

# بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

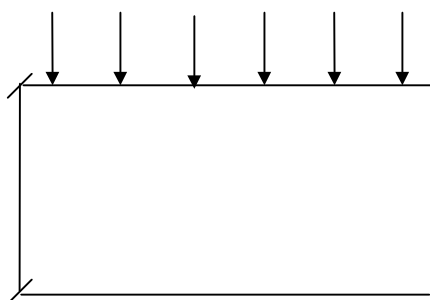
## (( جزوه درسی مکانیک خاک ))

### فهرست منابع و مراجع:

- |                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| ۱- اصول مهندسی ژئوتکنیک (جلد اول) | شاپور طاحونی             |
| ۲- مکانیک خاک                     | ابن جلال - شفاعی بجستانی |
| ۳- مکانیک خاک و مهندسی پی         | طباطبایی - بهنیا         |
| ۴- مکانیک خاک                     | علی فاخر                 |
| ۵- آزمایشگاه مکانیک خاک           | خیاط - توحیدی            |
|                                   | <u>6- soil mechanics</u> |
|                                   | 7- soil mechanics        |
|                                   | lee                      |
|                                   | lambe                    |

### فهرست عناوین مطالب درسی:

- ۱- شناسایی و طبقه بندی خاک
- الف) شناسایی منشأ پیدایش و طبقه بندی مقدماتی خاک
- ب) آزمایشات مربوط به شناسایی و طبقه بندی خاک
- ج) روابط وزنی و حجمی خاک
- د) طبقه بندی خاک (I آشتو II یونیفاید)
- ۲- حرکت آب در خاک
- ۳- تنش مؤثر (تنش بین دانه‌های خاک یا اسکلت خاک) تا بتوانیم رفتار مهندسی یا منحنی‌های تنش - کرنش برای توده خاک بدست بیاوریم .



نشست یا تغییر شکل خاک در اثر بارهای مؤثر

۴- توزیع تنش در خاک (پخش تنش در خاک)

۵- نشست خاک

۶- مقاومت خاک (مقاومت برشی)

۷- پایداری شیروانی

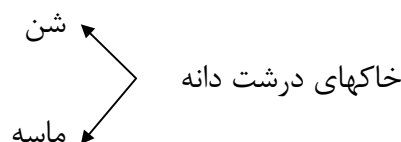
## فصل ۱:

## شناسایی خاک

اصطلاح مهندسی ژئوتکنیک شاخه‌ای از مهندسی عمران می‌باشد که هدف آن مطالعه مصالح طبیعی موجود در لایه سطحی زمین است. بطور کلی این علم شامل کاربرد مفاهیم مکانیک خاک و مکانیک سنگ در مسائل طراحی پی می‌باشد.

## منشاء پیدایش خاک:

خاک اولین فرایند تغییر شکل سنگ را گویند که اندازه ذرات آن کوچکتر از  $7/5\text{mm}$  است بطور کلی خاکها از تخریب فیزیکی سنگها بوجود می‌آیند که این فرسایش بوسیله حرکت یخچالها و تخریب فیزیکی آنها ویا سایش بوسیله آب یا بوسیله باد همراه با گردو غبار را گویند.



این خاکهای درشت دانه از لحاظ ساختمان همانند سنگ هستند و در حقیقت ماکتی از سنگ می‌باشند و اگر بر روی این سنگها تغییرات و حل شدگیهای شیمیایی صورت گیرد خاکهای ریز دانه بنام سیلت ورس ایجاد می‌شود که دیگر آنها را نمی‌توان ماکتی از سنگ نامید. صرف اندازه بیانگر نوع خاک نیست مثلاً گرده سنگ را نمی‌توان جزء سیلت و رس آورد و علاوه بر اندازه کانیهای تشکیل دهنده آنها نیز مهم است مثلاً گرده سنگ همانند رس یا سیلت خمیری نمی‌شود.

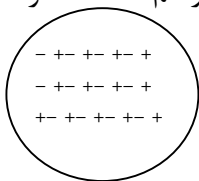
رس	سیلت	ماسه	شن	اندازه $\text{mm}$ / مؤسسه
$< 0.002$	$0.02 \sim 0.06$	$0.06 \sim 2$	$2 \sim 76/2$	MIT
$< 0.002$	$0.02 \sim 0.05$	$0.05 \sim 2$	$2 \sim 76/2$	USDA
$< 0.002$	$0.002 \sim 0.075$	$0.075 \sim 2$	$2 \sim 76/2$	AASHTO
$< 0.075$	$< 0.075$	$0.075 \sim 4/75$	$4/75 \sim 76/2$	UNIFID

## نامگذاری الکها:

#200 یا NO.200 در هر یک اینچ ۲۰۰ سوراخ داریم.  
طول هر یک از اضلاع ۲ اینچ است.

## الف) شکل هندسی کانیهای خاکهای درشت دانه:

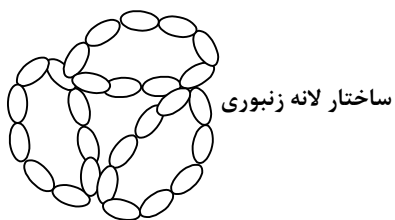
در کانیهای خاکهای درشت دانه پخش باد در آنها یکنواخت است و بصورت خنثی هستند بهمین دلیل واکنش نمی دهند و دارای بافت تک دانه ای یا متراکم هستند هر دانه با دانه دیگر در تماس است.



کانیهای درشت دانه سه بعدی است وقتی که در کویرهای باد می وزد دانه های ماسه سست در پشت تپه ها بوجود می آید که شکل آنها به صورت لانه زنبوری است که راه حل از بین بردن این ساختار:

۱- در اثر رطوبت زیاد شسته می شود و بافت آنها متراکم می گردد.

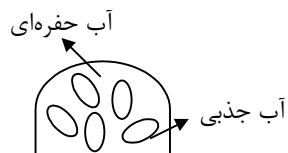
۲- راه حل دیگر تراکم خاکها است




## ب) خاکهای ریز دانه:

در خاکهای ریز دانه شکل کانیهها بصورت صفحه ای است و ضخامت چندانی ندارند در این کانیهها به علت سرعت زیاد الکترونها از لبه خارج می شوند و پخش بار در آنها یکنواخت نیست به همین علت جذب آب آنها بالا است. (کانیههای رسی) که به این آبها آبهای جذبی گویند.

در خاکهای ریز دانه علاوه بر آبهای جذبی آبهای حفره ای نیز وجود دارد که در حفرات بین دانه ها جمع می شود. آب جذبی باعث بزرگتر شدن سایز کانی می شود. این در حالی است که آب حفره ای بین آنها قرار می گیرد که این آب حفره ای خواص آب عادی را دارد ولی آب جذبی دارای خصوصیات متفاوت است و بصورت لزج است.

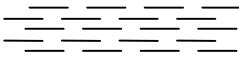


۱- لخته‌ای (*flocculate*): که براساس جاذبه الکتریکی آنها کنار هم می‌نشینند. این ساختار نفوذپذیری بیشتری نسبت به ساختار دیگر دارد.



انواع کانیه‌های ریزدانه دارای دو نوع بافت هستند:

۲- پراکنده (*disperse*):



**نکته:** بافت لخته‌ای در اثر رطوبت فراوان احتمالاً بصورت بافت پراکنده می‌شود زیرا رطوبت زیاد باعث سست کردن پیوندهای آنها (بافت لخته‌ای) می‌شود و دلیل دیگر اینکه بافت لخته‌ای تبدیل به پراکنده می‌شود اعمال تنشهای زیاد می‌باشد که پیوندها را از بین می‌برد. برای مثال در یک منطقه که ساختمان بلندی است کانیه‌های صفحه‌ای تمایل به خوابیدن دارند بهمین دلیل تنش زیاد باعث شکسته شدن پیوندهای آنها شده و آنها را بصورت مسطح در می‌آورد.

**نکته:** خاک ریزدانه مرطوب بعد از کوبیدن بصورت پراکنده در می‌آید بنابراین خاک پراکنده همیشه مرطوب تر است. خاک ریز دانه خشک بعد از کوبیدن بصورت پراکنده در می‌آید

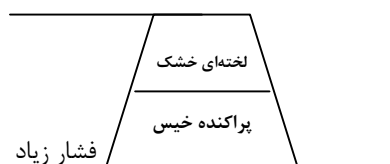
در محدوده فشارهای کم نشست خاکهای با ساختار لخته‌ای کمتر از خاکهایی با ساختار پراکنده است.

$$3 \sim 5 \frac{kg}{cm^2}$$

در محدوده فشارهای بالا نشست خاکهای با ساختار لخته‌ای بیشتر از خاکهایی با ساختار پراکنده است.

$$6 \sim 10 \frac{kg}{cm^2}$$

**نکته:** میزان تنش پذیری (تحمل تنش) بافتها بستگی به دامنه تنش اعمال شده دارد.



بهتر است در قسمتهایی که فشار زیاد است خاک را بصورت خیس بکوبیم و قسمتهایی که فشار کمتر است را بصورت خشک بکوبیم.

سطح مخصوص (specific volume):

$$\text{سطح ویژه (S)} = \frac{\text{سطح ماده}}{\text{حجم یا جرم}}$$

مساحت واحد جرم را گویند (یک کیلوگرم جرم چه سطحی دارد) که البته این مساحت هم مساحت قسمت بالاست و هم مساحت قسمت پایین آن است شاخص برای جذب آب کانیهای رس سطح مخصوص آنهاست هر چه سطح مخصوص بیشتری داشته باشد آب بیشتری را دارد.

کائولینیت	→ سطح مخصوص	۱۵ $m^2/gr$
ایلیت	→ سطح مخصوص	۸۰ $m^2/gr$
مونت موریلونایت	→ سطح مخصوص	۸۰۰ $m^2/gr$

خصوصیات نوع کانی	ابعاد جانبی A	ضخامت A	سطح مخصوص $m^2/gr$
کائولینیت	۱۰۰۰ ~ ۲۰۰۰	۱۰۰ ~ ۱۰۰۰	۱۵
ایلیت	۱۰۰۰ ~ ۵۰۰۰	۵۰ ~ ۵۰۰	۸۰
مونت موریلونایت	۱۰۰۰ ~ ۵۰۰۰	۱۰ ~ ۵۰	۸۰۰

کانی شناسی (SOIL MINERALOGY):

الف) خاکهای دانه‌ای:

۱) کوارتز (*Quartz*): ساختار اصلی آن از اتمهای سیلیکون و اکسیژن ویژگیهای آن: پایداری فیزیکی و شیمیایی مولکولی مناسبی دارد دارای اتصالات اتمی و مولکولی محکم است مصالح از این جنس مقاوم و بادوام - سخت است.

۲) فلدسپار (*Feldspar*): شبیه کوارتز است که بخشی از سیلیکون بوسیله آلومینیوم جایگزین شده است. این کانی ساختاری بازتر (مولکولی و اتمی) نسبت به کوارتز دارد مقاومت و اتصالات بین مولکولی فلدسپار از کوارتز ضعیف تر است ولی مقاومت آن در مقابل شکستن و هوازدگی کمتر است.

۳) میکا (*Mica*): مخلوطی از سیلیکون و آلومینیوم است که خاصیت ورقه‌ای دارد اتصالات بین صفحات ضعیف و خاصیت الاستیسیته و تورم پذیری زیاد دارد

نکته مهم: خواص مکانیکی و مهندسی خاکهای دانه ای تابعی است از:

بافت + اندازه ذرات کانی + نوع دانه بندی

(ب) خاکهای رسی (چسبنده) (*cohesive soils*)

رس چیست؟ عبارتست از کانیهای مشخص مثل

(۱) کائولینیت (*kaolinit*)

(۲) ایلیت (*Illit*)

(۳) مونت موریلونیت (*Montmorilinite*)

**ویژگیهای خاکهای خیلی ریزدانه:** (توجه شود که لای و گرد سنگ نیز ریزدانه اند ولی رس

نیستند) معمولا ذره رس غیرقابل رویت با چشم است ( $1 < \mu m$ ).

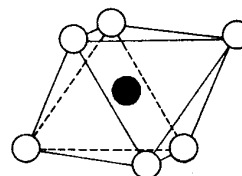
چسبنده و پلاستیک هستند (وجه تمایز رس از خاکهای دیگر) حساس بودن خواص آنها به حضور مایع، نوع مایع، رفتار رسها به شکل منحنی دانه بندی بستگی زیادی ندارند (برعکس خاکهای دانه ای) رسها به لحاظ الکتروشیمیایی فعال بوده و درصد کمی از آنها می تواند خواص خاک را تغییر دهند. اگر درصد رس به ۵۰ برسد ذرات خاک دانه ای داخل رسی شناور شده و عملا رفتار خاک تابع خواص رسی خواهد بود.

**کانیهای رس:**

اجزاء تشکیل دهنده از هوازدگی شیمیایی سنگها می باشند. به لحاظ شیمیایی این کانیها آلومینوسیلیکات هیدراته می باشند.

کرسیتالهای کانیهای رس از تکرار ورقه های نازک که تکرار آن یک ساختمان اتمی را تشکیل می دهد تشکیل می شوند. در ورقه کریستال اصلی در ساختار کریستال کانیهای رسی شرکت دارند

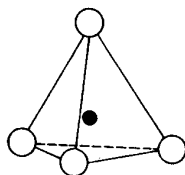
(۱) چهاروجهی سلیکا



(میدروکسیل) & (اکسیژن)  
(پ) هشت وجهی آلومینا

نماد علمی  $Al$   $Al$

(۲) هشت وجهی آلومینا



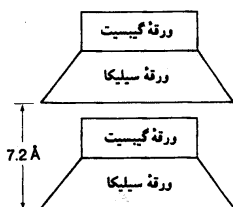
(اکسیژن) & (سیلیکا)  
(الف) چهاروجهی سلیکا

نماد علمی  $Si$   $Si$

### انواع کانیهای اصلی و مشهور رس:

(۱) کائولینیت (*kaolinite*):

عبارتست از تکرار ورقه آلومینای هشت وجهی + ورقه سیلیکای چهاروجهی

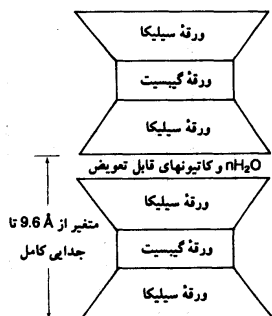


کانی یک به یک

محل مصرف: صنعت چینی - کاغذ - رنگ

(۲) هالوئی سیت (*Holloysite*):

شبه کائولینیت است با این تفاوت که بین لایه‌ها عمل هیدراتاسیون صورت گرفته و سبب بهم چسبیدن تصادفی و نامنظم ورقه‌ها شده و شکل مجوف (سورخدار) پیدا کرده است.



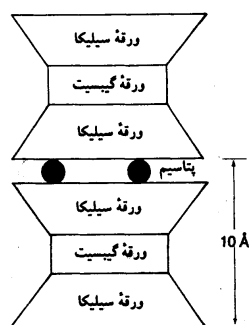
(۳) مونث موریلونایت (*Montmorilonite*):

تکرار و توالی دو ورقه سیلیکاتی + یک ورقه آلومینا تی

کانی دو به یک

(۴) ایلیت (*Illite*): مثل مونث موریلونایت ساختار ۲:۱ دارند با این تفاوت که بین لایه‌ها از طریق اتم

پتاسیم اتصال صورت می‌گیرد.



(۵) کلریت (*cholorite*): تشکیل شده از تکرار

یک ورقه سیلیکاتی + ورقه آلومیناوسیلیکاتی دیگر در بین لایه‌ها  $Al$  یا  $mg$

**شناسایی خاکهای ریز دانه (لای و رس) با روشهای صحرائی:**

(۱) آزمایش مقاومت خشک: یک مقدار خاک را گل کرده بعد خشک می‌کنیم سپس اگر بین دو انگشتان قرار دهیم در صورتی که راحت خرد شود لای است و در غیر اینصورت رس است

(۲) آزمایش تعیین نفوذ پذیری صحرائی: خمیری درست می‌کنیم و در کف دست پهن می‌کنیم و روی دست پهن می‌کنیم بعد به زیر دست ضربه می‌زنیم اگر سطح خمیر شفاف شد یعنی آب روی سطح آمد لای است و اگر تغییری نکرد رس است چون رس آب را عبور نمی‌دهد و نفوذ پذیری آن کم است.

(۳) خاکهای رس حالت خمیری دارند و اگر آنها را فتیله کنیم می‌تواند وزن خود را نگه دارد و اگر نتوانستیم یک فتیله ۳mm در بیابوریم لای است که به این آزمایش خمیری (Plasticity) گوئیم.

(۴) اگر مقداری خاک را در ظرف آب بریزیم (۱ lit) اگر ماسه باشد سریعاً (۱ دقیقه) ته نشین می‌شود اگر لای باشد حدود یک ساعت ته نشینی آن طول می‌کشد و اگر رس بود ساعتها یا چند روز ته نشینی آن طول می‌کشد.

**چگالی دانه‌ها (Gs):**

در انجام محاسبات مختلف در مکانیک خاک، اغلب چگالی دانه‌های خاک لازم می‌گردد چگالی دانه‌ها را می‌توان در آزمایشگاه به دقت تعیین کرد. دامنه چگالی دانه‌ها معمولاً بین ۲/۶ تا ۲/۹ است. چگالی دانه‌های ماسه کم‌رنگ، که اکثر از کوارتز ساخته شده، در حدود ۲/۶۵ و چگالی خاکهای لای دار و رس دار در حدود ۲/۶ تا ۲/۹ است.

**دانه بندی خاک:**

دانه بندی خاک، تعیین دامنه اندازه ذرات موجود در خاک و توزیع وزنی آنها است که بر حسب درصدی از وزن کل خشک خاک بیان می‌شود. معمولاً دو روش برای تعیین منحنی دانه بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

(۱) آزمایش دانه بندی برای ذراتی با قطر بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر (درشت دانه)

(۲) آزمایش هیدرومتری برای ذراتی با قطر کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر



**(۱) آزمایش دانه‌بندی:**

آزمایش دانه‌بندی عبارتست از لرزاندن نمونه خاک بر روی یک سری الک که اندازه‌های آن به ترتیب از بالا به پائین کاهش می‌یابد در جدول ۱-۵ صفحه ۲۰ کتاب طاحونی اندازه‌روشنه‌های الک آمریکایی ارائه شده است. برای آزمایش دانه بندی، ابتدا خاک در کوره خشک می‌شود سپس کلوخه‌های خاک کاملاً خشک شده و نمونه از الکها عبور داده می‌شود و الکها لرزانده می‌شوند بعد از اتمام مرحله لرزاندن الکها و عبور دادن کامل خاک از آنها، جرم خاکهایی که در روی هر یک از الکها باقیمانده اندازه‌گیری می‌شود. در هنگام آزمایش دانه بندی خاکهای چسبنده، شکستن کلوخه‌های سنگ به دانه‌های جدا از هم مشکل است. در این صورت خاک را می‌توان در آب حل کرد تا بصورت دوغاب درآید دوغاب خاک از میان الکها عبور داده شده و مقدار باقیمانده در روی هر الک در کوره خشک و توزین می‌شود.

\* **نکته:** اگر شماره الک را به اینچ بیان کنیم یعنی قطر (ابعاد) هر سوراخ به اندازه عدد بیان شده به اینچ است ولی اگر الک را با نمره بیان نمودیم یعنی در هر اینچ مربع الک به اندازه نمره الک سوراخ وجود دارد.

**جدول ۱-۱: اندازه الکهای استاندارد آمریکایی**

شماره الک	اندازه روزنه (mm)
4	4.750
6	3.350
8	2.360
10	2.000
16	1.180
20	0.580
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
80	0.180
100	0.150
140	0.106
170	0.088
200	0.075
270	0.053

**محاسبات:**

۱- درصد خاک باقیمانده روی الک شماره  $n$  ام (از بالا به پایین):

$$R_n = \frac{\text{وزن باقیمانده روی الک شماره } n \text{ ام}}{\text{وزن کل خاک مورد آزمایش}} \times 100$$

۲- درصد جمع شده خاک بر روی الکها (تا  $n$  امین الک):

یعنی اگر الکهای بالا نبودند اینقدر خاک روی الک  $n$  ام جمع می‌شد (بر حسب درصد)

$$= \sum_{i=1}^{i=n} R_n$$

۳- درصد رد شده از الک  $n$  ام  $\text{درصد رد شده} = 100 - \sum_{i=1}^{i=n} R_n$

**رسم منحنی:**

منحنی تغییرات درصد رد شده بر حسب قطر سوراخ الکها را بر روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم کنیم اندازه سوراخها بر روی مقیاس لگاریتمی رسم می‌شوند.

(درصد ریزی، اندازه الک (قطردانه)) = مختصات هر نقطه روی نمودار

$$\text{مقیاس} \times \left( \frac{\text{قطر بزرگترین دانه}}{\text{قطر مورد نظر}} \right) = Ln (\text{مختصات هر نقطه روی نمودار})$$

**اندازه مؤثر:**

$D_{10}$ : قطری که در روی منحنی دانه بندی ۱۰٪ دانه‌ها از آن عبور می‌کنند.

