



ما مصمم هستییم تا کلیه آموخته هایمان را در اختیار دانشجویان و دانش پژوهان پرچسته کشور قرار دهیم و معتقدیم که با این عمل، درسازندگی های آتی که توسط شما توانمندان بوجود خواهد آمد شریک خواهیم بود.

شما نیز با یاری گیری علوم تان، ایران را سرفراز تر کنید

## مکانیک خاک

با تشکر از استاد پزرگوار جناب آقای دکتر مسجیدی که تمام تلاش خود برای انتقال اطلاعات علمی مورد نیاز

دانش آموزان را بعمل می آورد

اهداف دانشمندان شناسایی بهترین خاک در مکانیک خاک است

اجزای تشکیل دهنده یک خاک نیمه اشباع عبارتند از:

ذرات جامد (مواد معدنی و آلی) آب هوا

خاک اشباع فاقد هوا و خاک خشک فاقد آب است. جهت شناخت مکانیک خاک لازم است برخی از پارامترها را یادآوری نماییم.

روابط جرمی	روابط وزنی	روابط وزنی	روابط جرمی
$V_a$	هوا	$W_a$	.
$V_w$	آب	$W_w$	$M_w$
$V_s$	ذرات جامد	$W_s$	$M_s$

روابط وزنی و جرمی خاک: تفاوت این روابط در شتاب  $g$  است زیرا روابط وزنی دارای شتاب  $g$  میباشند.  $w = m \cdot g$

جرم مخصوص ظاهری خاک:  $\rho = \frac{M}{V}$  عبارتست از نسبت بین جرم خاک به حجم خاک. جرم مخصوص آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

وزن مخصوص خاک: (وزن جرمی خاک): وزن مخصوص نسبت وزن خاک به حجم آب میباشد.

وزن مخصوص خشک  $\gamma_d$ ، مرطوب  $\gamma$ ، اشباع  $\gamma_{sat}$  و مستغرق  $\gamma'$  و علامت خاصی برای معرفی آنها تعریف شده است که عبارتند از: برای وزن مخصوص خاک

خشک  $\gamma_d$ ، مرطوب  $\gamma$ ، اشباع  $\gamma_{sat}$  و مستغرق  $\gamma'$  وزن مخصوص خاک مستغرق نسبت به وزن مخصوص اشباع و وزن مخصوص اشباع نسبت به وزن مخصوص مرطوب و وزن مخصوص مرطوب نسبت به وزن مخصوص خشک بیشتر است.

چگالی ذرات جامد خاک: عبارتست از جرم یا وزن ذرات جامد به جرم یا وزن آب هم حجم آن در دمای ۴ درجه سانتیگراد (در دمای غیر از ۴ درجه سانتیگراد وزن مخصوص تغییر میکند).

چگالی ذرات جامد خاک  $G_s = \frac{M_s}{V_s \rho_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$  (توجه:  $\gamma_s$  همان وزن مخصوص ذرات جامد و  $\gamma_w$  نیز وزن مخصوص آب است. چگالی ذرات جامد اغلب بین ۲٫۶۵ تا ۲٫۷۵ است. چگالی آب یک و چگالی جیوه ۱۳٫۶ است.)

توجه: چگالی نسبت به آب اعلام میگردد)

توجه: در این جزوه نسبت پوکی با  $e$  و نسبت تخلخل با  $n$  نمایش داده شده است که در برخی از کتابهای علمی علامت آن به ترتیب با  $e$  و  $n$  است. این تفاوت در محتوای مسائل تغییری ایجاد نمیکند.

درصد رطوبت خاک: عبارتست از نسبت جرم یا وزن آب به جرم یا وزن ذرات جامد آن.  $\omega = \frac{M_w}{M_s} = \frac{W_w}{W_s} * 100$

درصد هوای خاک :

عبارتست از نسبت حجم هوا به حجم کل خاک :  $A = \frac{V_a}{V} * 100$  توجه  $A = n(1 - S_r)$

نسبت پوکی : عبارتست از نسبت حجم خلل و فرج به حجم ذرات جامد خاک .  $e = \frac{V_v}{V_s}$

برای ماسه های طبیعی نسبت پوکی اغلب بین ۰.۵ تا ۰.۸ ، می باشد و برای خاکهای چسبیده بین ۰.۷ تا ۱.۱ است .

تخلخل یا پروسیتی : عبارتست از نسبت حجم خلل و فرج به حجم کل خاک .  $N = \frac{V_v}{V} * 100$

بین نسبت پوکی و تخلخل این رابطه برقرار است :  $n = \frac{e}{1+e}$  ،  $e = \frac{n}{1-n}$

درجه اشباع : عبارتست از نسبت حجم آب به حجم خلل و فرج .  $S_r = \frac{V_w}{V_v} * 100$  (درجه اشباع می باشد) . این رابطه

نیز یک رابطه حجمی است ./ برای خاکهای خشک درجه اشباع برابر صفر و برای خاکهای کاملا اشباع درجه اشباع برابر یک است .

حجم مخصوص : عبارتست از حجم کل توده خاکی که حجم قسمت جامد آن برابر یک باشد .

با در نظر گرفتن روابط فوق میتوان روابط زیر را نتیجه گرفت : ( با فرض  $V_s=1$  )

فرمول ردیف دوم برای خاکهای اشباع

$$e = \frac{V_v}{V_s} = V_v$$

$$S_r = \frac{WG_s}{e} \rightarrow S_r \cdot e = WG_s \quad , \quad S_r = 1 \Rightarrow e = WG_s$$

$$\gamma = \frac{WG_s + G_s}{1+e} \gamma_w \rightarrow \gamma = \frac{G_s(1+W)}{1+e} \gamma_w \Rightarrow \gamma = \frac{e \cdot S_r + G_s}{1+e} \gamma_w$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_r = 1 \Rightarrow \gamma_{sat} = \frac{e + G_s}{1+e} \gamma_w \\ S_r = 0 \Rightarrow \gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w \quad \text{و} \quad \gamma_d = \frac{\gamma}{1+W} \end{array} \right.$$

وزن مخصوص خاک مستغرق : چون توده خاک در حالت مستغرق تحت تاثیر نیروی ارشمیدوس به اندازه آب هم

جسمش سبک میشود لذا  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$  پس

$$\gamma' = \frac{(e + G_s) \gamma_w}{1+e} - \gamma_w \Rightarrow \gamma' = \frac{G_s - 1}{1+e} \gamma_w$$

وزن مخصوص خاک اشباع نیز از رابطه  $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+W}$  بدست می آید .

مثال : مشخصات میانگین یک خاک طبیعی برابر زیر است

الف : اگر با اضافه کردن آب به خاک آن را کاملا اشباع کنیم رطوبت خاک در حالت اشباع چقدر خواهد بود . ب : وزن

مخصوص خاک اشباع را بدست آورید .

$e = 0.8$  ،  $W = 24\%$  و  $G_s = 2.68$  چون خاک اشباع است  $S_r = 1$  می باشد .

$$S_r \cdot e = WG_s \quad , \quad 1 * 0.8 = W * 2.68 \Rightarrow W_{sr} = \frac{0.8}{2.68} = 29.85\%$$

همان درصد رطوبت خاک اشباع است در نتیجه در حالت اشباع درصد رطوبت بیشتر است . با توجه به پاسخ بدست

آمده میتوان گفت تقریباً ۵٪ خاک اشباع رطوبت بیشتری پیدا کرده است .

$$\gamma_{sat} = \frac{e + G_s}{1 + e} \gamma_w \Rightarrow \gamma_{sat} = \frac{0.8 + 2.68}{1 + 0.8} * 9806 = 18958.26 \text{ N/m}^3 = 18.95 \text{ KN/m}^3$$

مثال: یک نمونه خاک دارای ۱٫۸ نیوتن وزن و ۰٫۱ متر مکعب حجم است. میزان رطوبت آن که در آزمایشگاه بدست آمده است ۱۲٫۶٪ میباشد اگر  $G_s = 2.71$  باشد مطلوب است تعیین ۱- وزن مخصوص خاک مرطوب ۲- وزن مخصوص خاک خشک ۳- نسبت پوگی ۴- نسبت تخلخل

۵ - درجه اشباع

$$W = 12.6\% \quad w = 1.8 \text{ KN} \quad V = 0.1 \text{ m}^3 \quad G_s = 2.71$$

$$\gamma = \frac{W \cdot G_s + G_s}{1 + e} \gamma_w = \frac{W}{V} = \frac{1.8}{0.1} = 18 \text{ KN}$$

با بکارگیری فرمولهای موجود باقی موارد بشرح زیر بدست می آیند

$$\gamma_d = 15.9 \text{ KN} \quad e = 0.67 \quad N = 40\% \quad S_r = 50\%$$

رده بندی خاک: در این علم، مکانیک خاک استقامت و مقاومت خاک را به ما نشان میدهد. با رده بندی خاکها میخواهیم خاک را از نظر بافت و ساختمان، جهت ساختمان سازی، راهسازی، سدسازی و غیره مورد بررسی قرار دهیم. سیستمهای مختلفی برای رده بندی خاک وجود دارد. درمکانیک خاک اساس رده

بندی خاک اندازه خاک برای خاکهای درشت دانه و خواص خمیری برای خاکهای ریزدانه است.

تعیین اندازه دانه ها: خاک از ذراتی با اندازه های متفاوت تشکیل شده است. نامگذاری ذرات خاک براساس قطر ذرات خاک برحسب م م بشکل زیر میباشد

رس clay ذرات کوچکتر از ۰٫۰۰۲ م م

لای silte بین ۰٫۰۰۲ تا ۰٫۰۶ م م

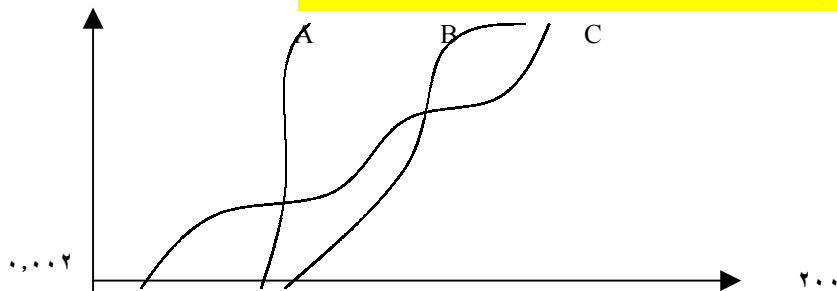
ماسه sand بین ۰٫۰۶ تا ۲ م م

شن gravel بین ۲ تا ۶۰ م م

قلوه سنگ cobble بین ۶۰ تا ۲۰۰ م م

لاشه سنگ boulder بزرگتر از ۲۰۰ م م

چنانچه اندازه ذرات درصدمده ای از یک خاک در محدوده باریکی از این دامنه قرار گیرد (کمتر از ۰٫۰۰۱ م م تا ۲۰۰ م م) آن خاک را یکنواخت و در صورتی که در محدوده آن قرار نگیرد آن خاک را غیر یکنواخت گویند. منحنی دانه بندی: اساس کار برحسب درصد وزن خاک و قطر ذرات خاک است.



نمودار A طیف محدودی از ذرات را دربر گرفته است و تقریباً نمودار یک خاک یکنواخت است ولی نمودار B طیف وسیعتری از ذرات را نشان میدهد. نمودار C، هر چند طیف وسیعی را در بر گرفته ولی در جاهایی، خط نمودار تقریباً افقی شده است یعنی درصد ذرات در آن رنج ثابت است. چنین خاکی را خاک گسسته گویند، در مهندسی خاک غیریکنواخت کاربرد بیشتری دارد).

منحنی دانه بندی در یک دستگاه مختصات دو بعدی نیمه لگاریتمی رسم میشود که در محور افقی، قطر دانه ها و لگاریتمی و محور عمودی درصدوزن مصالح عبور کرده از الکهای مختلف میباشد.

خاکی از نظر دانه بندی خوب شناخته میشود که منحنی آن طیف وسیعی از اندازه ذرات را نشان بدهد و در محدوده این طیف اندازه های حذف نشده باشد به این ترتیب دانه بندی خاک غیر یکنواخت که در محدوده منحنی اش همه اندازه ها

را دارا میباشد خوب توصیف میگردد . دانه بندی یک خاک یکنواخت و یا خاکی که فاقد بعضی از اندازه ها در محدوده منحنی اش میباشد ، ضعیف یا بدتوصیف میگردد .

**چگونگی دانه بندی یک خاک:** با ضرایبی که از منحنی دانه بندی آن بدست بیاید ، بصورت زیر ارزیابی میکنند

**برای خاکهای درشت دانه** از روش الک برای دانه بندی خاک استفاده میشود . روش الک برای خاکهای درشتتر از ۰,۰۷۵ م است ( الک آن بسیار ریز و شماره آن ۲۰۰ است ) .

برای مثال اگر قطر ذرات بدست آمده ۰,۰۷۵ م باشد، وزن آن رابدست آورده و در محور افقی نمودار قرار داده و مقدار % آن را تعیین کرده و در محور عمودی نمودار قرار میدهیم بدین ترتیب از تلاقی نقاط بدست آمده یک نقطه در صفحه نمودار بوجود می آید و به همین طریق بقیه نمودار ترسیم میشود . آزمایش دانه بندی یعنی لرزاندن نمونه خاک بر روی مجموعه ای از الکها ، که اندازه ذرات بترتیب کوچکتر میشوند .

شماره الک	۴	۵	۶	۷	.....	۲۰۰	۲۷۰
اندازه چشمه م م	۴,۷۵	۴	۳,۳۵	۲,۸	.....	۰,۰۷۵	۰,۰۵۳

پس از عبور خاک از الکها ، جرم خاک روی هر الک تغییر میکند و سپس مراحل زیر انجام میشود .

- جرم خاک روی هر الک یعنی  $m_1, m_2, m_3$  و ..... و خاک روی کفه زیرین را تعیین میکنیم
- جرم کل خاک را بدست می آوریم  $m_1+m_2+m_3+....m_n=M$
- جرم تجمعی خاک باقیمانده در بالای هر الک را تعیین میکنیم برای مثال برای الک I ام خواهیم داشت  $M_1+M_2+M_3+....M_i$

- جرم خاک عبوری از الک I ام عبارتند از  $M-(M_1+M_2+M_3+....M_i)$

- درصد خاک عبوری از الک I ام بصورت زیر بدست می آید .

$$f = \frac{M - (M_1 + M_2 + M_3 + \dots M_i)}{M} * 100$$

که f درصد عبوری از الک میباشد .

