ و وزن $210\,gr$ پس از خشک شدن، حجم $90\,cm^3$ و وزن $174\,gr$ می‌رسد. چگالی دانه‌ها چیست؟

الف) 2.65 ب) 2.53 ج) 2.61 د) 2.72

حل اول:

$$W_w = 210 - 174 = 36\,gr$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{36}{174} = 0.21$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_T}{V_T} = \frac{210}{100} = 2.1\,gr/cm^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w (G_s + e)}{1+e} \Rightarrow \frac{(G_s + 0.21 G_s)}{1 + 0.21 G_s} \times 1 = 2.1 \Rightarrow G_s = 2.72$$

حل دوم:

$$\left(\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)}{1+e}\gamma_w \;;\; \gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}\right) \Rightarrow \gamma_{sat} - \gamma_d = n\gamma_w$$

$$\gamma_{sat} = 2.1\,gr/cm^3 \;;\; \gamma_d = \frac{W_d}{V} = \frac{174}{100} = 1.74\,gr/cm^3$$

$$\Rightarrow n = 0.36 \Rightarrow e = 0.56 \Rightarrow 1.74 = \frac{G_s \times 1}{1 + 0.56} \Rightarrow G_s = 2.72$$

مثال: وزن $2245\,cm^3$ از خاک $4176\,gr$ است و حاضر $200\,gr$ از این خاک را خشک کنیم وزن آن $168\,gr$ می‌رسد. با فرض $G_s = 2.7$ نسبت تخلخل را بیابید.

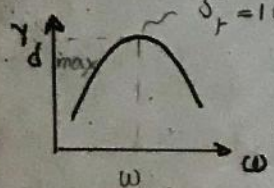
الف) 0.728 ب) 0.91 ج) 0.56 د) 0.5

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{4176}{2245} = 1.86\,gr/cm^3$$

$$W_w = 200 - 168 = 32\,gr \Rightarrow \omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{32}{168} = 0.19$$

$$\gamma = \frac{\gamma_w (1+\omega) G_s}{1+e} \Rightarrow 1.86 = \frac{1 \times 2.7 (1 + 0.19)}{1+e} \Rightarrow e = 0.728$$

نکته: اگر تمام هوای موجود در خاک در اثر تراکم خارج شود، خاک، حداکثر وزن مخصوص خشک خود را پیدا می‌کند.

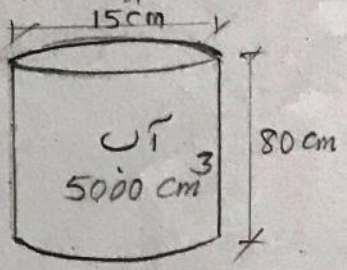


مثال: در خاکی با $G_s = 2.65$ و $\omega_{opt} = 0.115$، مطلوب است حداکثر وزن مخصوص خشک

$$S_r \cdot e = \omega G_s \Rightarrow e = 0.3 \Rightarrow \gamma_{d_{max}} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{2.65 \times 1000}{1 + 0.3} = 2038.5\,kg/m^3$$

مثال: مقداری ماسه خشک در لوله‌ای استوانه‌ای شکل به قطر 15 cm و ارتفاع 80 cm ریخته شده است. حجم آب لازم برای اشباع نمودن خاک درون استوانه $5000\ cm^3$ است. وزن مخصوص (استوانه دارای کف است)
ذرات جامد خشک ماسه چند کرم در سانتی متر مکعب است. $\gamma_s = 27\ KN/m^3$

$V_v = V_w = 5000\ cm^3$ در ماسه خشک تمام حجم فضای خالی مربوط به هوا است.



$V = \frac{\pi D^2}{4} \times h = 14137.17\ cm^3$

$V_s = V - V_v = 14137.17 - 5000 = 9137.17\ cm^3$

$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \Rightarrow W_s = 2.7\left(9137.17 \times 10^{-6}\right) = 246703 \times 10^{-6}\ KN$

$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{246703 \times 10^{-6}}{14137.17} = 1.75\ KN/m^3$

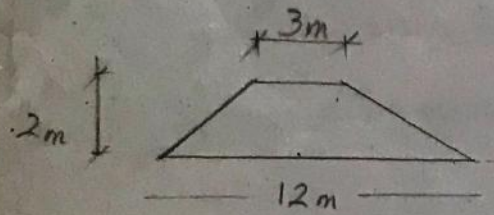
Ⓨ V, V_v, G_s, e, γ_d

نکته: اگر V_1 متر مکعب از خاک با نسبت تخلخل e_1 داشته باشیم و بخواهیم درون تغییر در میزان رطوبت (همان وزن) و آن V_2 متر مکعب از آن خاک با نسبت تخلخل e_2 درست آوریم، خواهیم داشت:

$W_1 = W_2$ (خاک خشک ثابت) $\Rightarrow V_1 \frac{G_s(1+\omega)}{1+e_1}\gamma_w = V_2 \frac{G_s(1+\omega)}{1+e_2}\gamma_w$

$\Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{\gamma_{d_2}}{\gamma_{d_1}} = \frac{1+e_1}{1+e_2}$

مثال: خاکریزی به شرح رودرو و به طول 800 متر در کنار یک رودخانه احداث خواهد شد و لازم است توسط غلتک تا رسیدن به تخلخل 0.7 متراکم شود. برای احداث این خاکریز قرضه‌ای با نسبت تخلخل 1 چقدر باید خاکبرداری شود؟



$\begin{cases} V_1 = (12+3) \times 1 \times 800 = 12000\ m^3 \\ e_1 = 0.7 \end{cases}$ $\begin{cases} V_2 = ? \\ e_2 = 1 \end{cases}$ $\Rightarrow \frac{12000}{1+0.7} = \frac{V_2}{2}$

$\Rightarrow V_2 = 14117.65\ m^3$

نکته: اگر بدون تغییر در حجم خاک رطوبت آنرا تغییر دهیم، تغییری در وزن مخصوص خشک خاک بوجود نمی‌آید.

بنابراین

$$\gamma_{d_1} = \gamma_{d_2} \Rightarrow \frac{\gamma_1}{1+w_1} = \frac{\gamma_2}{1+w_2} \checkmark$$

$$\left(\gamma_d = \frac{W_s}{V}\right) = cte$$

مثال: وزن مخصوص طبیعی خاکی با رطوبت ٪۲۰، ۲۱۶۰ kg/m³ است. اگر مقداری از رطوبت این خاک بدون کاهش حجم تبخیر شود و وزن مخصوص آن به ۲۰۰۰ kg/m³ برسد، درصد رطوبت آن چقدر است؟

$$\frac{2160}{1+0.2} = \frac{2000}{1+w_2} \Rightarrow w_2 = .111 = 11.1\% \checkmark$$

نکته: اگر بخواهیم مقداری آبی را که باید به خاک اضافه شود تا آن را اشباع کند، به دست آوریم باید وزن خاک در حالت اشباع را از کل آوریم ($W_{sat} = \gamma_{sat} \times V$) سپس وزن موجود خاک را از آن کسر کنیم:

$$W_{کل} = W_w + W_s$$
$$W_s = cte \Rightarrow \Delta W = \Delta W_w$$

مثال: در خاکی لوکی ۰/۳۹، جگالی دانه‌های خاک ۲/۶۷ و درجه رطوبت ٪۱۵ است. مطلوب است وزن آبی که باید به $20\,m^3$ از آن خاک اضافه شود تا ٪۸۰ اشباع گردد.

$$n = .39 \Rightarrow e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.39}{1-0.39} = 0.64$$

$$\gamma = \frac{G_s(1+w)}{1+e}\gamma_w = \frac{2.67(1+0.15)}{1+0.64} \times 1000 = 1872.3\ kg/m^3$$

$$W_{کل\ موجود} = 20 \times 1872.3 = 37446\ kg$$

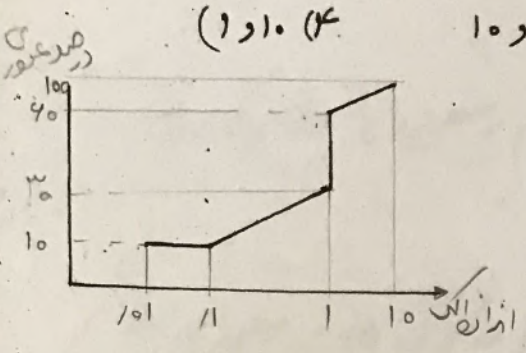
$$\gamma_{.8} = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.67 + 0.8 \times 0.64}{1+0.64} \times 1000 = 1940.2\ kg/m^3$$

$$W_{کل\ اشباع\ .8} = 20 \times 1940.2 = 38804\ kg \Rightarrow \Delta W = 38804 - 37446$$
$$= 1358\ kg$$
$$\Delta V = 1.358\ m^3$$

علیرضا حاجیانی
کارشناسی ارشد
ژئوتکنیک

مثال: درصورتیکه ضریب یکنواختی C_u و ضریب انحنا C_c باشد، با توجه به منحنی زیر مقادیر تقریبی به ترتیب

۴) ۱۰ و ۱ ۳) ۱۰ و ۱۰ ۲) ۱۰۰ و ۱ ۱) ۱۰۰ و ۱۰ :پاسخ



$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{1}{1 \times 0.1} = 10 \qquad C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1}{0.1} = 10$$

گزینه ۳ صحیح است

نکته: بین وزن وزن مخصوص طبیعی یک خاک با وزن مخصوص خشک و اشباع آن رابطه زیر برقرار است.

$$\gamma = \gamma_d + S_r(\gamma_{sat} - \gamma_d)$$

اثبات:

$$\gamma = \gamma_d(1+\omega)$$

$$= \gamma_d\left(1 + \frac{\omega e}{e} + \frac{\omega G_s}{e} - \frac{\omega G_s}{e}\right)$$

$$= \gamma_d\left(1 + \frac{\omega G_s}{e}\left(\frac{e}{G_s} + 1 - 1\right)\right)$$

$$= \gamma_d\left(1 + S_r\left(\frac{e + G_s - 1}{G_s}\right)\right)$$

$$= \gamma_d\left(1 + S_r\left(\frac{\gamma_{sat}(G_s + e)}{\gamma_w} - 1\right)\right)$$

$$= \gamma_d\left(1 + S_r\left(\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_d} - 1\right)\right)^{\gamma_w}$$

$$= \gamma_d + S_r(\gamma_{sat} - \gamma_d)$$

علیرضا حاجیانی
کارشناسی ارشد
ژئوتکنیک

واحد شیراز

مکانیک خاک (1)

فصل دوم

«طبقه بندی و دانه بندی خاک»

استاد : دکتر علیرضا حاجیانی بوشهریان

@geomechanicsiau

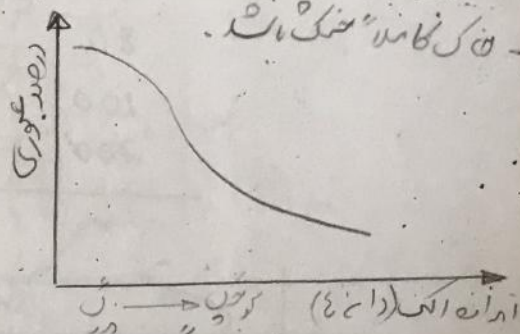
دانه بندی :

آزمایشی که نتیجه آن منحنی، در سیم نمودار موسوم به منحنی دانه بندی می گردد.

دو روش برای تعیین منحنی دانه بندی خاک:

۱ - دانه بندی با الک: مخصوص ذرات با قطر درشت تر از ۰.۰۷۵ میلیمتر می باشد.

۱ - باید بار بستگاه الک بود.
۲ - خاک کاملاً خشک باشد.



لرزاندن نمونه خاک بر روی یک سری الک که اندازه های آن از بالا به پایین کاهش می یابد. ابتدا خاک درون کوره خشک شده پس کلوخه های کاملاً خرد شده و از الکها عبور داده می شود. بعد از اتمام مرحله لرزاندن الکها و عبور کامل خاک از آنها جرم خاکهای باقیمانده روی الکها اندازه گیری شده و جرم کل نمونه تقسیم می شود (درصد عبوری)

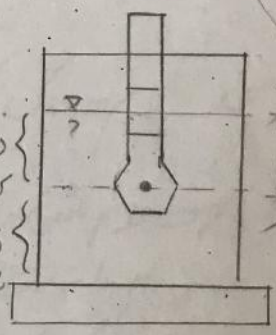
۲ - هیدرومتری: در پایه اصول ته نشینی ذرات خاک در آب استوار است. (رابطه دانه)

$$V = \frac{2}{9}\frac{g(\rho_s - \rho_f)}{\eta}\times\left(\frac{D}{2}\right)^2$$

- ۵۰ گرم خاک عبوری از الک ۲۰۰ (قطر کمتر از ۰.۰۷۵)
- ماده پراکنده ذرات خاک (هگزا فسفات سدیم)
- آب مقطر

V (cm/s) : سرعت
ρ_s (gr/cm³) : چگالی
ρ_w (gr/cm³) : چگالی
η (Dyne.s/cm²) : لزجت

(فاصله سطح آزاد آب تا مرکز ثقل هیدرومتر در هر لحظه)



حجم نمونه خاک + محلول پراکنده را با آب مقطر به ۱۰۰۰ cc می رسانیم. چگالی نمونه را در محلول قرائت می کنیم. طوری کالیبره می شود که در هر زمان مقدار خاکی را که در حالت معلق است و جرم خاک ته نشین می دهد. از طرفی قطر ذرات معلق در عمق نمونه (L) با کمک قانون استوکس قابل محاسبه است.

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

(عمق نمونه بر حسب سانتی متر) ~ (مدت زمانی که از شروع آزمایش گذشته (دقیقه))

$$K = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}}$$

η : لزجت آب

مثال: در یک آزمایش هیدرومتری نتایج زیر ارائه شده است: $G_s = 2.65$; $K = 0.01286$

$T = 25^\circ$ = درجه حرارت آزمایش

$L = 12$ cm. (@ $t = 30$ min)

مطلوب است تعیین قطر کوچکترین ذره ای که در لحظه اندازه گیری از نقطه اندازه گیری عبور کرده است.

$$D_{mm} = K\sqrt{\frac{L\,(cm)}{t\,(min)}} \Rightarrow D = 0.01286\sqrt{\frac{12}{30}} = 0.00813\ mm$$

اندازه الکهای استاندارد آمریکایی

شماره الک	اندازه روزنه (mm)
4	4.75
8	2.36
10	2.00
20	0.85
40	0.425
80	0.18
100	0.15
200	0.075

سیستم	شن	ماسه	لای	رس
AASHTO	2 - 76.2	2 - 0.075	0.002 - 0.075	< 0.002
متحد	4.75 - 76.2	0.075 - 4.75	< 0.075	

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

$$P\% = \frac{1606 (R_{c2} - 1) a}{W_s} \times 100 \qquad 151H$$

$$a = \frac{G_s \times 1.65}{(G_s - 1.) \times 2.65}$$

$$R_{c2} = R_a \pm C_t - C_d$$

C_d : Zero Correction

C_m : Meniscus Correction

آزمایش تعیین حد جمعی: میزان رطوبتی است که با ازاء آن میله‌ای به قطر ۳/۲ میلیمتر که از خمیر خاک ساخته شده ترک بخورد.

آزمایش تعیین حد انقباض: نمونه‌ای از خاک را در یک ظرف چینی گذاشته در کوره خشک می‌کنند و وزن و حجم آن در لحظه‌ای که دیگر با خشک شدن از آن کاسته نمی‌شود.

$$SL = \omega_i - \Delta\omega = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} - \frac{(V_i - V_d)\rho_w}{m_2} \right) \times 100$$

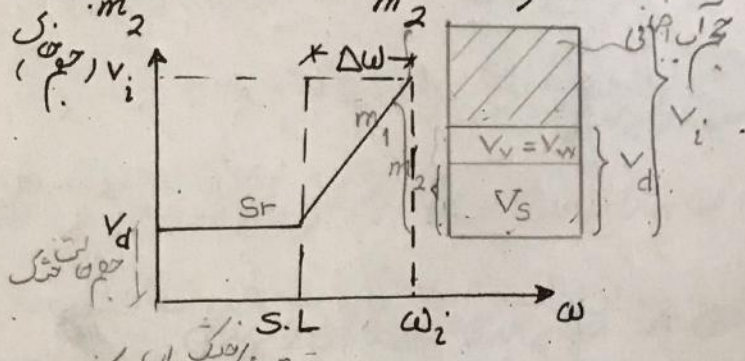
$\Delta V_w \rho_w = \Delta w_w$

m_1 : (gr) جرم خاک اولیه

m_2 : (gr) " خشک

V_i : (cm^3) حجم اولیه

V_d : (cm^3) " خاک خشک



وقتی خاکی را خشک می‌کنیم، رطوبت و فضای خالی آن پر شده و حجم آن کم می‌شود. رطوبت در نقطه انقباض یا SL می‌ماند.

طبقه بندی خاک:

- طبقه بندی بافت خاک (یا دانه‌بندی) USDA : بر حسب اندازه ذرات
- " خاکها بر حسب استفاده: علاوه بر اندازه، شکل خواص خمیری هم در نظر دارد. (آشتو، USCS یونیفاید)

- سیستم طبقه‌بندی متحد: نام هر خاک ترکیبی از ۲ حرف می‌باشد حرف اول نوع خاک با توجه به اندازه دانه‌ها و S و M یا C و حرف دوم صفتی برای حرف اول:

O: خاک آلی ؛ حد متوسط بین خمیری : L ؛ دانه‌بندی شده : P ؛ خوب دانه‌بندی شده : W

Peat : Pt خاک لای دار : M ؛ خاک رس دار : C ؛ خاصیت خمیری بالا : H

شباهتها و تفاوت‌ها دو روش طبقه بندی متحد و آشتو:

دارای	ندارد
خوب W	H خمیری زیاد
دانه بندی شده P	L " کم

۱- هر دو روش بر مبنای بافت و خواص خمیری خاک استوار است.

۲- در آشتو خاکهای آلی تعریف شده‌اند.