$D_{30}$ : قطری که در روی منحنی دانه بندی، ۳۰٪ از دانه‌ها از آن عبور می‌کنند.

$D_{60}$ : قطری که در روی منحنی دانه بندی، ۶۰٪ از دانه‌ها از آن عبور می‌کنند.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{ضریب یکنواختی } C_u$$

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

معیار خوب دانه بندی یابد دانه بندی شدن خاک :

در صورت برقرار نبودن معیارهای زیر خاک بد دانه بندی شده است

$$\text{if } \left. \begin{array}{l} 6 \leq C_u \\ 1 \leq C_c \leq 3 \end{array} \right\} \text{ For } \underline{\text{sand}} \text{ than خوب دانه بندی شده}$$

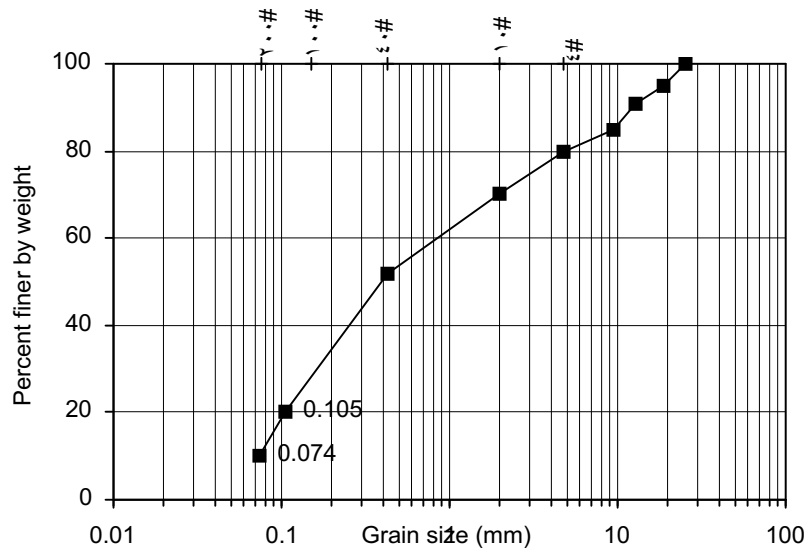
$$\text{if } \left. \begin{array}{l} 4 \leq C_u \\ 1 \leq C_c \leq 3 \end{array} \right\} \text{ For } \underline{\text{Grawel}} \text{ than خوب دانه بندی شده}$$

۱) اگر خاک طبق  $C_u$  خوب دانه بندی شده باشد ولی  $C_c$  آن بین ۱ و ۳ نباشد خاک را منفصل گویند که جزء خاکهای بد دانه بندی شده‌ها است.

۲) اگر شرط  $C_u$  برقرار نبود دیگر نیازی برای بررسی شرط دوم نیست ( $C_c$ ) و می‌گوییم خاک بد دانه بندی شده است.

**مثال:** بر روی  $1000\text{ gr}$  خاک خشک آزمایش دانه بندی انجام شده است و نتایج زیر حاصل گردیده. نمودار دانه بندی را ترسیم و بیان کنید که خاک خوب دانه بندی شده است یا بد دانه بندی شده است.

اندازه الک	وزن باقیمانده روی هر یک	درصد باقیمانده $R_n$	$\sum R_n$	درصد رد شده $100 - \sum R_n$
۱" (۲۵/۴mm)	۰	۰	۰	۱۰۰
$\frac{3}{4}$ " (۱۹mm)	۵۰	۵	۵	۹۵
$\frac{1}{2}$ " (۱۲/۷mm)	۴۰	۴	۹	۹۱
$\frac{3}{8}$ " (۹/۵mm)	۶۰	۶	۱۵	۸۵
NO.4 (۴/۷۵mm)	۵۰	۵	۲۰	۸۰
NO.10 (۲mm)	۱۰۰	۱۰	۳۰	۷۰
NO.40 (۰/۴۲۵mm)	۱۸۰	۱۸	۴۸	۵۲
NO.140 (۰/۱۰۵mm)	۳۲۰	۳۲	۸۰	۲۰
NO.200 (۰/۰۷۴mm)	۱۰۰	۱۰	۹۰	۱۰
	وزن کل خاک ۱۰۰۰ gr	۱۰	۱۰۰	۰



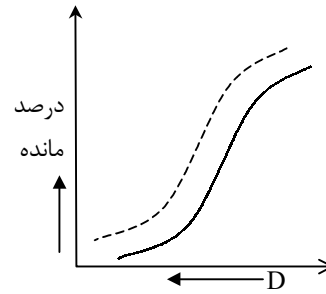
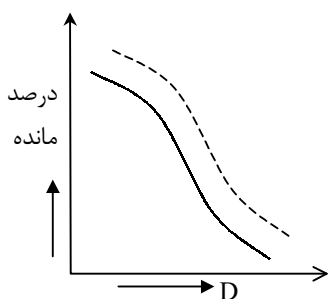
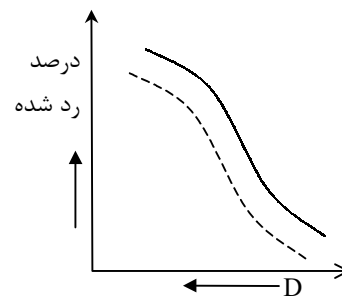
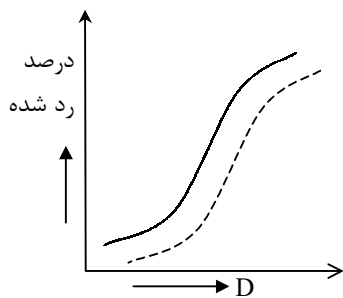
$$C_u = \frac{D_{\phi.}}{D_{1.}} = \frac{0.786}{0.074} = 10.62$$

$$C_c = \frac{D_{\phi.}^2}{D_{1.} \times D_{\phi.}} = \frac{0.127^2}{0.074 \times 0.786} = 0.277$$

خاک بد دانه‌بندی شده است.

### شکلهای مختلف منحنی دانه بندی:

منحنی نشان داده شده با نقطه چین خاک درشت دانه‌تر است



۲) آزمایش هیدرومتری (دانه بندی بوسیله ته نشینی):

آزمایش هیدرومتری برپایه اصول ته نشینی دانه‌های آب در خاک قرار دارد، وقتی که نمونه خاک در آب کاملاً هم زده می‌شود، دانه‌های معلق برحسب شکل، اندازه، وزن با سرعت‌های مختلفی ته نشین می‌شوند. برای سهولت، فرض می‌شود که تمام دانه‌های خاک کروی هستند و سرعت ته نشینی آنها طبق قانون استوکس بیان می‌شود

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} D^2 \quad \text{قانون استوکس}$$

$$v = \text{سرعت}$$

$$\gamma_s = \text{وزن مخصوص دانه‌های خاک}$$

$$\gamma_w = \text{وزن مخصوص آب}$$

$$\eta = \text{ویسکوزیته آب}$$

$$D = \text{قطر دانه‌های خاک}$$

$$D_{(mm)} = K \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}}$$

K: مقدار آن از جدول زیر بدست می‌آید.

جدول ۱-۲ مقدار K در رابطه ۱-۶ (ASTM-1982)

درجه حرارت (°C)	$G_s$							
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374
17	0.01511	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01169

برحسب  $G_s$  و درجه حرارت

$$\% \text{ درصد عبوری} = \frac{R \frac{2/65-1}{2/65} \cdot G_s}{W_s} \times 100$$

$$R = l \text{ در هر زمان}$$

$$W_s = \text{وزن خاک خشک}$$

**مثال:** در یک آزمایش هیدرومتری نتایج زیر در دست است مطلوبست تعیین قطر  $D$  کوچکترین ذره ای که در لحظه اندازه گیری از نقطه اندازه گیری عبور کرده است

$$G_s = 2/7$$

$$T = 22^\circ$$

$$L = 11/9 \text{ cm}$$

$$t = 30$$

حل:

$$D_{(mm)} = K \sqrt{\frac{L_{(cm)}}{t_{(min)}}}$$

$$T = 22^\circ \quad \rightarrow 0.01312 \quad \text{از جدول صفحه 24}$$

$$G_s = 2/7$$

$$D_{(mm)} = 0.01312 \sqrt{\frac{11/9}{30}} = 0.0083 \text{ mm}$$

مثال:

$$A: D_{1.} = 0.02 \text{ mm} \quad D_{2.} = 0.6 \text{ mm} \quad D_{3.} = 9 \text{ mm}$$

$$B: D_{1.} = 0.3 \text{ mm} \quad D_{2.} = 0.4 \text{ mm} \quad D_{3.} = 9 \text{ mm}$$

$$C: D_{1.} = 0.022 \text{ mm} \quad D_{2.} = 0.55 \text{ mm} \quad D_{3.} = 1/2 \text{ mm}$$

تعیین کنید خاکهای فوق از لحاظ دانه بندی چه وضعیتی دارند؟

حل:

خوب دانه بندی شده  $W$

$$C_c = \frac{D_{2.}^2}{D_{1.} \times D_{3.}} = \frac{0.6^2}{0.02 \times 9} = 2$$

$$C_u = \frac{D_{3.}}{D_{1.}} = \frac{9}{0.02} = 450$$

بد دانه بندی شده  $P$

$$C_c = \frac{0.4^2}{0.55 \times 0.3} = 0.9696 \sim 1$$

$$C_u = \frac{0.55}{0.3} = 1/833 < 4$$

دانه بندی منفصل  $P$

$$C_c = \frac{0.55^2}{0.022 \times 1/2} = 0.115$$

$$C_u = \frac{1/2}{0.022} = \frac{9}{0.022} = 54/54$$

فصل دوم

« ترکیب خاکها »

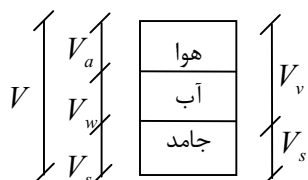
خاکها دارای سه فاز زیر می باشند :

(۱) جامد : کانی ها و مواد آلی .

(۲) مایع : آب .

(۳) گاز: هوا

وزن خاک = وزن جامد + وزن مایع



روابط حجمی :

$$V_s = \text{حجم ذرات جامد}$$

$$V_w = \text{حجم ذرات آب}$$

$$V_a = \text{حجم هوا}$$

$$V_v = \text{حجم فضای خالی از مواد جامد}$$

$$V = \text{حجم کل}$$

$$V = V_s + V_v$$

$$V_v = V_w + V_a$$

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

$$n = \text{درجه پوکی} = \frac{V_v}{V}$$

$$S = \text{درصد اشباع خاک} = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

$$S = 100\% \quad \left| \begin{array}{l} V_a = 0 \\ V_w = V_v \end{array} \right. \quad S = 0 \quad \left| \begin{array}{l} V_a = V_v \\ V_w = 0 \end{array} \right.$$

خاکهای رسی را با نسبت تخلل می سنجد

خاکهای ماسه ای را با درجه پوکی می سنجد

$D_r$  تراکم نسبی (%):

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

$e$ : نسبت تخلخل در محل

$e_{max}$ : نسبت تخلخل خاک در شل‌ترین وضعیت

$e_{min}$ : نسبت تخلخل خاک در متراکم‌ترین وضعیت

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

### روابط وزنی (جرمی)

$$W = W_s + W_w$$

$$W_w = W - W_s$$

وزن کل =  $W$

وزن خاک خشک =  $W_s$

وزن آب =  $W_w$

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

درصد رطوبت

وزن مخصوص ( $\gamma$ ):

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} \quad (S\% = 100) \quad \text{وزن کل خاک}$$

حجم کل خاک  $V$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (W\% = 0) \quad \text{وزن ذرات جامد خاک}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \text{حجم ذرات جامد خاک}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \text{حجم آب}$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad \text{وزن آب}$$

وزن مخصوص ویژه یا چگالی ذرات

$$\gamma' < \gamma_d < \gamma_{wet} < \gamma_{sat} < \gamma_s$$

$$(1/5 \sim 11)(13 \sim 18/5)(17/5 \sim 19)(19/5 \sim 21/5)(23/5 \sim 28/5)$$



خلاصه‌ای از برخی روابط وزنی-حجمی:

$e = \frac{V_v}{V_s}$	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	$n = \frac{e}{1+e}$
$e = \frac{n}{1-n}$	$S_v = \frac{V_w}{V_v} \times 100$	$S \cdot e = G_s \cdot w$
$w\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{M_w}{M_s} \times 100$	$A = \frac{V_v}{V_t} \times 100$ درصد هوا	$A = n(1-S)$ $A = \frac{e - WG_s}{1+e}$
$\gamma_{wet} = \frac{W_t}{V_t}$ $(s < 100)$	$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$ $(w\% = 0)$	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} =$
$\gamma_{sat} = \frac{W_T}{V_T}$ $(s = 100)$	$\gamma_s = G_s \cdot \gamma_w$	$\gamma_{wet} = \frac{(1+w)G_s \cdot \gamma_w}{1+e}$ $\gamma_{wet} = \frac{(G_s + s \cdot e)\gamma_w}{1+e}$
$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e}$ $\gamma_{sat} = \frac{1+\omega}{1+\omega G_s} G_s \gamma_w$	$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1+\omega}$ $\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e}$	$e = \frac{G_s \gamma_w - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} + \gamma_w}$ $\gamma_d = \frac{G_s \cdot \rho_w - \rho_{sat}}{\rho_{sat} - \rho_w}$
$M_w = \frac{\omega M_T}{1+\omega}$ $M_s = \frac{M_T}{1+\omega}$	$V_s = \frac{W_s}{G_s \cdot \gamma_w}$ $\rho = \rho_{sat} - \rho$ جرم آب لازم برای اشباع کردن	$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w - \rho}{\rho_{sat} - \rho}$

اثبات برخی روابط:

۱- رابطه بین  $e$  و  $n$  را اثبات کنید.

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

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{V_v}{V(1 - \frac{V_v}{V})} = \frac{n}{1-n}$$

$$e = \frac{n}{1-n} \rightarrow e - en = n \rightarrow e = n + en = n(1+e)$$

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

۲- رابطه بین  $w$ ,  $s$  و  $G_s$  را اثبات کنید.

$$w\% = \frac{W_\omega}{W_s} \times 100$$

$$\gamma_\omega = \frac{W_\omega}{V_\omega} \rightarrow W_\omega = \gamma_\omega \cdot V_\omega$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \rightarrow W_s = \gamma_s \cdot V_s$$

$$S = \frac{W_\omega}{V_s} \times 100 \rightarrow W_\omega = \frac{S \cdot V_s}{100}$$

$$\omega = \frac{V_\omega \cdot \gamma_\omega}{G_s V_s \gamma_\omega} \times 100 = \frac{V_\omega}{G_s \cdot V_s} \times 100 = \frac{\frac{S \cdot V_s}{100}}{G_s V_s} \times 100 = \frac{S \cdot V_s}{G_s \cdot V_s} = \frac{S \cdot e}{G_s}$$

$$\boxed{S \cdot e = G_s \cdot \omega}$$

۳- رابطه بین  $\gamma$  و  $\gamma_d$  و  $\omega$  را اثبات کنید.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_\omega}{V} = \frac{W_s \left(1 + \frac{W_\omega}{W_s}\right)}{V} = \gamma_d \left(1 + \frac{\omega}{100}\right)$$

$$\boxed{\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{\omega}{100}}}$$

۴- رابطه بین  $e$  و  $\gamma$  و  $S$  و  $G_s$  را اثبات کنید؟

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_\omega}{V_s + V_v} = \frac{G_s \cdot \gamma_\omega \cdot V_s + V_\omega \cdot \gamma_\omega}{V_s + V_v} =$$

$$\frac{G_s \cdot \gamma_\omega \cdot V_s + \frac{S V_v}{100} \gamma_\omega}{V_s + V_v} = \frac{G_s \cdot \gamma_\omega + \frac{S V_v}{100 \cdot V_s} \times \gamma_\omega}{1 + \frac{V_v}{V_s}}$$

$$\boxed{\gamma = \frac{G_s + S e}{1 + e} \gamma_\omega}$$

$$S = 100\% \quad \gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_\omega$$

$$S = 100\% \quad \gamma_{sat} = \frac{G_s}{1 + e} \gamma_\omega$$

**مثال ۱:** نمونه خاکی درون استوانه‌ای با ابعاد زیر است در صورتیکه درصد اشباع آن صددرصد باشد

و  $W = 3/1 \text{ lbs}$  و  $W_s = 2/5 \text{ lbs}$  پارامترهای  $\gamma_d$  و  $\gamma_{sat}$  و  $n$  و  $w$  و  $e$  را حساب کنید.

$$L = 6'' \quad D = 3'' \quad \gamma_\omega = 62/4 \text{ lb/ft}^3 \quad \nu' = 12''$$

حل:

ابتدا تمامی طولها را تبدیل به  $ft$  می‌کنیم

$$L = 6'' = \left(\frac{6}{12}\right) = 0.5'$$

$$D = 3'' = \frac{3}{12} = 0.25'$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{\pi (0.25)^2}{4} \times 0.5 = 0.0245 \text{ ft}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{3/1}{0.0245} = 126/5 \text{ lb/ft}^3$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{2/5}{0.0245} = 102 \text{ lb/ft}^3$$

$$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{W - W_s}{W_s} \times 100 = \frac{3/1 - 2/5}{2/5} \times 100 = 24\%$$

$$W_w = W - W_s = 3/1 - 2/5 = 0.6$$

$$W_w = V_w \cdot \gamma_w \rightarrow 0.6 = V_w \times 62/4$$

$$V_w = 0.0096 \text{ ft}^3 = V_v$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{0.0096}{0.0245} = 0.392$$

$$V_s = V - V_v = 0.0245 - 0.0096 = 0.0149 \text{ ft}^3$$

$$e = \frac{V_w}{V_s} = \frac{0.0096}{0.0149} = 0.644$$

چون اشباع است

مثال ۲: در صورتیکه مقادیر

$$\omega = 10\% \quad G_s = 2.65 \quad \gamma_d = 120 \text{ lb/ft}^3 \quad V = \frac{1}{30} \text{ ft}^3$$

مفروض باشد پیدا کنید  $\gamma$  و  $S$  و  $e$  را؟

حل:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \rightarrow 120 = \frac{\gamma}{1 + 0.1} \rightarrow \gamma = 132 \text{ lb/ft}^3$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.65 \times 62/4}{120} - 1 = 0.378$$

راه حل دوم

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{\gamma_d \cdot V}{G_s \gamma_w} = 0.0242 \text{ ft}^3$$

$$V_v = V - V_s = \frac{1}{30} - 0.0242 = 0.009 \text{ ft}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.009}{0.242} = 0.372$$

$$S.e = G_s \cdot \omega \rightarrow S \times 0.372 = 2/65 \times 0.1$$

$$S = 71/2 \%$$

**مثال ۳:** خاکی را با خصوصیات ذیل می‌خواهیم اشباع کنیم رطوبت خاک بعد از اشباع چقدر است

$$G_s = 2/68 \quad e = 0.8 \quad \omega = 24 \%$$

$$S.e = G_s \cdot \omega \rightarrow 0.8 \times 1 = 2/68 \times \omega \rightarrow \omega = 29/8 \%$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(1 + \omega_{sat}) G_s \gamma_w}{(1 + \omega_{sat} G_s)} = 19 \text{ KN/m}^3$$

**مثال ۴:** ۳۵ گرم از یک خاک با  $G_s = 2/65$  را درون آب می‌ریزیم. ارتفاع آب به  $1/6 \text{ cm}$  می‌رسد حال اگر همین مقدار خاک را در جیوه بریزیم ارتفاع به  $1/9$  خواهد رسید تعیین کنید درصد هوا و رطوبت این خاک را؟

**توجه\*:** می‌دانیم که آب درون ذرات خاک نفوذ می‌کند ولی جیوه نفوذ نمی‌کند

$$\Delta V = 1/9^h \times 10^A = 19 \text{ cm}^3 = V_w + V_s + V_a$$

$$\Delta V_{H_2O} = 1/6 \times 10 = 16 \text{ cm}^3 = V_w + V_s$$

$$V_a = \Delta V_{Hg} - \Delta V_{H_2O} = 3$$

$$A\% = \frac{V_a}{V_T} = \frac{3}{19} = 15/8 \%$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \rho_s = 2/65$$

$$V_w + V_s = 16 \text{ cc}$$

$$\frac{M_w}{\rho_w} + \frac{M_s}{\rho_s} = 16 \quad M_s = \frac{M_T}{1 + \omega} \quad M_w = \frac{\omega M_T}{1 + \omega}$$

$$\frac{\omega M_T}{\rho_w (1 + \omega)} + \frac{M_T}{\rho_s (1 + \omega)} = 16$$

$$\frac{35\omega}{1(1 + \omega)} + \frac{35}{2/65(1 + \omega)} = 16 \quad \omega = 16/7 \%$$