پس از محاسبه درصد عبوری ازهر الک محاسبات را بر روی کاغذ نیم الگاریتمی بصورت نمودار ترسیم میکنیم در این نمودار درصد عبوری بر روی محور عمودی ( مقیاس حسابی ) و اندازه قطر ذرات بر روی محور افقی ( مقیاس لگاریتمی ) نشان داده میشود .

**برای خاکهای ریز دانه** از روش هیدرومتری یاچگالی سنجی و برای ذرات ریزتر از ۰,۲ م م استفاده میگردد . این آزمایش براساس اصل ته نشینی ذرات خاک در آب انجام میشود در این حالت پس از پراکنده شدن نمونه خاک در آب ذرات خاک بسته به شکل ، اندازه و وزن خودوهمچنین گرانیروی (لزجت)با سرعتهای متفاوتی ته نشین میشوند. در این آزمایشات

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} D^2$$

ذرات خاک کروی فرض شده و سرعت ذرات براساس قانون استوکس به این صورت بیان میشود

که  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب ،  $\gamma_s$  وزن مخصوص ذرات خاک ، D قطر ذرات و  $\eta$  آب است .

**منحنی توزیع دانه بندی:** از منحنی دانه بندی میتوان برای تعیین پارامترهای زیر استفاده نمود :

۱- اندازه موثر  $D_{10}$  :  $D_{10}$  اندازه ای است که ۱۰٪ وزن ذرات خاک از آن کوچکتر باشد . این معیار خوبی برای تخمین ضریب نفوذپذیری وزهکش آب از درون خاک است .

۲- ضریب یکنواختی :  $C_u$  : اندازه ای که ۶۰٪ وزنی ذرات از این اندازه کوچکتر باشد .  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$  . ضریب یکنواختی

برای خاکی که اندازه آن یکسان است برابر یک میباشد . بزرگ بودن این ضریب نشان دهنده دامنه تغییرات وسیع اندازه ذرات خاک بین  $D_{10}$  و  $D_{60}$  است . بزرگ بودن ضریب یکنواختی به تنهایی دلیل بر خوبی خاک نیست چون ممکن است شرایطی مانند خاک گسسته داشته باشند . در چنین مواقعی از ضریب انحنا استفاده میکنیم .

$$C_c = \frac{D_{30}}{D_{60} * D_{10}}$$

۳- ضریب انحنا ( خمیدگی ) :  $C_c$

الف: اگر  $C_c$  ضریب خمیدگی نزدیک به یک باشد دانه بندی خاک خوب است .

ب: اگر  $C_c$  خیلی کوچکتر یا خیلی بزرگتر از یک باشد دانه بندی خاک بد است .

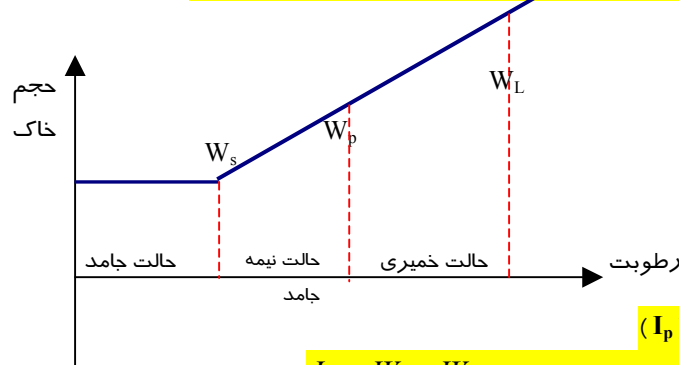
ج: بطور کلی یک خاک با دانه بندی خوب دارای ضریب انحنای بین ۱ تا ۳ است ( ضریب خمیدگی از یک بیشتر باشد ).  
 خواص خمیری خاک ریزدانه: چنانچه با اعمال نیرو ، شکل یک توده خاک مرطوب را بتوان تغییر داد بدون آنکه حجم آن تغییر کند و یا اینکه پس از حذف نیرو به شکل اول برگردد و یا ترک خورده و شکاف بردارد، میگویند این خاک دارای خاصیت خمیری یا پلاستیسیته است . خمیرایی یکی از خواص مهم خاکهای چسبیده است عامل اصلی این خاصیت ذرات رس و عامل اصلی موجود در خاک می باشد . کاهش آب موجود در خاک موجب کاهش لایه کاتیونی اطراف رس گشته و در نتیجه موجب افزایش نیروی جاذبه بین ذرات رس میگردد . چنانچه به یک توده خاک چسبیده به مقدار فراوان آب اضافه گردد به حالت مایع میشود اگر به تدریج آب این توده خاک کاهش داده شود زمانی میرسد که آن خاک حالت روانی خود را از دست داده و حالت الاستیک یا خمیری به خود میگیرد با کاهش بیشتر آب به تدریج توده خاک حالت نیمه جامد و بالاخره حالت جامد را بخود میگیرد .

آقای آتربرگ براساس شرایط فیزیکی خاک ، ۴ حالت جامد ، نیمه جامد ، خمیری و روانی را برای خاک در نظر گرفت . درصد رطوبت حد انقباض  $W_p$ : درصد رطوبت خاک ، حدفاصل بین حالت جامد و نیمه جامد را گویند مرحله ای که کاهش رطوبت ، کاهش در حجم بوجود نمی آورد .

درصد رطوبت حد خمیری  $W_p$ : درصد رطوبت خاک ، حدفاصل بین حالت نیمه جامد و حالت خمیری را گویند و از طریق فته کردن خاک به قطر ۳ م م بدست می آید .

درصد رطوبتی حد روانی  $W_L$ : درصد رطوبت خاک ، حدفاصل بین حالت خمیری و حالت روانی را گویند و توسط دستگاه کاساگراند تعیین میشود ( این دستگاه همانند یک فنجان است . مقداری از نمونه خاک در حد روانی را درون آن ریخته و با یک وسیله کارد مانند وسط خاک شکاف ایجاد میکنیم و تعداد مشخصی ضربه به دستگاه وارد نموده تا مجددا شکاف ایجاد شده از بین رفته و نمونه تهیه شده در محل شکاف به یکدیگر بچسبند . در این دستگاه ، تعداد ضربات زده شده ملاک محاسبه حد روانی است ) حد روانی میزان رطوبتی است که مقاومت برشی خاک به ازاء آن ۲.۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است . حد روانی بستگی به بار الکتریکی و سطح ویژه ذرات خاک دارد . هرچه بار الکتریکی بیشتر باشد آب متصل به آن بیشتر و حجم روانی خاک بزرگتر است بنابراین حد روانی بزرگ نشانه بالا بودن حجم ذرات خاک رس میباشد .

اهمیت حدود اتربرگ و شاخص های مربوط به آن: حدود اتربرگ و شاخص های آن که در این حدود تعریف میشود در خصوصیات فیزیکی ، شیمیایی و مکانیکی خاکها در طبقه بندی آنها حائز اهمیت است .



۱ -- شاخص خمیری ( $I_p$ )

تفاوت رطوبت خاک در حد روانی و خمیری است .  $I_p = W_L - W_p$

شاخص خمیرایی بزرگ همواره با حد روانی بزرگ نشان دهنده این است که پتانسیل انقباض و انبساط خاک بر اثر کاهش یا افزایش رطوبت زیاد است به عبارت دیگر خاک بر اثر تبخیر به مقدار زیادی منقبض گشته و کاهش حجم پیدا میکند برعکس اگر در مجاورت آب کافی قرار گیرد شدیداً متورم گشته و به مقدار زیادی افزایش حجم پیدا میکند .

۲ -- شاخص روانی ( $I_f$ )

شاخص روانی گویای درجه تغییر مقاومت برشی خاک بر اثر افزایش آب است به عبارت دیگر شیب خط روانی را شاخص روانی گویند . در آزمایش حد روانی رابطه میان میزان رطوبت و لگاریتم N (لگاریتم تعداد ضربات) لازم برای بسته شدن شکاف ایجاد شده توسط شیارزن در خاک درون فنجان دستگاه کاساگراند تقریباً بصورت یک خط مستقیم است .

$$I_f = \frac{W_2 - W_1}{\log N_2 - \log N_1}$$

خاکی که در ۲۵ ضربه شیارش به هم بیوندد یعنی در حدروانی قراردادی یعنی  $N=25$ .

۳- شاخص مایع ( $I_L$ )

وضع طبیعی رطوبت یک خاک در مقایسه با رطوبت آن در حد روانی و خمیری را با شاخص مایع مشخص میکنند.

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p}$$

که  $W$  وضع رطوبت طبیعی خاک و  $W_p$  درصد رطوبت خاک در حدخمیری و  $I_p$  شاخص خمیرایی است.

۴- شاخص اکتیویته ( $I_A$ )

برای بررسی بخش یک خاک رس چسبیده که تا چه درجه خاصیت خمیری یا پلاستیسه دارد، از شاخص اکتیویته استفاده میکنند. (یعنی مشخص شدن نوع رس)

$$I_A = \frac{I_p}{d < 0.002}$$

فرمول اسکمپتون: هرچه رس فعال تر باشد تغییر حجم آن بر اثر رطوبت بیشتر است. شاخص

اکتیویته برای شناسایی پتانسیل تورم خاک بکار می رود. شاخص اکتیویته برای شناسایی پتانسیل تورم کاربرد دارد.

**توصیف و رده بندی خاک:** توصیف خاک با رده بندی خاک متفاوت است رده بندی خاک عبارتست از تقسیم بندی خاکها براساس مشخصات مواد تشکیل دهنده آنها به گروه معین. این مشخصات معمولا در آزمایشگاه با روشهایی بسیار دقیق بدست می آید. توصیف جامع یک خاک شرح مشخصات مواد تشکیل دهنده آن و نیز وضع و مشخصات توده خاک را درمحل شامل میشود. مشخصات مواد تشکیل دهنده خاک را میتوان از نوع بهم خورده خاک بدست آورد ولی خصوصیات خاک در محل باید در خود محل تعیین گردد و یا در مواردی از نمونه های بهم نخورده استفاده نمود.

توصیف خاک براساس استانداردکشور انگلستان **BS5930** شرح داده شده است بطور کلی خاکها را به چند نوع خاک پایه براساس اندازه ذرات آن تقسیم میکنند. بطور کلی توصیف خاک یعنی مشخص کردن مقدار درصد گونه های مختلف خاک در نمونه مورد آزمایش.

بطور کلی برای رده بندی و توصیف خاکها دو سیستم کلی وجود دارد. سیستمهای مختلفی برای رده بندی خاکها وجود دارد. برخی از این سیستمها برای کارهای غیرازمهندسی خاک (کشاورزی) پیشنهاد شده است. در بین سیستمها که خاک را از نظر خواص مکانیکی طبقه بندی میکنند، دو سیستم کاربردیتری دارند، سیستم **Unified** که نسبت به دیگر سیستم متعادل تر است.

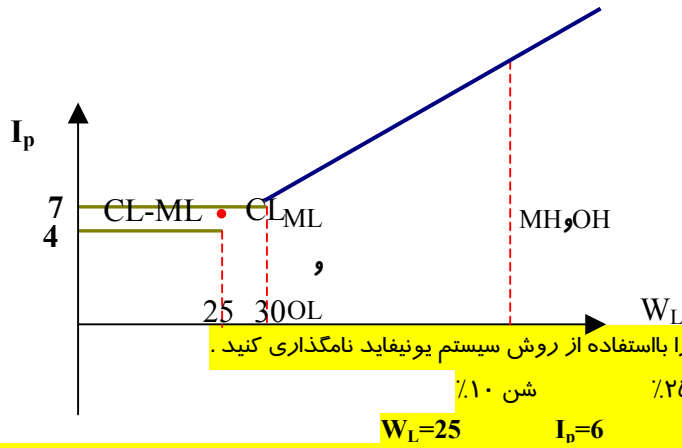
سیستم **Aashto** که در خصوص راهسازی از آن استفاده میگردد.

این رده بندی در سال ۱۹۴۳ توسط کاساگراند پیشنهاد گردید در این سیستم خاکها به دو دسته درشت دانه و ریز دانه تقسیم شده اند. خاک درشت دانه به خاکی گفته میشود که ۵۰٪ آن در الک شماره ۲۰۰ (یعنی قطر سوراخها ۰.۰۷۵ م م) باقی بماند و خاک ریزدانه به خاکهایی گفته میشود که بیش از ۵۰٪ آن از الک عبورکنند.

هریک از این دسته های اصلی به قسمتهای کوچکتر تقسیم میشوند کوچکترین واحد رده بندی، گروه می باشد. گروه هر خاک را با دو حرف نشان میدهند که حرف اول نشان دهنده نوع خاک و حرف دوم نشان دهنده وضعیت خاک میباشد.

حرف اول	حرف دوم	وضعیت خوب	وضعیت ضعیف
Gravel	G	Well graded - W	Poorly graded - P
Sand	S	With non_plastic fines - M	With non_plastic fines - C
Silt	M	Of low plastic - L	Of low plastic - H
clay	C		
مواد آبی	O		

از ضریب یکنواختی، ضریب انحنای حد روانی و شاخص خمیرایی برای تعیین گروه خاک استفاده میشود. آزمایش حد روانی و حد خمیری را بر روی قسمتی از خاک که از الک شماره ۴۰ رد شود، انجام میدهند. یکسری جداول و نمودار برای این منظور وجود دارد.



مثال : خاک با مشخصات زیر را با استفاده از روش سیستم یونیفاید نامگذاری کنید .

رس ولای ۶۵٪ ماسه ۲۵٪ شن ۱۰٪

$W_L = 25$       $I_p = 6$       $C_c = 3$       $C_u = 4$

با توجه به عبور بیش از ۵۰٪ از الک ۲۰۰، خاک ریزدانه است. چون خاک ریزدانه است از نمودار خمیرایی ( نمودار A کاساگراند) استفاده میشود. در این نمودار محور افقی حد روانی  $W_L$  و محور عمودی آن  $I_p$  است. جدا کردن رقم 6 در محور عمودی ( مطابق نوع نمونه خاک در مثال فوق ) و رقم ۲۵ در محور افقی و بوجود آوردن محل تلاقی، متوجه میشویم که این خاک از نوع CL-ML است. ( محل تلاقی با یک دایره کوچک قرمز رنگ در نمودار فوق نشان داده شده است ). یعنی رس با پلاستیسیته پایین و Silt با خمیرایی پایین است.