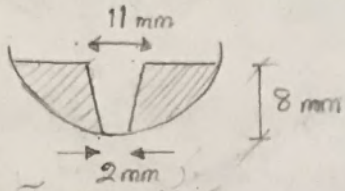
۳- دانه‌بندی و سیلت در سیستم متحد الک ۴ و در سیستم آشتو الک ۱۰ می‌باشد.

۴- در سیستم متحد خاکهای تمیز دارد و ماسه دار به وضوح از هم تفکیک می‌شوند در آشتو این چنین نیست.

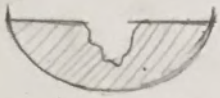
۵- سیستم متحد دلیل تقسیم بندیهای بیشتر دقت بالاتری دارد.

۶- در سیستم متحد ملاک رد دانه بودن بیش از ۵۰ درصد عبوری از الک ۲۰۰ است اما در آشتو

حاجیای
۰۹۱۷[redacted]۷۲



شیار روی کوپن قبل از آزمایش

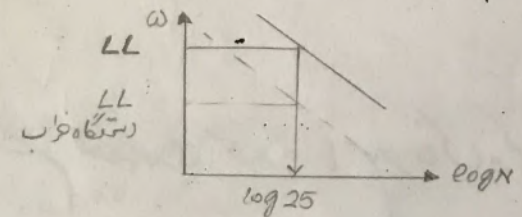


شیار روی کوپن بعد از آزمایش

با پیچاندن دسته دستگاه، فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰ میلیمتری روی آن می‌افتد. در صورتی که بر اثر آن به علت ۲۵ ضربه فنجان، شیار ایجاد شده در نمونه داخل فنجان در طول ۱۲٫۷ mm پیوسته می‌شود، حد روانی نامیده می‌شود.

حداقل ۴ آزمایش روی خاک با رطوبت‌های مختلف انجام می‌شود.

نکته: اگر در آزمایش کاساگرانده دستگاه خراب شد و کاسه بیش از حد معمول بالا بیاید، LL کمتر از حد معمول است یعنی در نمیل انرژی بیشتر در رطوبت کمتری به حد روانی می‌رسیم.



اندازه مؤثر، ضریب یکنواختی و ضریب دانه بندی :

- اندازه مؤثر : اندازه مؤثر قطر مربوط به درصد عبوری ۱۰ درصد می باشد یا (D_{10})

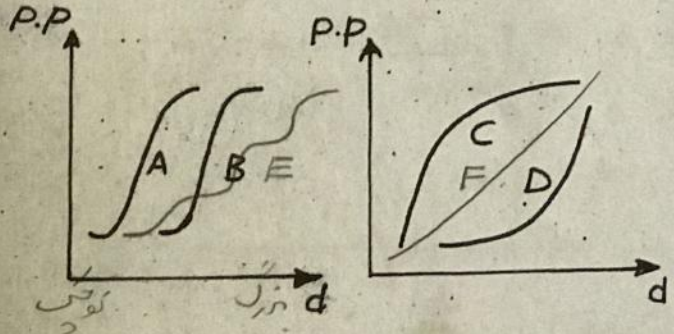
D_{10} : چه قطری است که ۱۰ درصد دانه ها از آن ریزترند .

- ضریب یکنواختی : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

- ضریب دانه بندی : $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$

کیفیت دانه بندی :

خاک دانه بندی شده : اگر اکثر دانه ها در روی یک الک قرار گیرند.



منحنی A: دانه بندی شده دارای دانه بندی یکنواخت بوده و فاقد ریزدانه است

منحنی B : " " فاقد ریزدانه است

" C : دانه بندی شده با ریزدانه بیشتر

" D : " " درشت دانه "

منحنی E : خاک دانه بندی شده با دانه بندی منفصل یا روی بعضی از الکها دانه نمی ماند.

" F : " خوب " " روی الکها به مقدار کافی و تقریباً مساوی با الکهای دیگر باقی می ماند

خاک خوب دانه بندی شده ⇐

شن { $C_u \geq 4$, $1 \leq C_c \leq 3$

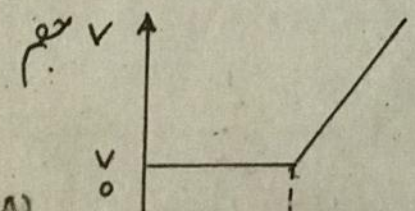
ماسه { $C_u \geq 6$, $1 \leq C_c \leq 3$

تقسیم بندی خاک از نظر خمیری :

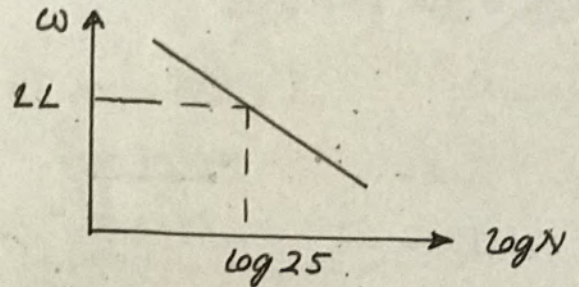
$\omega = \frac{W_w}{W_s}$

روان	خمیری	نیمه جامد	جامد
	LL (حد روانی)	PL (حد خمیری)	SL (حد انقباض)

حد انقباض: SL درصد رطوبتی که با کاهش رطوبت دیگر کاهش حجمی در خاک مشاهده نشود.



حد روانی: LL آزمایش کازاگرانده



✓ تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار

هر ضربه 0.1 KN/m^2 مقاومت برشی است.

معادل

$$I_f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\log(\frac{N_2}{N_1})} \Rightarrow \omega = -I_f(\log N) + C$$

شیب خطوط جریان

مثال: در یک آزمایش کازاگرانده نتایج زیر حاصل شده؛ LL ؟

1: $N_1 = 19$; $\omega_1 = 25\%$

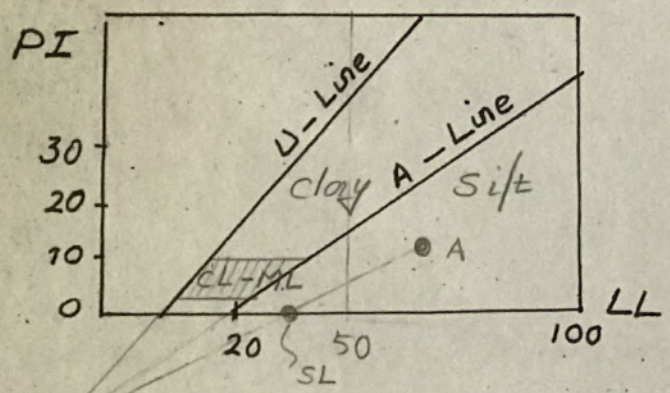
2: $N_2 = 27$; $\omega_2 = 16\%$

$$I_f = \frac{0.25 - 0.16}{\log\frac{27}{19}} = 0.59 \Rightarrow 0.25 = -0.59 \log 19 + C$$

$$\Rightarrow C = 1 \Rightarrow LL = -0.59 \log 25 + 1$$

$$LL = 17.5\%$$

نمودار کسرگرانده:



$$PI = LL - PL$$

A: $PI = 0.73(LL - 20)$

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

شاخص قوام یا سفتی:

A $\begin{cases} LL = -43.5 \\ PI = -46.5 \end{cases}$ $I_C = \frac{LL - \omega}{PI}$ درصد رطوبت طبیعی

هرچه این عدد کوچکتر باشد خاک نرم تر است

CL-ML: $4 \le PI \le 7$

شاخص روانی: (سفتی نسبی)

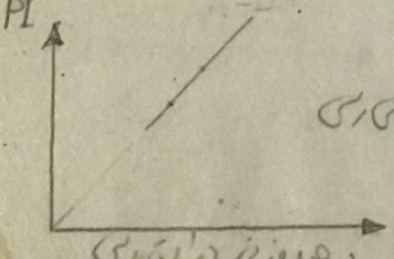
$$LI = \frac{W - PL}{PI} = I_L$$

$$I_C + I_L = 1$$

سفتی هم می تواند با شاخص روانی خاک محک زده شود

شاخص فعالیت:

$$A = \frac{PI}{\text{درصد وزنی رس}}$$



نشانی برای شناسایی پتانسیل تورم خاکهای رسی

نکته: هرچه درصد رسی خاک بیشتر باشد تغییر حجم آن نیز بیشتر خواهد شد.

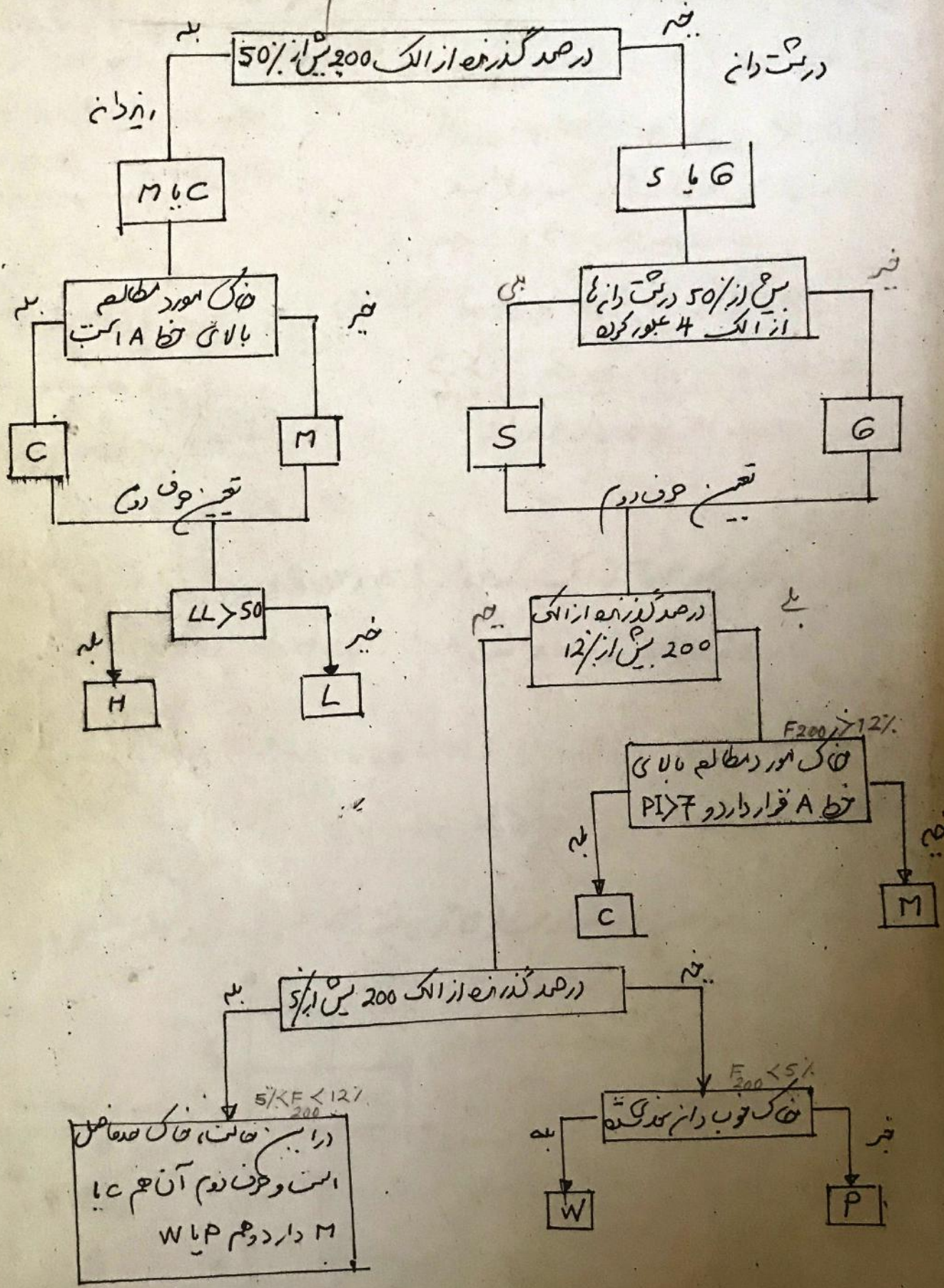
وزن کل نمونه = 500 gr

نمره الک	وزن نمونه باقیمانده روی هر الک (gr)	وزن نمونه عبوری از الک (gr)	درصد نمونه عبوری (gr)
# 4	200	300	$= \frac{300}{500} \times 100 = 60\%$
# 10	100	200	$= \frac{200}{500} \times 100 = 40\%$
# 100	50	150	$= \frac{150}{500} \times 100 = 30\%$
# 200	50	100	$= \frac{100}{500} \times 100 = 20\%$
Pan (سینی)	100	0	✓

Check کنترل

دکتر حامی

نمودار سیستم طبقه بندی متحد



مثال: اگر در نمونه‌ای خاک حد روانی برابر ۳۰٪ و حد خمیری ۱۵٪ باشد نام خاک را مشخص کنید. (دو نمونه)

درصد گذشته از الک 10 = 56%
درصد گذشته از الک 200 = 10%

$C_u = 26.67$ ، $LL = 30\%$

$C_c = 0.15$ ، $PL = 15\%$

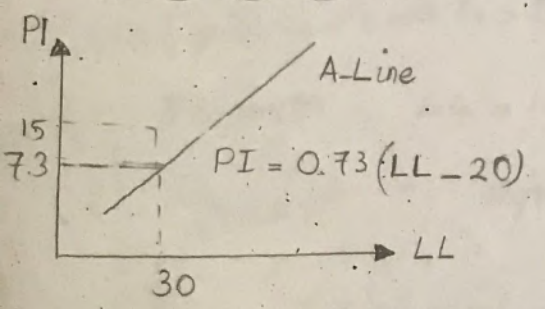
فرضیات مسأله

$P_{NO200} = 10\% < 50\% \Rightarrow$ G or S

$P_{NO.10} = 56\% \Rightarrow P_{NO.4} > 56\%$

منافذ الک ۴ درشت‌تر از الک ۱۰ می‌باشد

$\Rightarrow$ خاک ماسه‌ای است (S)



$PI = 0.73(30 - 20) = 7.3\%$

$\Rightarrow$ SP − SC

خاک حداقل کمی چسبنده است $\Rightarrow$ $12\% < P_{NO200} < 15\%$ از طرفی

$C_c < 1 \Rightarrow$ خاک دانه‌بندی نشده (P)

$\Rightarrow$ C خاک در ناحیه بالای خط A قرار دارد.

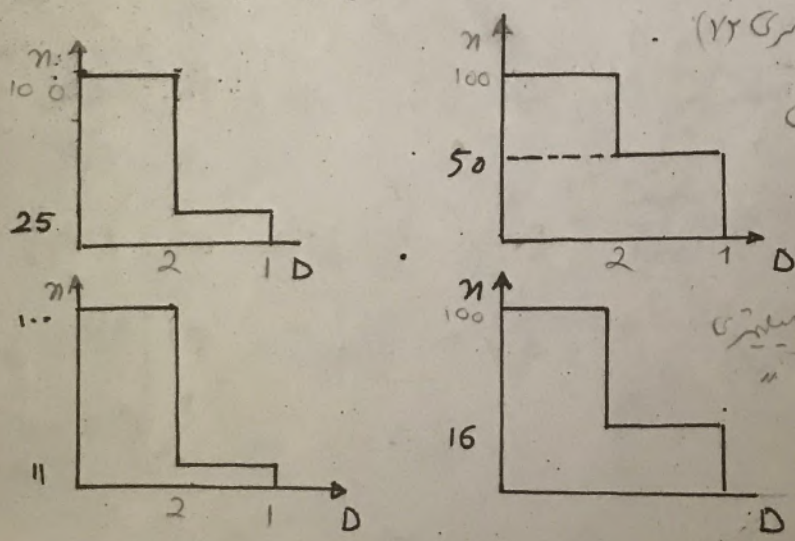
مثال: درخاکی درصد عبوری از الک ۲۰۰ برابر ۸۶٪ و حد روانی و حد خمیری به ترتیب برابر با ۷۴٪ و ۲۵٪ باشند نام خاک در طبقه‌بندی یونیفاید چیست؟

$P_{NO200} = 86\% > 50\% \Rightarrow$ M or C

$LL = 74\%$
$PL = 25\%$
$\Rightarrow PI = 74 - 25 = 49\%$ ، $PI_{A\text{-}Line} = 0.73(74 - 20) = 39.42$

بالای خط A قرار دارد و $LL > 50\% \Rightarrow$ CH

مثال: یک ماسه مصنوعی از تعداد مساوی گوی شیشه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلیمتر تشکیل شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه کدام است؟ (سراسری ۷۲)



نام میلیم وزن خشک خاک رگ مصنوعی با اندازه قطری چه درصدی از وزن کل خشک خاک است.

$$\frac{\text{وزن گوی‌های میلیمتری}}{\text{" ۲ " "}} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{\text{تعداد گویها}}{n \times \gamma \times v_1} = \frac{4 \times \frac{\pi D_1^3}{3}}{n \times \gamma \times v_2} = \frac{4 \times \frac{\pi D_1^3}{3}}{4 \times \frac{\pi D_2^3}{3}}$$

$$= \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 = \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}$$

$$\frac{W_1}{W} = \frac{1}{9} = 0.11 = 11\%$$

حد انقباض خاکی ۸٫۵٪ است. درصد تخلخل آن در رطوبت حد انقباض کدام است؟ (چگالی نسبی قسمت جامد خاک G_s، ۲٫۶ است.)

۱) ۰٫۱۷ ۲) ۰٫۲۲۱ ۳) ۰٫۳۲۷ ۴) ۰٫۱۸۵

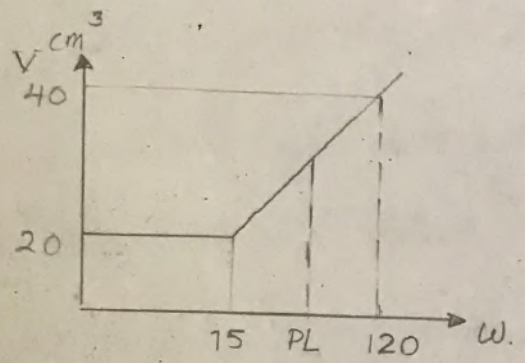
$S_r = 1$

$Se = wG_s \Rightarrow e = 0.085 \times 2.6 = 0.221$

اگر حجم نمونه‌ای در حد روانی و در خشک‌ترین حالت به ترتیب ۴۰ و ۲۰ cm^3 باشد با داده‌های جدول روبرو حجم نمونه را در حد جمعی بیابید.