**مثال:** چند کیلوگرم آب برای اشباع کردن  $10 \text{ m}^3$  از خاک ذیل لازم است؟

$$n = 0/5, \quad \omega = 15 \%, \quad G_s = 2/65$$

حل:

$$\rho_w = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.5}{1-0.5} = 1$$

$$\rho_{wet} = \frac{(1+w)G_s \rho_w}{1+e} = \frac{(1+0.5) \times 2.65 \times 1000}{1+1} = 1523.75 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{sat} = \left( \frac{G_s + e}{1+e} \right) \rho_w = \left( \frac{2.65 + 1}{1+1} \right) \times 1000 = 1825 \frac{kg}{m^3}$$

$$\Delta M_w = 10 \times 30.1 / 25 = 30.12 / 5 \text{ kg}$$

جرم آب لازم برای اشباع کردن یک متر مکعب خاک

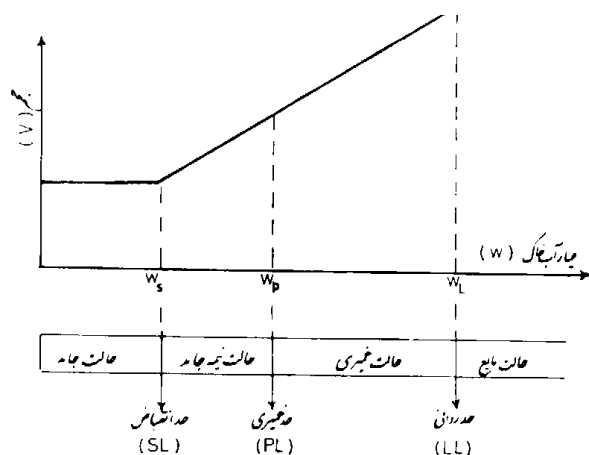
**توجه \***: باید دقت نمود که چه در حالت مرطوب و چه در حالت اشباع کامل  $\gamma_d$  خاک همواره ثابت است

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{sat}}{1 + \omega_{sat}}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1 + \omega_{wet}}$$

### حدود اتربرگ

بحث حدود اتربرگ برای خاکهای ریزدانه است ظاهر فیزیکی خاکهای ریزدانه در مقابل درصد رطوبتهای مختلف با هم فرق می کند. وقتی در خاکهای ریزدانه، کانیهای رسی ظاهر شود، با مرطوب کردن، خاک حالت خمیری بخود می گیرد و آن را بدون خرد شدن می توان شکل داد. این خاصیت چسبندگی بعلت آب جذب شده ای است که ذرات رس را احاطه کرده است. در اوایل دهه ۱۹۰۰، دانشمند سوئدی، اتربرگ، روشی برای توصیف سفتی خاکهای ریزدانه بر حسب میزان رطوبت ابداع نمود. در میزان رطوبت خیلی کم، خاک مثل یک جسم جامد عمل می کند. در رطوبت خیلی بالا، مخلوط آب و خاک می تواند به صورت یک مایع جاری شود بر حسب میزان رطوبت، طبیعت رفتار خاک به یکی از چهار حالت جامد، نیمه جامد، خمیری و مایع خواهد بود



خصوصیات حدود اتربرگ در خاکهای درشت دانه زیاد تاثیری ندارد و باید این آزمایش را برای خاکهای عبوری از الک NO.40 استفاده کرد.

### تعریف حدود اتربرگ:

- الف) حد روانی:** در صد رطوبتی که خاک جذب می کند تا بصورت مایع درآید
- ب) حد خمیری:** حدی است که اگر خاک بیشتر از آن رطوبت از دست دهد شروع ترک خوردن می کند یا بعبارتی کمترین رطوبت است که در آن خاک شکل می گیرد
- ج) حد چروکی (انقباض):** رطوبتی که بعد از آن دیگر تغییر حجم خاک صفر است

### روش تعیین هر یک از حدود اتربرگ:

#### الف) تعیین حد روانی

رطوبتی است که در دستگاه کاساگرانده شکاف ایجاد شده در خمیر خاک به اندازه  $13\text{mm}$  به ازای ۲۵ ضربه بهم بیاید. ابتدا به خاک مقداری آب اضافه می کنیم و خوب ورز می دهیم سپس آنرا در کاسه پهن کرده و در آن شکافی طولی ایجاد می کنیم و بعد حدود ۲ ضربه در ثانیه به دستگاه ضربه می زنیم و می شماریم که بینیم شکاف با چند ضربه بسته می شود این آزمایش را چند بار تکرار می کنیم و اعداد حاصله را روی محور نیمه لگاریتمی برده و از روی آن رطوبتی را که به ازای شکاف در ۲۵ ضربه بسته شده را بدست می آوریم.

#### نکته:

- ۱- اگر حتی نقطه‌ای باشد که حین آزمایش در ۲۵ ضربه شکاف بسته شود باز آن رطوبت حد روانی نیست بلکه باید حد روانی از نمودار خوانده شود.
- ۲- اگر پایه زیر کاسه کاساگرانده بجای کائوچو سخت یا لاستیک سخت، چوب پنبه نرم باشد در اینصورت حد روانی بیشتر است زیرا چوب پنبه نرم مقداری از انرژی را مستهلک می کند در نتیجه انرژی وارده با خاک کمتر می شود در نتیجه باید برای بسته شدن شکاف رطوبت را افزایش دهیم.
- ۳- اگر بجای ۲۴ ساعت خاک را بمدت ۱۲ ساعت در گرمخانه قرار دهیم در اینصورت حد روانی کمتر از مقدار واقعی خوانده شود زیرا تمام آب نمونه بخار نشده است.

#### ب) روش تعیین حد خمیری

گلوله‌ای را از خمیر به ابعاد یک گردوی کوچک تهیه می کنیم سپس آنرا بمدت ۷۰ تا ۸۰ بار در دقیقه بصورت فتیله‌ای بقطر  $3\text{mm}$  درمی آوریم تا در این قطر ترک بخورد در آزمایش حد خمیری اگر رطوبت دقیقاً اندازه حد خمیری بود جواب آن رطوبت را بعنوان یک حد خمیری از یک سعی و خطا در نظر می گیریم سپس مجموع چند سعی و خطا را با هم جمع و میانگین می گیریم و آنرا

بعنوان حد خمیری اعلام می‌نماییم. فتیله‌هایی که در قطر کمتر یا بیشتر از ۳mm بوجود می‌آیند برای نتایج ارزشی ندارند.

### ج) روش آزمایش حد انقباض

خاک عبوری از الک N040 را آنقدر آب می‌زنیم تا اشباع شود (سطح آن برق بزند) آنگاه جرم اولیه خاک اشباع را بدست می‌آوریم و حجم آنرا نیز از روی حجم ظرف حساب کرده سپس آنرا در گرمخانه می‌گذاریم و آنرا تحت حرارت قرار داده تا آب آن تبخیر شود بعد از آن خاک را وزن کرده تا بدین وسیله  $W_w$  (وزن آب) بدست آید.

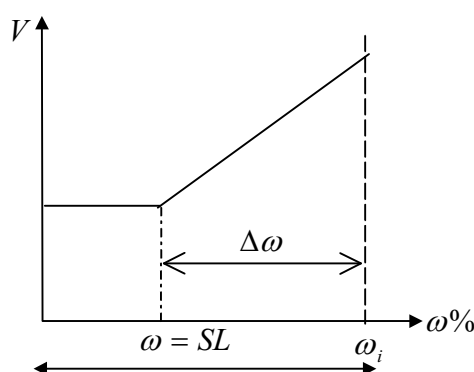
سپس برای بدست آوردن حجم خاک خشک آنرا در ظرفی که حجم معینی دارد می‌ریزیم و فضای خالی بالای ظرف را با جیوه پر می‌کنیم (بدلیل اینکه جیوه در درون ذرات خاک فرو نمی‌رود) و حجم جیوه مصرفی را از حجم ظرف کم کرده تا حجم خاک خشک شده بدست آید.

$$\omega_i = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100$$

$$\Delta\omega = \Delta\left(\frac{M_w}{M_s}\right) = \frac{1}{M_f} \Delta M_w = \frac{1}{M_f} \Delta(\rho_w V_w) = \frac{1}{M_f} \rho_w (V_i - V_f)$$

$$SL = \omega_i - \Delta\omega$$

$$SL = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 - \frac{V_i - V_f}{M_f} \rho_w \times 100$$



نشانه خمیری  $PI$ : اختلاف بین حد مایع و حد خمیری می‌باشد

$$PI = LL - PL$$

نکته ۱: هر خاکی که  $PI$  آن بالاست کار کردن با آن خاک در دست‌پذیرتر است.

نکته ۲: ماده خمیری که به ازای تنش مشخصی تغییر شکل آن خیلی زیاد است در حقیقت  $PI$  آن بالاست.

فعالیت خاک  $Ac$ : شیب نمودار خطی  $PI$  در مقابل درصد ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون است. فعالیت به عنوان نشانه‌ای برای شناسایی پتانسیل تورم خاکهای رسی است.

$$Ac = \frac{PI}{\text{درصد وزنی ذرات با اندازه رسی}}$$

هر چه فعالیت یک خاک بیشتر باشد خاک بدتر است زیرا تغییرات آن با آب بیشتر است. هرچقدر درصد رس بیشتر باشد حد خمیری و حد روانی بیشتر است. بطور کلی اگر رس نداشته باشیم  $PI=0$  است یعنی  $PI$  هیچگاه بمعنی  $PL=LL$  نیست بلکه به معنای کم بودن رس است.

### دلایل جذب آب در رس

- ۱- ریز بودن ذرات
- ۲- بارهای الکتریکی منفی: کاتیونها و ملکولهای آب را جذب خود می کند

### آبهای اطراف ذرات رس

- ۱- آب جذب شده: که تحت تأثیر بارهای الکتریکی است و در درجه حرارتهای بالا جدا می شود.
- ۲- آب دو لایه: که تحت تأثیر بارهای الکتریکی است.
- ۳- آب آزاد: که تحت تأثیر بارهای الکتریکی نیست.

**نکته:** درصد رطوبت خاکهای رسی ناشی از آب جذب شده و آب دو لایه است.

### عوامل مؤثر بر حد روانی

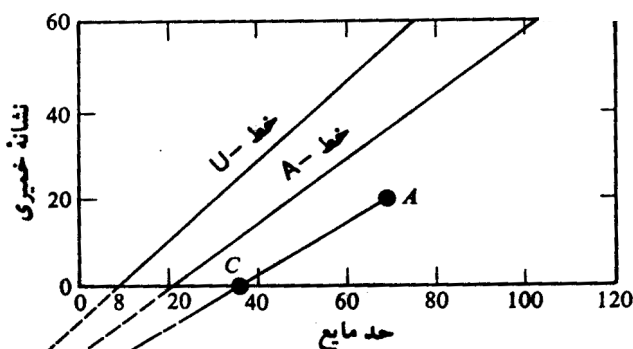
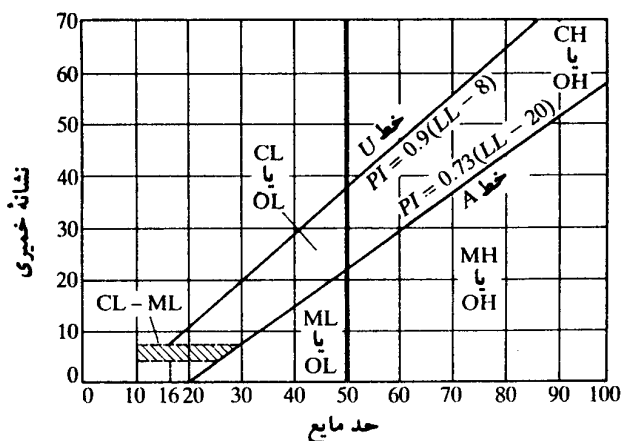
- ۱- درصد رس
- ۲- نوع کانی رس
- ۳- نوع کاتیون (مثلا  $Na$  بیشترین آب را جذب می کند)
- ۴- مواد آلی (باعث افزایش حد روانی می شود)
- ۵- سمنتاسیون (باعث کاهش حد روانی می شود)

$$\text{نشانه روانی } (I_L) : I_L = \frac{\omega_n - \omega_p}{\omega_L - \omega_p}$$

- ۱- اگر  $\omega_n < \omega_p$  موقعی است که خاک سفت است  $I_L < 0$
- ۲- اگر  $\omega_p < \omega_n < \omega_L$  این خاک نرم و سفت است  $0 < I_L < 1$
- ۳- اگر  $\omega_p < \omega_n$  باشد خاک خیلی نرم است  $I_L > 1$



نمودار خمیرایی (چارت خمیرایی):



B LL = -43.5  
PI = -46.5

با توجه به مشخصات داده شده برای یک خاک از روی  $LL$  و  $PL$  ان می‌توان  $PI$  مربوط به آن خاک را پیدا کرد. از طرفی با قرار دادن  $LL$  خاک در معادله  $PI = 0.73(LL - 20)$  می‌توان مشخصات  $PI$  خاک در معادله را نیز یافت

رس  $\rightarrow PI(\text{خاک}) > PI$  (نمودار)

لای  $\rightarrow PI(\text{خاک}) < PI$  (نمودار)

$PI$  هیچ خاکی نمی‌تواند بالای خط  $PI = 0.9(LL - 8)$  بیفتد

**مثال:** در یک آزمایش حد انقباض نتایج زیر به دست آمده است

$$m_v = 44/6 \text{ gr} \quad V_i = 16/2 \text{ cm}^3$$

$$m_f = 32/8 \text{ gr} \quad V_f = 10/8 \text{ cm}^3$$

حد انقباض آن را محاسبه کنید

$$SL = \left( \frac{m_v - m_f}{m_f} \right) \times 100 - \left[ \frac{(V_i - V_f)}{m_f} \rho_w \right] (100)$$

$$SL = \left( \frac{44/6 - 32/8}{32/8} \right) \times 100 - \left[ \frac{16/2 - 10/8}{32/8} \times 1 \right] \times 100 = 19/5$$

## فصل سوم

## « طبقه بندی خاکها »

سیستم طبقه بندی خاک عبارتست از مرتب کردن خاکهای مختلف با خواص مشابه به گروهها و زیرگروههایی برحسب کاربردشان. سیستمهای طبقه بندی یک زبان مشترک برای بیان مشخصات خاک بطور خلاصه بوجود می آورند.

## هدف از طبقه بندی خاکها

- ۱- یکی از اهداف اینست که بر اساس آزمایشهای مختلف خاکها را در گروههای مشخصی قرار دهیم و خاکهایی که در یک طبقه هستند خصوصیات تقریباً مشابهی دارند.
- ۲- با طبقه بندی خاکها ارتباط بین اصول مهندسی بهم نزدیکتر شده و استفاده از آنها آسانتر می شود.

## روشهای طبقه بندی خاکها

- ۱- روش یونیفاید (متحد) (کاربرد در ژئوتکنیک)
- ۲- روش آشتو (کاربرد بیشتر آن در راهسازی است)

## گروههای مختلف در یونیفاید:

شن  $G$ ماسه  $S$ رس  $C$ لای  $M$ خاکهای آلی  $O$ 

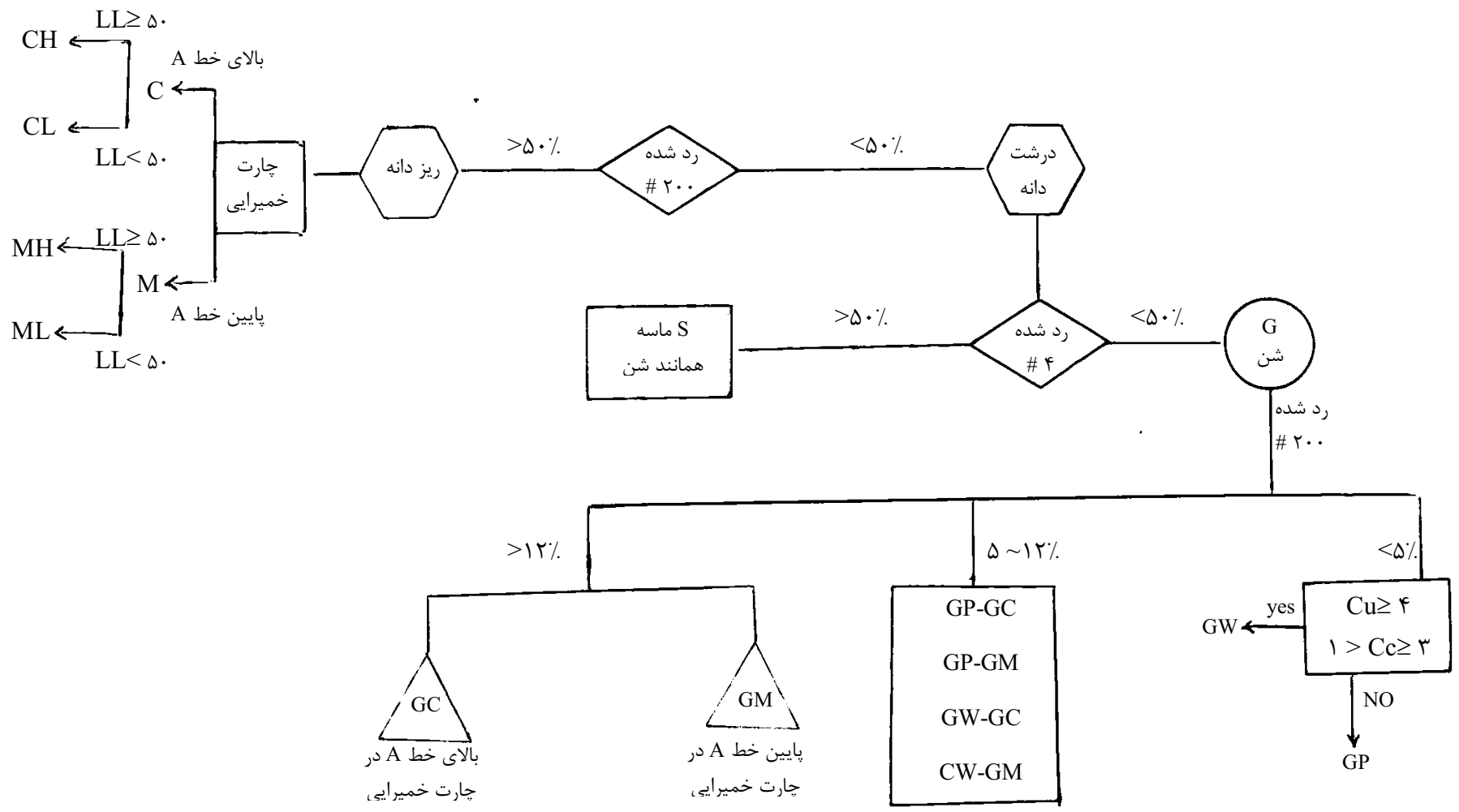
## برای ریزدانه ها :

رس با خمیرایی پایین  $CL$   $\begin{matrix} \xrightarrow{ll < 50} \\ \xrightarrow{ll \geq 50} \end{matrix}$

رس با خمیرایی بالا  $CH$

لای با خمیرایی کم  $ML$   $\begin{matrix} \xrightarrow{ll < 50} \\ \xrightarrow{ll \geq 50} \end{matrix}$

لای با خمیرایی بالا  $MH$



مثال ۱:

شماره الک	درصد رد شده	
≠ ۴	۴۳	$C_u = 20$
≠ ۲۰۰	۲	$C_c = 1/5$

حل:

درشت دانه است  $50\% < 2\%$  درصد رد شده از  $200 \neq$   
 پس شن است  $G$   $50\% < 43\%$  درصد رد شده از  $4 \neq$   
 $1 < C_c < 3$   
 $4 \leq C_u = 20$

پس GW

مثال:

$95\% =$  رد شده از  $200 \neq$   
 $LL = 70$   $PL = 25$

حل:

الف) ریز دانه است  $95\% < 50\%$  رد شده از  $200 \neq$   
 ب)  $PI = 70 - 25 = 45$  نقطه  
 ج)  $50 < LL = 70$   
 $H$

CH

مثال ۲:

شماره الک	درصد عبوری	
≠ ۴	۴۰	$LL = \omega_L = 35$
≠ ۱۰	۳۰	$PL = 22$
≠ ۴۰	۲۲	
≠ ۱۰۰	۲۰	
≠ ۲۰۰	۱۵	

حل:

درشت دانه  $50\% > 15\%$  عبوری از  $200 \neq$   
 $G$   $50\% > 40\%$   
 نقطه  $PI < PI$  معادله  $PI = LL - PL = 35 - 22 = 13$   
 معادله  $PI = 0.73(LL - 20) = 10/95$

GC

دانه بندی به روش آشتو:

جدول ۱-۳ طبقه بندی مصالح بستر راهها طبق طبقه بندی آشتو

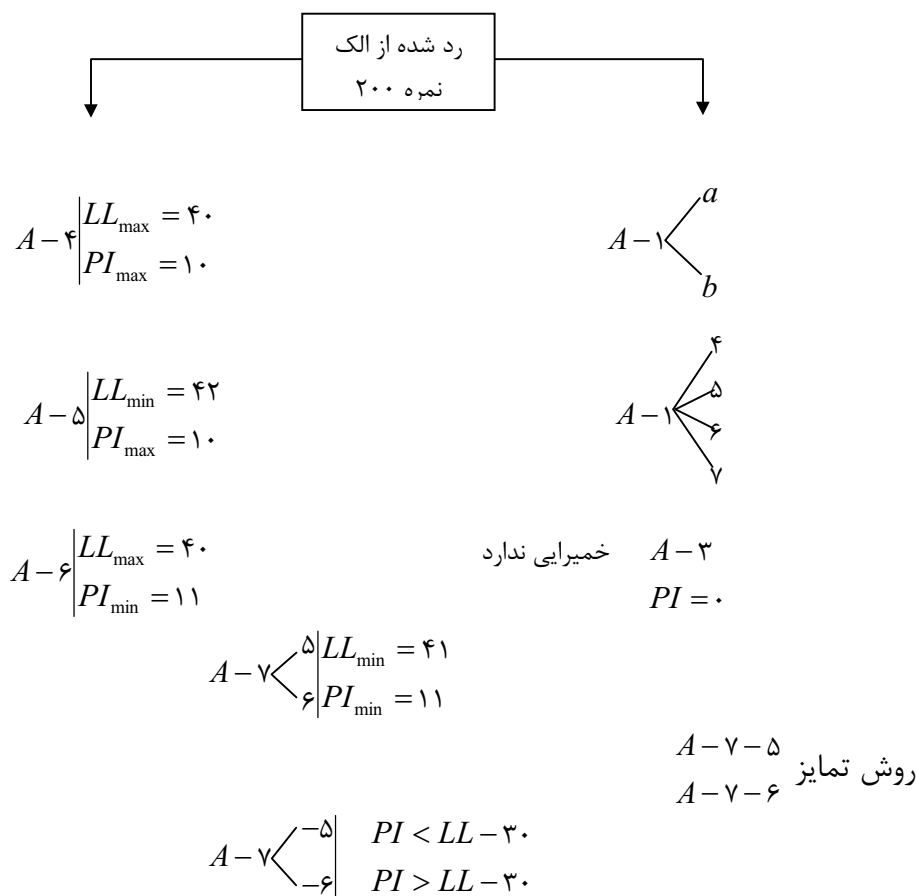
طبقه بندی عمومی	مصالح دانه ای (درصد عبوری از الک ۲۰۰ مساوی ۳۵ درصد و یا کمتر)						
	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
آزمایش دانه بندی (درصد عبوری) No. 10 (الک نمره ۱۰) No. 40 (الک نمره ۴۰) No. 200 (الک نمره ۲۰۰)	50 max.						
مشخصات قسمت عبوری از الک ۴۰ حد مایع نشانه خمیری	30 max.	50 max.	51 min.				
	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
نوع مصالح تشکیل دهنده	ماسه و شن با قلوه سنگ		ماسه ریز	ماسه و شن رس دار و یا لای دار			
مناسب بودن به عنوان مصالح بستر	عالی تا خوب						

طبقه بندی عمومی	مصالح رس - لای (درصد عبوری از الک ۲۰۰ بزرگتر از ۳۵ درصد)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6+
آزمایش دانه بندی (درصد عبوری) No. 10 (الک نمره ۱۰) No. 40 (الک نمره ۴۰) No. 200 (الک نمره ۲۰۰)				
	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
مشخصات قسمت عبوری از الک ۴۰ حد مایع نشانه خمیری	40 max.	42 min.	40 max.	41 min.
	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
نوع مصالح تشکیل دهنده	خاکهای لای دار		خاکهای رس دار	
مناسب بودن به عنوان مصالح بستر	متوسط تا بد			

\* For A-7-5 ,  $PI \leq LL-30$

+ For A-7-6 ,  $PI > LL-30$

الکهای مهم مورد استفاده  $\neq 10, \neq 40, \neq 200$



در جدول ۳-۱ طاحونی ص ۸۶ روش دانه‌بندی آشتو آمده است از سمت چپ اولین ستونی که معیار ما را ارضا کرد خاک جزء آن منطقه است.

### شاخص ایندکس $GI$ :

کمیتی است معرف خصوصیات بخش ریز دانه خاک

\* برای بیان خصوصیات خاک تنها اسم آن کافی نیست بلکه شاخص ایندکس آن نیز لازم است.

\* هرچه قدر  $GI$  بیشتر باشد خاک ریزدانه‌های بیشتری دارد.

$$GI = (F - 35) \left[ \frac{0.2 + 0.005(LL - 40)}{0.005(LL - 40)} \right] + \frac{0.01(F - 15)(PI - 10)}{0.005(LL - 40)}$$

$F$  درصد عبوری از الک نمبر ۲۰۰

نکته ۱: برای خاکهای درشت دانه زیر  $GI = 0$  است و نباید محاسبه گردد:

$$A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-3$$

نکته ۲: برای خاکهای  $A-2-6, A-2-7$  مقدار  $GI$  مقدار  $GI$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$GI = \frac{0.01(F - 15)(PI - 10)}{0.005(LL - 40)}$$

نکته ۳: برای خاکهایی که جزء گروه‌های فوق نیستند و  $GI < 0$  باشد مقدار  $GI = 0$  را در نظر می‌گیریم.

نکته ۴: قانون گرد کردن اعداد بصورت زیر است:

$GI$

$$8/5 \rightarrow 9$$

$$8/6 \rightarrow 9$$

$$8/45 \rightarrow 8$$

نکته ۵: هرچقدر  $GI$  بیشتر باشد خاک بدتر است. یعنی اگر دو خاک داشته باشیم که در یک گروه باشند باید گروه ایندکس آنها را تعیین کنیم هرکدام  $GI$  آن کمتر است کیفیت بهتری دارد.

	$\neq 10$	100	$LL = 30$	مثال ۳:
	$\neq 40$	80	$PI = 10$	
	$\neq 200$	58		

حل:

$$A-4-(3)$$

$$GI = (58 - 35) \left[ \frac{0}{2} + \frac{0}{100} \cdot 5(30 - 40) \right] + \frac{0}{101} (58 - 15)(10 - 10)$$

مثال ۴: در صورتیکه

$$\begin{aligned} &\neq 200 && 95\% \\ &LL = 60 && PI = 40 \end{aligned}$$

حل:

$$GI = (95 - 35) \times \left[ \frac{0}{2} + \frac{0}{100} \cdot 5(60 - 40) \right] + \frac{0}{101} (95 - 15)(40 - 10) = 42$$

$$A-7-6(42)$$

$$PI = 40 > LL - 30 = 30 \quad \text{پس } A-7-6$$

مثال ۵: در صورتیکه

شماره الک	درصد عبوری	
$\neq 10$	83	$LL = 20$
$\neq 40$	48	$PI = 5$
$\neq 200$	20	

$A-2-4(0)$

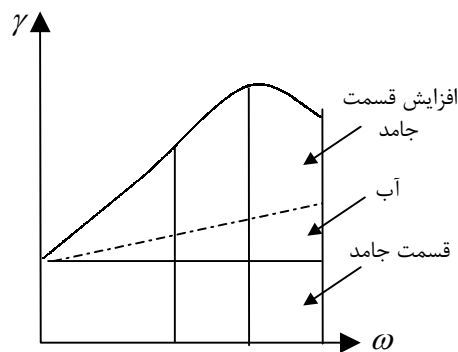
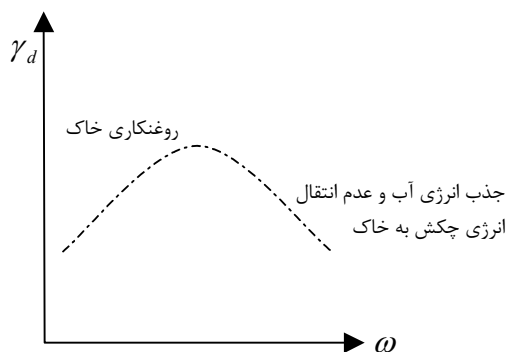
$$GI = (20 - 35) \left[ \frac{0}{2} + \frac{0}{100} \cdot 5(20 - 40) \right] + \frac{0}{101} \times (20 - 15)(5 - 10) = -1/75$$

نکته: در جدول آشتو هرچه از طرف چپ جدول بطرف راست جدول می‌رویم کیفیت خاک برای کارهای راهسازی کمتر می‌شود.

## فصل چهارم

### « تراکم خاک »

در احداث خاکریز شاهراهها، سدهای خاکی و سازه‌های مهندسی متعدد دیگر، خاک شل باید متراکم شود تا وزن مخصوص آن افزایش یابد. تراکم باعث افزایش و بهبود مشخصه‌های مقاومتی خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری شالوده‌های احداث شده بر روی آنها می‌شود. تراکم همچنین باعث کاهش نشستهای ناخواسته سازه و افزایش پایداری شیروانی خاکریزها می‌گردد. عمل تراکم معمولاً برای خاکهای ریزدانه و درشت دانه انجام می‌شود که هدف از انجام آن خروج هوا از خاک است که مقاومت خاک بیشتر و نشست پذیری آن کمتر می‌شود که در طی این عمل  $e$  (نسبت تخلخل) کمتر می‌شود و در صورتیکه آب به خاک نزنیم  $w$  ثابت می‌ماند ولی درصد اشباع آن زیاد می‌شود.



### روشهای تراکم خاک در آزمایشگاه:

۱- آزمایش تراکم پراکتور معمولی

۲- آزمایش تراکم پراکتور اصلاح شده

فرق آزمایش پراکتور با پراکتور اصلاح شده:

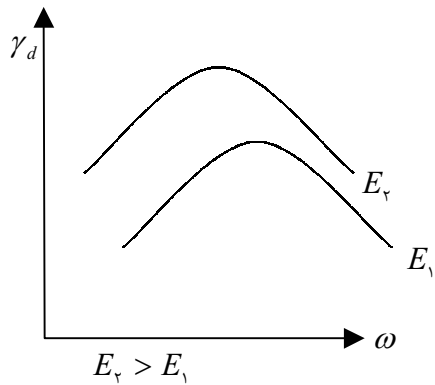
پراکتور	اصلاح شده
۳	۵
۱'	۱/۵'
۵ <sub>lb</sub>	۱۰ <sub>lb</sub>
انرژی	۵ برابر
$12000 \frac{lb-ft}{ft^3}$	$56000 \frac{lb-ft}{ft^3}$
$\frac{1}{3}$ حجم قالب	

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

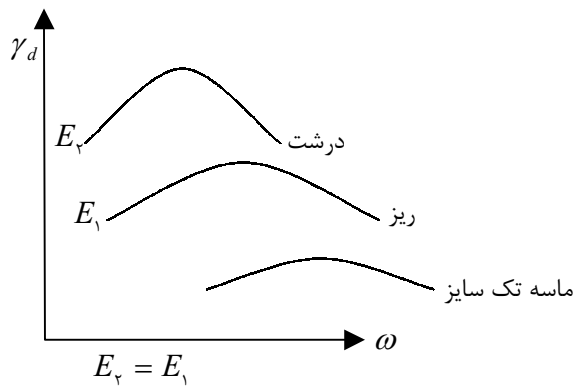


تفسیر نمودارهای تراکم:

(۱) در یک خاک هرچه انرژی تراکم بیشتر باشد با رطوبتی کمتر می‌توان به وزن مخصوص بیشتر رسید.

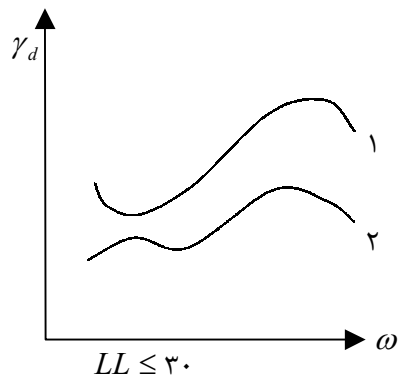


(۲) عمدتاً خاکهای درشت دانه بهتر از خاکهای ریزدانه متراکم می‌گردند

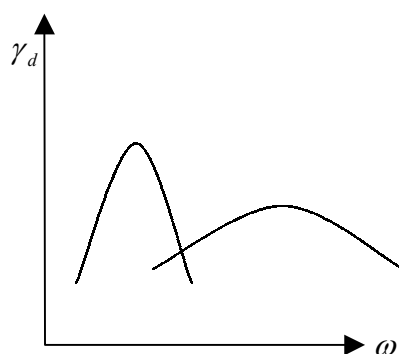
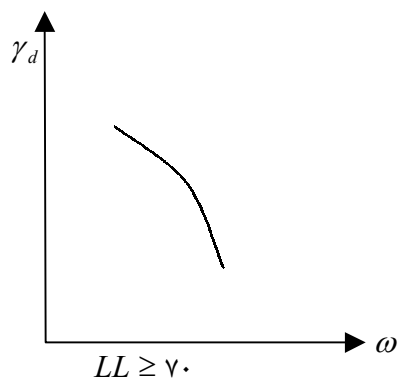


(۳) ماسه بد دانه‌بندی شده  $SP$ :

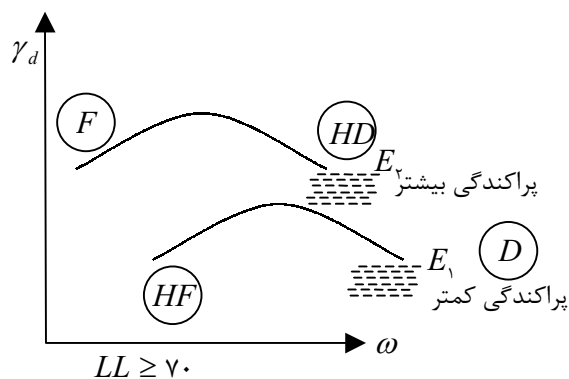
پدیده موئینگی سبب نزول در قسمت اول سخنی می‌گردد. نمودار این ماسه برخی اوقات همانند ۱ و بعضی مواقع مانند ۲ است.



۴) منحنی مونت مورنایت که علت آن جذب آب بالای آن می‌باشد.



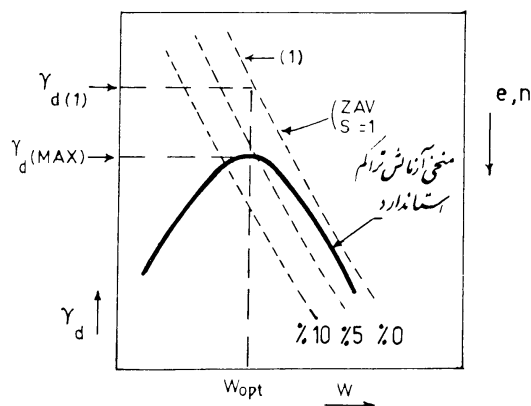
۵) در انرژی‌های کم خاک خشک پراکندگی بیشتری ( $HF$ ) نسبت به خاک خشک با انرژی زیاد دارد یا عبارتی «پدیده لخته‌ای زیاد در قسمتهایی که انرژی کمتر است بیشتر اتفاق می‌افتد». ولی «در پدیده پراکندگی زیاد در قسمتهایی که انرژی زیادتر است بیشتر اتفاق می‌افتد».



### عوامل مؤثر بر تراکم در صحرا

- ۱- تعداد گذرهای غلتک (تعداد دفعات عبور) ۱۵ الی ۱۰ بار
- ۲- ضخامت لایه: (با افزایش ضخامت تراکم کمتر می‌شود) در خاک‌های ریزدانه بهتر است ضخامت را حدود ۲۵ الی ۲۰ سانتیمتر بگیریم.
- ۳- فرکانس ویبراتور: هرچه فرکانس بالاتر وزن مخصوص بیشتر.
- ۴- سرعت کشیدن غلتک: هرچه سرعت زیادتر باشد وزن مخصوص کمتر می‌شود.

منحنی هوای صفر:



$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

$$W_s = V_s \cdot \gamma_s = V_s \cdot G_s \cdot \gamma_w$$

$$V = V_s + V_v = V_s + eV_s$$

$$\gamma_d = \frac{V_s \cdot G_s \cdot \gamma_w}{V_s + eV_s} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad e = \frac{\omega \cdot G_s}{S}$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{\omega G_s}{S}}$$

در حالت 100% S

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

کاربرد غلتکهای مختلف برای انواع خاک :

- ۱- برای خاکهای رسی و لای از غلتک پاچه بزی و پاچه فیلی استفاده می کنند
- ۲- برای خاکهای شنی و ماسه‌ای از غلتک صاف فولادی همراه وایبره استفاده می کنند
- ۳- برای خاکهای مختلف از غلتک چرخ لاستیکی استفاده می کنند

**مثال:** اطلاعات زیر از یک آزمایش استاندارد تراکم بدست آمده است منحنی تراکم را ترسیم

نموده، حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت اپتیمم را بدست آورید.

۱/۹۴	۱/۹۸۵	۱/۹۹	۱/۹۷	۱/۸۹۵	جرم خاک مرطوب خارج شده از قالب پس از تراکم (kg)
۱۹/۲	۱۶/۸	۱۵/۶	۱۴/۵	۱۲/۸	رطوبت خاک (درصد)

حجم قالب ۹۴۴ سانتیمتر مکعب و  $G_s=۲/۶۷$  می باشد.

حل:

وزن مخصوص خاک مرطوب  $\gamma$  و وزن مخصوص خاک خشک  $\gamma_d$  برای هر مورد، بترتیب از روابط زیر محاسبه و در جدول زیر یادداشت گردیده است.

$$\gamma = \frac{w}{v} \quad \gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$$

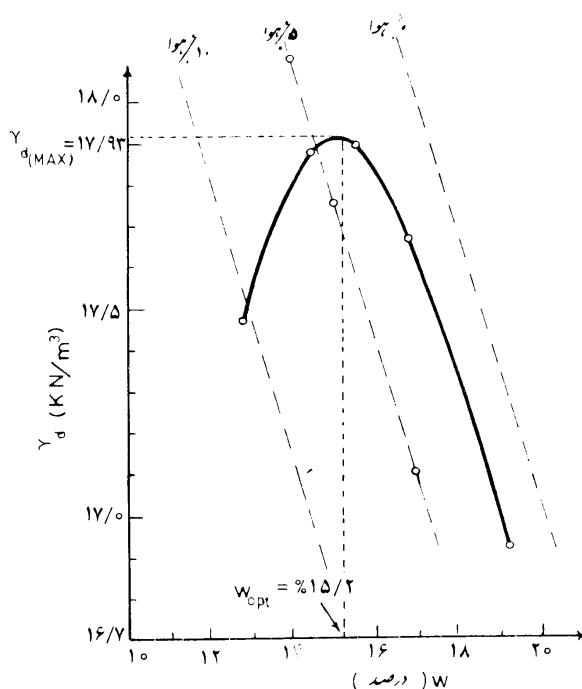
بعنوان مثال برای اولین نمونه

$$\gamma = \frac{۱/۱۹۵}{۹۴۴ \times ۱۰^{-۶}} \times \frac{۹/۸۱}{۱۰۰} = ۱۹/۶۹ \frac{KN}{m^3}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \times \frac{۱۹/۶۹}{1+۰/۱۲۸} = ۱۷/۴۶ \frac{KN}{m^3}$$

۲۰/۱۶	۲۰/۶۳	۲۰/۶۸	۲۰/۴۷	۱۹/۶۹	$\gamma \left( \frac{KN}{m^3} \right)$
۱۶/۹۱	۱۷/۶۶	۱۷/۸۹	۱۷/۸۸	۱۷/۴۶	$\gamma_d \left( \frac{KN}{m^3} \right)$
۱۹/۲	۱۶/۸	۱۵/۶	۱۴/۵	۱۲/۸	$\omega(\%)$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \omega G_s} = \frac{۲/۶۷ \times ۹/۸۱}{1 + ۲/۶۷ \omega} = \frac{۲۶/۲}{1 + ۲/۶۷ \omega}$$



**تعیین وزن مخصوص صحرائی:**

در طی تراکم خاک در محل، لازم است گاهی اوقات وزن مخصوص خاک کنترل شود و با مقدار تعیین شده توسط مشاور مقایسه گردد که برای اینکار سه روش وجود دارد.