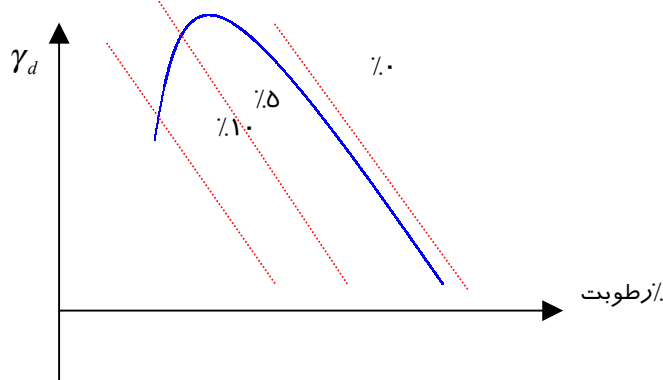
**تراکم خاک**: تراکم یعنی خارج کردن خلل و فرج از خاک.

تراکم، یکی از روشهای تغییر در خصوصیات فیزیکی در مهندسی خاک است. تراکم عبارتست از کاهش دادن تخلخل خاک یا خارج کردن هوا از خاک، این عمل در زمین و بطور گوناگون صورت میگیرد. در خاکهای چسبیده معمولاً از انواع غلطکها استفاده میشود و در خاکهای غیر چسبیده با ایجاد ارتعاش یا ویبراتور عمل تراکم انجام میشود. اثرات مثبت عمل تراکم: کاهش پتانسیل نشست، افزایش مقاومت برشی خاک، کاهش انقباض خاک و کاهش نفوذپذیری خاک

اثرات منفی عمل تراکم: افزایش پتانسیل تورم خاک در اثر یخندان. کم شدن نسبت پوکی موجب میشود که با مقدار کمی آب تمام خلل و فرج پر شوند در نتیجه برای افزایش حجم آب در اثر یخ زدن فضای باقی نمانده و حاصل این عمل تورم خاک و بالا آمدن سطح آن است. هرچه آب به ذرات خاک نزدیکتر باشد لزجت آن بیشتر و در درجه حرارت پایین تر یخ میزند. به همین دلیل آب در خلل و فرج ریز دیرتر از خلل فرج درشت منجمد میشود و از آنجاکه در عمل تراکم، خلل و فرج ریزتر میشوند لذا یخ زدن آب در درجه حرارت پایین تر صورت میگیرد این امر باعث محدود شدن تورم خاک بر اثر یخندان به شرایط آب و هوایی خاص میگردد.

آزمایش تراکم استاندارد یا آزمایش پروکتور: بر اساس نظریه پروکتور میزان تراکم خاک که وی آن را با درجه پوکی ارزیابی نمود تابع عوامل زیر است ۱ - رطوبت خاک ۲ - انرژی مورد نیاز جهت تراکم و ۳ - نوع خاک ( رطوبت بهینه از روی متغییر تراکم بدست می آید )

برای یک خاک چنانچه انرژی ثابتی جهت ایجاد تراکم به کار گرفته شود میزان تراکم که امروزه با جرم یا وزن واحد حجم خشک  $\gamma_d$  (وزن مخصوص خاک خشک) ارزیابی میشود، تابع درصد رطوبت خاک خواهد بود. در آزمایشگاه تراکم معمولاً با وارد کردن ضربه به خاکی که در قالب ریخته شده بوسیله چکش مخصوص صورت میگیرد. وزن چکش، ارتفاع سقوط آن، تعداد دفعات سقوط، اندازه قالب و تعداد لایه های خاکی که در قالب ریخته میشوند در عمل تراکم تاثیر میگذارد. از پارامتری بنام وزن مخصوص خاک خشک  $\gamma_d$  و از درصد رطوبت برای بیان آن استفاده میکنند.



شکل فوق نمونه ای از منحنی تراکم، برای خاکهای چسبنده میباشد. در این خاک افزودن آب ابتدا موجب تراکم بهتر خاک شده زیرا آب باعث متلاشی شدن خاکدانه ها و جدا شدن ذرات رس از یکدیگر میشود. اضافه شدن آب ضخامت لایه ای که اطراف ذرات خاک را گرفته افزایش داده و باعث کاهش نیروی پیوندی بین ذرات میشود بنابراین از انرژی تراکم در شرایط مناسبتری استفاده میشود در محل تماس بایکدیگر آب (رطوبت بهینه یا پتیمم) تا حدودی موجب لغزیدن بهتر ذرات شده، ذرات خاک نیز تراکم بیشتری به خود میگیرند. افزودن آب تا حدودی میتواند مزایای یادشده را دارا باشد. از حد معینی به بعد، افزایش آب باعث هدر رفتن انرژی تراکم میگردد. از این حد به بعد قسمتی از انرژی تراکم به آب موجود در خاک منتقل شده و باعث بالا رفتن لحظه ای فشار آن به مقدار زیاد میگردد. علاوه بر منحنی تراکم، چند منحنی دیگر هم بر روی منحنی تراکم ترسیم میگردد که در نمودار فوق با نقطه چین نشان داده شده است. رسم این منحنی ها (۰.۰٪، ۰.۵٪، ۱.۰٪) مشخص میکند در هر تراکمی مقدار هوای باقیمانده در خاک چقدر است برای مثال منحنی ۰.۰٪ هوا برای شرایطی است که تمام هوای خاک بر اثر تراکم خارج شده بنابراین وزن مخصوص خاک خشک برای هر رطوبتی، ماکزیمم ممکن خود را دارد یا عبارتی دیگر درجه اشباع خاک متراکم شده چه اندازه میباشد بنابراین امکان متراکم کردن بیشتر خاک میتواند مورد بررسی قرار گیرد. وقتی ۰٪ باشد یعنی  $A=0$  است که همان وزن مخصوص خاک خشک ماکزیمم

بدست می آید. روش ترسیم این منحنی ها از فرمول  $\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w (1-A)}{1+WG_s}$  بدست می آید که  $G_s$  چگالی ذرات خاک و  $\gamma_d$  وزن مخصوص خاک و  $A$  نیز درصد هوا است. اگر خاک مورد آزمایش، خاک خشک باشد در نتیجه وزن مخصوص

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

خاک خشک ماکزیمم از فرمول بدست می آید.

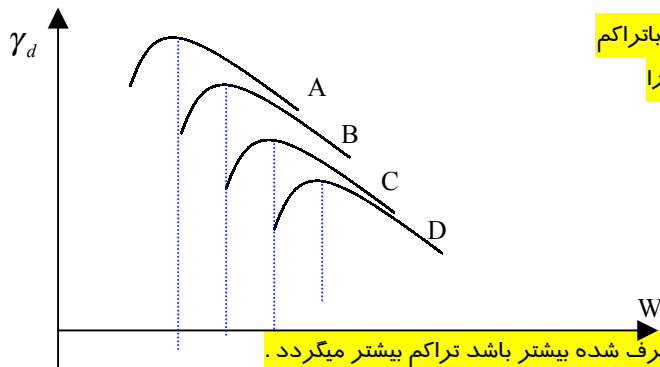
میزان رطوبتی که به ازای آن حداکثر وزن خاک خشک بدست آید را رطوبت بهینه گویند و آزمایشی که در آن حداکثر وزن مخصوص خاک خشک و رطوبت بهینه بدست می آید را آزمایش پراکتور گویند.

عوامل موثر بر تراکم:

**انرژی مصرف شده:** چنانچه برای یک خاک چندبار آزمایش تراکم انجام شود و هر بار نیز انرژی تغییر داده شود تعدادی

منحنی بدست می آید.  $A > B > C > D$

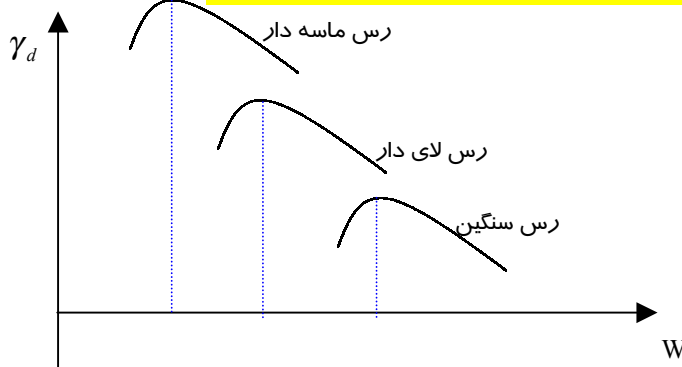
این نمودار رابطه بین انرژی مصرف شده با تراکم میباشد. از این منحنی ها می توان نتایج زیر را استخراج نمود.



۱- در یک رطوبت ثابت هرچه انرژی مصرف شده بیشتر باشد تراکم بیشتر میگردد.

۲- رطوبت اپتیمم برای انرژیهای مصروف شده کمتر، بیشتر است چون منحنی ها به سمت راست می روند پس رطوبت اپتیمم بیشتر میشود.

**نوع خاک:** نوع خاک که شامل شکل ذرات، منحنی دانه بندی و چگالی است بیشتر بر تراکم تاثیر میگذارد. اگر ما ۳ نوع خاک داشته باشیم و با یک اندازه انرژی هر ۳ متر اکم نمایم منحنی زیر بدست می آید



پس هر چه خاک سبکتر باشد وزن مخصوص خشک آن بیشتر است بطور کلی با عمل تراکم در خاکهای درشت دانه به وزن مخصوص خشک بزرگتری در مقایسه با خاکهای ریزدانه میتوان دست یافت. همچنین رطوبت اپتیمم برای خاکهای ریزدانه بیشتر از خاکهای درشت دانه است.

**تراکم کارگاهی:** تراکم در صحرا توسط غلطکهای گوناگون انجام میشود  $R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}}$  که  $R_c$  میزان تراکم موردنیاز (

یابدست آمده) در کارگاه و  $\frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}}$  نیز نسبت وزن مخصوص خاک در کارگاه به وزن مخصوص ماکزیم آزمایشگاهی

میباشد. برای حل مسائل تراکم از فرمولهای زیر استفاده میشود

$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}}$  که  $R_c$  تراکم مورد نیاز،  $\gamma_d$  تراکم در صحرا و  $\gamma_{d \max}$  تراکم در آزمایشگاه میباشد.

مقدار خاک مورد نیاز ( $m^3$ ) از قرصه نیز از فرمول  $V * \frac{\gamma_d}{\gamma_d}$  بدست می آید که  $\gamma_d$  صورت خاک متراکم و  $\gamma_d$  مخرج

مربوط به خاک قرصه است.  $V$  نیز حجم خاک متراکم شده است. جهت بدست آوردن  $V$  از فرمول  $\gamma = \frac{W}{V}$  استفاده میکنیم. جهت بدست آوردن دانسیته نسبی یا درجه تراکم یا عبارتی تراکم نسبی یا درصد تراکم ( $R_d$ ):

$R_d = \frac{e_{\max} - e_n}{e_{\max} - e_{\min}} * 100$  که  $R_d$  نسبت تخلخل حداکثر و وقتی که ذرات در پایین ترین حد تراکم قرار دارد و  $e_{\min}$

نسبت تخلخل حداقل و وقتی که ذرات در بالاترین حد تراکم قرار دارد و  $e_n$  نسبت تخلخل توده خاک در حالت طبیعی است.

$F = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\min}}$  ضریب تراکم پذیری است که از فرمول  $F$  بدست می آید.

(یادآوری: درجه تراکم خاک برحسب وزن مخصوص خشک آن اندازه گیری میشود)

رطوبت بهینه: میزان رطوبتی است که در آن حداکثر وزن مخصوص خشک حاصل میگردد).

برای ایجاد یک میزان معین تراکم در یک خاک در شرایط صحرائی تعداد دفعات عبور ایجاد تراکم نباید از حداقل کمتر باشد. این عدد که بستگی به نوع و جرم وسیله و ضخامت لایه خاک دارد معمولاً بین ۳ و ۱۲ است. از یک حد معین اضافه کردن تعداد عبور افزایش قابل ملاحظه ای در وزن مخصوص خاک خشک ایجاد نمیکند. ضخامت لایه های خاک ریز قبل از تراکم معمولاً بین ۱۵ تا ۵۰ سانتیمتر برحسب نوع و اندازه وسیله ایجاد تراکم است.

غلطکهای مورد استفاده در صحرا انواع گوناگون دارد.

**غلطکهای چرخ صاف:** برای فشار استاتیک و فشار دینامیک مورد استفاده قرار میگیرد. این نوع غلطک تشکیل شده از استوانه های فولادی توخالی که پر کردن آن با آب یا ماسه و به جهت افزایش جرم دستگاه صورت میگیرد. فشارهای زیر استوانه های فولادی تا ۴۰۰ کیلوگرم پاسکال میرسد. پوشش زیر استوانه ۱۰۰٪ است. این نوع غلطک برای کلیه خاکها مناسب است و از نوع ارتعاشی میباشد و بیشتر برای خاکهای دانه ای بکار میرود.

**غلطکهای چرخ لاستیکی:** این غلطکها حدود ۸۰٪ پوشش میدهند. فشار چرخها تا حدود ۷۰۰ کیلوپاسکال میرسد. این نوع غلطک برای طیف وسیعی از خاکهای درشت دانه و ریزدانه، به استثناء خاکهایی که دانه بندی پکنواخت دارند مناسب میباشد و بیشتر برای خاکهای چسبنده استفاده میشود و قابلیت ورز دادن نیز دارند.

**غلطکهای پاچه بزی:** این نوع غلطکها تشکیل شده از استوانه های فولادی توخالی که از سطح آنها زانده های زیادی بیرون زده است جرم استوانه ها را با پر کردن آنها افزایش میدهند. این غلطکها بیشتر برای خاکهای چسبنده استفاده میشود.

**غلطکهای چرخ مشبک:** استوانه این غلطک از میله های فولادی که تشکیل شبکه ای با سوراخهای مربعی شکل میدهند تشکیل شده است این غلطکها فشار زیادی در محل تماس با خاک ایجاد میکند ولی ورز دادن به مقدار کم صورت میگیرد و این غلطکها بیشتر برای خاکهای درشت دانه و سنگ دار مورد استفاده قرار می گیرد. پوشش آنها حدود ۵۰٪ و فشار تماس

۱۴۰۰ تا ۶۰۰۰ Kp است.