$PI = 75$ ، $LL = 120$ ، $SL = 15$

۱) ۲۵٫۷ cm^3 ۲) ۲۶٫۳ cm^3 ۳) ۲۸٫۴ cm^3 ۴) ۲۷٫۱ cm^3



$$V - 20 = \frac{40-20}{120-15}(w-15)$$

$$V = 0.19(w-15) + 20$$

@ $w = (120-75) = 45 \Rightarrow V = 25.7\ cm^3$

نتایج حاصل از دانه‌بندی خاک به شرح زیر است خاک از نوع:

۱) SW ۲) SP ۳) GW ۴) GP

D mm	درصد عبوری
#4 4.75	80
2	74
0.85	60 → D_{60}
0.3	50
0.18	30 → D_{30}
0.15	10 → D_{10}
#200 0.075	3

بیش از ۵۰ درصد دانه‌ها از الک ۴ عبور کرده (ماسه)

کمتر از ۱۲٪ از الک ۲۰۰ عبور کرده

عبوری از الک ۲۰۰ کمتر از ۵٪ است.

خاک دانه‌بندی شده

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 5.67 < 6 \Rightarrow$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = 0.25$$

واحد شیراز

مکانیک خاک (1)

فصل سوم

«تراکم»

استاد : دکتر علیرضا حاجیانی بوشهریان

@geomechanicsiau

تراکم : عملی که طی آن هوای خاک بیرون رانده می شود و $\frac{2}{3}$ ذرات بهم نزدیک شده و $\frac{3}{4}$ درگیری بین آنها افزایش یابد.

مزایای روش تراکم - تراکم باعث افزایش مقاومت برشی خاک

- کاهش نشست
- کم شدن تورم دانه ها

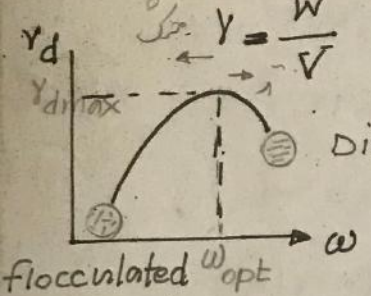
آزمایش تراکم استاندارد (پروکتور) : میزان رطوبتی است که با ازاء آن خاک بهترین تراکم را دارد. $\omega_{optimum}$

نحوه آزمایش: خاک مورد نظر هر بار با مقادیر مختلف آب مخلوط شده و در قالبی به قطر 10 cm در سه لایه تقریباً مساوی ریخته شده و هر لایه با 25 ضربه چکش 2,5 کیلوگرمی طوری متراکم شود که ارتفاع سه لایه تقریباً مساوی شود. (ارتفاع قالب 12,7 cm)

وزن خاک + قالب و حجم آن تعیین می شود بنابراین γ قابل محاسبه است. (عضو ی از خاک)

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \Rightarrow \quad \gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$$

اکنون نمودار γ_d را در برابر ω رسم می کنیم :



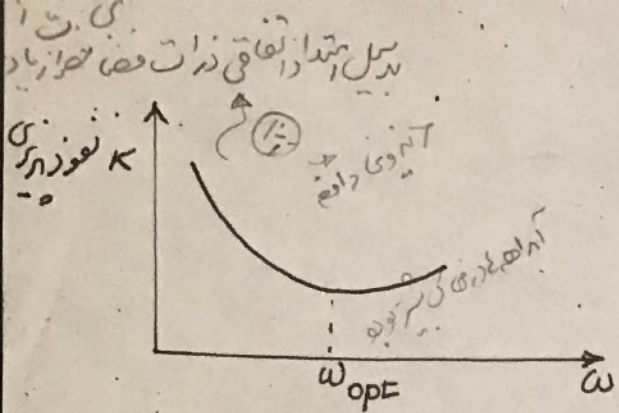
عدم تناسب وزن ذرات خاک در ناحیه خشک: در سمت راست نقطه بیشترین تراکم، وزن های لایه روی هم بیشتر است و ذرات را محکم تر به هم فشار می دهند و ذرات کاهش می یابد.

نکته : علت استفاده از وزن مخصوص خشک بجای استفاده از وزن مخصوص طبیعی در منحنی تراکم : مقاومت خاک فشرده به کمک ذرات جامد یا وزن مخصوص خشک بستگی دارد نه γ_{wet}

- دلیل آنکه وزن مخصوص خشک ابتدا با اضافه شدن درصد آب افزایش می یابد آن است وقتی خاک خشک باشد (سمت چپ نمودار تراکم) ساختار خاک فولکوله بوده ذرات آرایش نامنظمی دارند و اصطکاک آنها هم زیاد است.

با اضافه کردن آب (ادامه مرطوب) ذرات راحتی روی هم حرکت کرده و متراکم تر می شوند. آب که بیشتر اضافه شد نمونه عملاً در حالت اشباع رسیده آب جای ذرات را می گیرد بنابراین وزن مخصوص خشک پایین می آید.

نکته: تأثیر تراکم در نفوذپذیری خاک

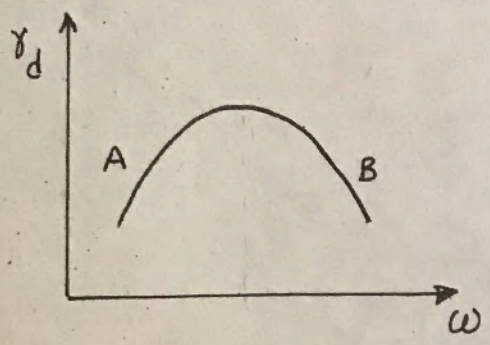


مینیمم K در حوالی ω_{opt} خواهد بود.

یعنی با کاهش یا افزایش رطوبت تراکمی می توان نفوذپذیری خاک را تغییر داد.

پس در سدهای خاکی همگن می توان قسمت میانی سد را با درصد رطوبتی بیشتر از ω_{opt} کوبید.

تمرین: منحنی تراکم یک خاک در آزمایشگاه بصورت زیر است. کدام یک از گزینه های زیر درست است؟



۱ - نفوذپذیری در قسمت A بیشتر از B است.

۲ - در فشار کم نشست A بیشتر از B است.

۳ - مقاومت برشی در هر بخش منفی یکسان است.

۴ - نفوذپذیری در رطوبت بهینه ماکزیمم است.

در خاک رس اشباع، تراکم کمتر از (B) در قالب های رس را بوازات هم در می آورد و آب بین دانه ها را خارج کرده و باعث کاهش حجم خاک و کمتر از بین دانه ها نفوذ می کند.

در آزمایش تراکم خاکهای رسی کدام یک از جملات زیر صحیح است؟ (سراسری ۷۲)

۱ - با افزایش انرژی تراکم از مقدار رطوبت بهینه کاسته شده و دانسیته افزایش می یابد.

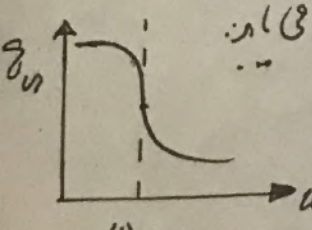
۲ - " " " " " " و دانسیته خاک هر دو کاسته می شود.

۳ - " " " " " بهینه و دانسیته خاک هر دو افزایش می یابد.

۴ - با ازاء انرژی تراکم ثابت با افزایش دامنه خمیری خاک (PI) دانسیته نیز افزایش می یابد.

نکته: تأثیر تراکم در مقاومت:

- با افزایش درصد رطوبت مقاومت فشاری مصدود شده کاهش می یابد.



همچنین دلیل اگر تراکم در γ_d بالایی کوبیده شود خاک که در رطوبت خشک کوبیده شود مقاومت بالاتری دارد.

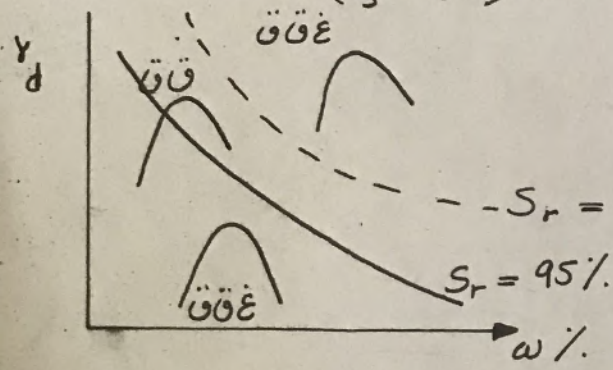
کنترل تراکم: برای یک میزان رطوبت معلوم وزن مخصوص خشک حداکثر γ_{dmax} زمانی بدست می‌آید که هیچ هوایی در فضای حفرات نباشد یعنی درجه اشباع یک باشد. بنابراین می‌توان حداکثر وزن مخصوص خشک را از رابطه زیر تعیین کرد:

$$\gamma_{zav} = \gamma_{dmax} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + G_s \cdot \omega}$$

معادله منحنی هوای صفر یا منحنی اشباع صد.

در حالی که نمونه خاک ۱۰۰ درصد اشباع نباشد:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + (G_s \cdot \omega / S_r)}$$



زمانی منحنی تراکم قابل قبول می‌باشد که نقطه اوج منحنی بین اشباع ۱۰۰٪ و ۹۵٪ قرار گیرد.

مثال: مطلوب است محاسبه وزن مخصوص خشک حداکثر در یک آزمایش تراکم با رطوبت ثابت ۱۵ درصد با فرض $G_s = 2.7$

$$\gamma_{zav} = \gamma_{dmax} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + G_s \omega} = \frac{2.7 \times 9.81}{1 + 2.7 \times 0.15} = 18.85$$

تذکر: انرژی تراکم را از رابطه زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$E = \frac{\text{تعداد لایه} \times \text{ارتفاع سقوط چکش} \times \text{تعداد ضربات در هر لایه}}{\text{حجم قالب}}$$

دکتری مهندسی علیرضا حاجیانی بوشهریان
نظام مهندسی ۳۲-۳-۰۰۰۵۰۲

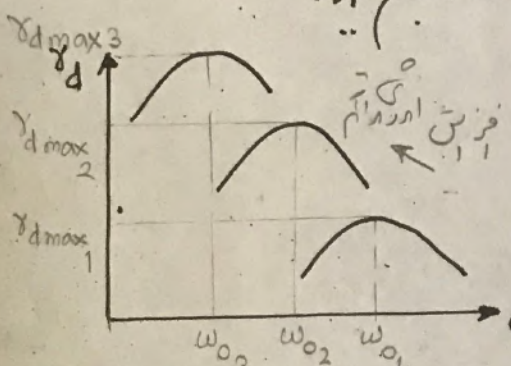
در کارگاه:

با داشتن γ_{dmax} آزمایشگاه و ω_{OPE} ، در کارگاه با افزایش یا کاستن از رطوبت طبیعی خاک رطوبت را به رطوبت بهینه می‌رسانند و خاک را متراکم می‌کنند. در پایان تراکم، وزن مخصوص خشک خاک متراکم تعیین شده و با γ_{dmax} آزمایشگاه مقایسه می‌شود.

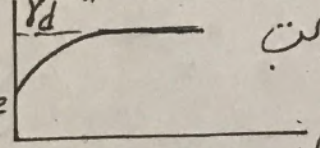
$$\frac{\gamma_{d\ field}}{\gamma_{d\ max\ (lab)}} = \frac{\text{وزن مخصوص خاک متراکم شده در کارگاه}}{\text{حداکثر وزن مخصوص خشک در آزمایشگاه}} = \text{درجه تراکم} \simeq 0.95 = 95\%$$

- عوامل مؤثر در تراکم:

(a) اندرژی تراکم: اگر آزمایش با اندرژی‌های مختلف انجام گیرد.

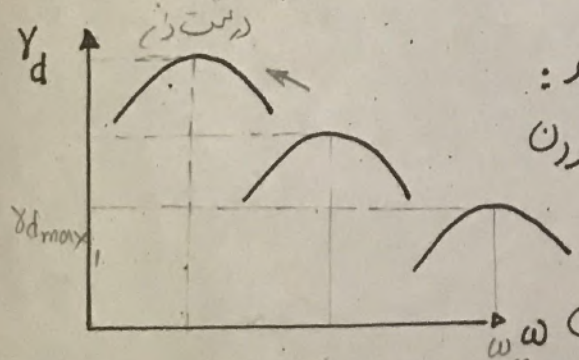


نکته: با افزایش اندرژی تراکم، وزن مخصوص خشک تا یک حد مشخص افزایش می‌یابد بعد از آن γ_{dmax} ثابت می‌ماند پس در عمل تعداد رفت و برگشت‌های غلتک نباید از یک مقدار معین بیشتر باشد زیرا عملاً بی‌فایده است.



(b) نوع خاک: اگر اندرژی تراکم ثابت باشد:

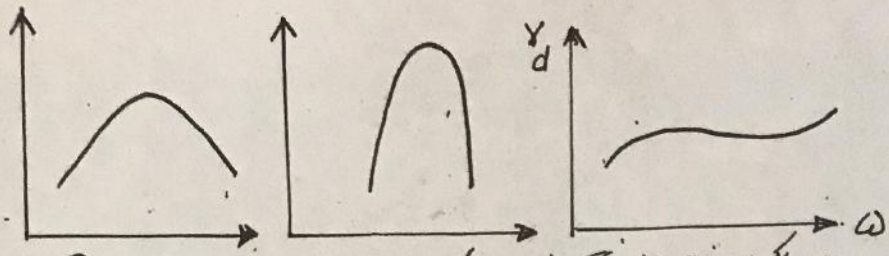
خاک درشت دانه را برای متراکم کردن مناسب‌تر از ریزدانه است.



نکته: علت اینکه تراکم درشت دانه‌ها بهتر از ریزدانه‌ها می‌باشد:

ریزدانه‌ها سطح ویژه بیشتری دارند لذا برای آغشته کردن آنها با آب و کاهش اصطکاک نیاز به رطوبت بیشتری است و این رطوبت بیشتر فضای زیادی از فضای خالی خاک را اشغال می‌کند و مانع از تراکم بیشتر خاک می‌گردد.

نکته: اگر لای در نمودار تراکم



GW, SW
CL, CH

خاکهای لای دار (سیلت ها)

ماسه تمیز دانه بندی نشده

در بیل کشی هوسینگی کمتر از لغزش دانه ها در اطراف یکدیگر در تراکم بیشتر جلوگیری می نماید.

مثال: وزن مخصوص خشک یک نمونه خاک در آزمایش در کوتاه $20\frac{KN}{m^3}$ ؛ این خاک در محل کارگاه دارای رطوبت ٪13 بوده که با درجه ی تراکم ٪95 متراکم شده، فرض $G_s=2.68$ و $\gamma_w=10$

لوکی را تعیین کنید: (الف) ٪29 (ب) ٪34 (ج) ٪41 (د) ٪47

$$R=\frac{\gamma_d\ (\text{صحرا})}{\gamma_d\ (\text{آزمایشگاه})} \Rightarrow \gamma_{d\ field}=0.95\times 20=19\ KN/m^3$$

$$\gamma_d=\frac{G\gamma_w}{1+e} \Rightarrow 19=\frac{2.6\times 10}{1+e} \Rightarrow e=0.41 \Rightarrow n=\frac{e}{1+e}=0.29$$

مثال: وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاکی در آزمایشگاه در تراکم ٪95 برابر $1.8\frac{ton}{m^3}$ است. جهت اجرای یک متر مکعب عملیات خاکی با ٪95 تراکم مجاز، چه جرمی از این خاک در قرضه ای که رطوبت طبیعی آن ٪5 و وزن مخصوص آن $1.68\frac{ton}{m^3}$ می باشد؛ لازم است؟

$$\frac{V_f}{V_{B\ \text{قرضه}}}=\frac{(\gamma_d)_B}{(\gamma_d)_f} \quad ; \quad (\gamma_d)_{\text{آزمایشگاه}}=(\gamma_d)_{\text{صحرا}}\times 0.95=0.95\times 1.8=1.71$$

$$(\gamma_d)_B=\frac{1.68}{1+0.05}=1.6 \Rightarrow \frac{V_f}{V_B}=\frac{(\gamma_d)_B}{(\gamma_d)_f}=\frac{\left(\frac{\gamma_w G_s}{1+e}\right)_B}{\left(\frac{\gamma_w G_s}{1+e}\right)_f}=\frac{(1+e)_f}{(1+e)_B}$$

$$\frac{1}{V_B}=\frac{1.6}{1.7} \Rightarrow V_B=1.069$$

نکته: درجه کوبی دانه ای مشخصات فنی هم در مبنای تراکم نسبی (D_r) و هم در مبنای میزان تراکم (درصد تراکم) تنظیم می شود:

$$R\ (\text{درصد تراکم})=\frac{\gamma_{d\ (field)}}{\gamma_{d_{max}\ (lab)}}\times 100$$

$$D_r\ (\text{تراکم نسبی})=\left(\frac{\gamma_{d\ field}-\gamma_{d\ min}}{\gamma_{d\ max}-\gamma_{d\ min}}\right)\times\left(\frac{\gamma_{d\ max}}{\gamma_{d\ (field)}}\right)$$

رابطه تجربی: $R=80+0.2D_r$

نکته : انواع غلطک‌های مورد استفاده در آزمایشگاه برای متراکم نمودن خاک‌ها :

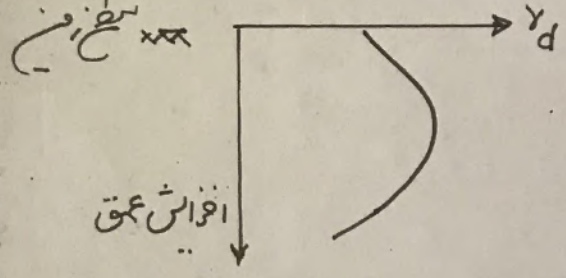
- غلطک چرخ فولادی : خاک‌های درشت دانه خوب دانه‌بندی شده ـ خاک‌های ریزدانه غیر چسبی
- غلطک لرزنده (ارتعاشی) : " ماسه‌ای یا دانه‌بندی یکنواخت و نیز ماسه‌لای‌دار و خاک درشت دانه
- غلطک پاچه‌بزی (قیلی) : برای خاکهای ریزدانه چسبی و غیرچسبی و درشت دانه‌هایی که بیش از ۲۰٪ درصد ریزدانه
- غلطک چرخ لاستیکی : مناسب برای اغلب خاکهای درشت دانه و ریزدانه

نکته : روشهای خاص تراکم :

- تراکم ارتعاشی : → در لایه‌های ضخیم خاکهای دانه‌ای
- تراکم ضربه‌ای : → در خاک‌های دانه‌ای با سقوط وزنه‌های سنگین روی خاک
- تراکم توسط انفجار : → در خاک‌های دانه‌ای.
- پیش بارگذاری : در خاک‌های رسی نرم اشباع . (قبل از احداث سازه اصلی)
- پایین آوردن سطح آب زیرزمینی : " اشباع به دلیل افزایش تنش مؤثر در خاک تحکیم صورت می‌گیرد.

$$\Delta H = m_v H \Delta\sigma'_0$$

نکته : هنگامی که یک لایه خاکریز را با غلطک می‌کوبیم، بهبود بخشیدن خصوص خشک آن در اعماق مختلف تقریباً بصورت زیر است :



در نزدیکی سطح زمین عدم وجود فشار جانبی کافی و در اعماق زیاد به علت کاهش انرژی تراکمی رسیده به واحد حجم خاک، γ_d کوچکتری خواهند داشت

نکته : هرچه فاصله بین حد خمیری و حد روانی (PI) زیادتر شد، خاک چسبنده‌تر و خمیری‌تر خواهد بود.