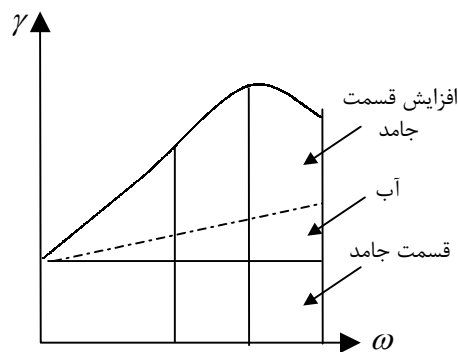
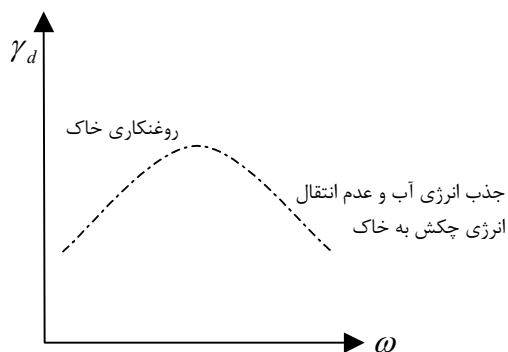
- ۱- روش مخروط ماسه (سندباتل)
- ۲- بادکنک پلاستیکی
- ۳- دانسیته سنج هسته‌ای

- ۱- روش مخروط ماسه
- الف) کالیبره کردن وزن مخصوص ماسه
- ب) کالیبره کردن مخروط
- ج) محاسبه حجم چاله
- د) تعیین درصد رطوبت خاک در محل
- ه) وزن مخصوص خشک خاک مورد استفاده

## فصل چهارم

### « تراکم خاک »

در احداث خاکریز شاهراهها، سدهای خاکی و سازه‌های مهندسی متعدد دیگر، خاک شل باید متراکم شود تا وزن مخصوص آن افزایش یابد. تراکم باعث افزایش و بهبود مشخصه‌های مقاومتی خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری شالوده‌های احداث شده بر روی آنها می‌شود. تراکم همچنین باعث کاهش نشستهای ناخواسته سازه و افزایش پایداری شیروانی خاکریزها می‌گردد. عمل تراکم معمولاً برای خاکهای ریزدانه و درشت دانه انجام می‌شود که هدف از انجام آن خروج هوا از خاک است که مقاومت خاک بیشتر و نشست پذیری آن کمتر می‌شود که در طی این عمل  $e$  (نسبت تخلخل) کمتر می‌شود و در صورتیکه آب به خاک نزنیم  $w$  ثابت می‌ماند ولی درصد اشباع آن زیاد می‌شود.



### روشهای تراکم خاک در آزمایشگاه:

۱- آزمایش تراکم پراکتور معمولی

۲- آزمایش تراکم پراکتور اصلاح شده

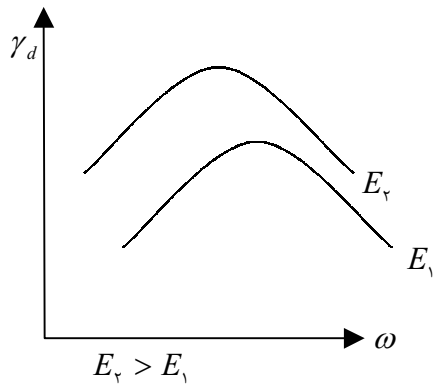
فرق آزمایش پراکتور با پراکتور اصلاح شده:

پراکتور	اصلاح شده
۳	۵
۱'	۱/۵'
۵ <sub>lb</sub>	۱۰ <sub>lb</sub>
انرژی	۵ برابر
$12000 \frac{lb-ft}{ft^3}$	$56000 \frac{lb-ft}{ft^3}$
$\frac{1}{3}$ حجم قالب	

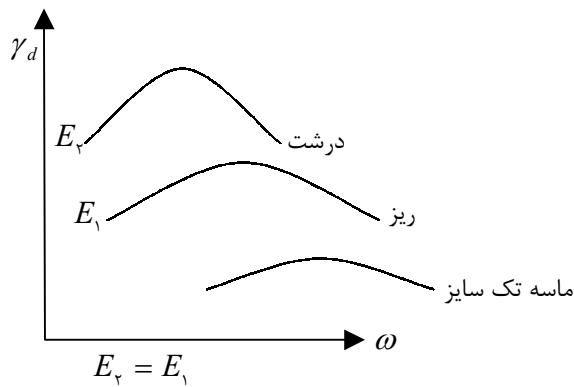
$$E = \frac{\text{ارتفاع سقوط} \times \text{وزن چکش} \times \text{تعداد لایه} \times \text{تعداد ضربات برای هر لایه}}{\text{حجم قالب}}$$

تفسیر نمودارهای تراکم:

(۱) در یک خاک هرچه انرژی تراکم بیشتر باشد با رطوبتی کمتر می‌توان به وزن مخصوص بیشتر رسید.

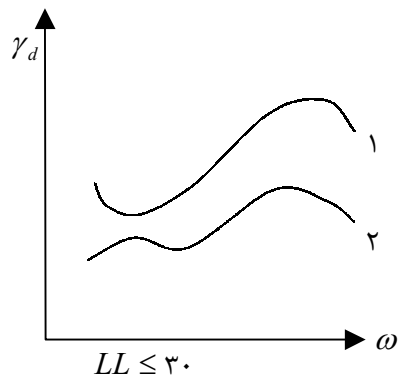


(۲) عمدتاً خاکهای درشت دانه بهتر از خاکهای ریزدانه متراکم می‌گردند

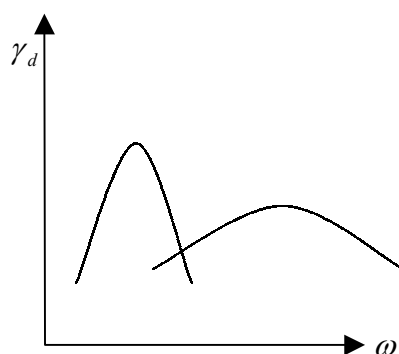
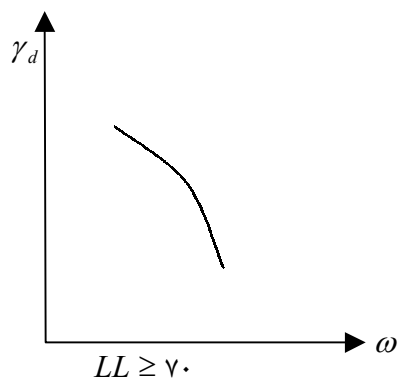


(۳) ماسه بد دانه‌بندی شده  $SP$ :

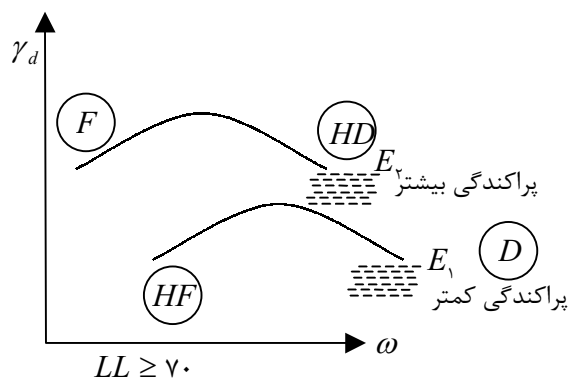
پدیده موئینگی سبب نزول در قسمت اول سخنی می‌گردد. نمودار این ماسه برخی اوقات همانند ۱ و بعضی مواقع مانند ۲ است.



۴) منحنی مونت مورنایت که علت آن جذب آب بالای آن می‌باشد.



۵) در انرژی‌های کم خاک خشک پراکندگی بیشتری (HF) نسبت به خاک خشک با انرژی زیاد دارد یا عبارتی «پدیده لخته‌ای زیاد در قسمتهایی که انرژی کمتر است بیشتر اتفاق می‌افتد». ولی «در پدیده پراکندگی زیاد در قسمتهایی که انرژی زیادتر است بیشتر اتفاق می‌افتد».

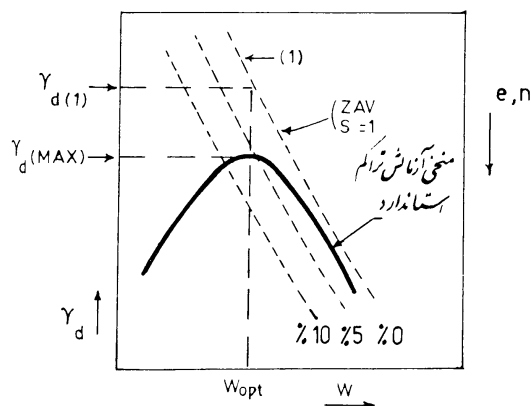


### عوامل مؤثر بر تراکم در صحرا

- ۱- تعداد گذرهای غلتک (تعداد دفعات عبور) ۱۵ الی ۱۰ بار
- ۲- ضخامت لایه: (با افزایش ضخامت تراکم کمتر می‌شود) در خاکهای ریزدانه بهتر است ضخامت را حدود ۲۵ الی ۲۰ سانتیمتر بگیریم.
- ۳- فرکانس ویبراتور: هرچه فرکانس بالاتر وزن مخصوص بیشتر.
- ۴- سرعت کشیدن غلتک: هرچه سرعت زیادتر باشد وزن مخصوص کمتر می‌شود.



منحنی هوای صفر:



$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

$$W_s = V_s \cdot \gamma_s = V_s \cdot G_s \cdot \gamma_w$$

$$V = V_s + V_v = V_s + eV_s$$

$$\gamma_d = \frac{V_s \cdot G_s \cdot \gamma_w}{V_s + eV_s} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad e = \frac{\omega \cdot G_s}{S}$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{\omega G_s}{S}}$$

در حالت  $S = 100\%$

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

کاربرد غلتکهای مختلف برای انواع خاک :

- ۱- برای خاکهای رسی و لای از غلتک پاچه بزی و پاچه فیلی استفاده می کنند
- ۲- برای خاکهای شنی و ماسه‌ای از غلتک صاف فولادی همراه وایبره استفاده می کنند
- ۳- برای خاکهای مختلف از غلتک چرخ لاستیکی استفاده می کنند

**مثال:** اطلاعات زیر از یک آزمایش استاندارد تراکم بدست آمده است منحنی تراکم را ترسیم

نموده، حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت اپتیمم را بدست آورید.

۱/۹۴	۱/۹۸۵	۱/۹۹	۱/۹۷	۱/۸۹۵	جرم خاک مرطوب خارج شده از قالب پس از تراکم (kg)
۱۹/۲	۱۶/۸	۱۵/۶	۱۴/۵	۱۲/۸	رطوبت خاک (درصد)

حجم قالب ۹۴۴ سانتیمتر مکعب و  $G_s=۲/۶۷$  می باشد.

حل:

وزن مخصوص خاک مرطوب  $\gamma$  و وزن مخصوص خاک خشک  $\gamma_d$  برای هر مورد، بترتیب از روابط زیر محاسبه و در جدول زیر یادداشت گردیده است.

$$\gamma = \frac{w}{v} \quad \gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$$

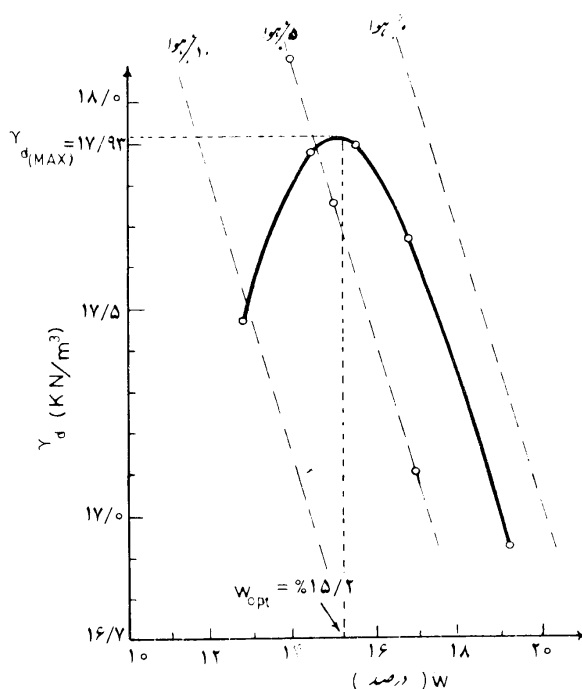
بعنوان مثال برای اولین نمونه

$$\gamma = \frac{۱/۱۹۵}{۹۴۴ \times ۱۰^{-۶}} \times \frac{۹/۸۱}{۱۰۰} = ۱۹/۶۹ \frac{KN}{m^3}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \times \frac{۱۹/۶۹}{1+۰/۱۲۸} = ۱۷/۴۶ \frac{KN}{m^3}$$

۲۰/۱۶	۲۰/۶۳	۲۰/۶۸	۲۰/۴۷	۱۹/۶۹	$\gamma \left( \frac{KN}{m^3} \right)$
۱۶/۹۱	۱۷/۶۶	۱۷/۸۹	۱۷/۸۸	۱۷/۴۶	$\gamma_d \left( \frac{KN}{m^3} \right)$
۱۹/۲	۱۶/۸	۱۵/۶	۱۴/۵	۱۲/۸	$\omega(\%)$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \omega G_s} = \frac{۲/۶۷ \times ۹/۸۱}{1 + ۲/۶۷ \omega} = \frac{۲۶/۲}{1 + ۲/۶۷ \omega}$$



**تعیین وزن مخصوص صحرائی:**

در طی تراکم خاک در محل، لازم است گاهی اوقات وزن مخصوص خاک کنترل شود و با مقدار تعیین شده توسط مشاور مقایسه گردد که برای اینکار سه روش وجود دارد.

- ۱- روش مخروط ماسه (سندباتل)
- ۲- بادکنک پلاستیکی
- ۳- دانسیته سنج هسته‌ای

۱- روش مخروط ماسه

الف) کالیبره کردن وزن مخصوص ماسه

ب) کالیبره کردن مخروط

ج) محاسبه حجم چاله

د) تعیین درصد رطوبت خاک در محل

ه) وزن مخصوص خشک خاک مورد استفاده

فصل ششم

مفهوم تنش مؤثر (تنش بین ذره‌ای)

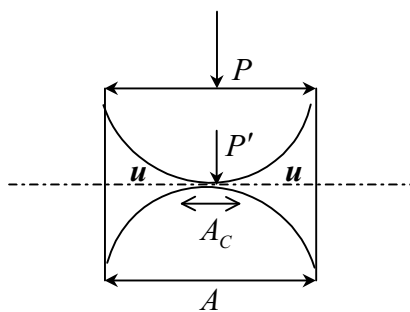
فشار آب حفره‌ای + فشار مؤثر = فشار کل

$$\sigma = \bar{\sigma} + u$$

$\bar{\sigma}$ : تنش مؤثر (Effective stress)

$\sigma$ : تنش کل (Total stress)

$u$ : فشار آب حفره‌ای (Pore water pressure)



تبادل در راستای  $y$

$$P = P' + u(A - A_c)$$

طرفین را بر  $A$  تقسیم می‌کنیم

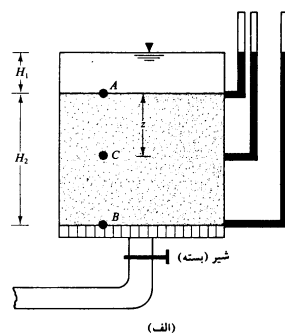
$$\frac{P}{A} = \frac{P'}{A} - \frac{A - A_c}{A} u$$

سطح تماس در واحد سطح کل  $\frac{A_c}{A} = \alpha$

$$\sigma = \bar{\sigma} + \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) u$$

$$\sigma = \bar{\sigma} + (1 - \alpha)u = \bar{\sigma} + u - \alpha u$$

(I) تنش در خاک اشباع غیرنشتی



در نقطه A

$$\sigma_A = H_1 \gamma_w$$

$$\rightarrow \bar{\sigma}_A = \sigma_A - u_A = H_1 \gamma_w - H_1 \gamma_w = 0$$

$$u_A = H_1 \gamma_w$$

در نقطه B

$$\sigma_B = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_{sat}$$

$$\rightarrow \bar{\sigma}_B = \sigma_B - u_B = H_1 \gamma_w + H_2 \gamma_{sat} - H_1 \gamma_w - H_2 \gamma_w$$

$$u_B = (H_1 + H_2) \gamma_w$$

$$= (\gamma_{sat} - \gamma_w) H_2 = \gamma' H_2$$

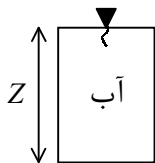
حالات مختلف تنش موثر در خاک

الف) در حالت سکون

۱- تنش موثر آب صفر است

$$\sigma = \gamma_w Z \rightarrow \bar{\sigma} = 0$$

$$u = \gamma_w Z$$

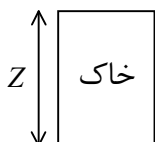


۲- تنش موثر در خاک اشباع (خاک بالای سطح آب)

$$\sigma = \gamma \cdot Z \quad \bar{\sigma} = \sigma - u = \gamma Z$$

$$u = 0$$

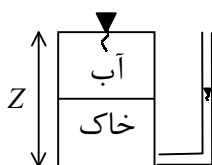
(زیرا این خاک فقط اشباع است)



۳- خاک زیر آب زیر زمینی (چاه)

$$\sigma = \gamma_{sat} \cdot Z$$

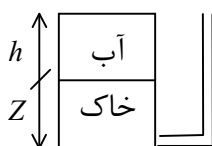
$$u = \gamma_w Z \quad \bar{\sigma} = \gamma' Z$$



۴- خاک زیر بستر دریا (جریان سکون)

$$\sigma = \gamma_{sat} \cdot Z + \gamma_w h$$

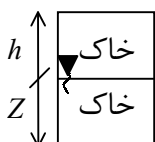
$$u = \gamma_w Z + \gamma_w h \quad \bar{\sigma} = \gamma' Z$$



۵- لایه پایینی اشباع ولایه بالایی اشباع نشده

$$\sigma = \gamma h + \gamma_{sat} \cdot Z$$

$$u = \gamma_w Z \quad \bar{\sigma} = \gamma h + \gamma' Z$$



ب) حالت جریان آب در خاک

I) جریان از پایین به بالا

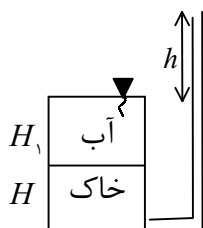
$$u_b = (H_1 + H + h) \gamma_w$$

$$\sigma_b = H \gamma_{sat} + H_1 \gamma_w$$

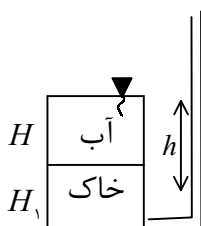
$$\bar{\sigma}_b = \sigma_b - u_b = H \gamma_{sat} + H_1 \gamma_w - H_1 \gamma_w - H \gamma_w - h \gamma_w$$

$$\bar{\sigma}_b = H \gamma' + h \gamma_w = H \left( \gamma' - \frac{h}{H} \gamma_w \right) = H (\gamma' - i \gamma_w)$$

$$\boxed{\bar{\sigma}_b = H (\gamma' - i \gamma_w)}$$



(II) جریان آب از بالا به پایین



$$u_b = (H + H_1 - h)\gamma_w$$

$$\sigma_b = H\gamma_{sat} + H_1\gamma_w$$

$$\bar{\sigma}_b = \sigma_b - u_b = H\gamma' + h\gamma_w = H\left(\gamma' + \frac{h}{H}\gamma_w\right) = H(\gamma' + i\gamma_w)$$

$$\boxed{\bar{\sigma}_b = H(\gamma' + i\gamma_w)}$$

برآورد  $u$  (فشار آب) در خاک:

(الف) آب در شرایط هیدرواستاتیک

$$U_A = Z\gamma_w$$

(ب) آب در حال تراوش

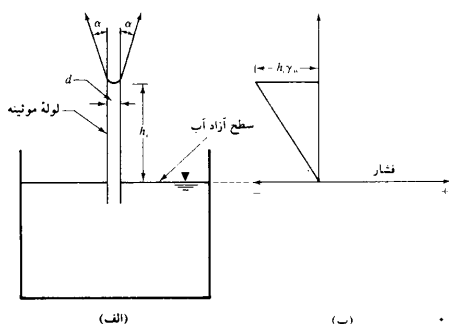
$$u = [(h - Z)\gamma_w]$$

(ج) آب در شرایط مویبندی

$$u = -\gamma_w h_c S$$

$S$  درصد اشباع

$h_c$  ارتفاع مویبندگی



(الف)

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum T \cos \alpha = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum T \sin \alpha = \gamma_w \frac{\pi D^2}{4} h_c$$

(ب)  $f_c$  نیروی کشش سطحی در واحد طول پیرامون ظرف

$$h_c = \frac{4 \sum T \sin \alpha}{\pi D^2 \gamma_w}$$

$$F_c \pi D = \sum T$$

هر چقدر  $h_c$  بیشتر باشد مکش بیشتر است

$$h_c = \frac{4(F_c \pi) \sin \alpha \cdot D}{\pi D^2 \gamma_w}$$

$$\boxed{h_c = \frac{4F_c \cdot \sin \alpha}{D \gamma_w}}$$

فشار ناشی از مویبندی منفی است یعنی اینکه در ناحیه‌ای که ما صعود مویبندی داریم چون  $\bar{\sigma}$  زیادتر می‌شود (زیرا  $u$  منفی است) پس در نتیجه خاک بیشتر متراکم می‌گردد در نتیجه نشست بیشتری داریم ولی در ناحیه‌ای که سطح آب خودش بالا آمده تنش موثر کم می‌شود پس تراکم کمتر و تورم بیشتر ایجاد می‌گردد