مثال: مشخصات یک قرضه درحالت طبیعی عبارتند از  $e = 1.1$  ،  $S_r = 0.75$  ،  $G_s = 2.7$  پس از انجام آزمایش استاندارد تراکم مشخص شده است  $\gamma_{d \max} = 1.924 \text{ gr/cm}^2$  ،  $W_{opt} = 12\%$  طبق طراحی وزن مخصوص خاک خشک راهی که از این خاک ساخته خواهد شد باید ۹۵٪ تراکم شود.

اولاً: مراحل خاک قرضه مورد نیاز برای یک مترمکعب خاکریزی مترمکعب شده را تعیین کنید. فرض شود که ۵۰ مترمکعب خاک مترمکعب شده نیاز داشته باشیم، به چه مقدار خاک قرضه نیاز داریم؟ و اگر هر کامیون ۶ مترمکعب خاک حمل کند، چند کامیون خاک باید از قرضه خاک برداشته شود.

ثانیاً: تعیین کنید چقدر آب باید به یک متر مکعب خاک قرضه اضافه شود تا آب لازم برای یک متر مکعب خاک مترمکعب شده تامین گردد.

پاسخ: جرم یا وزن خاک قرضه برابر با خاک مترمکعب شده است.  $M1 = M2$  ،  $\gamma_d.V = \gamma_d.V$

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w = \frac{2.7}{1+1.1} * 9806 = 12607 \text{ , } \rho_d = \frac{G_s}{1+e} = \frac{2.7*1}{1+1.1} = 1.285 \text{ gr/cm}^3 \text{ or } \text{ton/m}^3$$

$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}} \Rightarrow \gamma_d = 1.924 * 0.95 = 1.82 \text{ , } \rho_d V = \rho_d V \Rightarrow 1.285 * V = 1.82 * 1$$

$$\Rightarrow V = 1.42 \text{ m}^3 \text{ , } 50 * 1.42 = 71 \text{ m}^3 \text{ , } 71 / 6 = 12$$

در نتیجه به ازای یک مترمکعب که بخواهیم خاک را مترمکعب کنیم باید ۱.۴۲ مترمکعب خاک قرضه را مورد استفاده قرار دهیم. با توجه به مشخص شدن مقدار تراکم توانستیم مقدار خاک مورد نیاز از قرضه را بدست آورده و تعداد کامیون های حامل خاک از قرضه را نیز مشخص کنیم.

$$S_r.e = W.G_s \Rightarrow 0.75 * 1.1 = W * 2.7 \Rightarrow W = \frac{1.1 * 0.75}{2.7} = 0.305 \Rightarrow W = 30.5\%$$

حجم آب رطوبتی که در خاک قرضه است عبارتست از  $\gamma_d.W = V \Rightarrow 1.8 * 0.305 = 0.558$

حجم آبی که باید در خاک باشد =  $0.22 = 0.12 * 1.82 = 0.22$  در نتیجه  $338 = 558 - 220$  لیتر بر متر مکعب یعنی باید از خاک قرضه ۳۳۸ لیتر آب بگیریم تا یک متر مکعب خاک مترمکعب داشته باشیم.

**حرکت آب در خاک:** بطور کلی آب به ۳ صورت در خاک حرکت میکند.

آب جذبی: مولکولهای آبی که به شدت به ذرات چسبیده اند و به راحتی از آن جدا نمیشوند.

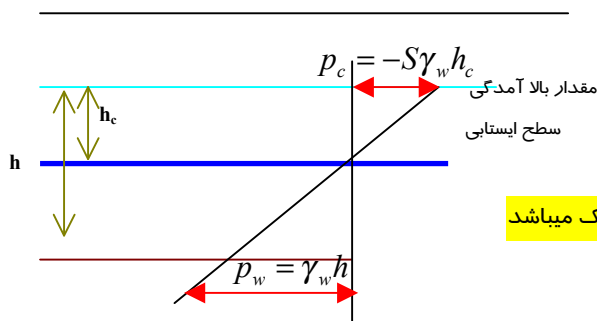
آب موئینگی: آبی که بوسیله نیروی کشش سطحی در بین ذرات خاک از سطح آزاد آب خود را بالا میکشد. حاصل عملکرد لوله کاپیلاری که عامل انتقال آب از سطح ایستابی به سمت بالا میباشد، مرطوب شدن قسمتی از خاک موجود در بالای سطح ایستابی است. فشار، در این سیستم، منفی است و رطوبت میتواند در حد اشباع یا کمتر باشد.

در این فرمول  $S$  درجه اشباع خاک (میزان درصد وزنی رطوبت در خاک) و  $P_c$  فشار مکش و  $h_c$  ارتفاع بالا آمدگی آب در لوله موئین (ارتفاع منطقه نیمه اشباع) میباشد. میزان  $h_c$  نیز از رابطه زیر بدست می آید.

$$h_c = \frac{2T \cos \alpha}{r \rho g} \xrightarrow{\alpha=0, T=0.073 \text{ n/m}} h_c = \frac{15}{r}$$

$T$  نیروی کشش،  $\rho$  جرم مخصوص و  $\alpha$  زاویه موجود است. (اگر  $\alpha = 0$  و  $T = 0.073$  باشد نتیجه فوق حاصل میشود. (مقدار  $T$  برای آب معادل ۰.۰۷۳ میباشد)

$H_c$  بر اثر نیروی  $T$ ، و مقدار آبی است که بین سطح آب زیرزمینی و مقدار بالا آمدگی آب وجود دارد. هرچه لوله کاپیلاری باریکتر باشد، مقدار  $h_c$  بیشتر میگردد.



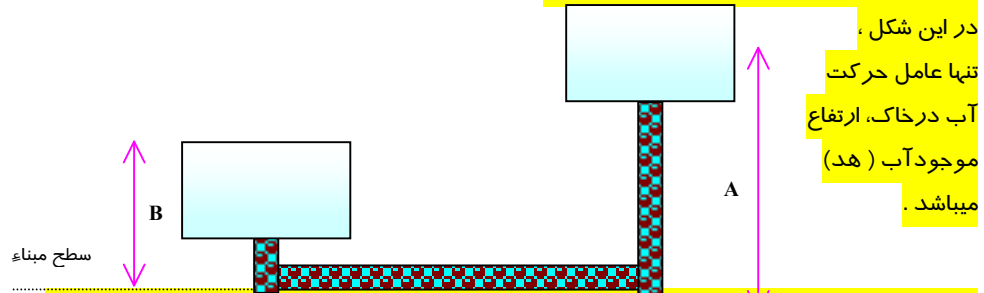
در شکل بالا توزیع فشار به صورت فشار هیدرواستاتیک میباشد

آب ثقلی یا آزاد: آبی که تحت تاثیر وزنش در خاک به تعادل رسیده باشد و سطح آن پایین تر از سطح آب قبل است. سطح آب در این حالت عمدتاً افقی نبوده و از سطح زمین تبعیت نمیکند.

$$h = \frac{P}{\gamma_w} + Z + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{گرادیان شیب هیدرولیکی})$$

میخواهیم برآورد نماییم که کدام یک از نیروهایی که مربوط به گرادیان شیب میشوند، بردگیری غالب است. در سیستمهای متخلخل (خاک) می توان از  $\frac{V^2}{2g}$  صرف نظر نمود لذا خواهیم داشت  $h = \frac{P}{\gamma_w} + Z$  و این بدین معناست که

عامل حرکت آب در خاک، فشار و شیب میباشد



در این شکل، تنها عامل حرکت آب در خاک، ارتفاع موجود آب (هد) میباشد.

$$H_A = \frac{P_A}{\gamma_w} + Z_A \quad \text{چون } Z_A \text{ و } Z_B \text{ در یک سطح قرار دارند لذا } P_A = H_A * \gamma_w \rightarrow H_A = \frac{P_A}{\gamma_w}$$

داریم  $h = \frac{P}{\gamma_w}$ ، با جاگذاری  $P_A = H_A * \gamma_w$  و حذف  $\gamma_w$  خواهیم داشت  $H_A = h_A$  یعنی عامل حرکت آب در خاک فقط هد است و از مخزن A بسمت مخزن B، زیرا  $H_A$  از  $H_B$  بزرگتر است.

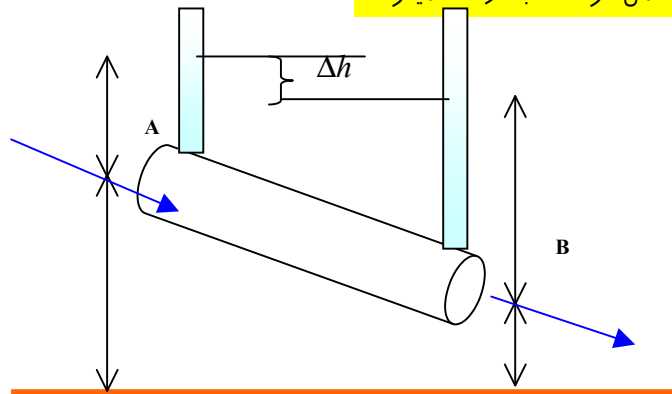
حال اگر حرکت آب در خاک مایل باشد آنگاه ارتفاع آب بر روی نقطه A و B ثابت است در نتیجه  $h_A = \frac{P_A}{\gamma_w} + Z_A$  و

$$h_B = \frac{P_B}{\gamma_w} + Z_B = h_B = \frac{P_B}{\gamma_w} \quad (\text{ارتفاع آب در نقطه B نسبت به سطح مبناء صفر است}). \text{ نهایتاً برای نقطه B داریم}$$

$$h_B = \frac{H_B \gamma_w}{\gamma_w} \quad \text{یعنی } H_B = h_B \text{ و برای نقطه A داریم } H_A = h_A + Z_A = \frac{P_A}{\gamma_w} + Z_A = h_A$$

$$Z_A > Z_B \rightarrow h_A > h_B \quad \text{پس میتوان نوشت}$$

در مثال فوق انرژی پتانسیل قالب است. حال اگر در مثال اول، در لوله انتقال افقی واقع در سطح مبناء، شیب وجود داشته باشد ویا در مثال دوم سطح آب بر روی نمونه خاک یکنواخت نباشد، آنگاه هم انرژی پتانسیل و هم انرژی حاصل از ارتفاع (فشار) در سیستم ما عامل حرکت آب در خاک میگردد.



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

هرچه قدر طول مسیر حرکت آب بیشتر باشد میزان افت افزایش مییابد. گرادیان هیدرولیکی نسبت افت بار در میان دو نقطه به فاصله به فاصله میان آن دو نقطه که افت بار در طول آن صورت میگیرد بستگی دارد. (گرادیان شیب هیدرولیکی عامل حرکت آب در خاک است هرچه شیب بیشتر باشد، حرکت آب افزایش می یابد)  $i = \frac{\Delta h}{L}$ . گرادیان هیدرولیکی در یک

نقطه برابر است با شیب خط جریان در آن نقطه یعنی  $i = \tan \theta$  از آنجاکه حرکت آب در خاک سه بعدی است لذا خواهیم داشت:

$$i = \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\delta h_x}{\delta x} \\ -\frac{\delta h_y}{\delta y} \\ -\frac{\delta h_z}{\delta z} \end{pmatrix}$$

جریان کم میشود)

قانون دارسی:  $V = Ki$  (K ضریب نفوذپذیری خاک است)

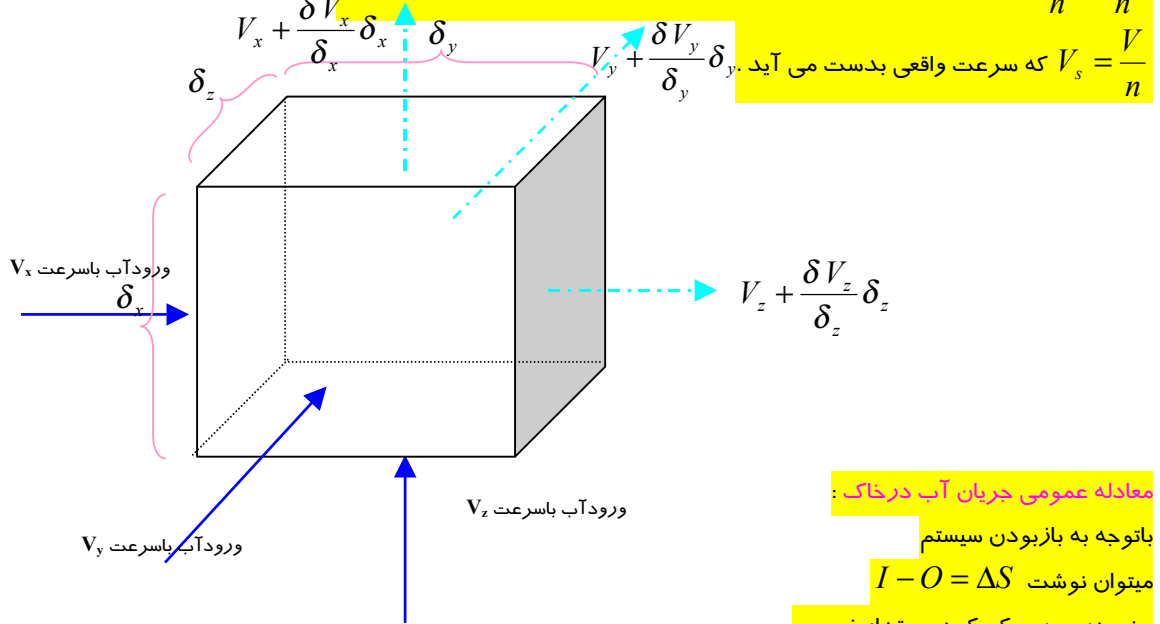
دو شرط اساسی در استفاده از قانون دارسی وجود دارد: ۱- خاک اشباع باشد ۲- جریان آرام باشد.

i (گرادیان هیدرولیکی) را با استفاده از زدن دو چاهک بدست می آوریم.

میزان دبی عبوری از سطح مقطع آب در خاک  $Q=KiA$  میباشد.

سطح مقطع آب نشان دهنده کل سطح مقطع خاک در مقابل جریان است

در این فرمول  $V_s = \frac{V}{n} = \frac{Ki}{n}$  سرهت تراوش، V سرعت و n تخلخل است.