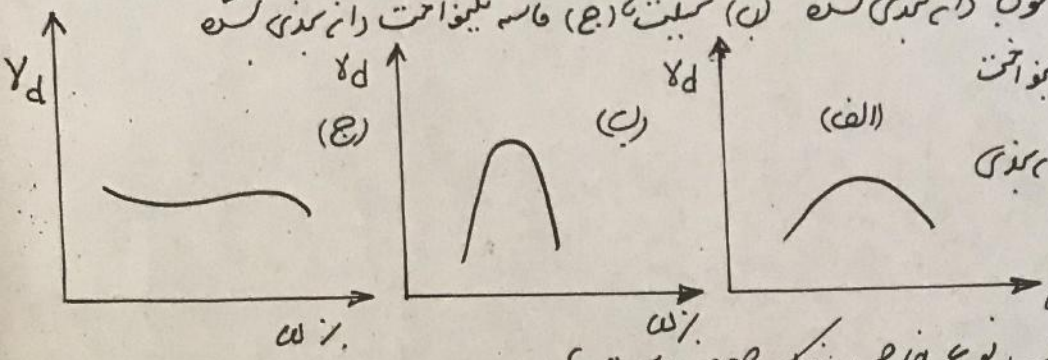
مثال: منحنی‌های تراکم معمولاً در کدام یک از خاک‌ها مشاهده می‌شود.

۱) (الف) ماسه‌های نیکوخت دانه‌بندی شده؛ (ب) سیلت‌ها (ج) رس‌ها

۲) (الف) " " " ؛ (ب) رس‌ها و ماسه خوب دانه‌بندی شده (ج) سیلت‌ها

۳) (الف) رس‌ها و ماسه‌های خوب دانه‌بندی شده (ب) سیلت‌ها (ج) ماسه نیکوخت دانه‌بندی شده

۴) (الف) سیلت‌ها (ب) ماسه نیکوخت دانه‌بندی شده (ج) ماسه خوب دانه‌بندی شده



مثال: کدام عبارت در مورد یک نوع خاص خاک صحیح است؟

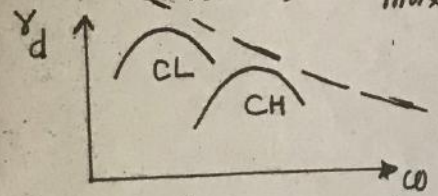
(الف) روش انجام آزمایش در تعیین درصد تراکم مؤثر نیست.

(ب) درصد تراکم خاک می‌تواند بیش از صد درصد باشد.

(ج) رطوبت بهینه و $\gamma_{d_{max}}$ مقدار ثابتی دارند.

(د) با افزایش انرژی تراکم وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه افزایش می‌یابند.

نکته: در خاک‌های رسی با افزایش خاصیت خمیری ω_{opt} زیاد شده و $\gamma_{d_{max}}$ کمتر می‌شود.



نکته: در خاک‌های رسی برای دست یابی به مقاومت بیشتر باید خاک را در حدود خشک نمودار کوبید.

مثال: از قرضه‌ای مقدار ۱۰۰۰ متر مکعب خاک با نشانه خلاء (e) ۱ برداشته شده است، چند متر مکعب خاک در بانک با خلاء ۰/۸ با قرضه می‌توان ساخت: $e = \frac{V_v}{V_s}$

$\frac{V_f}{V_B} = \frac{(1+e)_F}{(1+e)_B} \Rightarrow V_f = 900$

مثال: نتایج آزمون تراکم خاکی از یک منبع قرضه به شرح جدول زیر است. اگر خاکوری با ۹۵٪ تراکم در درصد رطوبت بهینه انجام شده باشد چه مقدار آب برحسب لیتر باید به ۱ متر مکعب از خاک قرضه اضافه کنیم.

ω	6	8	10	13 (ω_{opt})	15
γ_d	17.5	18.9	19	19.3 ($\gamma_{d_{max}}$)	19

$\gamma_{dB} = 17.5\ KN/m^3$; $\omega = 12\%$; $\gamma_w = 10$; $G_s = 2.65$

قرضه $\gamma_{dF} = 0.95 \times 19.3 = 18.34$

$\frac{(\gamma_d)_F}{(\gamma_d)_B} = \frac{V_B}{V_F} \Rightarrow V_F = \frac{17.5}{18.34} = 0.954\ m^3$; $\gamma_d = \frac{W_s}{V_F} \Rightarrow W_s = 17.5\ KN$ Or $\gamma_{dB} = \frac{W_s}{V_B}$ $V_w = \frac{0.175}{9.8} = 0.017$

@ $\omega_B = 12\% \Rightarrow \frac{W_w}{W_s} = 0.12 \Rightarrow W_w = 2.1\ KN \Rightarrow \Delta W = 0.175\ KN$

@ $\omega_{op} = 13\% \Rightarrow W_w = 2.275$

(۲۱) $\frac{W_w}{W_s} = \omega$ خواص

واحد شیراز

مکانیک خاک (1)

فصل چهارم

«حرکت آب در خاک»

استاد : دکتر علیرضا حاجیانی بوشهریان

@geomechanicsiau

حرکت آب در خاک و تنش موثر

طبق رابطه برنولی (گرادیان هیدرولیکی) :

$$h = \frac{P}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z$$

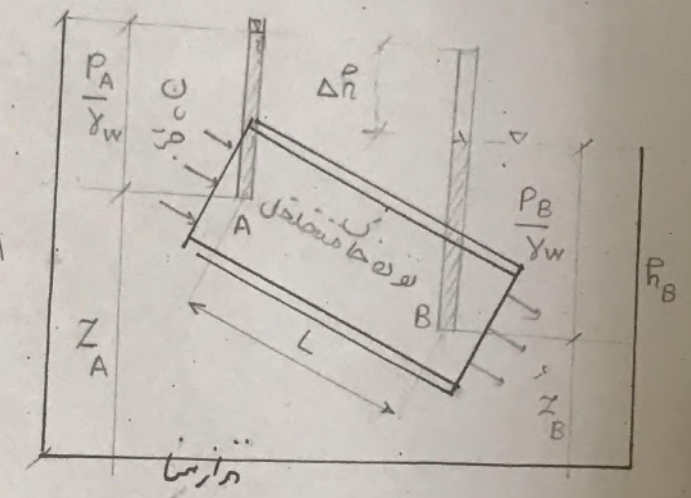
h: هد کل

$\frac{P}{\gamma_w}$: بار فشار

P: فشار در نقطه مورد نظر

$\frac{v^2}{2g}$: بار سرعت

Z: بار ارتفاع



در محیطهای آب و خاک به دلیل سرعت کم جریان آب می توان از بار سرعت صرفنظر کرد و بار آبی کل را به این صورت نوشت:

$$h = \frac{P}{\gamma_w} + Z \qquad v \approx 0$$

نکاتی که از شکل استخراج می شود :

- ارتفاع ستون آب در پیزومتر قرار داده شده بیانگر بار فشار آب در آن نقطه است و با ضرب کردن این ارتفاع در وزن مخصوص آب (γ_w) فشار آب در نقطه مورد نظر بدست می آید.

$$P_A = \left(\frac{P_A}{\gamma_w}\right) \times \gamma_w$$

- فاصله قائم نقطه تا سطح مبنا بیانگر بار ارتفاع نقطه مورد نظر است.

- اختلاف سطح آب در دو پیزومتر بیانگر اختلاف بار آبی یا افت بار بین دو نقطه است.

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{P_A}{\gamma_w} + Z_A\right) - \left(\frac{P_B}{\gamma_w} + Z_B\right)$$

افت بار Δh در حالت کلی بعد بصورت زیر است:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

L: طول جریان

i: گرادیان هیدرولیکی

مثال: در دو نقطه مختلف از یک توده متخلخل خاک دو پیزومتر قرار داده ایم. مشاهده می کنیم اختلاف ارتفاع صعود آب در دو پیزومتر ۰/۵ متر است. اگر فاصله دو نقطه از سطح مبنا ۳/۵ و ۳ متر باشد اختلاف سطح آب در دو پیزومتر چقدر است؟ اگر فاصله دو نقطه را ۲ متر باشد گرادیان هیدرولیکی؟

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{P_A}{\gamma_w} + z_A\right) - \left(\frac{P_B}{\gamma_w} + z_B\right) = \left(\frac{P_A}{\gamma_w} - \frac{P_B}{\gamma_w}\right) + (z_A - z_B) = 0.5 + 0.5 = 1$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{1}{2} = 0.5$$ با فرض طول

(یادآوری) دبی جریان و معادله پیوستگی: (از مکانیک سیالات)

(حجم) مقدار آب عبوری در واحد زمان را دبی جریان می نامیم.

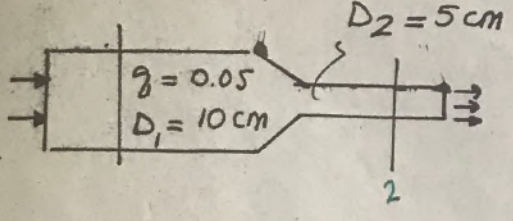
$$q = \frac{\text{(حجم)}\ v}{\text{(زمان)}\ t} = \frac{A \times L}{t} = A \times v$$

اگر در مسیر جریان چشمه یا چاه وجود داشته باشد، دبی جریان برای مقاطع مختلف آن خواهد بود.

و این مفهوم پیوستگی جریان است، که معادله آن بصورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0$$ (با فرض دائمی بودن جریان و غیر قابل تراکم بودن آن)

مثال: مطلوب است محاسبه سرعت جریان در مقطع ۲ از شکل زیر:



$$v_2 = \frac{q}{A} = \frac{(0.05)}{\left(\pi \times \frac{0.05^2}{4}\right)} = 25.48\ m/s$$

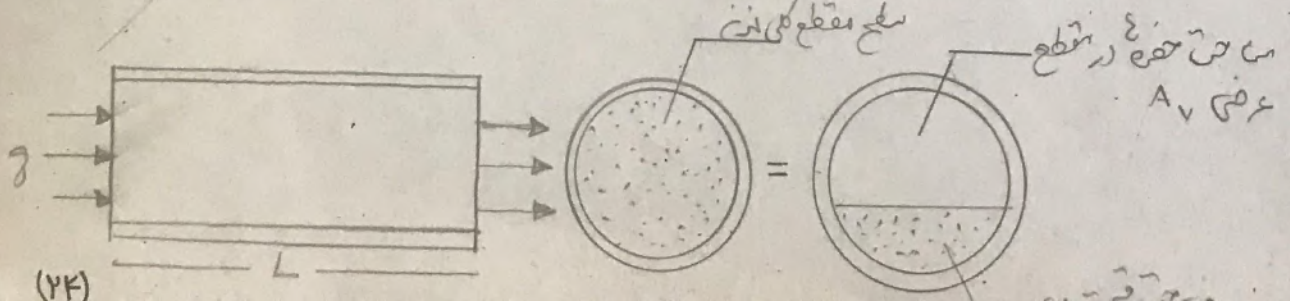
$$v_2 = 25.48\ m/s$$

سرعت آب در خاک:

برای حرکت آب در خاک دو نوع سرعت جریان در نظر گرفته می شود:

۱ـ سرعت متوسط (v) بر اساس سطح مقطع کلی خاک

۲ـ سرعت واقعی (v_s) بر پایه سطح مقطع فضای خالی خاک



رابطه بین سرعت جریان و سرعت تراوش:

$$q = v \cdot A = A_v v_s \Rightarrow q = v(A_v + A_s) = A_v v_s \Rightarrow$$

$$v_s = \frac{v(A_v + A_s)}{A_v} = \frac{v(A_v + A_s)L}{A_v \times L} = \frac{v(V_v + V_s)}{V_v} = \frac{V \times v}{V_v} = \frac{v}{n}$$

$$\Rightarrow v_s = v\left(\frac{1+e}{e}\right) = \frac{v}{n} \quad , \quad n = \frac{V_v}{V} < 1 \Rightarrow v_s > v$$

رابطه دارسی (۱۸۵۶):

$$v = K \cdot i$$

v: سرعت متوسط جریان $(\frac{m}{s})$

i: گرادیان هیدرولیکی

K (m/s): ضریب نفوذپذیری:

$$K = \frac{\gamma_w}{\eta} \bar{K}$$

$\bar{K}$: نفوذپذیری مطلق خاک (از خاکی به خاک دیگر متفاوت بوده و به فضای خالی خاک بستگی دارد)

نفوذپذیری خاکها به عوامل متعددی وابسته است

- لزجت سیال (η)
- اندازه و توزیع حفرات خاک (دانه‌های یکنواخت دارای نفوذپذیری بالاتر، نسبت به گرد گوشه‌ها)
- دانه‌بندی
- تخلخل (e)
- زبری سطح دانه‌ها (هرچه زبرتر باشد، میل اصطکاک و اتلاف بیشتر، نفوذپذیری کاهش می‌یابد)
- درجه اشباع (S_r)

نکته: خاکهای اشباع نفوذپذیری بزرگتری از خاکهای مرطوب دارند.
هرچه درجه اشباع بالاتر باشد، نفوذپذیری هم بیشتر می‌شود.

نکته: با توجه به اینکه آب خود تابعی از درجه حرارت محیط هستند بنابراین برای یک نمونه خاک (γ_w و η)

$$\frac{K\theta_1}{K\theta_2} = \frac{\gamma_w(\theta_1)}{\gamma_w(\theta_2)} \cdot \frac{\eta(\theta_2)}{\eta(\theta_1)}$$

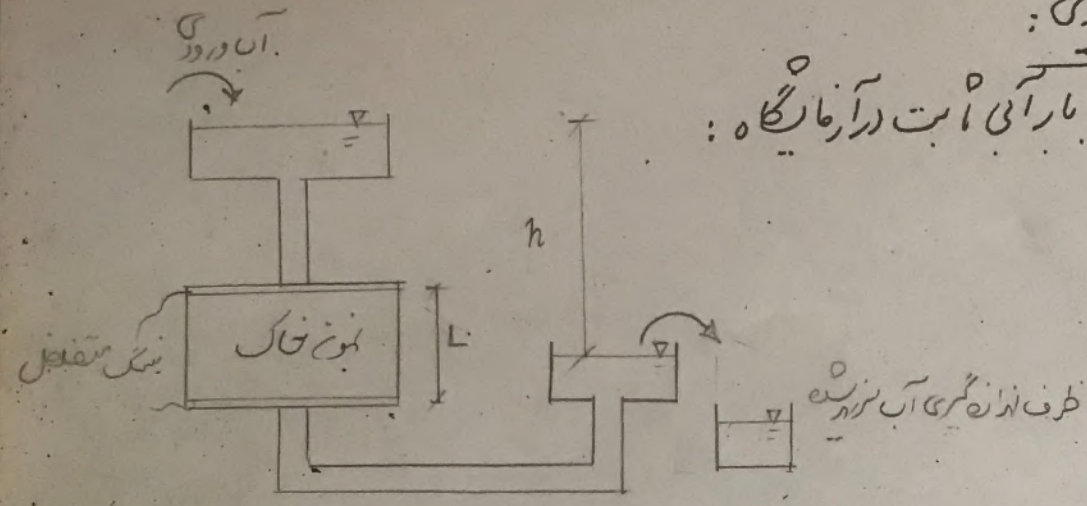
نکته : روابط تجربی نفوذپذیری خاک در دمای ثابت، برخی روابط تجربی نیز ارائه شده

برای خاکهای ماسه‌ای : $K \propto \frac{e^3}{1+e}$

برای ماسه تقریباً یکنواخت : $K \propto D_{10}^2$

آزمایشهای تعیین نفوذپذیری :

الف - آزمایش با بار آبی ثابت در آزمایشگاه :



آزمایش روی نمونه دست نخورده خاک در شرایط دائم انجام می‌شود.

در ابتدای آزمایش آب از نمونه عبور می‌دهند تا هوای آن خارج شود.

$v = K.i \Rightarrow \frac{Q}{tA} = K \frac{h}{L}$

بعد از خروج هوا، حجم آب گذرانده از آن در زمانی معین تعیین می‌شود.

$$K = \frac{QL}{Aht}$$

$Q =$ حجم آب جمع شده در ظرف

$L =$ طول نمونه

$A =$ مساحت مقطع نمونه

$h =$ اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه

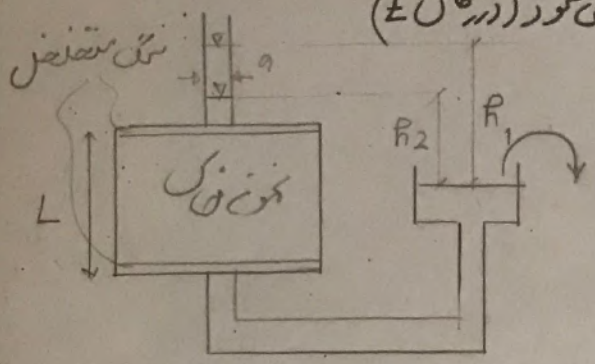
$t =$ مدت زمان جمع آوری آب

واحد K همان واحد سرعت است. (cm/s ، m/s ، m/day ، ...)