### گرادیان هیدرولیکی بحرانی

اگر دبی نشت، تنش موثر هر نقطه که در عمق Z از سطح خاک قرار دارد به اندازه  $iZ\gamma_w$  کاهش می‌یابد اگر دبی نشت و به تبع از آن شیب هیدرولیکی به طور تدریجی افزایش می‌یابد، یک وضعیت حدی پیش می‌آید که در آن تنش موثر صفر می‌شود.

$$\bar{\sigma} = Z(\gamma' - i\gamma_w) = 0 \quad i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

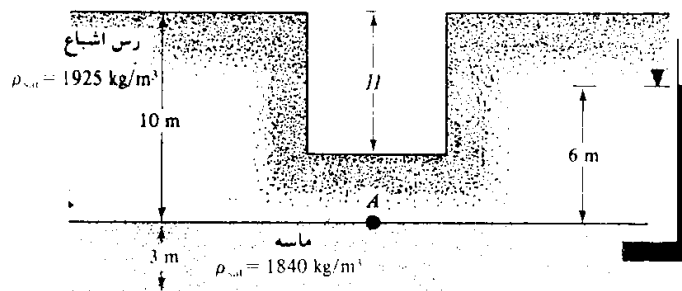
$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s\gamma_w + e\gamma_w}{1+e} - \gamma_w = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{1+e}$$

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1+e}$$

**مثال ۱:** یک لایه رس اشباع به ضخامت ۱۰m بر روی یک لایه ماسه‌ای به ضخامت ۳m قرار گرفته است لایه ماسه تحت فشار آرتزین قرار دارد مطلوبست محاسبه حداکثر عمق H که می‌توان در لایه رس حفر کرد.

$$\rho_{sat} = 1925 \frac{kg}{m^3}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{1925 \times 9.81}{1000} = 18.88$$



**حل:**

بعلت گود برداری، کاهش در فشار سر بار بوجود می‌آید. عمق بحرانی که در آن کف گود بالا می‌زند مساوی h فرض می‌شود اگر تعادل نقطه A در نظر گرفته شود:

$$\sigma_A = (10 - H)\gamma_{sat_c}$$

$$u_A = 6\gamma_w$$

برای شروع بالا آمدن،  $\bar{\sigma}_A$  (تنش موثر در A) باید مساوی صفر شود

$$\sigma_A - u_A = 0 \quad \rightarrow \quad (10 - H)\gamma_{sat_c} - 6\gamma_w = 0$$

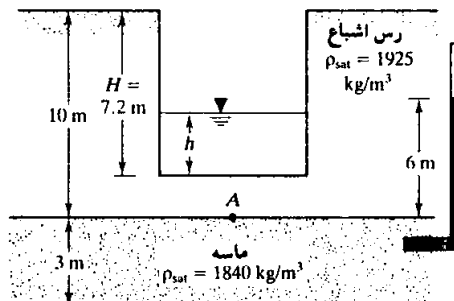
$$(10 - H)18.88 - 6 \times 9.81 = 0 \quad \boxed{H = 6.88m}$$

مثال ۲: با توجه به شکل زیر اگر  $H=7/2$  باشد. ارتفاع  $h$  آب درون گودبرداری چقدر باشد تا پایداری رس اشباع به مخاطره نیفتد

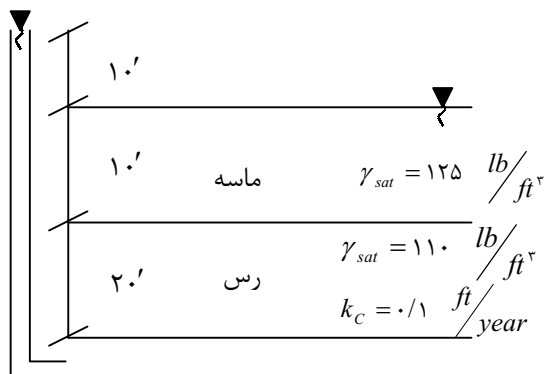
$$\sigma_A = (1.0 - 0.5) \gamma_{satC} + h \gamma_w = 0.5 \times 18 / 1.1 + h \times 9 / 1.1$$

$$u_A = 6 \gamma_w = 5.4$$

$$\sigma_A - u_A = 0$$



مثال ۳: در شکل زیر الف)  $q$  ب)  $\sigma, \bar{\sigma}, u$  را در بالا و پایین لایه رس حساب کنید.



حل: چون ماسه بسیار نفوذ پذیرتر از رس است پس بنابراین تمام افت در رس اتفاق می افتد

$$\left( \frac{u}{\gamma_w} \right)_b = 2.0 + 1.0 + 1.0 = 4.0 \quad Z_b = -3.0$$

$$\left( \frac{u}{\gamma_w} \right)_t = 1.0 \quad Z_t = -1.0$$

$$h_b = \left( \frac{u}{\gamma_w} \right)_b + Z_b = 4.0 - 3.0 = 1.0$$

$$h_t = \left( \frac{u}{\gamma_w} \right)_t + Z_t = 1.0 - 1.0 = 0$$

$$i_c = \frac{h_b}{L_c} = \frac{1.0}{2.0} = 0.5$$

$$i_s = \frac{h_t}{L_s} = \frac{0}{1.0} = 0$$

$$q = kiA = 0.1 \left( \frac{1.0}{2.0} \right) \times 1 = 0.05 \text{ ft}^2 / \text{year}$$



$$\sigma_b = 10 \times 125 + 110 \times 20 = 3450 \text{ lb/ft}^2$$

$$\sigma_b = 125 \times 10 = 1250 \text{ lb/ft}^2$$

$$u_b = 40 \times 62 / 4 = 2496 \text{ lb/ft}^2$$

$$u_t = 10 \times 62 / 4 = 624 \text{ lb/ft}^2$$

$$\bar{\sigma}_b = \sigma_b - u_b = 3450 - 2496 = 954$$

$$\bar{\sigma}_t = 1250 - 624 = 626$$

روش دوم

$$\bar{\sigma} = Z(\gamma' - i\gamma_w)$$

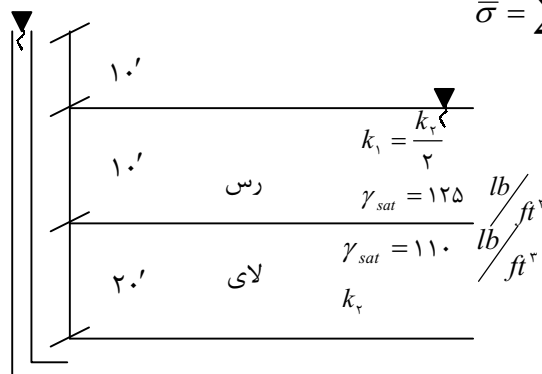
$$\bar{\sigma} = 10(125 - 62/4) + 20(110 - 62/4) - 0.5 \times 62/4 = 954$$

### فرمول بارکل در هر نقطه از لایه

فاصله آن نقطه نسبت به ابتدای لایه  $\times i$  - بارکل سیستم در ابتدای  $h =$  هر نقطه  
شیب هیدرولیکی  
ورود به لایه  
لایه

مثال ۴:  $\bar{\sigma}$  و  $\sigma$  و  $u$  را در بالا و پایین لای بدست آورید. همچنین پارامتر را در وسط لای تعیین کنید.

$$\bar{\sigma} = \sum (\gamma' - i\gamma_w)Z$$



حل:

$$\bar{\sigma}_b = [(125 - 62/4) - i_c \times 62/4] \times 10 + [(110 - 62/4) - i_m \times 62/4] \times 10 = 478$$

$$h_t = h_c + h_m$$

$$10 = h_c + h_m$$

$$q_1 = q_2 \quad k_c \frac{h_c}{l_c} = k_m \frac{h_m}{l_m} \quad \frac{k_m}{2} \times \frac{h_c}{10} = k_m \frac{h_m}{10}$$

$$h_c = 2h_m$$

$$10 = 2h_m + h_m \quad h_m = \frac{10}{3} = 3.33 \quad h_c = \frac{20}{3} = 6.67$$

$$i_c = \frac{h_c}{10} = \frac{20/3}{10} = \frac{2}{3} = 0.67$$

$$i_m = \frac{h_m}{10} = \frac{10/3}{10} = \frac{1}{3} = 0.33$$

$$u_t = (h - Z)\gamma_w = (6.67 - (-1.0))62/4 = 10.42$$

$$u_b = (h - Z)\gamma_w = (10 - (-3.0))62/4 = 1872$$

$$\sigma_b = \bar{\sigma}_b + u_b = 478 + 1872 = 2350$$

$$\bar{\sigma}_t = (\gamma' - i_c\gamma_w)Z = [(125 - 62/4) - 0.67 \times 62/4] \times 10 = 207/92$$

$$\sigma_t = 125 \times 10 = 1250$$

$$u_t = \sigma_t - \bar{\sigma}_t = 1250 - 207/92 = 10.42/0.8$$

در نقطه وسط لای

$$h_t = 10 - 0.33 \times 5 = 8.35$$

$$\sigma_m = 125 \times 10 + 5 \times 110 = 1800$$

$$u_m = (h - Z)\gamma_w = (8.35 - (-1.5))62/4 = 1457$$

$$\bar{\sigma}_m = \sigma_m - u_m = 1800 - 1457 = 343$$

ضریب اطمینان در مقابل جوشش در ماسه‌ها:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

$$i_{ext} = \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

$$SF = \frac{i_{cr}}{i_{ex}} = \frac{\gamma'}{\gamma_w \cdot i_{ex}} = \frac{\sigma}{u}$$

تنش موثر در خاکهای نیمه اشباع:

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_a + x(u_a - u_w)$$

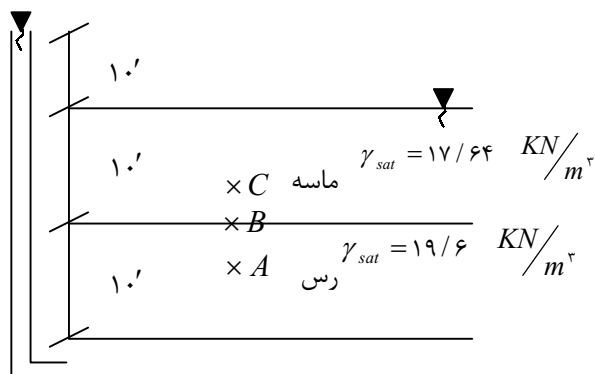
$u_a$ : فشار هوای حفره‌ای

$u_w$ : فشار آب حفره‌ای

$x = 0$  برای خاک خشک

$x = 1$  برای خاک اشباع

**مثال ۵:** بار ارتفاع، بار فشار و بار کل را برای نقاط A, B, C محاسبه کنید فشار موثر در نقطه A را محاسبه کنید.



حالت ۱:  $k_s = 10 \cdot k_C$

حالت ۲:  $k_s = 10 \cdot k_C$

حل:

حالت ۱:

$$h_s + h_C = 1.0$$

$$i_C = \frac{h_C}{L} = \frac{1.0}{1.0} = 1$$

نقطه A

$$Z_A = -1.5 \quad h_A = 1.0 - i \times 5 = 0.5$$

$$h_A = \frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A \quad u_A = (h_A - Z_A) \gamma_w = 19.6/2$$

نقطه B

$$Z_B = -1.0 \quad h_B = 0$$

نقطه C

$$h_C = 0 \quad Z_C = -0.5$$

$$u_C = 49/0.5 \quad h_C = \frac{u_C}{\gamma_w} + Z_C$$

حالت دوم

$$h_C + h_S = 1.0$$

$$q_C = q_S \quad k_C i_C = k_S i_S \quad k_C \frac{h_C}{1.0} = 10 \cdot k_C \frac{h_S}{1.0}$$

$$h_C = 10 \cdot h_S \quad h_S = 0.9 \quad h_C = 9/1$$

$$i_C = 0.9/1 \quad i_S = 0.09$$

$$h_A = 1.0 - 0.5 \times 0.9/1 = 0.5/45 \quad Z_A = -1.5 \quad \mathbf{A}$$

$$0.5/45 = -1.5 + \frac{u_A}{9/81} \quad u_A = 20.0/61$$

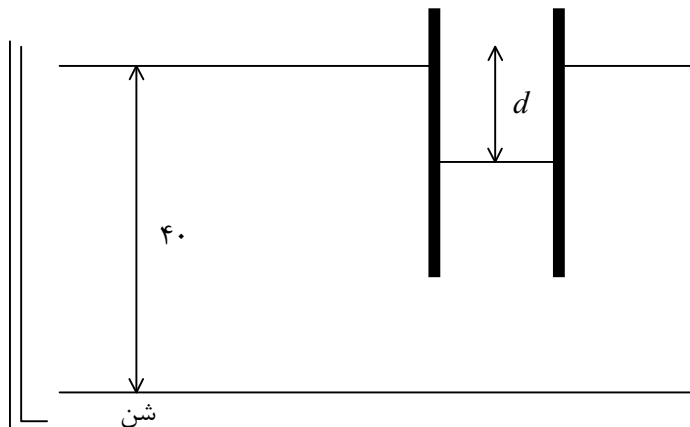
$$h_B = 1.0 - 1.0 \times 0.9/1 = 0.9 \quad Z_B = -1.0 \quad \mathbf{B}$$

$$0.9 = \frac{u_B}{9/81} - 1.0 \quad u_B = 10.6/93$$

$$h_C = 0.9 - 0.9 \times 0.5 = 0.45 \quad Z_C = -0.5 \quad \mathbf{C}$$

$$0.45 = \frac{u_C}{9/81} - 0.5 \quad u_C = 53/64$$

**مثال ۶:** در شکل زیر ماسه بین دو سپر فلزی خاکبرداری می‌شود در موقع خاکبرداری تمام آب وارده در محوطه حفر شده پمپاژ می‌شود و مطلوبیت مقدار  $d$  عمق خاکبرداری در موقعی که ماسه بجوش می‌آید.

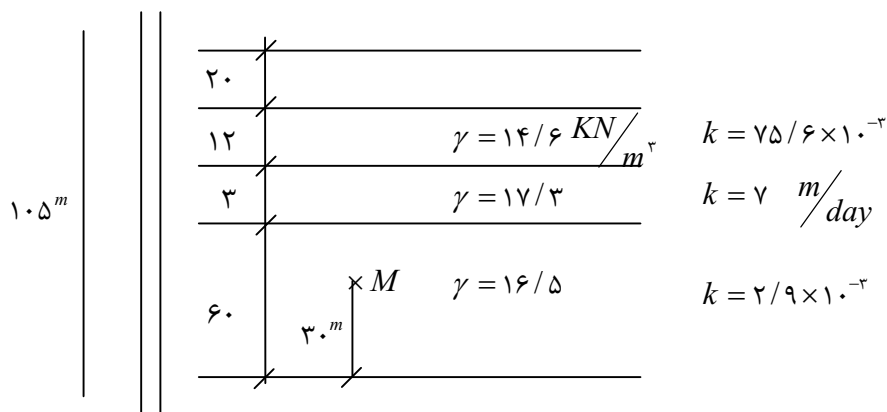


**حل:** چون ضریب نفوذپذیری رس و لای از ماسه خیلی بیشتر است پس این دو لایه کنترل کننده هستند.

$$i = \frac{h}{L} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad \frac{d}{40-d} = \frac{18-9/81}{9/81}$$

$$d = 18/3$$

**مثال:**  $u, \bar{\sigma}, \sigma, q$  را در وسط لایه لای حساب کنید.



## فصل هفتم:

## « تنش در توده خاک »

## مقدمه:

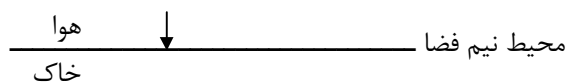
با تاثیر فشار از شالوده، خاک زیر آن در اعماق مختلف، تحت افزایش تنش قرار می گیرد. افزایش خالص در تنش خاک، بستگی به بار وارده بر واحد سطح تماس شالوده، عمق و فاصله نقطه مورد مطالعه از شالوده، و چند عامل دیگر دارد. برای محاسبات نشست، لازم است افزایش خالص تنش قائم خاک بعلاوه شالوده تعیین گردد. در این فصل با استفاده از تئوری الاستیسیته، اصول تعیین افزایش تنش قائم در خاک مورد بررسی قرار می گیرد. اگر چه نهشته‌های طبیعی خاک در اکثر حالات کاملا، همگن، ایزوتروپیک (همسانگرد) و الاستیک (کشسان) نیستند، لیکن محاسبات انجام شده برای تعیین افزایش تنش با استفاده از تئوری الاستیسیته نتایج نسبتا خوبی برای کارهای عملی به دست می دهد.

**توزیع تنش در خاک یعنی چه؟** یعنی در ترازى که به اندازه  $Z$  متر پایین تر از محلی که بار وارد می شود تنش چقدر است

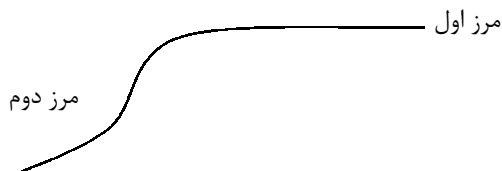
## تئوری بوسینیسک (فرضیات):

- ۱- ماده همگن باشد
- ۲- ماده ایزوتروپ باشد
- ۳- محیط نیمه بینهایت یا محیط بصورت نیم فضا
- ۴- محیط الاستیک است

**محیط نیم فضا:** محیطی است که فقط یک لایه دارد و فقط با یک مرز مشخص می شود و در صورتیکه نسبت مدولها خیلی زیاد باشد می توان محیط را نیمه بینهایت گرفت

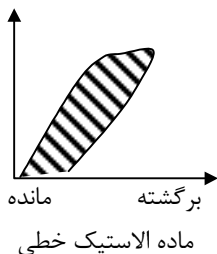


نیم فضا نیست زیرا دارای دو مرز است



**محیط الاستیک:** به محیطی گویند که مسیرهای بار گذاری و باربرداری یکسان باشد (در نمودار تنش- کرنش)

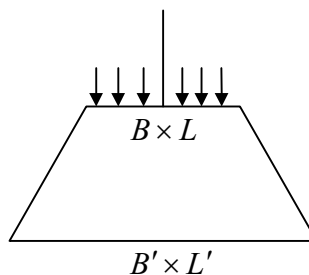
تمامی موادی که نمودار آنها خطی است الاستیک می‌باشند ولی تمامی مواد الاستیک خطی نیستند هر چقدر مساحت نشان داده شده در نمودار جسم غیر الاستیک مساحت بیشتری را داشته باشد انرژی بیشتری مستهلک می‌شود



اگر این سوال مطرح شد که چرا با فرض الاستیک ولی مقدار  $q$  در تراز پایین تر کمتر است اینست که چون در سطح بیشتری پخش شده است

$$Q' = Q \rightarrow \Delta q \cdot B'L' = q_c \cdot B.L$$

$$\Delta q = \frac{q_c \cdot B \times L}{B'L'}$$



با توجه به اینکه در مساحت بزرگتر پخش می‌شود. پس شدت آن کمتر می‌شود که یکی از روشهای پخش تنش با استفاده از روش ۱: ۲ یعنی ۲ قائم ۱ افقی پخش می‌شود

$$\Delta q = \frac{q_c \cdot B \times L}{(B + Z)(L + Z)}$$

فرمول فوق را می‌توان برای پخش تنش در همه خاکها بکار برد

$$I = \frac{B \times L}{(B + Z)(L + Z)}$$

$$\Delta q = I \cdot q_c$$

$$0 < I < 1$$

$$Z = 0 \quad I = 1$$

$$Z = \infty \quad I = 0$$

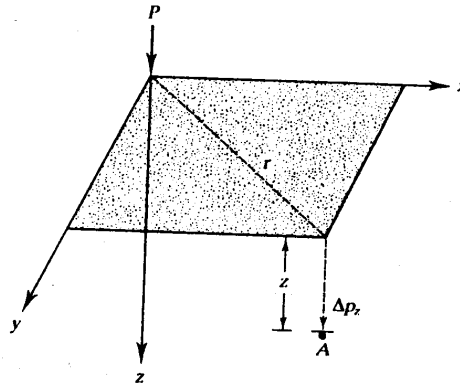
\* اگر بار در یک سطح وسیع پخش شود ضریب تنش صفر است  $I = 0$

\* اگر سطح بارگذاری در مقایسه با عمق نقطه مورد بررسی زیاد باشد  $I \approx 1$

**نکته:** در خاکهای ماسه‌ای خاک از زیر نیروی وارده فرار می‌کند ولی در رسها این اتفاق نمی‌افتد

تنش به علت بار متمرکز:

$$\Delta P_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{Z^3}{(r^2 + Z^2)^{5/2}}$$