معادله عمومی جریان آب در خاک:

باتوجه به بازبودن سیستم

$$I - O = \Delta S$$

یعنی در صورت کم کردن مقدار خروجی

از ورودی، مجموعه آب ذخیره شده در سیستم بدست می آید. حال با توجه به شکل فوق، ورودی و خروجی ها را بصورت فرمول مینویسیم:

$$(V_x \delta y \delta z + V_y \delta x \delta z + V_z \delta x \delta y) - \left[ \delta y \delta z \left( V_x + \frac{\delta V_x}{\delta x} \delta x \right) + \delta x \delta z \left( V_y + \frac{\delta V_y}{\delta y} \delta y \right) + \delta x \delta y \left( V_z + \frac{\delta V_z}{\delta z} \delta z \right) \right] = \frac{\delta \theta}{\delta t} \delta x \delta y \delta z$$

$\frac{\delta \theta}{\delta t}$  مقدار درجه تغییرات آب در خاک نسبت به تغییرات زمان است. ( $\theta$  حجم آب موجود در خاک)

از طرفی میدانیم که:  $\frac{\delta \theta}{\delta t} = - \left( \frac{\delta V_x}{\delta x} + \frac{\delta V_y}{\delta y} + \frac{\delta V_z}{\delta z} \right)$

$$V_x = i_x K_x \Rightarrow \frac{\delta h}{\delta x} K_x, V_y = i_y K_y \Rightarrow \frac{\delta h}{\delta y} K_y, V_z = i_z K_z \Rightarrow \frac{\delta h}{\delta z} K_z \Rightarrow$$

به این معادله، معادله ریچاردز میگویند.  $\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (K_x \frac{\delta h}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (K_y \frac{\delta h}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} (K_z \frac{\delta h}{\delta z})$

با حل این معادله میتوان معادله عمومی آب در خاک و نیز مقدار آبی که جریان پیدا میکند را بدست آورد. برای حل این

معادله باید شرایط مرزی و شرایط اولیه معلوم باشد. اگر محیط کاملاً اشباع باشد در نتیجه  $\frac{\delta \theta}{\delta t} = 0$  خواهد بود یعنی

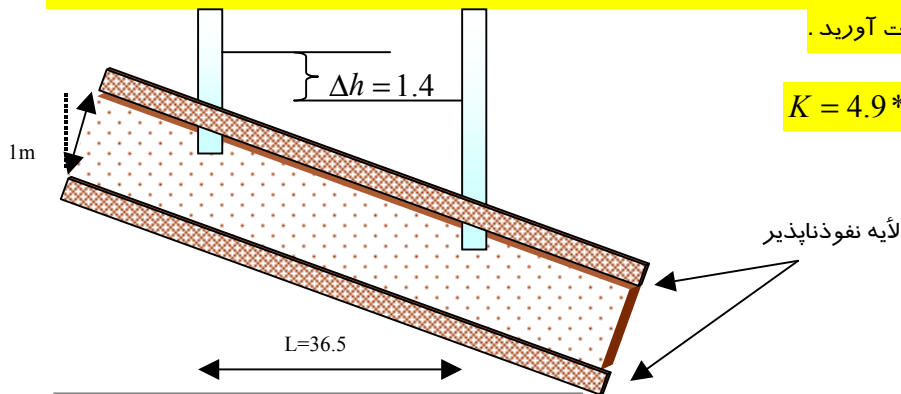
$$K_x \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + K_y \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + K_z \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0$$

باشد نتیجه میگیریم که  $K_x = K_y = K_z$

حل این معادله ( $K_x \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + K_y \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + K_z \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0$ ) دو پاسخ میدهد که یکی از آنها خطوط نشت و دیگری

خطوط پتانسیل را مشخص میکند. این دو خطوط برهم عمودند.

مثال: میزان جریان عبوری از یک خاک نفوذپذیر نشان داده شده در شکل زیر را بر حسب مترمکعب بر ساعت به ازای هر متر طول را بدست آورید.



$$K = 4.9 * 10^{-2}, \alpha = 14^\circ$$

توجه: ارتفاع مورد نیاز برای حل مسئله در خصوص ضخامت خاک مورد آزمایش، باید عمود بر سطح مبناء باشد (نقطه چین نشان داده شده) یعنی ما نیاز به  $\cos \alpha$  داریم. اما در خصوص فاصله بین دو پیرومتر و یا به عبارت دیگر طول نمونه خاک مورد آزمایش، ما نیاز به طول مایل داریم و در اینجا نیز باید از  $\cos \alpha$  استفاده نماییم تا طول مایل بدست

آید.  $i = \frac{\Delta h}{L'}$ ,  $Q = LiA$  که  $L'$  همان طول تبدیل شده به مایل خواهد بود.  $\cos \alpha = \frac{L}{L'} \Rightarrow L' = 37.62$

در نتیجه  $i = \frac{\Delta h}{L'} = \frac{1.4}{37.62} = 0.037$  شیب ما حدود ۰.۰۳۷٪ است.

$$Q = LiA = (4.9 * 10^{-2} * 10^{-2})(0.037)(0.97 * 1) * 3600 = 0.063$$

از آن جهت عدد ۰.۹۷ ضرب شده است زیرا در مسئله به ازای هر متر طول درخواست شده است.

**ضریب نفوذپذیری خاک K:** (توجه: جنس ضریب نفوذپذیری از نوع سرعت است).

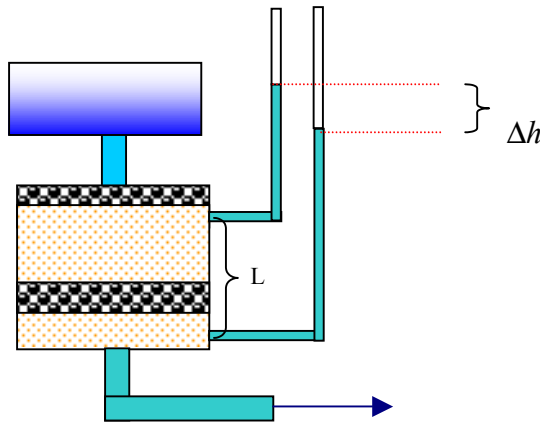
ضریب نفوذپذیری که با واحد سرعت نشان داده میشود به عوامل مختلفی از جمله ویسکوسیته سیال، درجه حرارت، اندازه و نحوه توزیع حفره ها، دانه بندی، نسبت تخلخل، درجه اشباع و غیره بستگی دارد. ضریب نفوذپذیری برای خاکهای مختلف، بمقدار زیادی تغییر میکند. ضریب نفوذپذیری در آزمایشگاه به دوروش بار ثابت و بار متغییر و در طبیعت از روشهایی نظیر

پمپاژ چاه و غیره تعیین میگردد.

**روش بار ثابت:** در روش بار ثابت با ثابت تگه داشتن میزان گرادیان هیدرولیکی ( $i$ ) مقدار ضریب نفوذپذیری در طول زمان ( $t$ ) بدست می آید. این روش مخصوص خاکهای درشت دانه، که ضریب نفوذپذیری آنها از  $10^{-4}$  متر بر ثانیه بزرگتر است استفاده میشود. در این روش جریان آب ورودی طوری تنظیم میشود که اختلاف بار میان جریان ورودی و خروجی در طول آزمایش ثابت باقی بماند. پس از ثابت شدن جریان، آب برای یک مدت زمان مشخص در ظرف مدرج جمع آوری میشود. برای آوردن ضریب نفوذپذیری در چنین شرایطی از فرمول  $K = \frac{VL}{\Delta h At}$  استفاده میشود.  $\Delta h$  افت حاصل از انتقال آب از یک نقطه به نقطه دیگر از جسم خاک است (اختلاف سطح مانومترها). روند بدست آوردن این فرمول چنین است:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad , \quad V = Ki \quad , \quad Q = KiA \quad \rightarrow \quad L = \frac{Q}{iA} \quad \Rightarrow \quad K = \frac{V}{\frac{Q}{iA} A} \quad \Rightarrow \quad K = \frac{VL}{\Delta h At}$$

$V$  حجم آبی است که در مدت زمان  $t$  از نمونه خاک خارج میگردد.  $A$  سطح مقطع نمونه  $K$  ضریب نفوذپذیری برای خاکهای درشت دانه (شن و ماسه)  $L$  طول نمونه (فاصله بین دو مانومتر) و  $t$  زمان خارج شده آب

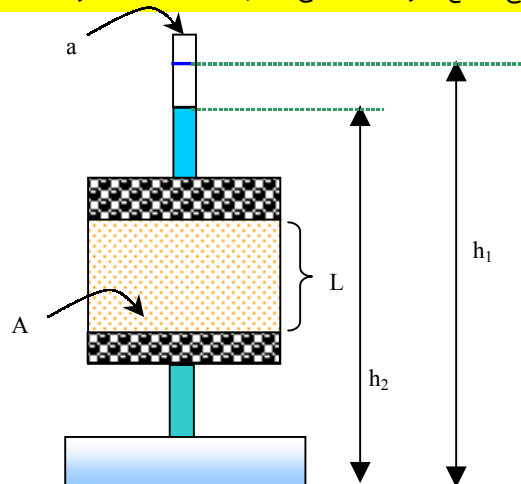


روش بار متغییر: (بار افتان)

در این روش که برای خاکهای ریزدانه نظیر ماسه های نرم، لای و رس که ضریب نفوذپذیری آنها حدود  $10^{-4}$  تا  $10^{-7}$  متر بر ثانیه است استفاده میگردد. در این حالت نمونه مورد نظر باید دست نخورده باشد. برای انجام این آزمایش، جهت عبور آب از خاک زمان زیادی لازم است و آزمایش از زمانی شروع میشود که خاک کاملاً اشباع گردد.

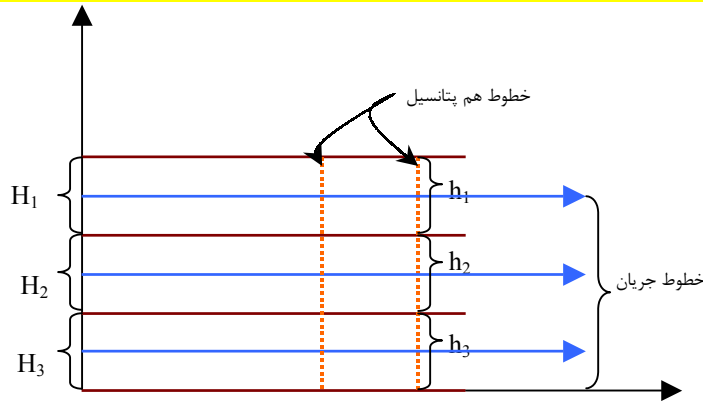
$$K = 2.303 \frac{aL}{At} \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

$a$  سطح مقطع لوله قائم  $L$  طول نمونه  $A$  سطح مقطع نمونه و  $h$  ارتفاع تغییر یافته آب روی نمونه است.



ضریب نفوذپذیری برای خاکهای همگن: (خاک همگن: خاکی که از یک نوع خاک تشکیل شده باشد و خاک غیرهمگن: خاکی که از چند نوع خاک تشکیل شده باشد. چنین خاکی نفوذپذیری یکسانی ندارد.)

حالت اول: برای بررسی حرکت آب در لایه های مختلف نیاز به ضریب نفوذپذیری معادل میباشد. چنانچه ضریب نفوذپذیری خاکها بترتیب  $K_1$  و  $K_2$  و  $K_3$  باشد و در صورتی که جریان افقی باشد، برای بدست آوردن ضریب نفوذپذیری معادل از روابط زیر استفاده میشود. برای جریان یک بعدی افقی، خطوط هم پتانسیل در هر لایه بصورت عمودی است لذا خطی که عمود بر لایه ها باشند، یک خط هم پتانسیل مشترک بین آنها قرار دارد. یعنی گرادین هیدرولیکی در جهت



محور X ها با هم برابرند.  
بر روی خطوط هم پتانسیل  
گرادین شیب ثابت است ولی  
خطوط هم پتانسیل با خطوط  
هم پتانسیل دیگر با هم متفاوتند  
زیرا در اثر جریان آب، افت  
خواهیم داشت.  
توجه اندیس  $eqx$  یعنی معادل  
در جهت X

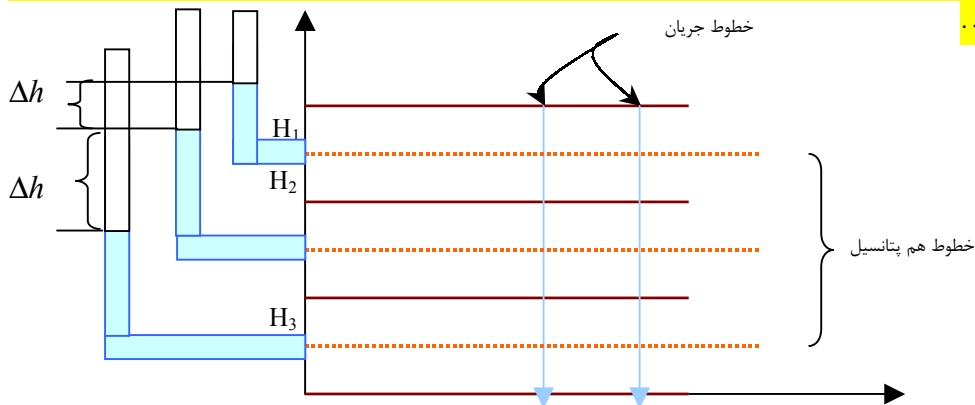
$$h_1 = h_2 = h_3, \quad i_1 = i_2 = i_3, \quad q = q_1 + q_2 + q_3$$

$$K_{eqx} i_x H = K_1 i_1 H_1 + K_2 i_2 H_2 + K_3 i_3 H_3 \rightarrow K_{eqx} = \frac{K_1 H_1 + K_2 H_2 + K_3 H_3}{H}$$

$$K_{eqx} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i}$$

و یا عبارتی دیگر

حالت دوم: حرکت قائم آب در خاک: در این حالت چون  $\Delta h$  ها متغییرند لذا افت وجود دارد و دبی ها در این حالت با یکدیگر مساویند.



$$V = Ki, \quad Q = KiA, \quad V = V_1 = V_2 = V_3, \quad \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3$$

$$\bar{K}_{eqy} \bar{i} = K_1 i_1 = K_2 i_2 = K_3 i_3 \Rightarrow \bar{K}_{eqy} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n H_i} = K_1 \frac{\Delta h_1}{H_1} = K_2 \frac{\Delta h_2}{H_2} = K_3 \frac{\Delta h_3}{H_3}$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \frac{V \sum_{i=1}^n H_i}{K_{eq}}, \quad \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 \Rightarrow \frac{V \sum_{i=1}^n H_i}{K_{eq}} = \frac{VH_1}{K_1} + \frac{VH_2}{K_2} + \frac{VH_3}{K_3}$$

$$\Rightarrow K_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{K_i}} = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{\frac{H_1}{K_1} + \frac{H_2}{K_2} + \frac{H_3}{K_3}}$$

حرکت آب در خاکهای غیرایزوتروپ:  $K_x = K_y = K_z$  اگر در خاکی این شرط برقرار باشد، خاک را ایزوتروپ گویند و در صورتی که این شرط برقرار نباشد آن خاک از نوع آنایزوتروپ است. یک خاک میتواند غیرهمگن و غیرایزوتروپ باشد. چنانچه ضرایب نفوذپذیری خاک ( $K_x, K_y, K_z$ ) متفاوت باشند آن خاک غیرایزوتروپیک است بنابراین یک خاک علیرغم همگن بودن میتواند غیر ایزوتروپیک باشد.