ب - آزمایش با بار آبی متغیر در آزمایشگاه

آزمایش روی نمونه دست خورده ای از خاک رس انجام می شود.

افت سطح آب در لوله مارک بالای نمونه اندازه گیری می شود (در زمان t)



a = سطح مقطع لوله قائم

L = طول نمونه خاک

A = سطح مقطع نمونه خاک

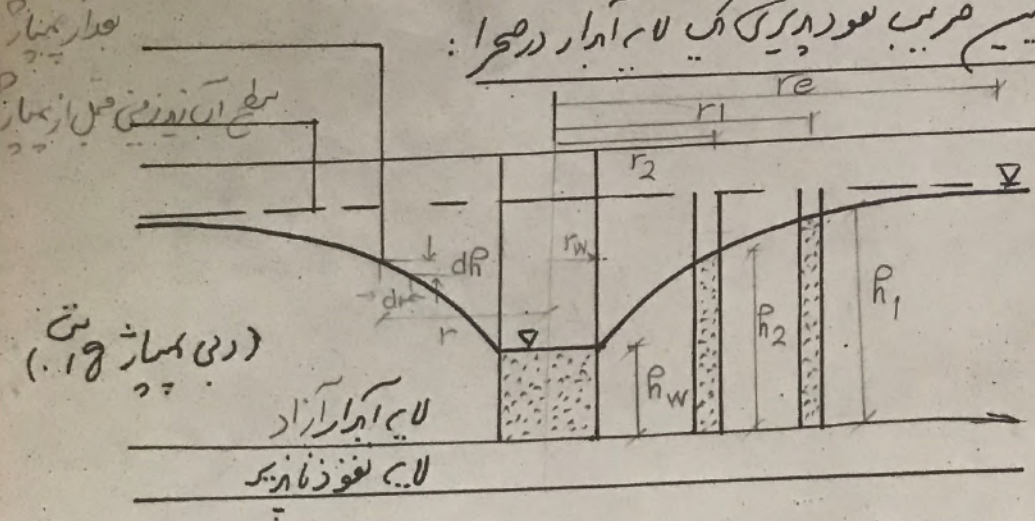
t = زمان آزمایش

h_1 = اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه در لحظه صفر

h_2 = " " " " " " " " t

$$k = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad ; \quad q = a\frac{dh}{dt} = k\frac{h}{L}A$$

ج - آزمایش پمپاژ برای تعیین ضریب نفوذپذیری یک لایه آبدار در صحرا:

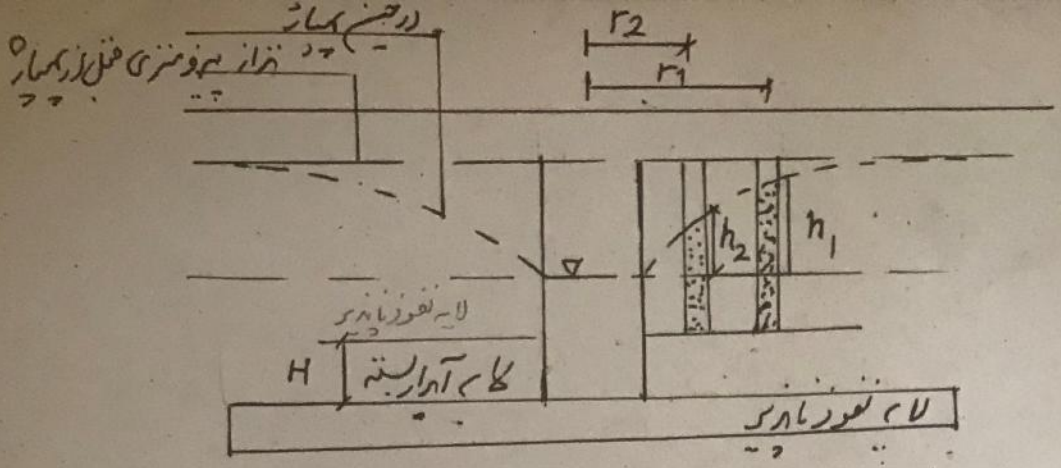


لایه آبدار آزاد

$$K = \frac{q \cdot L_n(r_1/r_2)}{\pi(h_1^2 - h_2^2)}$$

$$q = k\left(\frac{dh}{dr}\right) 2\pi r.h$$

آب با دبی ثابت از چاه اصلی پمپاژ می شود. هنگامی که سطح آب در پیزومترها و چاه های ثابت ماند، (چنین حالت دائمی پیدا کرد) تراز آب زیرزمینی در چاه اصلی و پیزومترها اندازه گیری می شود.



لایه آبدار تحت فشار $K = \frac{q \ln(r_1/r_2)}{2\pi H(h_1 - h_2)}$ or $K = \frac{q \log_{10}(r_1/r_2)}{2.727 H(h_1 - h_2)}$

نکته: هرچه گمانه‌ای از چاه اصلی دورتر شود، سطح آب در آنها بالاتر آمده، اگر گمانه‌ای را آنقدر از چاه اصلی دور کنیم تا سطح آب در آن برابر سطح ایستابی آب زیرزمینی قبل از پمپاژ شود، آنگاه فاصله مرکز گمانه تا مرکز چاه اصلی، شعاع تأثیر چاه خواهد بود و با r_e نمایش داده می‌شود.

تمرین: با دبی 250 lit/min آب در چاه پمپاژ می‌شود و سطح آب را 12 متر پایین می‌برد. دبی پمپاژ چقدر باشد تا سطح آب 18 متر افت کند؟ (شعاع تأثیر چاه در هر دو حالت برابر و ضخامت لایه آبدار آزاد برابر 100 متری باشد.)

ضریب نفوذپذیری در هر دو حالت یکسان است: $K_1 = K_2 \Rightarrow \frac{q_1 \ln(r_e/r_w)}{\pi(h_e^2 - h_{w1}^2)} = \frac{q_2 \ln(r_e/r_w)}{\pi(h_e^2 - h_{w2}^2)}$

$h_e = 100\ m$ ، $h_{w_1} = 100 - 12 = 88$ ، $h_{w_2} = 100 - 78 = 82$

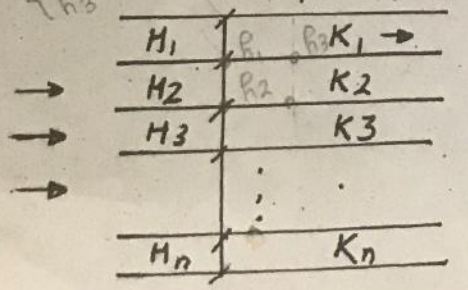
$\frac{250}{q_2} = \frac{100^2 - 88^2}{100^2 - 82^2} \Rightarrow q_2 = 363.03\ lit/min$ ✓

نفوذپذیری معادل در خاک‌های لایه‌بندی شده:

در خاک‌های لایه‌ای که ضریب نفوذپذیری برای جریان در یک امتداد معین در لایه‌های مختلف متفاوت است. برای تعیین K_e:

۱- امتداد جریان افقی:

$h_1 = h_2$ ، $h_3 = h_4$ ، $i = i_1 = i_2 = \dots = i_n$

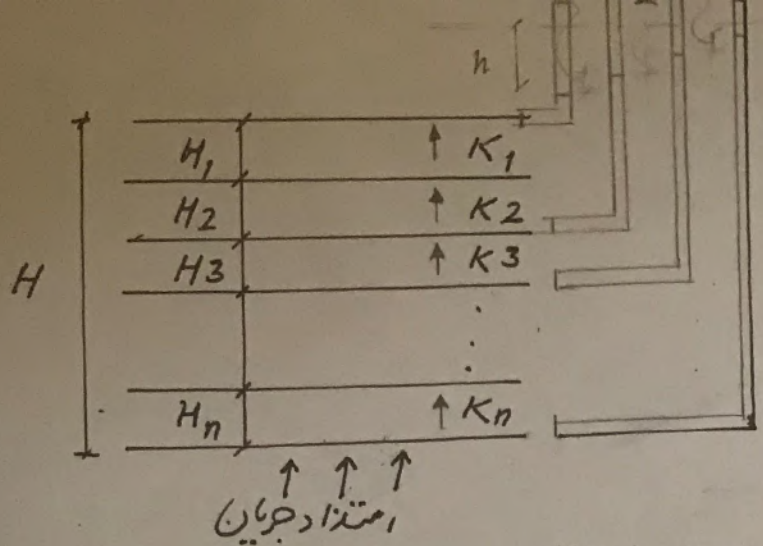


$q = v \cdot 1 \cdot H$

$= v_1 \cdot 1 \cdot H_1 + v_2 \cdot 1 \cdot H_2 + \dots + v_n \cdot 1 \cdot H_n$

$v = Ki$ ، $v_1 = K_1 i_1$ ، $v_2 = K_2 i_2$

$K = \frac{K_1 H_1 + K_2 H_2 + \dots + K_n H_n}{H}$



$$q = q_1 = q_2 = q_3 = \cdots = q_n$$

$$v = v_1 = v_2 = v_3 = \cdots = v_n$$

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + \cdots h_n$$

با استفاده از رابطه داری ($v = k.\frac{h}{H}$)

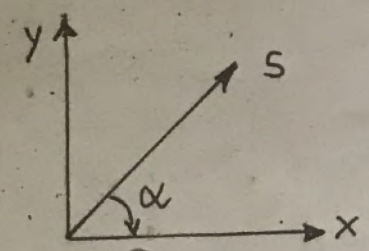
و جایگذاری آن در رابطه فوق داریم:

$$\frac{Hv}{K} = \frac{H_1 v_1}{K_1} + \frac{H_2 v_2}{K_2} + \cdots + \frac{H_n v_n}{K_n}$$

$$\frac{H}{K} = \frac{H_1}{K_1} + \frac{H_2}{K_2} + \cdots + \frac{H_n}{K_n}$$

$$K = \frac{H}{(H_1/K_1) + (H_2/K_2) + \cdots + (H_n/K_n)}$$

نکته: اگر ضریب نفوذپذیری در راستای محور x برابر K_x و در راستای محور y برابر K_y باشد در اینصورت ضریب نفوذپذیری در راستای S که با محور x ها زاویه α می سازد از رابطه زیر بدست می آید.

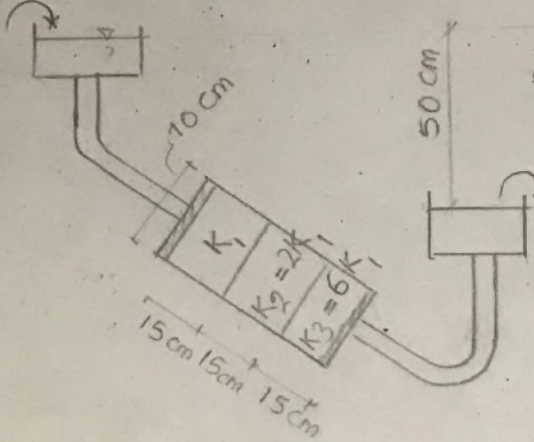


$$\frac{1}{K_S} = \frac{\cos^2\alpha}{K_x} + \frac{\sin^2\alpha}{K_y}$$

$$v_n = v_S \cdot \cos\alpha \; ; \; v_z = v_S \sin\alpha$$

$$\frac{\partial h}{\partial S} = \frac{\partial h}{\partial n}\cdot\frac{\partial n}{\partial S} + \frac{\partial h}{\partial z}\cdot\frac{\partial z}{\partial S} \Rightarrow \frac{v_S}{K_S} = \frac{v_n}{K_x}\cdot\cos\alpha + \frac{v_z}{K_z}\sin\alpha$$

تمرین: مطلوب است تعیین $K_1 < K_2 < K_3$



$q = 300\ cm^3/min$

$$K = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{K_1}\right) + \left(\frac{H_2}{K_2}\right) + \left(\frac{H_3}{K_3}\right)} \Rightarrow K = \frac{45}{\frac{15}{K_1} + \frac{15}{2K_1} + \frac{15}{6K_1}}$$

$$\Rightarrow K = 1.8K_1$$

$$v = Ki \Rightarrow \frac{q}{A} = K\frac{h}{H}$$

$$\Rightarrow \frac{300 \times 45}{\pi \times \frac{10^2}{4} \times 50} = 18K_1 \Rightarrow K_1 = 1.91\ cm/min \; , K_2 = 3.82 \; , K_3 = 11.46\ cm/min$$

واحد شیراز

مکانیک خاک (1)

فصل پنجم

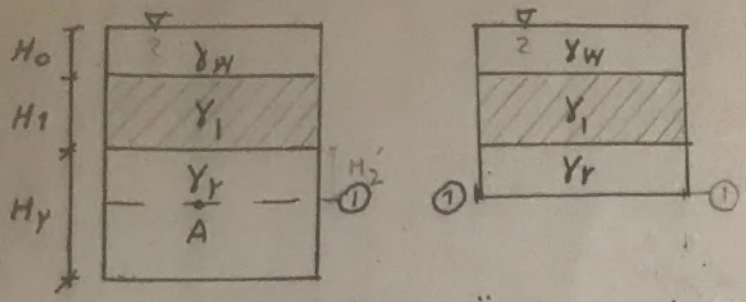
«تنش مؤثر (تراوش)»

استاد : دکتر علیرضا حاجیانی بوشهریان

@geomechanicsiau

تنش موثر :

تنش کل :



ستونی از یک توده خاک اشباع متشکل از دو لایه و همچنان هرگونه نشت (حرکت آب در خاک) را نشان می دهد. تنش کل در راز نقطه A را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\sigma_A = \frac{\text{وزن توده خاک در بالای راز A}}{\text{سطح مقطع توده}} = \frac{W}{S}$$

$$\sigma_A = \frac{\gamma_w V_0 + \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2}{S} = \frac{\gamma_w H_0 S + \gamma_1 H_1 S + \gamma_2 H_2 S}{S}$$

γ_1, γ_2 : وزن مخصوص اشباع خاکها

$$\sigma_A = \gamma_w H_0 + \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2$$

$$\sigma_A = \gamma_w H_0 + \gamma_{1sat} H_1 + \gamma_{2sat} H_2$$

$$= \gamma_w H_0 + \gamma_w H_2 + \gamma_{1sat} H_1 - \gamma_w H_1 + \gamma_{2sat} H_2 - \gamma_w H_2 + \gamma_w H_2$$

$$= \gamma_w (H_0 + H_1 + H_2) + (\gamma_{1sat} - \gamma_w) H_1 + (\gamma_{2sat} - \gamma_w) H_2$$

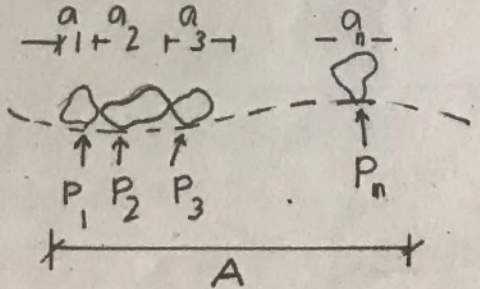
γ'_1 $\qquad$ γ'_2

$$= u_A + \sigma'_A$$

u_A : فشار آب حفره ای یا فشار منفذی که توسط آب موجود در فضای بین دانه ها تحمل می شود.

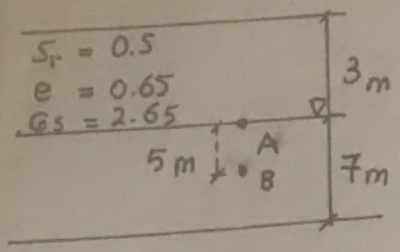
نکته : در زمانی که آب در خاک حرکت ندارد، u_A از حاصلضرب وزن مخصوص آب در فاصله سطح آزاد آب تا نقطه مورد نظر بدست می آید.

σ'_A : تنشی که بخش جامد خاک یا همان اسکلت خاک متحمل می شود.



دکتری مهندسی علیرضا حاجیانی بوشهریان
نظام مهندسی ۳۲-۳-۰۰۰۵۰۲

مثال: مطلوب است تعیین مقدار تنش مؤثر در نقاط A و B



$$\gamma = \frac{G_s + Se}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.65 + 0.5 \times 0.65}{1+0.65} \times \gamma_w = 1803 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{2.65 + 0.65}{1+0.65} \times \gamma_w = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\sigma_A = 3 \times 1803 = 5409 \text{ kg/m}^2$$

$$u_A = 0$$

$$\sigma'_A = \sigma_A - u = 5409 - 0 = 5409 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_B = 3 \times 1803 + 5 \times 2000 = 15409 \text{ "}$$

$$u_B = 5 \times 1000 = 5000 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma'_B = \sigma_B - u_B = 15040 - 5000 = 10409 \text{ kg/m}^2$$

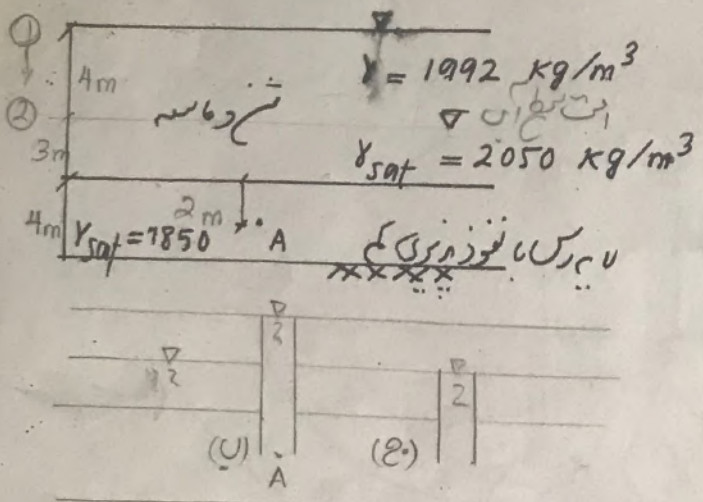
نکته: در لایه‌هایی که نفوذپذیری آنها خیلی کم است (نظیر لایه رس)، تغییر سطح آب پس از مدتی طولانی در لایه مورد نظر اثری نمی‌گذارد و فشار آب را تغییر می‌دهد و ملاحظه پس از تغییر سطح آب اثری در لایه نفوذناپذیر ندارد.