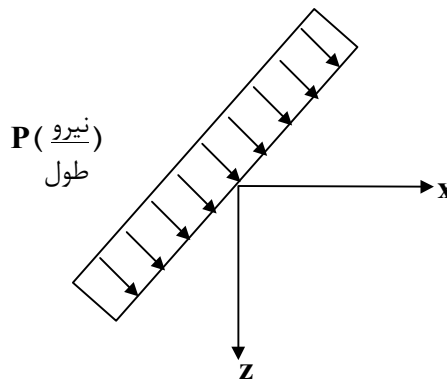


نکته مهم: اگر میزان تنش را در زیر خاک تحت دو بار متمرکز بخواهیم باید از فرمول فوق؟ را برای هر نیرو و محاسبه و سپس با هم جمع کنیم

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

تنش قائم به علت بار خطی:

$$\Delta P = \frac{2qZ^3}{\pi(x^2 + Z^2)^2}$$



مثال: اگر در شکل بالا شدت بار خطی  $500 \frac{KN}{m}$  در نظر گرفته شود، مطلوبست تعیین افزایش

تنش قائم در نقطه A با مختصات؟  
 $x = 5$   
 $Z = 4$

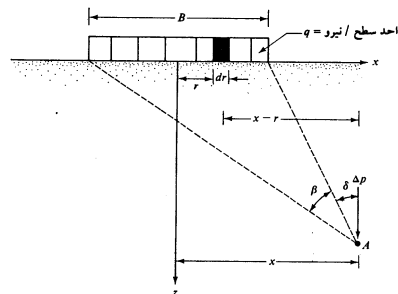
$$\Delta P = \frac{2qZ^3}{\pi(x^2 + Z^2)^2} = \frac{2 \times 500 \times 4^3}{\pi(5^2 + 4^2)^2} = 12/12 \text{ KN/m}^2$$

تنش بعلت بار نواری (عرض محدود و طول نامحدود):

$$d(\Delta P_v) = \frac{2q \cdot dr Z^3}{\pi[(x-r)^2 + Z^2]^2}$$

$$\Delta P = \frac{q}{\pi} [\beta + \sin \beta \cos(\beta + 2\alpha)]$$

بر حسب رادیان  $(\alpha, \beta)$



تنش قائم و زیر مرکز یک سطح بار گذاری دایره با شدت یکنواخت:

$$\Delta P = \frac{3P}{2\pi} \left( \frac{Z^3}{(r^2 + Z^2)^{5/2}} \right)$$

برای بار متمرکز

$$dP = P.dA = P.r.dr.d\theta$$

جزء بار متمرکز

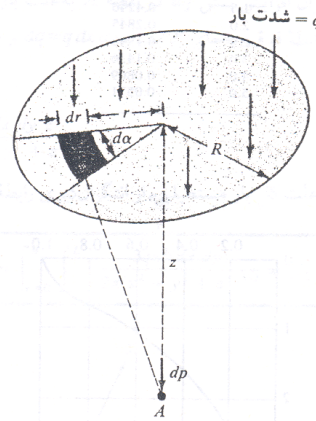
$$d(\Delta P_v) = \frac{3Pr.dr.d\theta}{2\pi} \cdot \frac{Z^3}{(r^2 + Z^2)^{5/2}}$$

جزء افزایش بار قائم

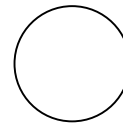
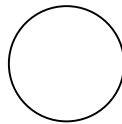
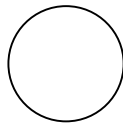
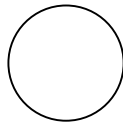
$$\Delta P_v = \int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \frac{3Pr.dr.d\theta}{2\pi} \cdot \frac{Z^3}{(r^2 + Z^2)^{5/2}}$$

$$\Delta P = P \left[ 1 - \frac{1}{\left[ \left( \frac{R}{Z} \right)^2 + 1 \right]^{3/2}} \right]$$

ایره‌ای بما می‌دهد.



دو مثال کاربردی: اگر افزایش تنش را در یکی از دو شکل زیر خواستند باید بر طبق مراحل زیر عمل کنیم



تنش قائم بعلت یک سطح بارگذاری مستطیلی با شدت یکنواخت

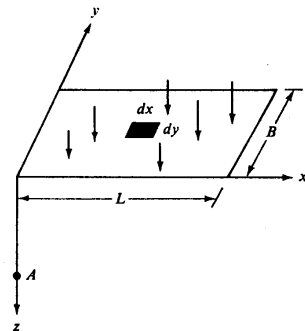
$$dA = dx.dy$$

$$dP = P.dA = P.dxdy$$

جزء بار متمرکز

$$d(\Delta P_v) = \int_0^{\beta} \int_0^L \frac{3q.dxdy}{2\pi} \cdot \frac{Z^3}{(x^2 + y^2 + Z^2)^{5/2}}$$

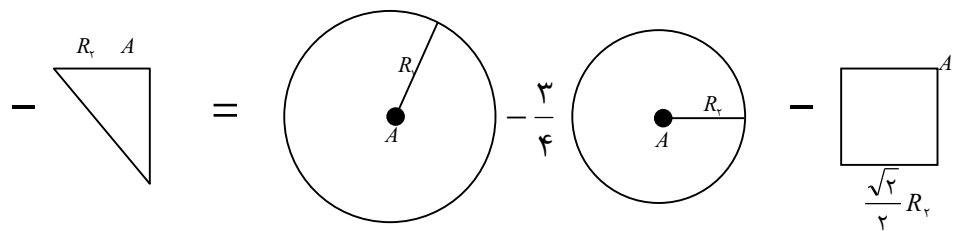
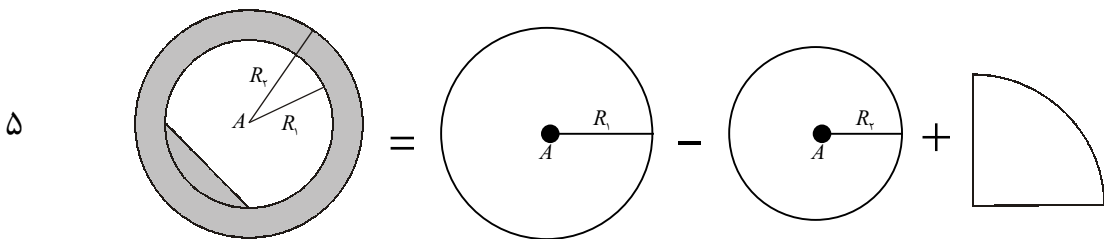
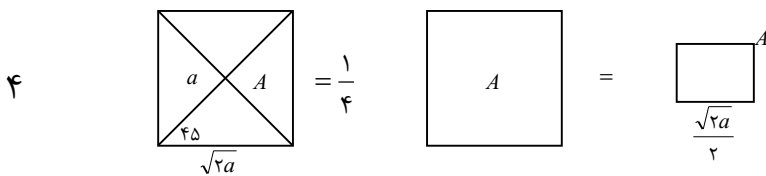
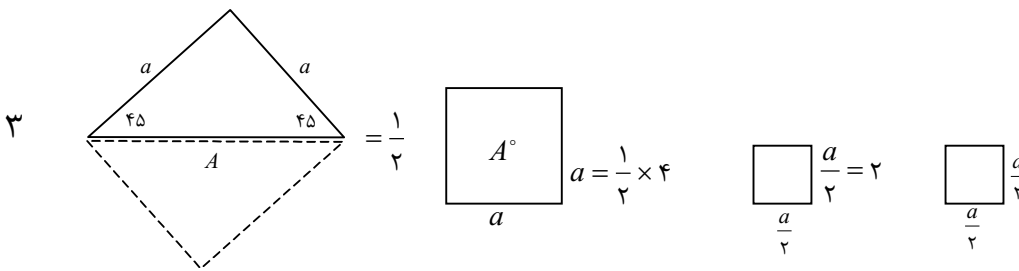
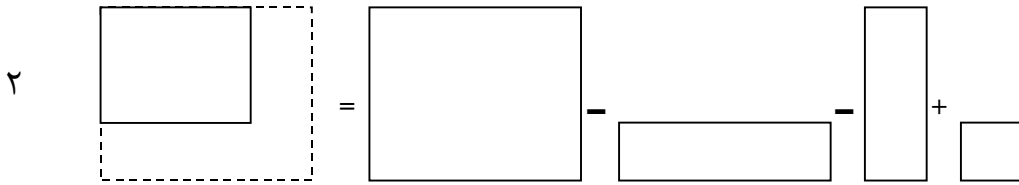
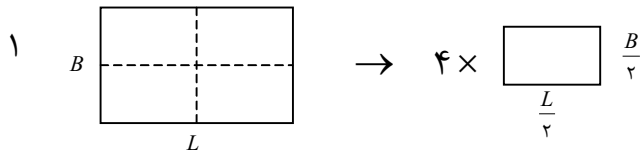
جزء افزایش بار قائم



نکته مهم: این افزایش بار برای نقاط گوشه است یعنی اینکه اگر بار بصورت مربع بود و افزایش تنش را در یک نقطه خواستند آنرا بگونه‌ای تقسیم می‌کنیم که بار در گوشه باشد



بررسی چند مثال مفهومی



حالت‌هایی که سطح بار گذاری نامشخص است: (روش نیومارک)  
وقتی که شکل بار گذاری نامشخص باشد و نتوان از روابط قبل استفاده کرد در اینصورت از نمودار نیومارک استفاده می‌کنند

روش حل:

۱- تعریف مقیاس در رسم پلان بارگذاری:

با خط‌کش اندازه گرفته شود عمق نقطه مورد بررسی = طول پاره خط AB در آباک

مثال:

$$SC : \frac{1}{100} \rightarrow 25m = 2/5cm \text{ طول پاره خط}$$

عمق را از ترازوی = عمق مورد بررسی  
که q وارد می‌شود

۲- رسم پلان بارگذاری و نقطه مورد بررسی با مقیاس بدست آمده

۳- انطباق شکل حاصل از بند ۲ بر روی آباک طوری که A در مرکز آباک باشد

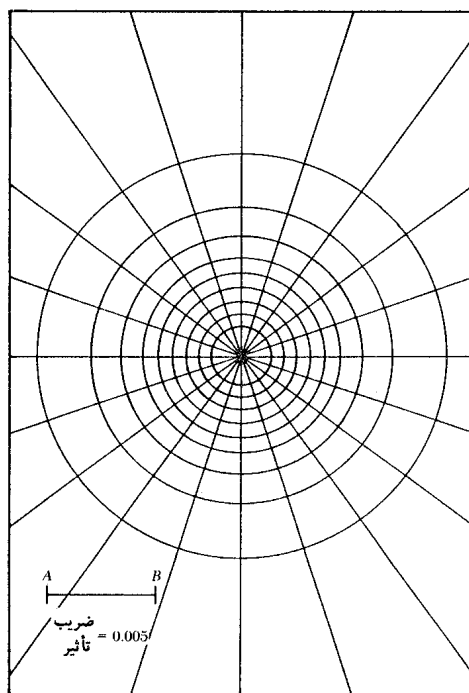
مثال  $N = 7/5$

۴- شمارش خانه‌های اشغال شده توسط سطح بارگذاری

نکته: هر چقدر نقطه دورتر باشد تعداد خانه‌های شمارش شده کمتر است

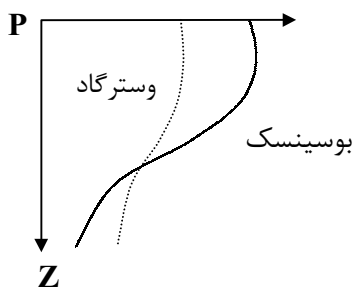
$$\Delta P = 0.005 \times N \times q$$

۵- یافتن  $\Delta q$  در نقطه مورد بررسی



### فرضیات تئوری وسترگاد:

- ۱- برای خاکهای لایه‌ای است که بین این لایه‌ها یکسری صفحات صلب است و دارای مدول الاستیسه‌های مختلف هستند
- ۲- در این تئوری از تغییر شکلهای جانبی زیاد جلوگیری می‌کند و محیط بصورت نیم فضا نیست و نتایج در نزدیکی مرزهای که تغییر شکل جانبی کم است خوب می‌باشد
- ۳- اگر خاک رس داشته باشیم و در بین آنها لایه‌های از ماسه باشد چون صلبیت ماسه در مقایسه با رس زیاد است پس لایه‌های ماسه را بصورت صفحات صلب می‌گیریم
- ۴- تئوری که بروش و وسترگاد است از تئوری ارتجاعی استفاده می‌کند و خاک را بصورت فنر می‌گیرد
- ۵- میزان تنش پخش شده و در خاک متناسب با جابجایی خاک است. وجود آب یا عدم وجود آن در بین لایه‌ها روی مدول الاستیسته برشی بی‌تاثیر است



### نکات مهم:

- ۱- در کارهای اجرایی معمولاً سعی می‌شود از تئوری بوسینسک استفاده شود زیرا مقادیر بیشتر تنش را در نزدیکی سطح می‌دهد

**جسم صلب:** جسمی است که هر چقدر به آن نیرو وارد کنیم صرف تغییر مکان صلب خود می‌کند و هیچ مقدار انرژی در آن مستهلک نمی‌شود

## فصل هشتم:

## نشست خاک (تحکیم خاک)

تحکیم خاک چیست؟ خارج کردن مولکولهای آب از خاک را تحکیم گویند.

## هدف از مطالعه مبحث تحکیم:

(۱) محاسبه مقدار نشست؟

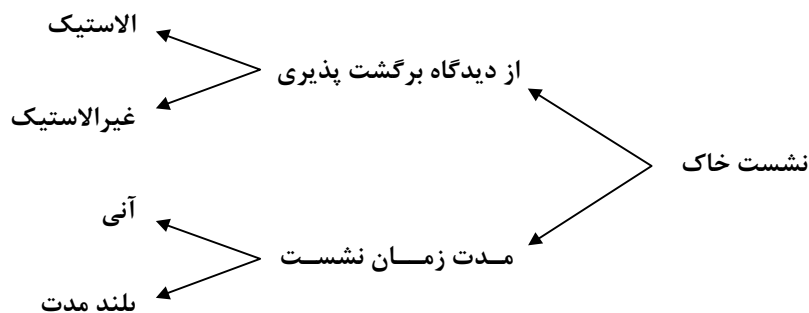
(۲) محاسبه زمان نشست؟

وقتی که یک لایه خاک اشباع تحت تاثیر افزایش تنش قرار می‌گیرد فشار آب حفره‌ای موجود در آن به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در خاکهای ماسه‌ای که نفوذپذیری بالاست، زهکشی ناشی از افزایش فشار آب حفره‌ای سریعاً انجام می‌شود که زهکشی آب حفره‌ای همراه با کاهش حجم توده خاک می‌باشد که نتیجه آن ایجاد نشست است. بعلاوه زهکشی سریع آب حفره‌ای در خاکهای ماسه‌ای، نشست تحکیم و آنی در آنها بطور همزمان رخ می‌دهد.

وقتی که یک لایه آب خاک رس اشباع، تحت تاثیر افزایش قرار گیرد ابتدا نشست آنی رخ می‌دهد. اما از آنجایی که ضریب نفوذپذیری رس بطور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از ضریب نفوذپذیری ماسه است، زهکشی آب حفره‌ای سریعاً انجام نشده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از بارگذاری، بطور تدریجی و در یک زمان طولانی رخ می‌دهد بنابراین کاهش حجم خاک، که از این به بعد آن را تحکیم می‌نامیم، به مدت طولانی بعد از بارگذاری و نشست آنی، ادامه خواهد داشت. در خاکهای رسی نرم، نشست تحکیم چندین برابر نشست آنی است.

## تعریف دیگر تحکیم:

عبارتست از کاهش حجم تدریجی یک خاک اشباع با نفوذپذیری کم در اثر زهکشی آب موجود در حفرات که نهایتاً منجر به تغییر ضخامت و نشست خاک می‌گردد.

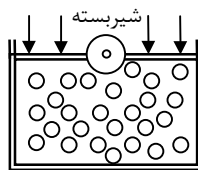


نکته: نشست آنی حتماً الاستیک نیست ولی نشستهای الاستیک مطمئناً آنی می‌باشند.

۱)  $t = 0 \equiv$  شیر بسته در مدل

$$\Delta \sigma_i = \Delta u_0$$

$$\Delta \bar{\sigma} = 0$$

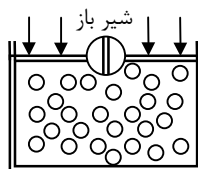


۲)  $t = t_i \neq 0$

$$\Delta \sigma_i$$

$$\Delta u_i < \Delta u_0$$

$$\Delta \bar{\sigma} \neq 0$$

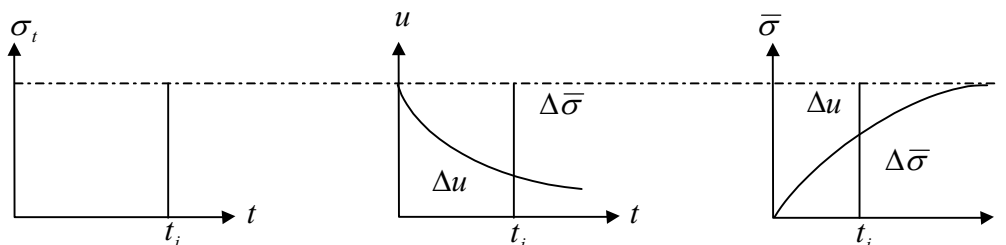


۳)  $t = \infty$

$$\Delta u = 0$$

$$\Delta \sigma_i = \Delta \bar{\sigma}$$

که البته در این حالت الزاماً تمام آب خارج نمی‌شود مثلاً اگر یک خانه دو طبقه داشته باشیم پس از مدتی تحکیم تمام می‌شود ولی اگر بعد از آن سه طبقه دیگر بسازیم دوباره از اول مراحل تحکیم طی می‌شود.



**نکته مهم:**

در طی پدیده تحکیم بعلت متراکم تر شدن ذرات خاک وزن آب موجود در آن همچنین حجمی که توسط آب اشغال شده کاهش می‌یابد پس بنابراین در اثر پدیده تحکیم نسبت تخلخل کاهش می‌یابد و همچنین درصد رطوبت کم می‌شود ولی در تمام طول تحکیم خاک کاملاً اشباع است.

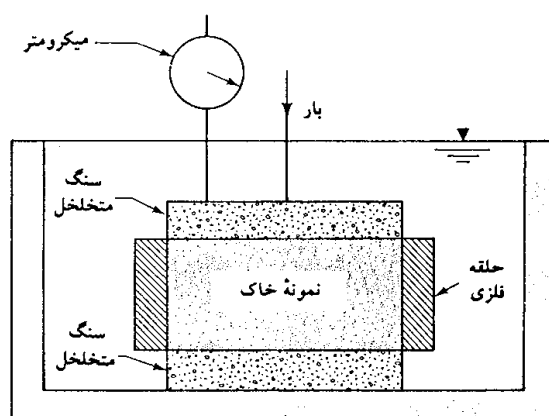
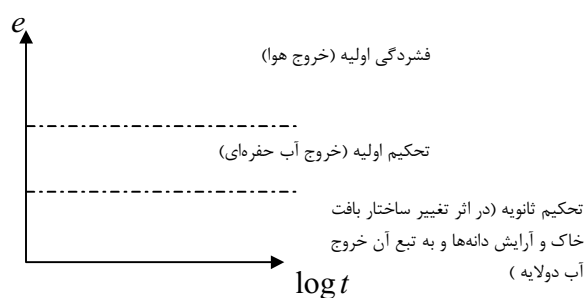
**آزمون آزمایشگاهی تحکیم یک بعدی ( ادمتری):**

روش آزمایشگاهی تحکیم یک بعدی، اول بار توسط ترزاقی پیشنهاد شد. این آزمایش در یک تحکیم سنج که ادمتر نامیده می‌شد انجام می‌گیرد. نمونه خاک در داخل یک حلقه فلزی قرار داده شده و دو درپوش سنگی متخلخل یکی در بالا و دیگری در پایین آن قرار داده می‌شود.

بارگذاری نمونه بوسیله یک اهرم اعمال شده و میزان فشردگی توسط یک میکرومتر عقربه‌ای اندازه گیری می‌شود. در حین آزمایش، نمونه در داخل آب نگهداری می‌شود. هر بارگذاری بمدت ۲۴ ساعت حفظ می‌شود. با دو برابر کردن بار، میزان فشردگی و اندازه گیری فشردگی ادامه می‌یابد در انتهای آزمایش، وزن خشک نمونه آزمایشی تعیین می‌گردد.