تحلیل خاکهای غیر ایزوتروپیک:

$$V_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{و} \quad V_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}, \quad V_s = -K_s \frac{\partial h}{\partial s}$$

$K_s$  ضریب نفوذپذیری معادل در خاکهایی است که  $K_x$  با  $K_z$  برابر نباشد.  $K_s$  معادلی از  $\sqrt{K_x}$  و  $\sqrt{K_z}$  است.

$$\text{جهت جریان آب در خاکهای غیرایزوتروپیک است.} \quad \frac{\partial h}{\partial s} \cdot V_s = K_s \frac{\partial h}{\partial s}$$

$$-\frac{V_s}{K_s} = -\frac{V_x}{K_x} \cos \alpha - \frac{V_z}{K_z} \sin \alpha \quad \text{در نتیجه} \quad \frac{\partial h}{\partial s} = \frac{V_s}{K_s} \quad \text{چون} \quad \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{ds} + \frac{\partial h}{\partial z} \frac{dz}{ds}$$

$$\text{با اعمال یک منفی خواهیم داشت} \quad \frac{V_s}{K_s} = \frac{V_x}{K_x} \cos \alpha + \frac{V_z}{K_z} \sin \alpha$$

$$\text{در نتیجه} \quad \sin \alpha = \frac{V_z}{V_s} \rightarrow V_z = V_s \sin \alpha \quad \text{و} \quad \cos \alpha = \frac{V_x}{V_s} \rightarrow V_x = V_s \cos \alpha$$

$$\text{در نتیجه فرمول بدست آوردن K معادل، وابسته به زاویه } \alpha \text{ برابر با} \quad \frac{V_s}{K_s} = \frac{V_s \cos \alpha}{K_x} \cos \alpha + \frac{V_s \sin \alpha}{K_z} \sin \alpha$$

$$\text{خواهد بود و در صورت وابسته نبودن به } \alpha \text{ خواهیم داشت:} \quad \frac{1}{K_s} = \frac{\cos^2 \alpha}{K_x} + \frac{\sin^2 \alpha}{K_z}$$

مثال:

در آزمایش نفوذپذیری با بارمتغیر داده های زیر مفروض است. الف (/  $K = ? \text{ cm/s}$  ب) اختلاف بار در زمان  $t=4$  دقیقه؟

$$\text{پاسخ:} \quad L=381 \text{ mm} \quad A=1935 \text{ mm}^2 \quad a=97 \text{ mm}^2 \quad h_{1(t=0)}=635 \text{ mm} \quad h_{2(t=8)}=305 \text{ mm}$$

زمان داده شده بر حسب دقیقه است.

$$K = 2.303 \frac{aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2} = 2.303 \frac{97 * 381}{1935 * 8} \log \frac{635}{305} = 1.748 \text{ mm/min}$$

$$K = 1.75 * \frac{10^{-1}}{60} = \frac{0.175}{60} = 0.0029 \text{ cm/s}$$

$$1.748 = 2.303 \frac{97 * 381}{1935 * 4} \log \frac{635}{h_2} \Rightarrow h_2 = 440 \text{ mm} \quad \text{برای } \epsilon \text{ دقیقه داریم}$$

$$\text{مثال: با توجه به شکل زیر مطلوب است تخمین نسبت نفوذپذیری معادل} \quad \frac{K_{H(eq)}}{K_{V(eq)}}$$

$$\begin{array}{l}
 H=3 \left\{ \begin{array}{l} K_1 = 10^{-3} \text{ cm / s} \\ K_1 = 2 * 10^{-4} \text{ cm / s} \\ K_1 = 10^{-5} \text{ cm / s} \\ K_1 = 2 * 10^{-3} \text{ cm / s} \end{array} \right. \\
 \bar{K}_{eqy} = \frac{3+3+3+3}{\frac{3}{10^{-3}} + \frac{3}{2*10^{-4}} + \frac{3}{10^{-5}} + \frac{3}{2*10^{-3}}} = .0000375 \text{ cm / s} \\
 \bar{K}_{eqx} = \frac{K_1 H_1 + K_2 H_2 + K_3 H_3 + K_4 H_4}{H} = .0008025 \text{ cm / s}
 \end{array}
 \Rightarrow \frac{K_H}{K_V} = 21.4$$

نتیجه میگیریم که حرکت درجهت افق بیشتر است و ۲۱٫۴ برابر حرکت درجهت عمود است. خطوط جریان: مسیری را که ملکول آب در داخل محیط متخلخل در امتداد آن حرکت میکنندرا نشان میدهد. خطوط هم پتانسیل: خطوطی هستند که در امتداد آن کلیه نقاط دارای انرژی پتانسیل مساوی میباشند. این خطو، برخطوط جریان عمود است.

خط انرژی: (افت انرژی): خط است که دو سطح آب دارای اختلاف ارتفاع را به یکدیگروصل میکند. مهمترین موارد استفاده اط شبکه جریان:

- ✓ محاسبه مقدار جریان عبوری از محیط متخلخل (مقدار تلفات آب).
- ✓ تعیین نقاط تمرکز خطوط جریان یعنی نقاط بحرانی که در آنها امکان فرسایش وجود دارد.
- ✓ محاسبه فشاربالا دهنده در زیر ساختمانهای هیدرولیکی ویادر داخل این تاسیسات.
- ✓ تعیین نقاط خروجی آب در پایین دست تاسیسات خاکی.
- ✓ تعیین محل های مناسب جهت تعبیه فیلترها.
- ✓ مطالعه فرم حرکت آب در محیط متخلخل.

در حل مسائل،  $n_e$  یا  $n_d$  برابر با تعداد خطوط هم پتانسیل و  $n_f$  تعداد خطوط جریان است (کانال جریان)

مقدار کل جریان عبوری از زیر سد چنین بدست می آید  $q = n_f \Delta Q \rightarrow q = Kh \frac{n_f}{n_e} \frac{a}{b}$  چون شبکه جریان، یک عضلعی منظم است لذا  $a=b$  در نتیجه

$$q = Kh \frac{n_f}{n_e} \frac{a}{b} \quad \text{توجه: } \frac{n_f}{n_d} \text{ را ضریب شکل میگویند.}$$

مراحل ترسیم خطوط جریان و هم پتانسیل:

ابتدا بالاترین وپایین ترین خطوط جریان واولین وآخرین خط هم پتانسیل رابدست می آوریم.

بالا ترین خط جریان: در مجاورت دیوار فلزی و چسبیده به آن است.

پایین ترین خط جریان: در مجاورت و چسبیده به سطح لایه نفوذناپذیر قرار دارد.

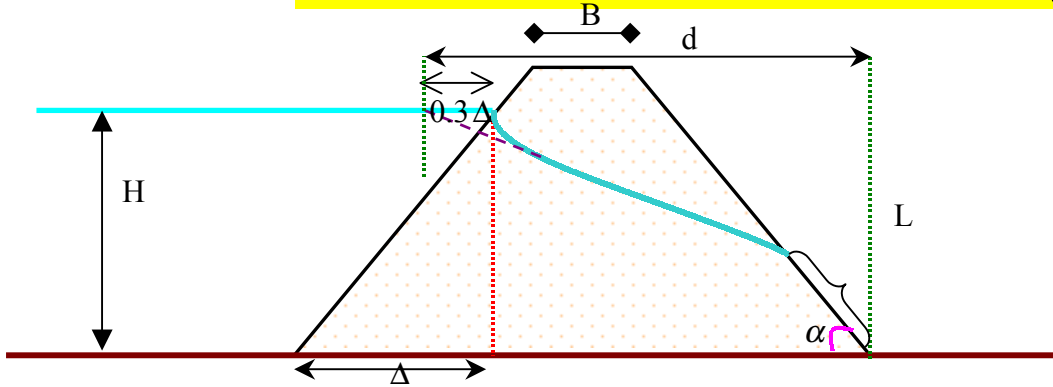
اولین خط هم پتانسیل: دارای بالاترین فشار پیزومتریک است و در سطح لایه نفوذناپذیر و در بالای دیواره فلزی قرار دارد. آخرین خط هم پتانسیل: دارای کمترین فشار پیزومتریک است در پایین دست و عمود بر سطح لایه نفوذپذیر پایین دست قرار دارد.

$$q = \sqrt{K_x K_z} H \frac{n_f}{n_d} \quad \text{اگر در نمونه خاک } K_x \neq K_z \text{ آنگاه}$$

اختلاف افت بین دو خط هم پتانسیل از فرمول  $\frac{h_1 - h_2}{n_e}$  بدست می آید و برای ترسیم شبکه جریان از فرمول

$$SH = SV \sqrt{\frac{K_x}{K_z}}$$

استفاده میشود که SH مقیاس افقی و SV مقیاس عمودی میباشد.



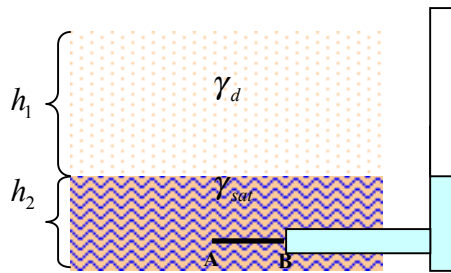
$$q = KL \tan \alpha \sin \alpha \quad \text{و} \quad L = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}}$$

روش بدست آوردن میزان تراوش از زیر سپر و بدست آوردن ارتفاع در پیزومتر.

- اختلاف ارتفاع دو سطح آب (H) را بر  $n_e$  تقسیم میکنیم تا مقدار افت بدست آید.
- ارتفاع آب بالا دست را از افت کم میکنیم تا h پیزومتر بدست آید.
- ارتفاع آب بالا دست را از (افت  $\times 2$ ) کم میکنیم تا h دوم پیزومتر بدست آید.
- ارتفاع آب بالا دست را از (افت  $\times 3$ ) کم میکنیم تا h سوم پیزومتر بدست آید.
- .....
- سپس با استفاده از  $\Delta q = K \frac{H n_f}{n_e}$  مقدار  $\Delta q$  را بدست می آوریم.

مفهوم تنش برشی:

$$\sigma = \gamma h_1 + \gamma_{sat} h_2$$



المانی از کف که قسمتی از سطح کف میباشد که نیرو بر آن وارد میشود. نیرویی که بر این صفحه وارد میشود برابر

تنشی است که بر سیال و ذرات وارد میگردد. بنابراین میتوان نوشت  $\sigma_{(x,y)} = F_w + F_s$  یعنی تنش وارده بر صفحه X و Y که از جنس نیرو میباشد برابر است با مجموع نیروی وارده بر آب و نیروی وارده بر ذرات جامد. (  $\sigma$  تنش کل وارد بر جسم میباشد ).

توسط آب است. در نتیجه میتوان نوشت  $\sigma_{(x,y)} = F_w + F_s = (xy - A') * U + F_s$  .  $F_w = (xy - A') * U$  مساحت ذرات جامد است و U فشار منفذی است.  $(xy - A')$  مساحت اشغال شده

اگر پارامترهای فوق را بر مساحت صفحه تقسیم کنیم خواهیم داشت:

$$\frac{\sigma_{(x,y)}}{xy} = \left( \frac{xy}{xy} - \frac{A'}{xy} \right) * U + \frac{F_s}{xy} \Rightarrow \sigma = (1 - a)U + \sigma'$$

a درصدی از سطح مقطع واحد که توسط سطوح تماس دانه ها پوشیده شده است. از آنجا که محاسبه بصورت یک بعدی میباشد لذا مقدار a ناچیز بوده و نادیده گرفته میشود.

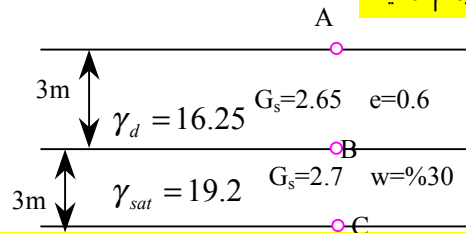
$\sigma'$  تنش است که به ذرات جامد خاک وارد میشود و به آن تنش موثر میگویند.

با توجه به توضیح پارامترها میتوان نوشت  $\sigma = U + \sigma' \Rightarrow \sigma' = \sigma - U$

جهت محاسبه تنش موثر در هر نقطه مورد نظر و در هر لایه ای که باشد میتوان از فرمول زیر استفاده کرد

نظر و  $\gamma_x h_x$  وزن مخصوص خاک لایه x است که اگر خشک باشد از  $\gamma_d$  و اگر اشباع باشد از  $\gamma_{sat}$  استفاده میکنیم.

مثال: در شکل زیر مقطع یک خاک نشان داده شده است مطلوب است تعیین تنش قائم، فشار آب منفذی یا حفره ای و تنش قائم موثر در نقاط A و B و C. هر سه نمودار را رسم نمائید.