مثال: در مثال قبلی با شروع تکمیل زدن، سطح آب ۴ متر پایین آورده شد، مطلوب است:

الف- تعیین مقدار تنش مؤثر در نقطه A، قبل از افت سطح آب.

ب- " " " " " " با فاصله بعد از افت سطح آب.

ج- " " " " " " " مدت زمانی " " .



الف- $\sigma_A = 7 \times 2050 + 2 \times 1850 = 18050$

$u_A = 9 \times 1000 = 9000 \text{ kg/m}^2$

$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = 9050$ "

ب- فشار آب حفره‌ای بدون تغییر می‌ماند.

$\sigma_A = 4 \times 1992 + 3 \times 2050 + 2 \times 1850$

$= 17818 \text{ kg/m}^2$

$* \; u_A = 9 \times 1000 = 9000 \text{ kg/m}^2$

$\sigma'_A = 17818 - 9000 = 8818 \text{ kg/m}^2$

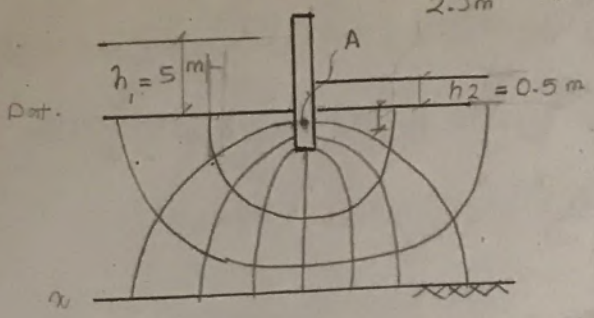
ج- $\sigma_A = 4 \times 1992 + 3 \times 2050 + 2 \times 1850$

$= 17818 \text{ kg/m}^2$

$u_A = 5 \times 1000 = 5000 \text{ kg/m}^2$

$\sigma'_A = 17818 - 5000 = 12818 \text{ kg/m}^2$

مثال ①: در شکل زیر فشار آب وارد بر جدار چپ و راست سپر در نقطه A چیست؟



$u_A = \gamma_w (h_A - z_A)$

h_A چپ $= \left[(5 \quad) - (5 - 0.5) \times \frac{1}{8} \right] = 4.4375$ m

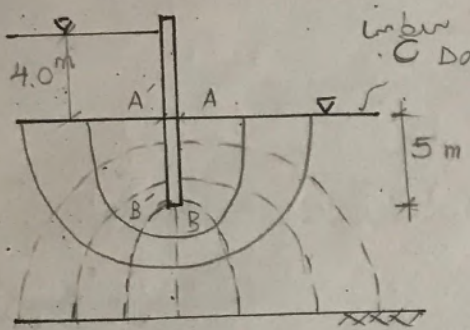
u_A چپ $= \gamma_w (4.4375 - (-2.5)) = 6.937 \times \gamma_w$

h_A راست $= \left[(5 \quad) - (5 - 0.5) \times \frac{7}{8} \right] = 1.0625$ m $\Rightarrow u_A$ راست $= \gamma_w (1.0625 - (-2.5))$

$= 3.5625 \gamma_w$

$\Rightarrow \Delta u = \gamma_w (6.937 - 3.56) = 2.834 \gamma_w$ ✓

مثال ②: فشار آب وارد بر جدار مدفون چقدر است؟



$h_A = 0 \Rightarrow u_A = (0 - 0)\gamma_w = 0$

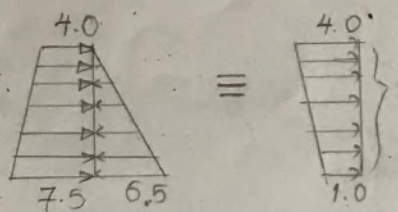
$h_B = 4 - \frac{4}{8} \times 5 = 1.5 \Rightarrow u_B = (1.5 - (-5))\gamma_w$

$= 6.5 \times \gamma_w$

$h_{A'} = 4 \Rightarrow u_{A'} = (4 - 0)\gamma_w = 4.0 \gamma_w$

$h_{B'} = 4 - \frac{4}{8} \times 3 = 2.5 \Rightarrow u_{B'} = (2.5 - (-5))\gamma_w$

$= 7.5 \gamma_w$



$\Delta u = \frac{(4+1)}{2} \times 5 \gamma_w = 12.5 \gamma_w = 122.575$ kN

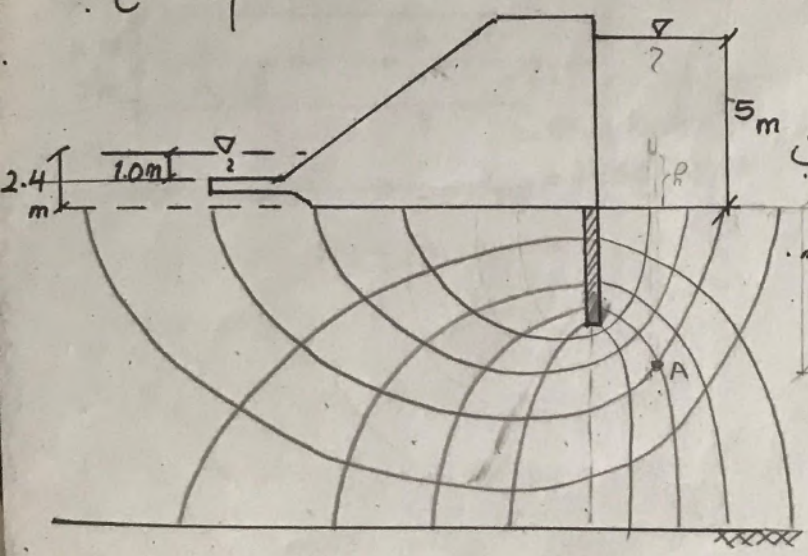
مثال ③: در A پیزومتری نصب شده و نفوذپذیری خاک 2.5×10^{-5} m/s است. کدام عبارت صحیح می‌باشد؟

الف- میزان دبی در واحد طول 3.12×10^{-5} m³/s

ب- " " " " " 4×10^{-5} " " " "

ج- سطح پیزومتریک در A منطبق بر آب بالادست است

د- " " " " " 1.2 متر بالاتر از " " " "



$h_A = (5 \quad) - \frac{(5 - 2.4)}{10} \times 3$

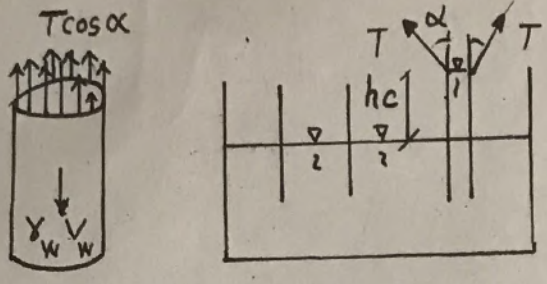
$= 4.22$ m

$q = K \frac{N_f}{N_d} \times H = 2.5 \times 10^{-5} \times \frac{5}{10} \times (5 - 2.4)$

$= 3.25 \times 10^{-5}$ m³/s

موئینگی در خاک :

فضای حفرات پیوسته موجود در خاک می تواند بصورت دسته ای از لوله های موئینه با سطح مقطع متغیر عمل کند. بعلت کشش سطحی، آب زیرزمینی در لوله های موئینه مذکور صعود کرده و تراز واقعی آن از تراز سطح آب زیرزمینی بالاتر خواهد ایستاد.



$$\Sigma f_y = 0 \Rightarrow$$

$$(T\cos\alpha)(2\pi R) = \pi R^2 h_c \cdot \gamma_w$$

$$\Rightarrow h_c = \frac{4T\cos\alpha}{\gamma_w \cdot d}$$

نیروی کشش سطحی — قطر لوله

نکته :

$$h_c \propto \frac{1}{d}$$

نکته : ارتفاع صعود آب در لوله های موئین خاک از رابطه زیر قابل محاسبه است. C ثابتی است که بین ۱۰ تا ۵۰ mm^2 تغییر می کند.

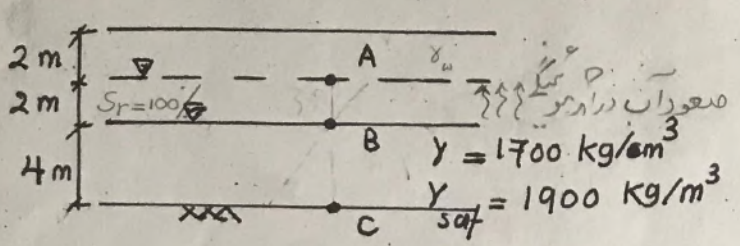
$$h(mm) = \frac{C}{e.D_{10}}$$

✓ فشار در محدوده صعود آب (کاپیلاری)

برای خاک اشباع : $u = -\gamma_w \cdot h_c \times S_r$

فاصله نقطه مورد نظر از سطح آب آزاد

مثال : در خاک شرح داده شده در شکل زیر، مطلوب است محاسبه تنش مؤثر در نقاط A و B و C



$\sigma_A = 2 \times 1700 = 3400 \ kg/m^3$

$u_A = -2 \times 1000 = -2000 \ kg/m^3$

$\sigma'_A = 5400 \ kg/m^3$

$\sigma_B = 2 \times 1700 + 2 \times 1900 = 7200$

$u_B = 0$

$\sigma'_B = 7200 \ kg/m^2$

$\sigma_C = 2 \times 1700 + 6 \times 1900 = 14800 \ kg/m^2$

$u_C = 4 \times 1000 = 4000 \ kg/m^2$

$\sigma'_C = 14800 - 4000 = 10800 \ kg/m^2$

فشار تراوش :

اگر آب موجود در یک توده خاک، حرکت داشته باشد تنش موثر در نقاط مختلف تغییر خواهد کرد. در جهت امتداد حرکت آب این تنش ممکن است کم یا زیاد شود. مقداری که با این تنش افزوده یا کاسته می شود.

$$P = iZ\gamma_w$$

P : فشار تراوش یا تراوش

γ_w : وزن مخصوص آب

Z : عمق نقطه مورد نظر از سطح خاک

i : شیب هیدرولیکی در توده خاک

افزایش تنش موثر $\sigma' \uparrow$ :: حرکت پایین

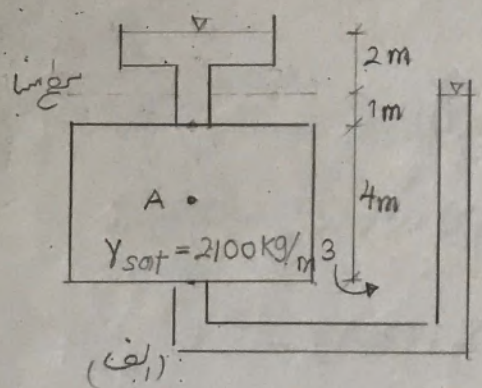
کاهش " " $\sigma' \downarrow$ :: حرکت بالا

نکته : هیدرولیک گرادیان (i)

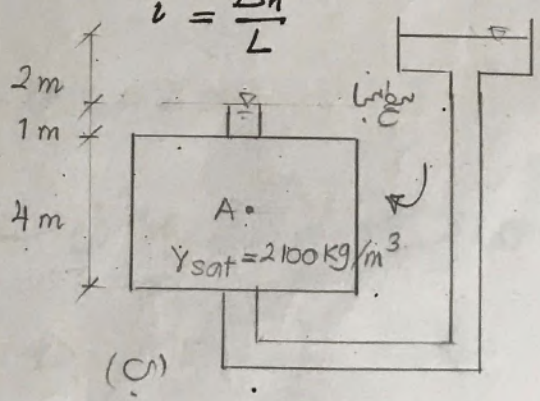
الف - با داشتن Q، A و K و رابطه $Q = KA.i$

ب - با داشتن Δh (اختلاف بار آبی بین دو نقطه از مسیر حرکت و فاصله آن دو نقطه)

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$



(الف)



(ب)

$\sigma_A = ?$

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{2}{4} = 0.5$$

$$\sigma'_A = \gamma' Z = (2100 - 1000) \times 2 = 2200 \ kg/m^2$$

$$P = iZ\gamma_w = \frac{1}{2} \times 2 \times 1000 = 1000 \ kg/m^2$$

الف - با تراوش $\sigma'_A = \sigma'_A + P = 2200 + 1000 = 3200 \ kg/m^2$

ب - " " $\sigma'_A = \sigma'_A - P = 2200 - 1000 = 1200 \ kg/m^2$

جوشش (Boiling)

حرکت رو به بالای آب در یک توده خاک باعث کاهش تنش موثر و ازدیاد فشار نفوذ $P = iZ\gamma_w$ خواهد شد. با افزایش دبی ($Q \uparrow$ یا $Q = KiA$) و بدیل ثابت بودن مقطع نمونه و ضریب نفوذپذیری خاک، گرادیان هیدرولیکی ($i \uparrow$) افزایش یافته و این افزایش باعث بالا رفتن مقدار فشار نفوذ می‌شود. ($P \uparrow$) در نتیجه مقدار بیشتری از تنش مؤثر کم خواهد شد. حال اگر Q را آنقدر افزایش دهیم که $\sigma' = 0$ شود خاک از وضعیت پایدار خارج شده و پدیده جوشش (روانگرایی Liquefaction، سیلان یا زلزله‌شویی) رخ می‌دهد.

$$\sigma'_A = 0 \Rightarrow \gamma' Z - iZ\gamma_w = 0 \Rightarrow i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

گرادیان هیدرولیکی ناشی از رابطه فوق را گرادیان هیدرولیکی بحرانی گویند. (critical)

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad ; \quad 1.1 \neq i_{cr} \neq 0.9$$

ضریب اطمینان در برابر جوشش:

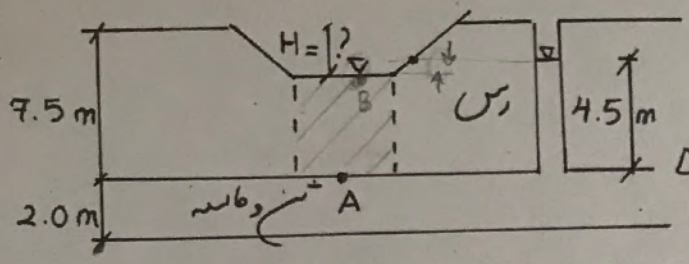
$$\frac{\sigma'_A \text{ در حالت بدون تراوش}}{P \text{ (فشار نفوذ)}} = F.S \quad \Leftrightarrow \quad \sigma'_{A \text{ بدون تراوش}} - (F.S)P = 0$$

برای ایجاد ایمنی در برابر جوشش فشار نفوذ را در ضریبی بزرگتر از ۱ ضرب می‌کنند.

$$\text{Or} : \quad \gamma' Z - (F.S)\, iZ\gamma_w = 0 \Rightarrow F.S. = \frac{\gamma'}{i.\gamma_w}$$

اگر در مسائل جوشش از ضریب اطمینان نشده باشد آنرا ۱ می‌گیریم.

مثال: در شکل زیر حداکثر عمق گودبرداری را طوری تعیین کنید که جوشش رخ ندهد.