$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w = \frac{2.65}{1+0.6} 9.81 = 16.25 \quad \text{و} \quad \gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)}{1+e} \gamma_w = \frac{2.7 + 0.81}{1+0.81} 9.81 = 19.02$$

واحدهای نتایج بدست آمده بر حسب  $\text{KN/m}^3$  است.

$$S_r \cdot e = G_s \cdot w \Rightarrow e = 2.7 * 0.3 = 0.81$$

$$\sigma_A = 0$$

بررسی برای نقطه A

$$\sigma_B = h_1 * \gamma_d = 48.75 \text{ KN/m}^3$$

$$\sigma_C = (h_1 * \gamma_d) + (h_2 * \gamma_{sat}) = (3 * 16.25) + (3 * 19.02) = 105.8$$

$$U_A = 0$$

$$U_B = 0$$

$$U_C = 3 * 9.81 = 29.43 \text{ KN/m}^3$$

$$\sigma' = \sigma - U$$

$$\sigma'_A = 0 - 0 = 0$$

$$\sigma'_B = 48.75 - 0 = 48.75$$

$$\sigma'_C = 105.81 - 29.43 = 76.38 \text{ KN/m}^3$$

برای بدست آوردن مستقیم تنش موثر هر نقطه ( برای مثال نقطه C ) از روش زیر استفاده میشود.

$$\sigma'_C = [(3 * 16.25) - 0] + [(3 * 19.02) - (3 * 9.81)] = 76.38$$

در حالت مورد بررسی قرار گرفته فوق هیچگونه باری بر ذرات وجود نداشت. حال اگر باری به اندازه  $\Delta P$  بر روی سطح زمین قرار داشته باشد محاسبه تنش موثر بشرح زیر است:

( توجه / در خاکهای درشت دانه، فشار منفذی با افزایش بار، افزایش مییابد زیرا سیستم زهکشی است و آب آن زهکش

میشود یعنی  $\Delta U = 0$ . ولی تنش موثر افزایش می یابد و در خاکهای ریزدانه، وقتی بار قرار میگیرد شاهد افزایش فشار

منفذی هستیم ولی در لحظه  $t=0$ ، تنش موثر برابر صفر است. در اثر گذشت زمان این آب فرار کرده و به حالت اول

خود بر میگردد یعنی افزایش تنش موثر را خواهیم داشت و در بینهایت  $\Delta U = 0$  خواهد شد. ( توجه مجدد:  $\Delta U = 0$

خواهد شد نه U )

به بیانی دیگر اگر بریک توده خاک اشباع ( ریزدانه مانند درس ) تنش جدیدی وارد گردد بلافاصله کل این تنش به آب

حفره ای ( منفذی ) منتقل میگردد و فشار آب حفره ای افزایش می یابد لیکن تنش موثر تغییر نمی کند. با گذشت زمان،

فشار اضافی آب حفره ای کاهش پیدانموده و تنش موثر افزایش می یابد و اگر بر یک توده خاک درشت دانه ( ماسه ای )



فشارپیش تحکیمی رامیتوان با استفاده از یک روش ترسیمی که توسط کاساگراندر در سال ۱۹۳۶ پیشنهاد شده است را بدست آورد. این روش ترسیمی دارای ۵ گام میباشد:

- نقطه  $O$  را روی نمودار  $e, \log P$ ، در محل تیزترین انحناء، یعنی محلی که کوچکترین شعاع انحناء را دارد، مشخص میکنیم.
  - خط افقی  $OA$  را ترسیم میکنیم.
  - خط  $OB$  را که مماس بر منحنی  $e, \log P$  در نقطه  $O$  میباشد را رسم میکنیم.
  - نیمساز زاویه  $AOB$  که خط  $OC$  خواهد بود را ترسیم میکنیم.
  - قسمت خط نهایی منحنی  $e, \log P$  را (قسمت خط صاف از منحنی) به سمت عقب امتداد داده تا این خط، خط  $OC$  را در نقطه  $D$  قطع کند. با خارج کردن خط، از نقطه  $D$ ، عمود بر محور  $\log P$ ، نقطه  $P_c$  بدست می آید.
- نشست های طبیعی خاک میتواند عادی تحکیم یافته، یا اضافه تحکیم یافته و یا پیش تحکیم یافته باشند. این ۳ اصطلاح، یک معنی دارند.
- فرمول کاربردی جهت بدست آوردن  $P_c$ :

که  $e_0 = 1.122 - 0.188 \log P_c - 0.0463 \log P_0$  نسبت پوکی در فشار موثر برابر  $P_0$  و

$e_L$  نسبت پوکی در حد مایع است. در حالت اشباع داریم  $e = W G_s$  و میدانیم  $e_L = \frac{w_{LL} G_s}{100}$  ویا میتوان نوشت

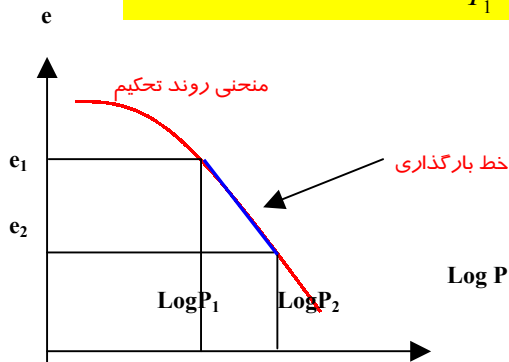
$$e_L = \frac{100 e_0}{w_{LL} G_s} = 1.122 - 0.188 \log P_c - 0.0463 \log P_0$$

$$\log P_c = \frac{1.122 - \frac{100 e_0}{w_{LL} G_s} - 0.0463 \log P_0}{0.188}$$

(۲) شاخص فشردگی ( شاخص تراکم )  $C_c$ :

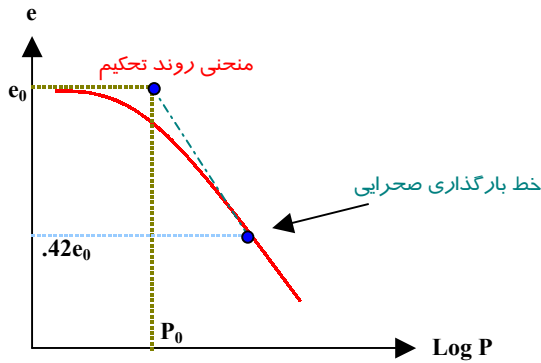
$$C_c = \frac{e_2 - e_1}{\log P_1 - \log P_2} = \frac{e_2 - e_1}{\log \frac{P_2}{P_1}}$$

شاخص تراکم شیب خط بارگذاری میباشد و از فرمول



شاخص فشردگی، شیب قسمت خطی نمودار، پس از فشارپیش تحکیمی است.

خط بارگذاری آزمایشگاهی، با خط بارگذاری صحرایی کمی تفاوت دارد. اگر نمونه خاک را به آزمایشگاه، جهت انجام آزمایش ببریم مبیایست با بهره گیری از  $P_0$  و  $e_0$  و همچنین نمودار بارگذاری، خط واقعی صحرایی را بدست آوریم. به بیان دیگر ممکن است در آزمایشگاه، شاخص فشردگی با مقدار واقعی آن در صحرا متفاوت باشد. این مسئله اساسا ناشی از دست خوردگی خاک در هنگام نمونه برداری است. منحنی بارگذاری صحرایی یا همان منحنی بکر، بطور تقریبی منحنی آزمایشگاهی را در نسبت پوکی  $0.42 e_0$  قطع میکند. توجه شود که  $e_0$  نسبت پوکی لایه رسی در صحرا است. با دانستن  $P_0$  و  $e_0$  میتوانیم منحنی بکر را رسم نماییم.



$P_0$  تنش موثر در نقطه مورد نظر است و  $e_0$  نسبت پوکی اولیه

فرمولهای تجربی:

$C_c = 0.01W_n$  ,  $C_c = 0.208e + 0.0082$  که این دو فرمول مربوط به رس شیکاگو بوده و  $W_n$  میزان رطوبت طبیعی خاک بر حسب درصد است.

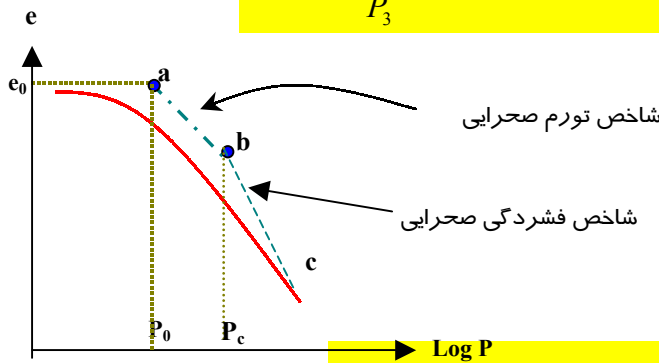
برای خاک آلی داریم  $C_c = 0.0115.....$

$C_c = 0.009(W_{LL} - 10)$  ,  $C_c = 0.2343e_L = 0.2343\left(\frac{W_{LL}}{100}\right)G_s$  مقدار رطوبت در حد مایع میباشد.

شاخص تورم ( شیب خط بارگذاری )

$$C_s = \frac{e_3 - e_4}{\log \frac{P_4}{P_3}}$$

مقدار شاخص تورم در حدود  $\frac{1}{4}$  تا  $\frac{1}{5}$  شاخص فشردگی است



نقطه  $a$  با مختصات  $e$  و  $p$  مربوط به شرایط صحرائی قبل از هر گونه افزایش فشار میباشد. نقطه  $b$  مربوط به فشار پیش تحکیمی  $P_c$  است

علاوه بر نمودار میتوان از فرمول

$$C_s = 0.0463e_L = 0.0643\left(\frac{W_{LL}}{100}\right)G_s$$

تجربی نیز استفاده نمود.

محاسبه نشست از روی تحکیم اولیه ( یک بعدی )

افزایش تدریجی تنش موثر در لایه رسی باعث نشست تدریجی در طول زمان خواهد شد. چنین نشستی به نشست تحکیم

$$S = \frac{\Delta e}{1 - e} H_c$$

معروف است. که  $S$  مقدار نشست و  $H_c$  ضخامت لایه رس و  $\Delta e$  تغییرات کلی پوکی به علت اعمال بار اضافی و  $e$  نسبت پوکی رس قبل از اعمال بار است

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{P_2}{P_1}} \Rightarrow C_c = \frac{\Delta e}{\log \frac{P_2}{P_1}} \Rightarrow \Delta e = C_c \log \frac{P_2}{P_1}$$

$$S = \frac{C_c \log \frac{P_2}{P_1}}{H e} H_c \rightarrow S = \frac{C_c H_c}{H e} \log \frac{P_2}{P_1} \rightarrow S = \frac{C_c H_c}{H e} \log \frac{P_0 - \Delta P}{P_0}$$

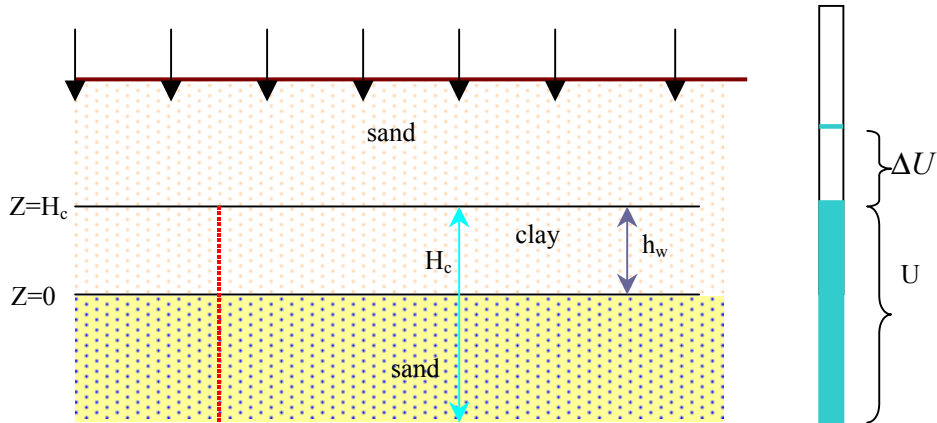
اگر لایه رس از دو طرف زهکش شده باشد تنش موثر  $P_0$  در وسط لایه رس در نظر گرفته میشود ( بدون سر بار ) و اگر از یک طرف زهکشی شده باشد تنش موثر را در پایین لایه رسی در نظر میگیریم.

$P_0$  تنش موثر قبل از بارگذاری  $\Delta P$  فشار اضافی

میزان نشست خاک رس اشباع در اثر افزایش فشار  $\Delta P$  برای رس عادی تحکیم یافته از رابطه زیر بدست می آید.

$$\Delta e = C_c \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}, \quad S = \frac{C_s H_c}{1 + e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad \text{حالت اول: } P_c \geq P_0 + \Delta P$$

$$S = \frac{C_s H_c}{1 + e_0} \log \frac{P_c}{P_0} + \frac{C_s H_c}{1 + e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_c} \quad \text{حالت دوم: } P_0 < P_c < P_0 + \Delta P$$



توجه:  $\Delta U$  حاصل فشار سربار است.

**درجه تحکیم متوسط:** تحکیم در نتیجه زایل شدن تدریجی فشار آب اضافی  $\Delta U$  لایه رسی است. زایل شدن فشار آب اضافی باعث افزایش تنش موثر و ایجاد نشست میشود بنابراین برای تحمل درجه تحکیم یک لایه رسی در زمان  $T$  بعد از اعمال بار باید سرعت زایل شدن فشار آب اضافی بر آن باشد. برای شرایط زهکشی قائم در لایه رسی آقای ترزاقی رابطه دیفرانسیلی راپیشنهاد کرده است  $\frac{\delta \Delta U}{\delta t} = C_v \frac{\delta (\Delta U)}{\delta Z^2}$  که  $C_v$  درجه تحکیم (ضریب تحکیم) است و

$$C_v = \frac{K}{m_v \gamma_w} = \frac{K}{\frac{\Delta e}{\Delta P (1 + e_{avg})} \gamma_w}$$

علت افزایش تنش  $\Delta P$  است و  $K$  ضریب نفوذپذیری رس و  $\Delta P$  فشار سربار است. برای تعیین ضریب تحکیم از روی آزمونهای تحکیم یک بعدی آزمایشگاهی، معمولاً از دو روش نموداری استفاده میشود.