$i_{cr}\gamma_w = \gamma'$ Boiling is occured

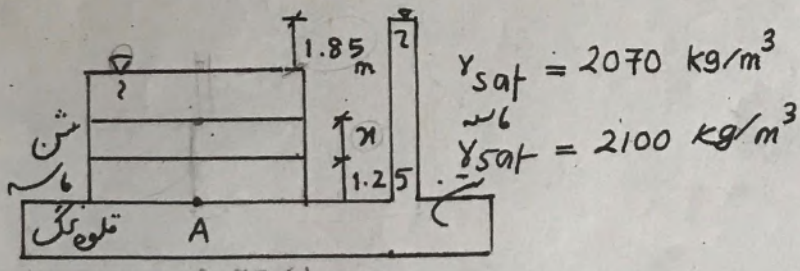
$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{4.5-(7.5-H)}{(7.5-H)} = \frac{H-3}{7.5-H}$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s\gamma_w(1+\omega)}{1+e} = \gamma_w\frac{G_s+\omega G_s}{1+\omega G_s} = \frac{2.7+0.4\times2.7}{1+0.4\times2.7}\gamma_w = 1817.3\ kg/m^3$$

$$\gamma' = 817.3\ kg/m^3 \Rightarrow 1000\times\frac{H-3}{7.5-H} = 817.3 \Rightarrow H = 5.02\ m$$

مثال: با توجه به شکل زیر، ارتفاع لایه شن حفر شده تا ماسه در برابر جوشش چقدر اطمینان در برابر ۲ داشته باشد؟



$$FS = \frac{\text{تنش موثر در برابر جوشش}}{\text{تنش وارد شده در A}}$$

$$\sigma'_{A\ \text{without B.}} = x\times(2100-1000) + 1.25(2070-1000)$$

$$P = iZ\gamma_w = \left(\frac{1.85}{1.25+x}\right)\times(1.25+x)\times1000$$

$$2 = \frac{\sigma'_A}{1.85\times1.25\times1000}\cdot(1.25+x) \Rightarrow x = 2.15\ m$$

واحد شیراز

مکانیک خاک (1)

فصل ششم

«تحکیم (نشست خاک)»

استاد : دکتر علیرضا حاجیانی بوشهریان

@geomechanicsiau

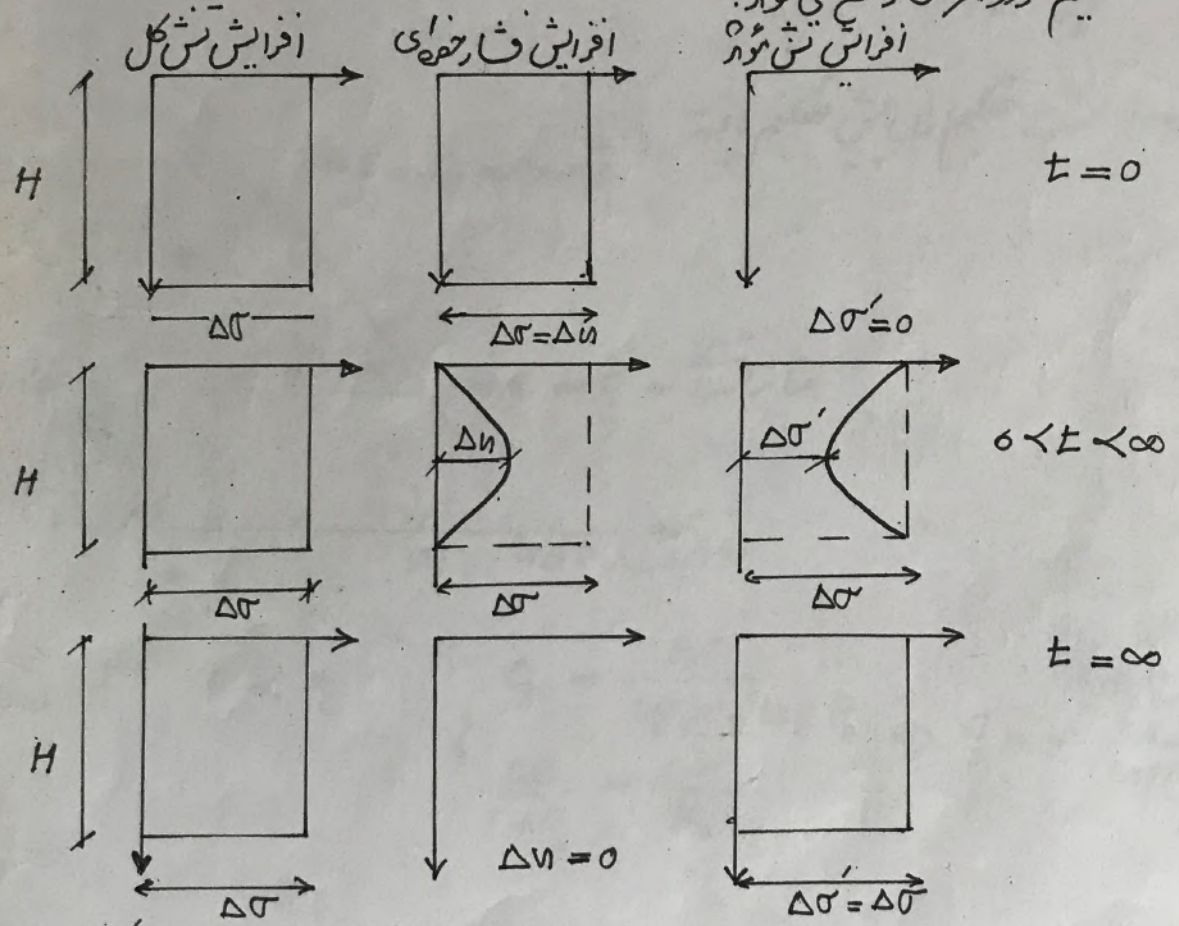
نشست خاک:

فشردگی یا تراکم خاک در اثر تأثیر بار (وزن سازه) باعث نشست سازه واقع بر روی آن می‌شود.

۲ نوع نشست:

- نشست تحکیم: ناشی از تغییر حجم خاک اشباع بدلیل رانده شدن آب‌های موجود در حفرات بیشتر در خاک‌های ریزدانه (رسی) دیده می‌شود.
- نشست آنی: ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک خشک و یا خاک‌های مرطوب و اشباع بدون تغییر در میزان آب.

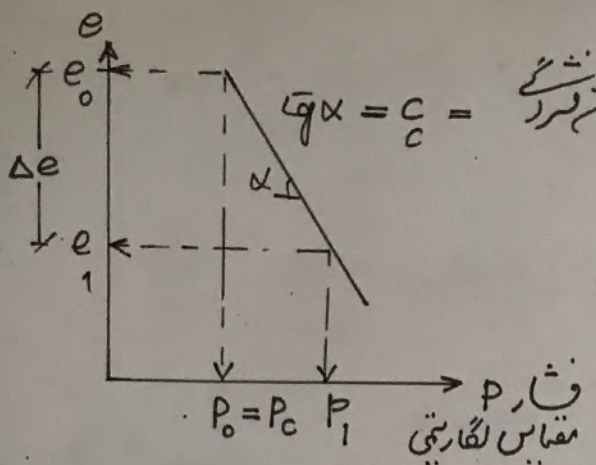
(۱) نشست تحکیم: در خاک‌های ریزدانه بدلیل نفوذ پذیری پائین، آب با سرعت خارج شده و نشست آنی و تحکیم هر دو همزمان واقع می‌شوند.



وقتی یک لایه خاک اشباع تحت تأثیر افزایش تنش مانند $\Delta\sigma$ قرار می‌گیرد، آب به عنوان یک مایع غیرقابل تراکم ابتدا تمام این اضافه تنش را دریافت می‌کند و Δu به طور ناگهانی به میزان $\Delta\sigma$ افزایش می‌یابد. با گذشت زمان آب اضافی در اثر این اضافه از خاک خارج شده و معادل آب خارج شده، خاک نشست می‌کند. با خروج آب دانه‌های خاک نیز در نقل اضافه تنش وارده سهیم می‌شوند. همان مقدار که آب خارج می‌شود و از Δu کم می‌شود به $\Delta\sigma'$ اضافه می‌شود. تا آنجا که $\Delta\sigma' = \Delta\sigma$ و $\Delta u = 0$ یعنی نقل اضافه تنش $\Delta\sigma$ کاملاً به دانه‌های جامد خاک می‌رسد.

محاسبه نشست تحکیم اولیه یک بعدی:

الف ـ نشست تحکیم رس عادی تحکیم یافته:



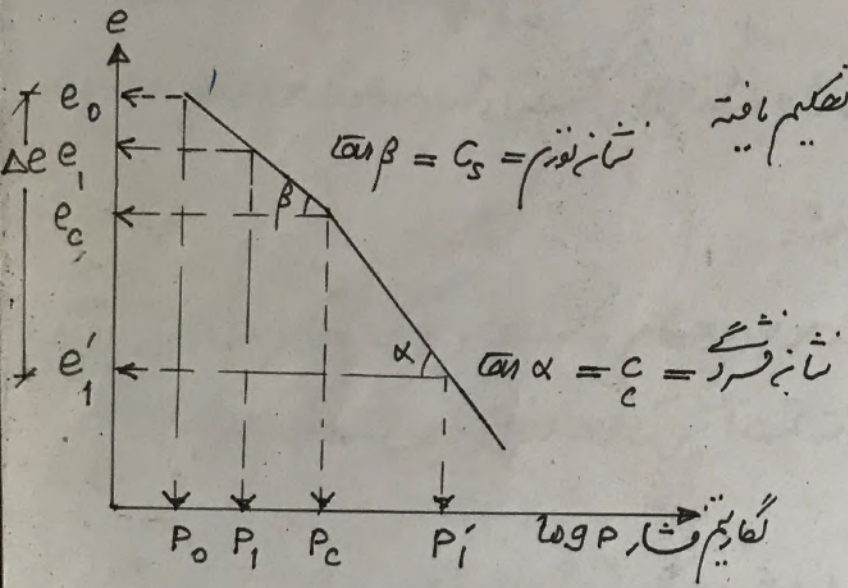
$$C_c = \tan\alpha = \frac{\Delta e}{\log P_1 - \log P_0}$$

$$\Delta e = \frac{(1+e_0)\Delta H}{H_0}$$

$$\log(P_1) - \log(P_0) = \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

$$\Rightarrow C_c = \frac{\frac{(1+e_0)\Delta H}{H_0}}{\log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)} \Rightarrow \Delta H = \frac{H_0 C_c}{1+e_0}\log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

ب) نشست تحکیم رس پیش تحکیم یافته



I) $P_1 < P_c$:

$$\begin{cases} C_s = \dfrac{\Delta e}{\log P_1 - \log P_0} \\ \dfrac{\Delta e}{1+e_0} = \dfrac{\Delta H}{H_0} \end{cases} \Rightarrow C_s = \frac{\frac{(1+e_0)\Delta H}{H_0}}{\log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)} \Rightarrow \Delta H = \frac{C_s H_0 \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)}{1+e_0}$$

II) $P_1 > P_c$:

$$\Delta e = e'_1 + e_0 = (e_c - e'_1) + (e_0 - e_c)$$

$$= \log\left(\frac{P_c}{P_0}\right) C_s + \log\left(\frac{P'_1}{P_c}\right) C_c \quad (1)$$

از طرفی دیگر

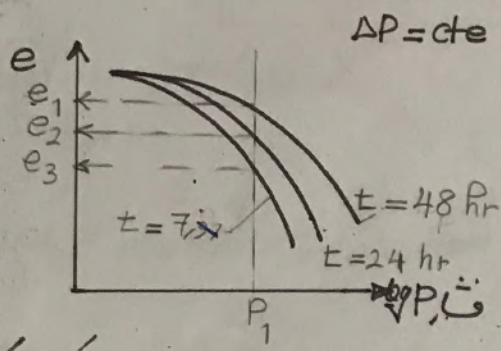
$$e_0 - e'_1 = \Delta e = \frac{(1+e_0)\Delta H}{H_0} \quad (2)$$

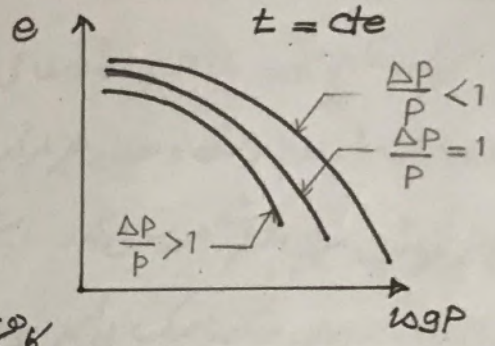
$$(1),(2) \Rightarrow \Delta H = \frac{H_0}{1+e_0}\left[C_s \log\left(\frac{P_c}{P_0}\right) + C_c \log\left(\frac{P'_1}{P_c}\right)\right]$$

مثال: در اثر عمل تحکیم γ_{sat} لایه ۱۰ متری رس که از هر دو طرف زهکشی می‌شود، از ۲۰۰۰ به ۲۰۲۰ kg/m^3 رسیده است. اگر چگالی دانه‌ها ۲٫۶۵ باشد مطلوب است نشست رس:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\cdot\gamma_w \Rightarrow \begin{cases} 2000 = \frac{2.65+e_0}{1+e_0}\gamma_w \Rightarrow e_0 = 0.65 \\ 2020 = \frac{2.65+e_1}{1+e_1}\times\gamma_w \Rightarrow e_1 = 0.617 \end{cases}$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \Rightarrow \frac{\Delta H}{10} = \frac{0.65-0.617}{1+0.65} \Rightarrow \Delta H = 0.2\ m$$





با افزایش زمان بارگذاری و نسبت بارگذاری نمودار به سمت چپ حرکت می‌کند.

رس عادی تحکیم یافته و رس پیش تحکیم یافته:

الف - اگر فشار سربار موجود در هنگام نمونه‌گیری (p_0) با حداکثر فشار سربار مؤثری که نمونه در گذشته تحت تأثیر آن بوده (p_c) برابر باشد خاک ریزدانه عادی تحکیم یافته است.

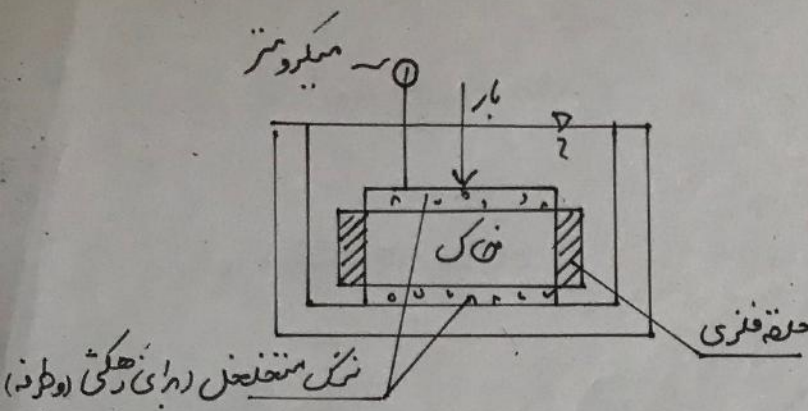
ب - اگر فشار سربار موجود در هنگام نمونه‌گیری (p_0) از حداکثر فشار سربار مؤثری که نمونه در گذشته تحمل کرده کمتر باشد (یعنی نمونه در اثر عوامل طبیعی نظیر فرسایش و یا عوامل غیر طبیعی انسانی نظیر خاکبرداری از میزان سربار آن کم شده باشد) خاک پیش تحکیم یافته است.

نکته: نسبت پیش تحکیمی:

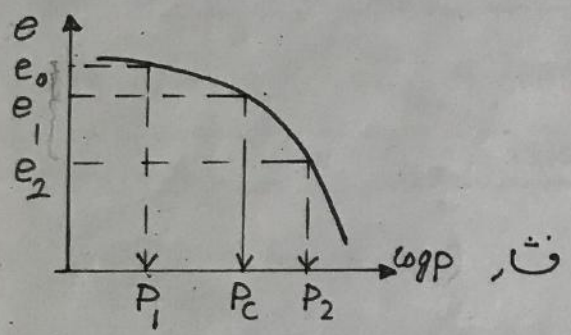
$$OCR = \frac{P_c}{P_0}$$

نکته : تبدیلات فشار آب حفره ای بر تنش مؤثر در عمق مقاومت است. اگر خاک از دو طرف زهکشی شود آب سریعتر از ابتدا و انتهای نمونه خارج شده در حالیکه وسط لایه تبدیلات کندتر است.

آزمایش تحکیم کی بعدی :



نمونه خاک به قطر ۲/۵ اینچ و به ارتفاع ۱ اینچ مطابق شکل در محفظه دستگاه ادئومتر قرار داده می شود و محفظه با آب پر می شود تا خاک اشباع شود. بار هم بارگذاری می شود بعد از ۲۴ ساعت بار دوباره برداشته و بعد از هر بارگذاری توسط میکرومتر قرائت میزان فشردگی صورت می گیرد. این روند تا فشاری که خاک در field در آن ساخته شده ادامه می یابد. در پایان خاک را خشک می کنیم W_s را اندازه می گیریم.



(الف) $e_0 = \frac{V_{v0}}{V_s}$ حجم حفرات در ابتدای آزمایش

$= V_0 - V_s$

$= \frac{W_s}{\gamma_w G_s}$ حجم دانه های جامد

وزن خشک نمونه که در آخرین مرحله تعیین کردیم.

(ب) $\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{\Delta H}{H_0}$

Δe : کاهش نسبت تخلخل تا پایان روز n ام

ΔH : نشست نمونه " " " "

$\Delta e = e_0 - e_2 \Rightarrow e_2 = e_0 - \Delta e$

قسمت قوقانی نمودار (قبل از P_c) شیب کمی دارد زیرا فشاره ای است که نمونه در طول عمر خود آنها را تحمل کرده. (P_c: فشار پیش تحکیمی) قسمت دوم پر شیب فشاری است که بواسطه آزمایش تحکیم روی نمونه وارد میشود.

نکته : ΔH و Δe نشست و کاهش نسبت تخلخل تا پایان روز n ام می باشند. اگر n آخرین روز آزمایش تحکیم باشد ΔH و Δe نهایی می باشند.

نکته : روابط تجربی بازدارقی وکپ (۱۹۶۷) برای نشانه فسردگی :

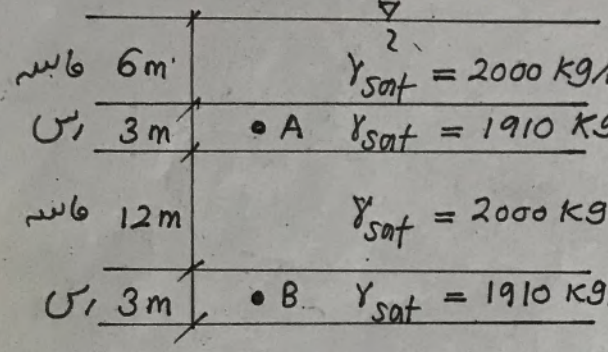
$C_c = 1.009 (LL - 10)$ رس دست نخورده

$C_c = 1.007 (LL - 10)$ رس ″ خورده

نکته : رابطه بین C_c و C_s :

$C_s = (\frac{1}{5}$ الی $\frac{1}{10}) C_c$

مثال : بار یکنواخت به شدت ۱٫۴۵ کیلوگرم بر سانتی متر روی یک سطح وسیع پخش شده است. نشست تحکیم خاک را تعیین کنید.



$\Delta\sigma' = 1.45 kg/cm^2$

$\sigma'_A = \gamma' H = (2000 - 1000) \times 6 + (1910 - 1000) \times 1.5$ (زیر کف لایه)

$= 7365 kg/m^2 \approx 0.74 kg/cm^2$

$\Delta H_1 = \frac{H_0 C_c}{1 + e_0} \log(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}) = \frac{0.35 \times 300}{1 + 0.935} \log(\frac{1.45 + 0.74}{0.74}) = 25.57 cm$

$\sigma'_{0B} = \gamma' H = 7365 + 1.5 \times (1910 - 1000) + 12 \times (2000 - 1000) + 1.5 \times (1910 - 1000)$

$= 22095 kg/m^2 \approx 2.21 kg/cm^2$

$\Delta H_2 = \frac{H_0 C_c}{1 + e_0} \log(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}) = \frac{0.35 \times 300}{1 + 0.935} \log(\frac{1.45 + 2.21}{2.21}) = 11.89 cm$

$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = 25.57 + 11.89 = 37.46 cm$

واحد شیراز

مکانیک خاک (1)

فصل هفتم

«مقاومت برشی»

استاد : دکتر علیرضا حاجیانی بوشهریان

@geomechanicsiau

مقاومت برشی خاک

مقاومت داخلی واحد سطح خاک در برابر گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحهٔ داخلی واقع در تودهٔ خاک را مقاومت برشی خاک می‌گویند.

نظریه (تئوری مور-کلمب) :

ترکیبی از تنش قائم و برشی باعث گسیختگی خاک میشود.

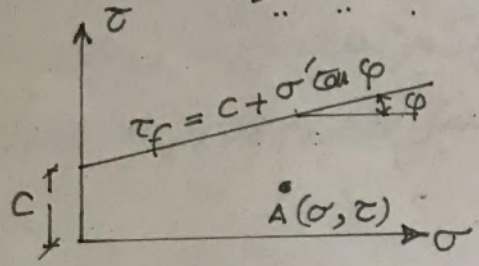
$$\tau_f = c + \sigma \tan\varphi$$

τ_f : تنش برشی که سبب گسیختگی در تودهٔ خاک شده و مقاومت برشی نامیده میشود.

σ : " قائم در صفحهٔ گسیختگی

φ : زاویهٔ اصطکاک داخلی

c : چسبندگی



اگر نقطهٔ A که وضعیت تنش در تودهٔ خاک را نشان می‌دهد؛ روی خط $\tau_f = c + \sigma \tan\varphi$ باشد (در امتداد این صفحه گسیختگی رخ می‌دهد.) اگر نقطهٔ A روی آن واقع شده باشد صفحه مورد نظر صفحهٔ گسیختگی خواهد بود.

نکته : نقطهٔ A نمی‌تواند بالای خط $\tau_f = c + \sigma \tan\varphi$ باشد زیرا قبل از رسیدن به چنین وضعیتی خاک گسیخته شده است.

نکته : در خاک‌های اشباع بجای استفاده از تنش کل (σ) از تنش مؤثر استفاده می‌کنیم زیرا آب مقاومت برشی ندارد.

$$\tau_f = c + \sigma' \tan\varphi$$

c و φ به ترتیب چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی برای خاک اشباع است. (φ' و c' یا φ_d و c_d)

نکته : c_d (زهکشی شده) برای ماسه، لای غیرآلی و رس عادی تقریباً مساوی با صفر است.

آزمایش مقاومت برشی :

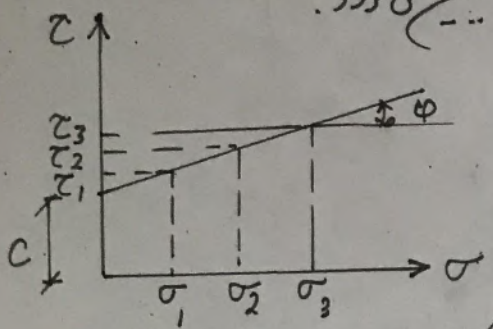
برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک در دو حالت خشک (ϕ و c) و زهکشی نشده (ϕ' و c')

۱ - آزمایش برش مستقیم :

- نمونه مکعبی یا استوانه‌ای خاک بصورت دستخورده تهیه میشود.
- " در دستگاه آزمایش که متشکل از دو جعبه برشی است قرار داده میشود.
- بار قائم P که مقدار آن در طول آزمایش ثابت است بر نمونه اعمال میشود.
- جعبه برشی متحرک دستگاه، توسط نیروی افقی T تدریجاً کشیده میشود تا خاک گسیخته شود.
- تنش قائم و برشی صفحه گسیختگی بصورت زیر محاسبه میشود:

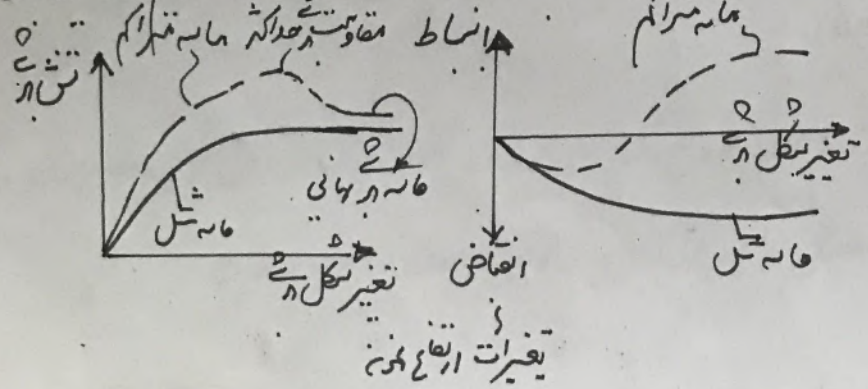
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad , \quad \tau = \frac{T}{A}$$

با تکرار این آزمایشها خط گسیختگی رسم شده و پارامترهای خاک تعیین می‌گردد.



نکته : برای بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی زهکشی شده یا در خاک اشباع را با سرعت پایین بارگذاری می‌کنند.

نکته : نمودار تنش برشی و تغییرات ارتفاع نمونه در مقابل تغییر مکان برشی، برای ماسه خشک مثل دستراکم در آزمایش برش مستقیم مطابق اشکال زیر است



معایب تست برش مستقیم:

الف - صفحه گسیختگی احتمالاً در صفحه جدایی دو قطعه دستگاه است. در حالیکه ممکن است صفحه ضعیف در جهتی دیگر باشد.

ب - توزیع تنش یکنواخت نمی‌باشد.

آزمایش سه محوری :

یکی از دقیقترین روشهای تعیین c و ϕ است که در آن دو دسته تنش به نمونه خاک وارد می‌شود .

۱ - فشار همه جانبه σ_3 ناشی از آب موجود در دستگاه

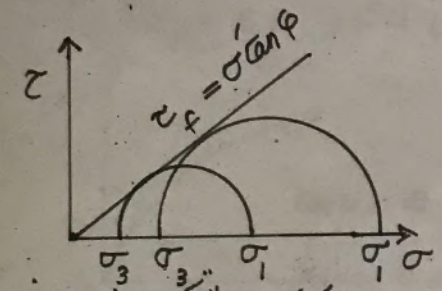
۲ - " وارده از فک دستگاه (σ_1)

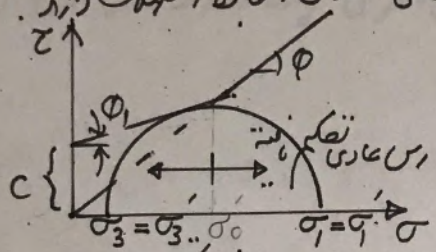
- اگر هنگام اعمال فشار همه جانبه اجازه خروج آب از خاک داده شود، آزمایش تحکیم یافته است .

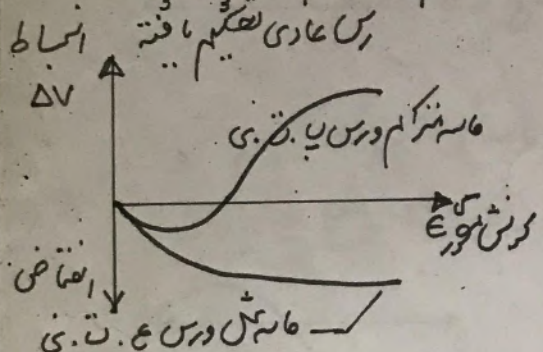
- " " " بار محوری " " " " " زهکشی نشده "

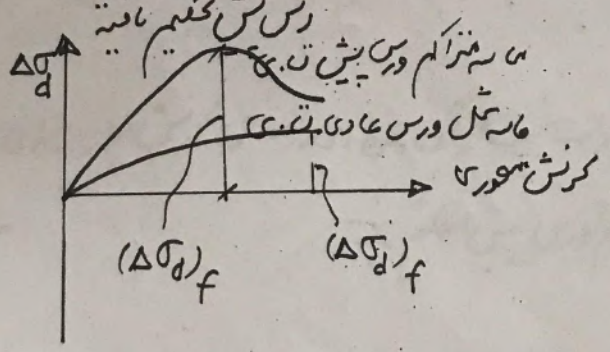
آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده : (CD)

در این آزمایش کلیه فشارهای منفذی اجازه استهلاک دارند .



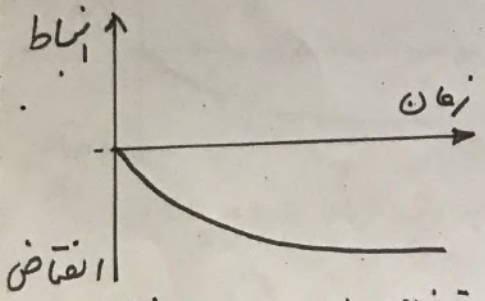






تغییر حجم نمونه در هنگام اعمال تنش انحرافی

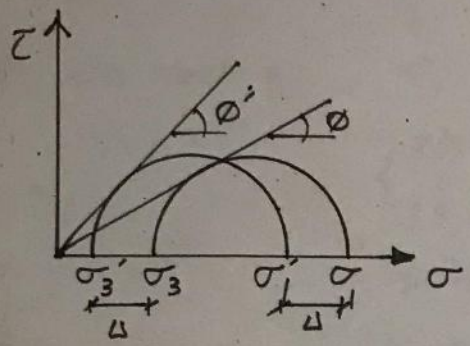
نکته : این آزمایش در ایران وقت گیر بوده و تنها در مطالعات بسیار دقیق کاربرد دارد .



تغییر حجم نمونه در حین اعمال فشار همه جانبه

آزمایش CU :

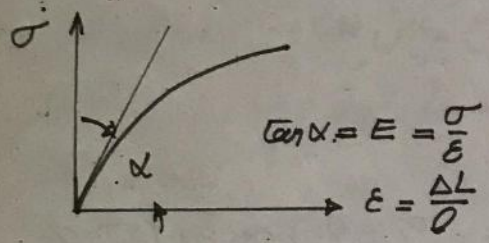
به علت زمان کوتاهی که در انجام این آزمایش صرف میشود، این آزمایش نسبت به آزمایش CD از اعتبار بیشتری برخوردار است. به دلیل وجود فشار آب حفره‌ای در حالت ماندگاری فک دستگاه بین نتایج تنش موثر و کل تفاوت وجود دارد.



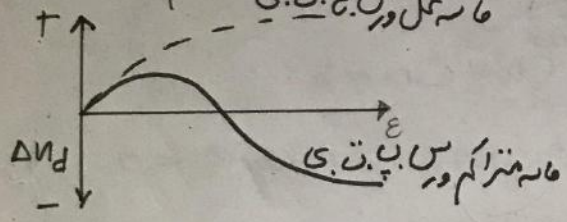
$\phi < \phi'$

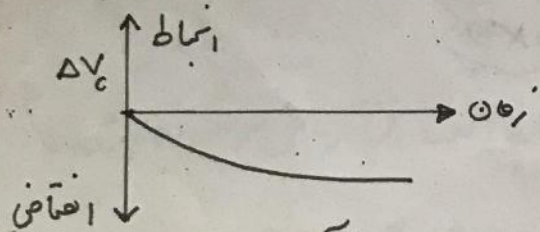
$\sigma = \sigma' + u$

نکته : نمودار تغییرات تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ در برابر کرنش محوری آزمایش CU و CD نظیر یکدیگر می‌باشد.



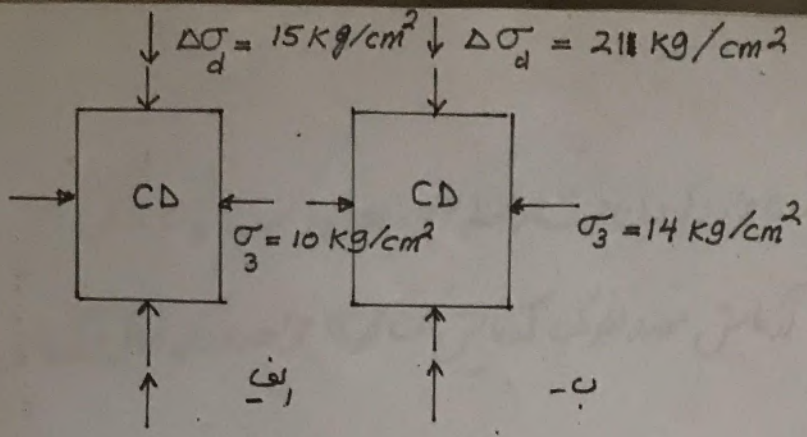
نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای در مقابل کرنش محوری برای ماسه شل و رس عادی تحکیم یافته و ماسه متراکم و رس پیش تحکیم یافته :





نکته : اگر فشار آب منفذی منفی باشد، حجم نمونه در حین آزمایش ثابت می‌ماند، زیرا اولاً در حین اعمال فشار همه جانبه ΔV_c (تغییر حجم ناشی از σ_3) ناچیز خواهد بود. ثانیاً تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ نیز به علت زهکشی نشدن نمونه و عدم خروج آب از آن تغییری در حجم بوجود نمی‌آورد. ($\Delta V_d = 0$)

مثال : بر روی دو نمونه از خاک، آزمایش CD انجام می‌گیرد و بر روی نمونه‌ای دیگر از همان خاک آزمایش CU انجام شده و خاک در فشارهای $\sigma_1 = 20\ kg/cm^2$ و $\sigma_3 = 12\ kg/cm^2$ گسیخته می‌شود. اضافه فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی را تعیین کنید:



CD Test :

$$\sigma_1 = \sigma_\mu \tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) + 2C\tan(45+\frac{\varphi}{2})$$

$$\begin{cases} 25 = 10\tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) + 2C\tan(45+\frac{\varphi}{2}) \\ 35 = 14\tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) + 2C\tan(45+\frac{\varphi}{2}) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \varphi_{CD} = 25.37^\circ \ ; \ C_{CD} = 0$$

نکته : اگر اضافه فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی (Δu_d)$_f$ مثبت شده باشد، می‌توان تنش‌های کل آزمایش CU را به تنش‌های مؤثر تبدیل کرد. به عبارت دیگر می‌توان از نتایج آزمایش CU، نتایج آزمایش CD را به دست آورد و با رسم دوایر مور نظیر تنش‌های مؤثر به دست آمده، خط گسیختگی مربوط را رسم نمود. و در نهایت پارامترهای برشی خاک در حالت زهکشی شده را تعیین کرد.

CU test :

$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2(45+\frac{\varphi'}{2}) + 2C'\tan(45+\frac{\varphi'}{2})$$

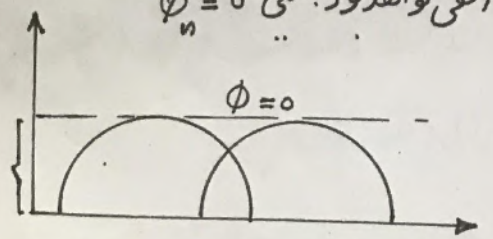
$$\sigma_3' = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f = 12 - (\Delta u_d)_f$$

$$\sigma_1' = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f = 20 - (\Delta u_d)_f$$

$$\varphi' = \varphi_{CD} \ ; \ C' = C_{CD} \Rightarrow (\Delta u_d)_f = 6.67\ kg/cm^2$$

آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)

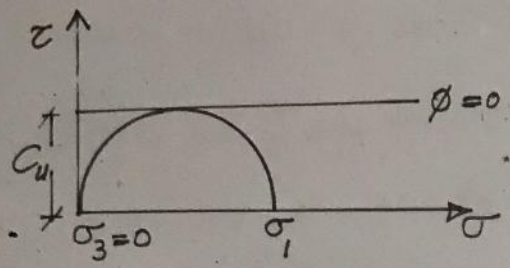
در هر دو مرحله بارگذاری اجازهٔ خروج آب داده نشده است. این آزمایش سریع انجام شده و در رسها کاربرد دارد. پوش گسیختگی در این آزمایش خط افقی خواهد بود. یعنی $\varphi_u = 0$

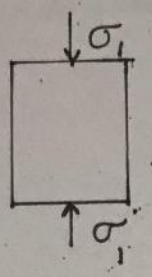


نکته : صفر بودن ϕ در این شاخه بدان معنی نیست که مصالح چسبنده است.

آزمایش UU :

اگر در آزمایش UU بدون وارد کردن فشار محصور کننده σ_3، تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را به نمونه وارد کنیم؛ در اینصورت آزمایش مورد نظر یک آزمایش تک محوری خواهد بود که به آن آزمایش فشاری محدود نشده می‌گویند:

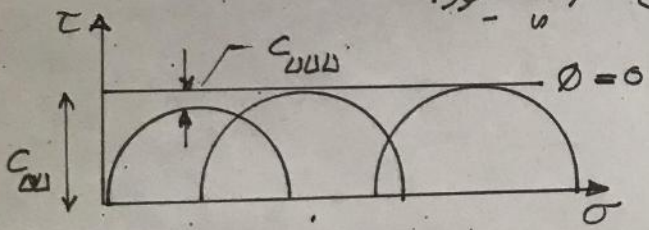




$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = C_u$$

که مقاومت برشی زهکشی نشده

نکته: در آزمایش فشاری محدود نشده آن است که برای خاک رس اشباع در عمل C_u بدست آمده از این آزمایش، قدری کوچکتر از C_u بدست آمده از آزمایش UU است. علت: در آزمایش UU فشار جانبی باعث بسته ماندن ترک‌ها و افزایش مقدار C_u میشود.



نکته: در خاک‌های رسی مقاومت فشاری محدود نشده (q_u) بعد از هم خوردگی نمونه، بدون هرگونه تغییری در میزان رطوبت، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این خاصیت خاک‌های رسی را حساسیت می‌نامند

$$S_t = \frac{q_u \text{ (دست نخورده)}}{q_u \text{ (دست خورده)}}$$

علت حساسیت خاک‌های رسی تغییر یافت طبیعی ذرات خاک می‌باشد. اگر نمونه هم خورده در حالی که رطوبت خود را حفظ کرده است بگذارند زمان مجدداً مقاومت از دست رفته را کسب می‌نماید. (تیکسوتروپی)

نکته: سرعت انجام آزمایشهای سه محوری برای یک نمونه رسی (نفوذپذیری پایین)

مربوط به درجه اشباع: سرعت آزمایش CD < سرعت آزمایش CU < سرعت آزمایش UU

(ممکن است چند روز طول کشد تا به تعادل کامل)