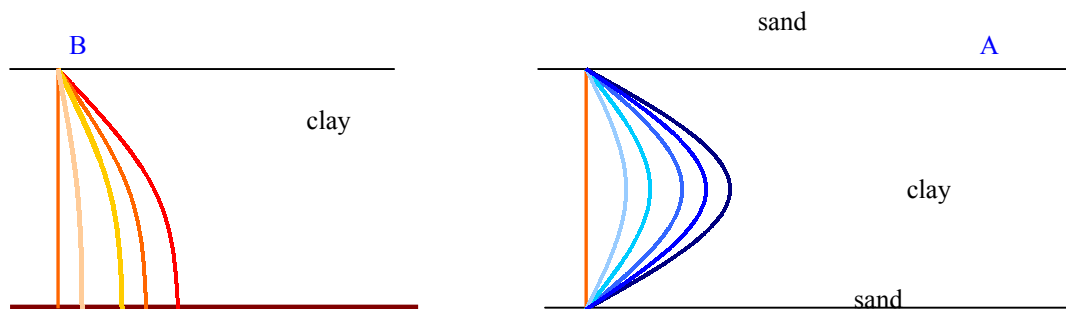
۱- روش لگاریتمی و ۲- روش جذر زمان. با استفاده از شرایط مرزی میتوان رابطه دیفرانسیل ترزاقی را برای تعیین  $\Delta U$  بصورت تابعی از زمان بدست آورد. توجه: در  $Z=H_c$  و  $Z=0$  فشار منفذی صفر است به شرط آنکه در دو طرف

لایه رس، لایه زهکشی وجود داشته باشد. با اعمال شرایط مرزی در رابطه دیفرانسیل ترزاقی نتیجه میگیریم  $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$  عامل زمان بدون بعد،  $C_v$  ضریب تحکیم،  $t$  زمان،  $H$  ضخامت لایه (توجه: اگر لایه رسی از دو طرف

sand

زهکشی شده باشد  $H = \frac{H_c}{2}$  و اگر فقط از یک طرف زهکشی شده باشد  $H = H_c$

شکل تغییرات  $\Delta U$  نسبت به زمان چنین است:



شکل A مربوط به لایه رسی است که از دو طرف زهکش شده است همانگونه که مشهود است هم در لایه A و هم در لایه B، با گذشت زمان مقدار  $\Delta U$  کاهش می یابد تا زمانی که به صفر برسد.

درجه تحکیم متوسط: U

$U = \frac{S_t}{S_{max}}$  که  $S_{max}$  نشست نهایی و  $S_t$  نشست در مدت زمان مشخص است.

رابطه ای بین U و  $T_v$  وجود دارد  $T_v = \frac{\pi}{4} \left[ \frac{U\%}{100} \right]^2$

**مقاومت برشی خاک:** مقاومت برشی توده خاک مقاومت داخلی به ازای واحد سطح است که توده خاک درمقابل گسیختگی و لغزش در امتداد هر سطح داخلی از خود نشان میدهد. شکست یا گسیختگی در خاک مانند بیشتر مواد جامد، تحت کشش و یا برش اتفاق می افتد. تنش برشی عامل اصلی شکست خاک میباشد لذا در بیشتر پروژه های مهندسی خاک تنها مقاومت برشی خاک مورد توجه قرار میگیرد. شکست برشی، زمانی در نقطه ای از توده خاک اتفاق می افتد که تنش برشی از مقاومت برشی خاک در آن نقطه بیشتر گردد. معیار گسیختگی موهو کولومب: براساس این تئوری مواد در اثر ترکیب بحرانی تنش قائم و تنش برشی گسیخته میشوند و نه بدلیل حداکثر تنش قائم و یا تنش برشی به تنهایی. کولومب مقاومت برشی خاک را یک تابع خطی از تنش عمودی در نظر گرفت.

قانون گسیختگی برشی در خاک اشباع:  $T_f = C + \delta \tan \phi$  به این معنی که مقاومت برشی خاک برابر است با ضریب چسبندگی خاک + تنش موثر قائم در تانژانت زاویه اصطکاک یا زاویه مقاومت برشی و یا میتوان نوشت

$$T_f = C + (\delta - U) \tan \phi$$

$\phi$  زاویه بین ذرات خاک است هرچه این زاویه بیشتر باشد مقاومت بیشتر میگردد. در نتیجه چسبندگی و زاویه بیشتر، افزایش مقاومت خاک را شاهد هستیم.

طبق نظریه تزارقی تنها اسکلت جامد خاک است که درمقابل تنش برشی مقاومت میکند. مقدار C برای ماسه ها برابر صفر و برای رسها ی اضافی تحکیم یافته بزرگتر از صفر میباشد.

برای تعیین پارامترهای برشی C و  $\phi$  معمولا از دو روش آزمایشگاهی استفاده میگردد.

۱- آزمایش برش مستقیم

۲- آزمایش برش ۳ محوری

**آزمایش برش مستقیم:** این آزمایش برای خاکهای درشت دانه میباشد. ماسه خشک را به راحتی میتوان توسط آزمایش برش مستقیم مورد آزمایش قرار داد. در این آزمایش، ماسه را درون جعبه برش که از دو نیمه تختانی و فوقانی تشکیل یافته است، قرار میدهیم. سپس نیروی برشی برنیمه فوقانی جعبه برش، تاجایی که باعث گسیختگی نمونه شود اعمال

میکنیم. تنشهای قائم و برشی در لحظه گسیختگی بصورت زیر بدست می آید:  $S = \frac{R}{A}$  و  $\delta' = \frac{N}{A}$ . s نشست

N تنش قائم R تنش موثر، افقی یا برشی A مساحت صفحه گسیختگی خاک

$$S = C + \delta' \tan \phi$$

چون ماسه چسبندگی ندارد

لذا  $C=0$  است

در نتیجه

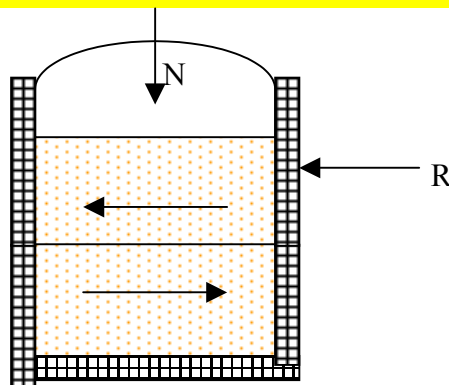
$$S = \delta' \tan \phi$$

و میتوان نوشت

$$\phi = \tan^{-1} \frac{S}{\delta'}$$

برای ماسه ها زاویه اصطکاک داخلی

بین ۲۶ تا ۴۵ درجه متغیر است.



آزمایش سه محوری: آزمایش فشار سه محوری را میتوان روی خاکهای رسی و ماسه ای انجام داد. در این آزمایش نمونه درون یک غشاء پلاستیکی و در داخل یک محفظه شفاف قرار داده میشود. به وسیله مایعی که در داخل محفظه شفاف قرار میگیرد، فشار همه جانبه ای که به فشار محفظه ای محدودکننده موسوم است، برنمونه وارد میشود. به وسیله پیستون تعبیه شده در بالای دستگاه، تنش اضافی  $\Delta\delta$  که به تنش انحرافی موسوم است بطور محوری به نمونه وارد میشود و مقدار آن تا لحظه گسیختگی نمونه افزایش داده میشود. در لحظه گسیختگی  $\Delta\delta = \Delta\delta_f$  که  $\Delta\delta$  تنش انحرافی توسط پیستون و  $\Delta\delta_f$  تنش تسلیم است. برحسب شرایط آزمایش ممکن است اجازه زهکشی شدن به نمونه داده شود و یا نشود. برای رس سه نوع آزمایش سه محوری قابل اجرا است.

- آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده (CD)
- آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU)
- آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)

آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده (CD): در طول اینگونه آزمایش، شیر زهکش بازاست زیرا آب باید تخلیه گردد. ابتدا به وسیله فشار آب محفظه  $\delta_3$  عمل تحکیم انجام میشود. معمولاً به مدت ۲۴ ساعت پس از اتمام تحکیم، تنش انحرافی  $\Delta\delta$  به وسیله پیستون به نمونه وارد میشود. سرعت افزایش تنش اضافی باید به قدری آهسته باشد که فشاری در آب منفذی ایجاد نگردد تا پارامترهای مقاومت برشی درست اندازه گیری شوند. مدت زمان لازم ممکن است تا دو هفته بطول انجامد. با توجه به زمان زیادی که این آزمایش لازم دارد، به آن آزمایش آهسته میگویند.

$\delta_3 + \Delta\delta_f = \delta_1 = \delta_1'$  یعنی فشار منفذی بعلاوه تنش تسلیم برابراست با فشار قائم و برابر است با تنش موثر حداکثر.

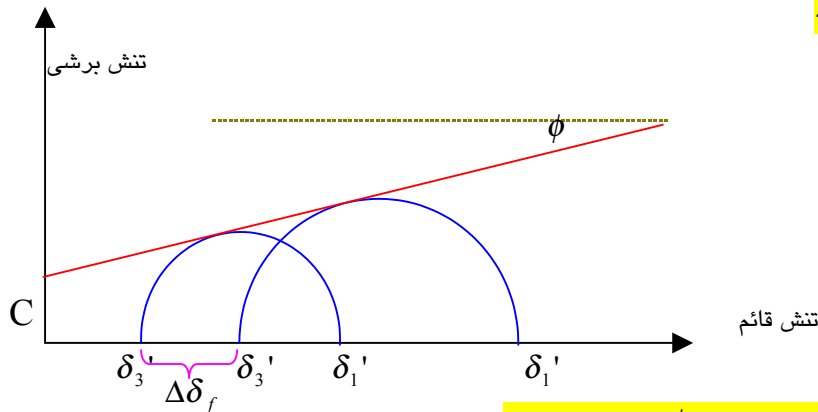
تنش کل با تنش موثر برابر است زیرا فشار منفذی هیچ تغییری در آزمایش نمی کند.

$$\delta_3 = \delta_3' = \delta_3'$$

با تغییر فشار منفذی، آزمایش متعددی از این نوع میتواند بر روی نمونه های رسی انجام شود. از روی آزمایش انجام شده فوق نمودار زیر رسم میگردد. این آزمایش باید دو بار تکرار گردد.

در آزمایش اول فرض میگردد که  $\delta_3'$  و  $\delta_1'$  در آزمایش دوم  $\delta_3'$  و  $\delta_1'$

این نقاط را بر روی محور مختصات (محور قائم، تنش برشی) پیاده میکنیم و دو نیم دایره از هر دو نقطه مربوط به یکدیگر بدست می آید.



با ترسیم این نمودار پارامترهای  $C$  و  $\phi$  بدست می آیند.

میتوان نشان داد که در لحظه گسیختگی، رابطه زیر بین تنش موثر حداکثر و تنش موثر حداقل برقرار است.

$$\delta_1' = \delta_3' \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2C \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

توجه: فرمول فوق مختص به آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده (CD) میباشد.

برای بدست آوردن نشست در آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده (CD)، از همان فرمول S عنوان شده در درس قبلی استفاده میکنیم.

آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) : در این آزمایش شیر زهکش بسته است . فشار منفذی باید در این مرحله مد نظر قرار گیرد زیرا زهکشی وجود ندارد . فشار آب محفظه در حد مورد نظر تنظیم میگردد. شیر زهکش باز گذاشته میشود تا تحت این فشار ، عمل تحکیم صورت پذیرد . پس از اتمام عمل تحکیم شیر را بسته، فشار آب منفذی را اندازه گیری نموده و تنش اضافی به نمونه خاک وارد میشود . تنش اضافی ادامه یافته تا نمونه گسیخته گردد . حال میتوان با پارامترهای موجود ، مقاومت برشی را برحسب تنش موثر بدست آورد .

توجه : در این مرحله تنش کل با تنش موثر برابر نیست .

$$\delta_3 + \Delta\delta_f = \delta_1' \quad \text{تنش اصلی حداکثر کل برابر است با :}$$

$$\delta_3 \quad \text{تنش اصلی حداقل کل برابر است با :}$$

$$(\delta_3 + \Delta\delta_f) - U_f = \delta_1' \quad \text{تنش موثر حداکثر برابر است با :}$$

$$(\delta_3 - U_f) = \delta_1' \quad \text{تنش موثر حداقل برابر است با :}$$

$U_f$  فشار منفذی در لحظه گسیختگی است .

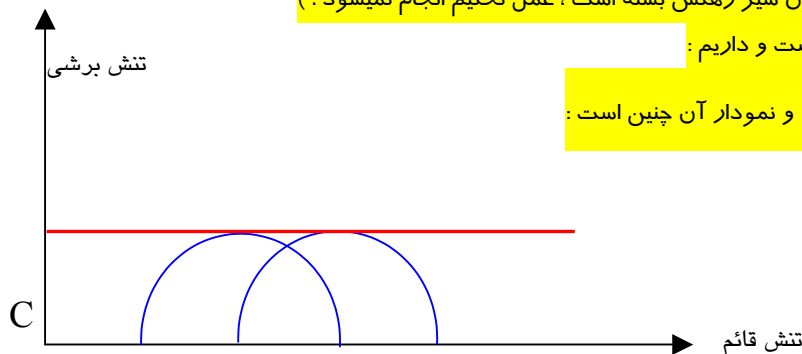
این آزمایش را دو بار تکرار میکنیم . هدف از تکرار آزمایش بدست آوردن  $\delta_1'$  و  $\delta_3'$  است .  $\delta_1'$  و  $\delta_3'$  محاسبه شده را روی نمودار پیاده مینماییم . در این حالت داریم :

$$S = C_{cu} + \delta \tag{\phi}_{cu}$$

آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) : ابتدا محفظه را پر از آب نموده و صبر میکنیم تا فشار آن به فشار مورد نظر برسد . بلا فاصله پس از تثبیت فشار محفظه در اندازه مورد نظر ، تنش اصلی از طریق میله و کلاهک بارگذاری به نمونه وارد میشود . افزایش تنش اضافی ادامه می یابد تا نمونه گسیخته گردد . این آزمایش حدود ۱۰ تا ۱۵ دقیقه بطول می انجامد . ( توجه : چون شیر زهکش بسته است ، عمل تحکیم انجام نمیشود . )

در این حالت  $\phi = 0$  است و داریم :

$$S = C_u = \frac{\Delta\delta f}{2} \quad \text{و نمودار آن چنین است :}$$



در صورتی که تمایل دارید تا مقالات ویا مطالب علمی شما در این سایت قرار گیرد یا مدیریت سایت تماس بگیرید.

موقت باشید

فرزین نجفی پور