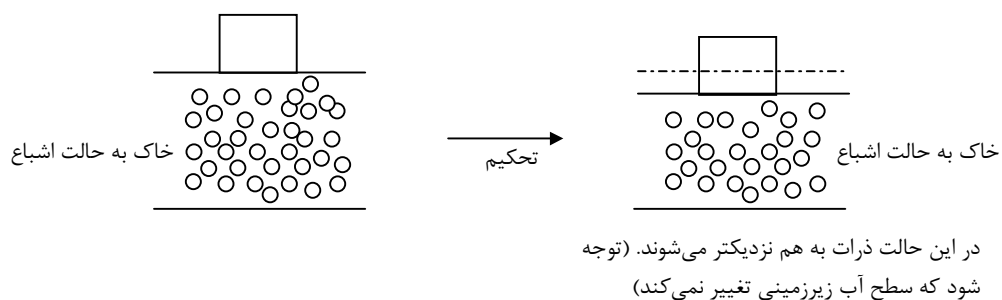
شکل عمومی نمودار تغییر شکل نمونه در مقابل زمان بشکل ذیل است:

**مرحله ۱:** فشردگی اولیه که اکثراً بعلت پیش بارگذاری است.  
**مرحله ۲:** تحکیم اولیه که طی آن بعلت زهکشی آب حفره‌ای، فشار اضافی آب حفره‌ای به تدریج به تنش موثر تبدیل می‌شود.  
**مرحله ۳:** تحکیم ثانویه که بعد از اتمام زایل شدن فشار اضافی آب حفره‌ای رخ می‌دهد. و علت آن بوجود آمدن تغییر شکل‌های پلاستیک در اسکلت خاک است.



شکل شماتیک دستگاه ادومتر

**تحکیم ثانویه:** خروج آب جذبی از ذرات خاک در اثر تغییر ساختار خاک را گویند. ولی باید گفت که این امر برای تمام خاکها نیست و برخی از خاکها هستند که از ابتدا تحکیم ثانویه دارند.



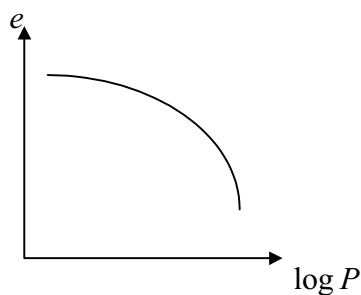
**تحمیم سه بعدی :**

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$$

$$\frac{\Delta(A \times H)}{A.H} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$$

$$\boxed{\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_0}}$$

کرنش در حالت تحمیم خطی



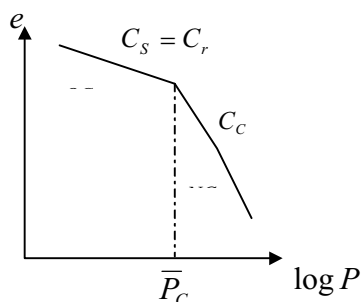
مثال:  $\Delta e = 0.25$      $e_0 = 0.9$      $H_0 = 4^m$     نشست خاک ؟

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1+e_0} H = \frac{0.25}{1/9} \times 4 = 0.526$$

**رسهای عادی تحمیم یافته و پیش تحمیم یافته :**

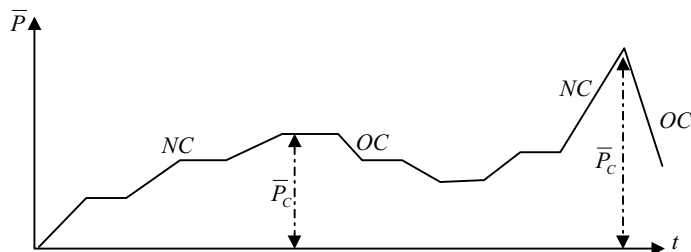
(I) رسهای تحمیم یافته معمولی : شیب منحنی آنها تقریباً نزدیک خط راست است و علت اینکه به آن تحمیم یافته معمولی گوییم اینست که هیچگاه فشاری بیشتر از فشار  $P$  تجربه نکرده است.

(II) رسهای پیش تحمیم یافته : خاکی است که فشار موثر فعلی موجود کمتر از حداکثر فشار موثری است که تجربه کرده است. بطور کلی فشار موثر کنونی حداکثر فشار موثری می باشد که تابحال دیده است و در گذشته بیشتر از آنرا ندیده است.



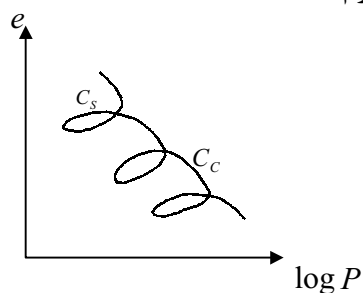
نکته : علت اینکه بارگذاری از مقادیر کم فشار شروع می شود اینست که بتوان نقطه شکست را پیدا کرد.

فشار پیش تحکیمی خاک ( $P_c$ ): حداکثر فشار موثری است که خاک تجربه کرده است و اگر فشارهای کمتر از آن به خاک وارد شود نشستهای آن کم است ولی در فشارهای بیشتر از  $P_c$  نشستهای آن زیاد است.



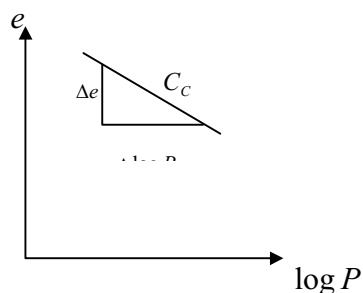
در شکل بالا در ابتدای بارگذاری، چون خاک هیچ فشار پیش تحکیمی را تجربه نکرده است بهمین دلیل هر فشار جدید برای آن ماکزیمم فشاری است که تا بحال تجربه کرده ولی اگر باربرداری انجام دهیم و دوباره بارگذاری کنیم فشارهای  $p_c$  برای خاک فشارهایی است که قبلاً تجربه کرده است بهمین دلیل نشست آن تغییرات زیادی را ندارد

نکته: همیشه رفتار خاک بحالتی است که فشردگی بیشتر از تورم است



رابطه کلی نشست:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \rightarrow \Delta H = \frac{H_0}{1+e_0} \cdot \Delta e$$





$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta(\log \bar{p})} = \frac{\Delta e}{\log \bar{p}_r - \log \bar{p}_i} = \frac{\Delta e}{\log(\frac{\bar{p}_r}{\bar{p}_i})} = \frac{\Delta e}{\log(\frac{\bar{p}_i + \Delta \bar{p}}{\bar{p}_i})}$$

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_o}\right) \quad (\text{شیب خط})$$

$$\Delta H = S = \frac{H_o C_c}{1 + e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_o}\right)$$

حالت کلی

$\bar{p}_o$ : فشار موثر قبل از احداث بنا ( در شرایط تعادل ) در وسط لایه رس

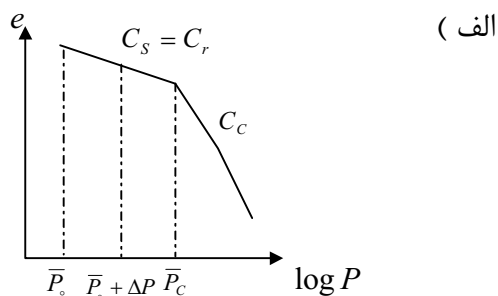
$\Delta p$ : افزایش تنش ناشی از احداث بنا

نشست در خاکهای مختلف :

$$\bar{p}_o < \bar{p}_c$$

$$\bar{p}_o + \Delta p < \bar{p}_c$$

$$S_c = \frac{H_o C_s}{1 + e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_o}\right)$$

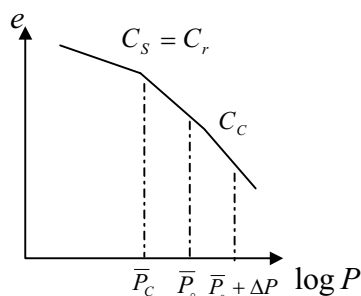


( ب )

$$\bar{p}_o > \bar{p}_c$$

$$\bar{p}_o + \Delta p > \bar{p}_c$$

$$S_c = \frac{H_o C_c}{1 + e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_o}\right)$$

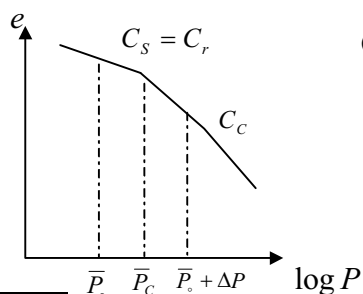


( ج )

$$\bar{p}_o < \bar{p}_c$$

$$\bar{p}_o + \Delta p > \bar{p}_c$$

$$S_c = S_{oc} + S_{nc} = \frac{H_o C_s}{1 + e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_c}{\bar{p}_o}\right) + \frac{H_o C_c}{1 + e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_c}\right)$$



برخی نکات مهم:

نسبت پیش تحکیمی (OCR):

$$OCR = \frac{\bar{P}_c}{\bar{p}_0} = \frac{\text{حداکثر فشاری که خاک تجربه کرده (فشار موثر)}}{\text{فشار موثر فعلی}}$$

خاک OC :  $OCR > 1$

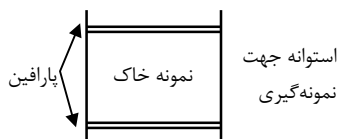
خاک NC :  $OCR < 1$

شیب خط عادی تحکیم یافته بر حسب LL:

$$C_c = 0.009(LL - 10) \quad \text{رس دست نخورده}$$

$$C_c = 0.007(LL - 10) \quad \text{رس دست خورده}$$

به خاک رسی دست نخورده گوئیم که در حین جابجایی رس از محل تا آزمایشگاه بگونه‌ای منتقل شود که نیروهای وارده بر نمونه تغییر پیدا نکند. در اینحالت خاک دست نخورده می‌باشد.



رابطه زیر برای خاک بکر یا دست نخورده وجود دارد

$$C_s = \left(\frac{1}{10} \approx \frac{1}{5}\right) C_c$$

$$e_0 = \left[ \frac{LL(\%)}{100} \right] G_s (1/22 - 0.2343 \log \bar{p}_0)$$

پدیده تحکیم ربطی به زهکشی ندارد.

روش ترسیمی کاراگرانده برای محاسبه فشار پیش تحکیمی:

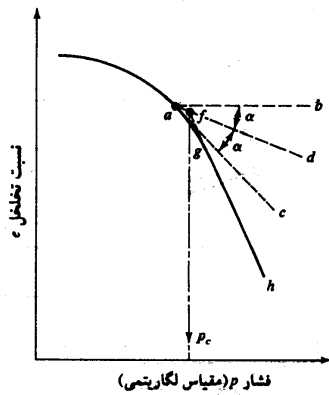
(۱) با بررسی چشمی، در روی نمودار  $e$  در مقابل  $\log p$ ، نقطه‌ای مثل  $a$  تعیین نمایید که دارای حداقل شعاع انحنای باشد.

(۲) خط افقی  $ab$  را بطوریکه از  $a$  بگذرد رسم کنید.

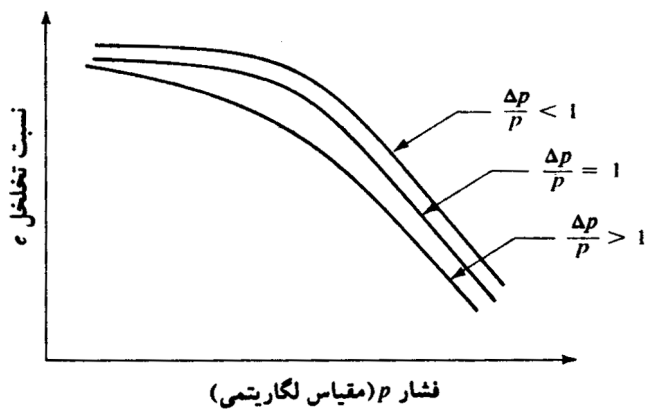
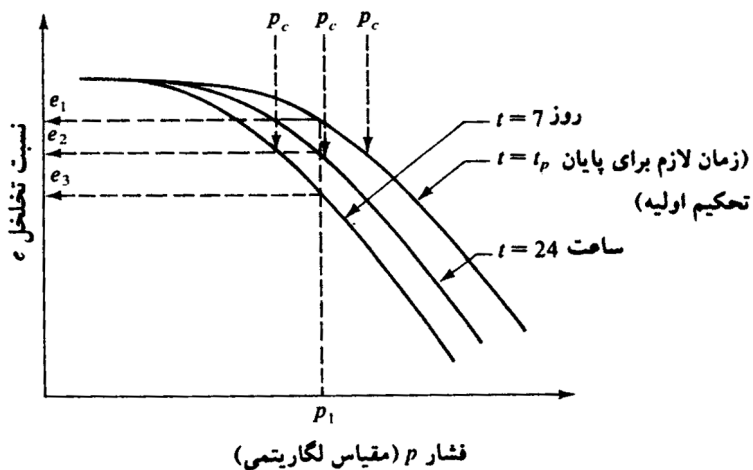
(۳) مماس  $ac$  را در نقطه  $a$  بر منحنی رسم کنید.

(۴) خط  $ad$  یعنی نیم زاویه  $bac$  را رسم کنید.

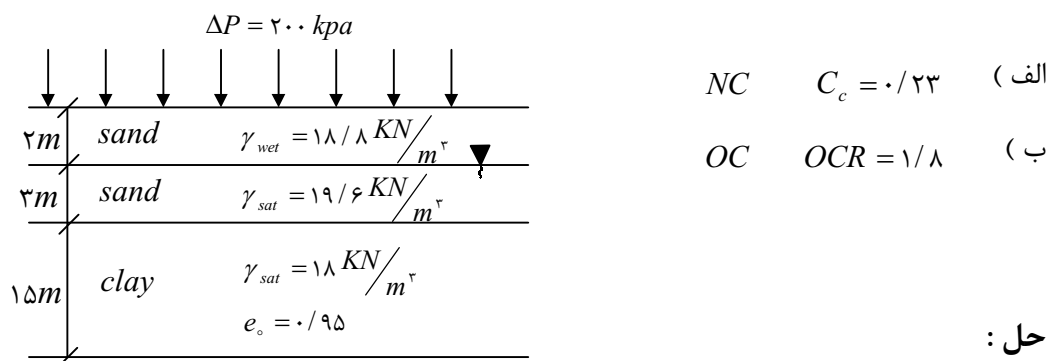
۵) قسمت داخلی  $gh$  نمودار  $e$  در مقابل  $\log p$  را بسمت عقب ادامه دهید تا  $ad$  را در  $f$  قطع کند طول نقطه  $f$  فشار پیش تحکیمی است.



اگر در ترسیم منحنی تحکیم بجای اینکه وزنه های مورد نظر را ۲۴ ساعت بر روی نمونه قرار گیرند مثلاً سه روز قرار گیرند منحنی ترسیمی زیر منحنی اولیه قرار می گیرد. در صورتیکه مدت زمان کمتر از ۲۴ ساعت باشد منحنی بالای منحنی اولیه می باشد.



مثال ۱: نشست تحکیم لایه رس را پیدا کنید.



حل:

$$\bar{p}_0 = 18/8 \times 2 + (19/6 - 9/8) \times 3 + 7/5(18 - 9/8) = 128/4 \text{ (kpa)}$$

$$\Delta P = 200 \text{ (kpa)}$$

$$S = \frac{C_c L}{1 + e_0} \log\left(\frac{\bar{p}_0 + \Delta p}{\bar{p}_0}\right) = \frac{0/23 \times 15}{1/95} \log\left(\frac{328/4}{128/4}\right) = 0/72m$$

(ب)

$$OCR = \frac{\bar{p}_c}{128/4} \Rightarrow \bar{p}_c = 1/8 \times 128/4 = 230 \text{ (kpa)}$$

$$\bar{p}_0 < \bar{p}_c = 230 < \bar{p}_0 + \Delta p = 328/4$$

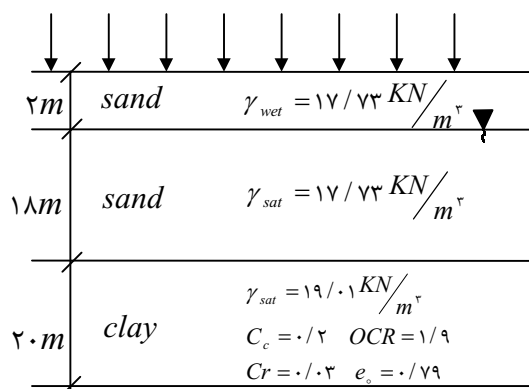
$$S = \frac{C_r L}{1 + e_0} \log\left(\frac{\bar{p}_c}{\bar{p}_0}\right) + \frac{C_c L}{1 + e_0} \log\left(\frac{\bar{p}_0 + \Delta p}{\bar{p}_c}\right) =$$

$$\frac{0/3 \times 15}{1/95} \log\left(\frac{230}{128/4}\right) + \frac{0/23 \times 15}{1/95} \log\left(\frac{328/4}{230}\right) =$$

مثال ۲:

یک تانکی نفت بقطر  $100m$  بر روی پروفیل خاک داده شده در شکل زیر بنا نهاده می شود عمق

متوسط نفت در داخل تانک  $20m$  است.  $\frac{\gamma_{oil}}{\gamma_w} = 0/92$  نشست خاک را پیدا کنید.



حل:

$$\Delta p = \rho g h = 0.92 \times 9.81 \times 20 = 180.3 \text{ (kpa)}$$

$$p_0 = 2 \times 17.73 + (17.73 - 9.81) \times 18 + (19.01 - 9.81) \times 10 = 270.3 \text{ (kpa)}$$

$$OCR = \frac{\bar{p}_c}{\bar{p}_0} = 1/9 \Rightarrow \frac{\bar{p}_c}{270.3} = 1/9$$

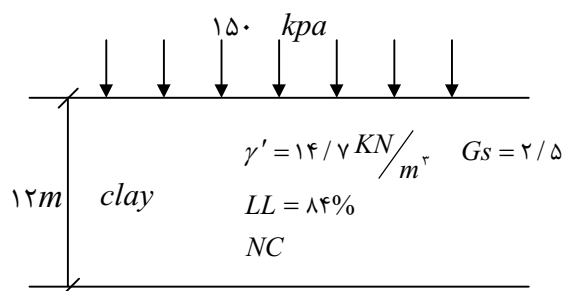
$$\bar{p}_c = 513.57$$

$$\bar{p}_0 + \Delta p = 450.3 < \bar{p}_c = 513.57$$

$$S = \frac{C_r L}{1 + e_0} \log\left(\frac{\bar{p}_0 + \Delta p}{\bar{p}_0}\right) = \frac{0.3 \times 20}{1.79} \log\left(\frac{450.3}{270.3}\right) = 0.074 \text{ m}$$

**نکته مهم:** اگر چند لایه نفوذ ناپذیر وجود داشته باشند که روی هم و بخواهیم نشست کل را حساب کنیم باید برای هر کدام از لایه‌های نفوذ ناپذیر  $S$  را حساب کنید و با هم جمع نمود باید توجه داشت که در هر کدام از این لایه‌ها،  $\bar{p}_0$  مجزا دارند یعنی لایه بالایی برای محاسبه  $\bar{p}_0$  لایه پایینی حکم یک لایه نفوذپذیر معمولی را دارد.

**مثال ۳:** نشست یک فنداسیون نواری شکل به عرض  $3 \text{ m}$  را که فشاری برابر با  $150 \text{ kpa}$  بر سطح زمین وارد می‌کند را محاسبه کنید.



حل:

$$G_s = 2/5$$

$$\Delta p = 150$$

$$C_c = 0.009(LL - 10) = 0.009(84 - 10) = 0.666$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad 14/7 = \gamma_{sat} - 9.81 \quad \gamma_{sat} = 24/51$$

$$\bar{p}_0 = 6 \times 14/7 = 88/2$$

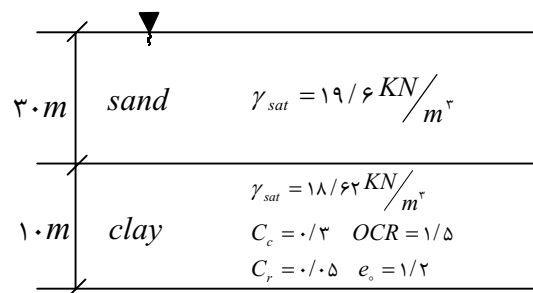
$$e_o = \left[ \frac{LL}{100} \right] G_s (1/22 - 0/2343 \log p_o) = \frac{84}{100} \times 2/5 (1/122 - 0/2343 \log 88/2)$$

$$e_o = 1/4$$

$$S = \frac{C_c L}{1+e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_o}\right) = \frac{0/666}{2/4} \times 12 \log\left(\frac{88/2 + 150}{88/2}\right) = 1/43 \text{ m}$$

علت زیاد بودن نشست این فنداسیون حد روانی بالای لایه رسی زیر فنداسیون است. که بنابراین نباید بر روی این خاک سازه را بنا کرد بلکه باید این زمین را اصلاح کرد.

**مثال ۴:** نشست لایه رس را در اثر پایین آوردن سطح آب زیر زمینی تا بالای لایه رسی محاسبه کنید.



حل:

$$\bar{p}_1 = (19/6 - 9/81) \times 3 + (18/62 - 9/81) \times 5 = 337/75 \text{ (kpa)}$$

$$\bar{p}_2 = 19/6 \times 3 + 5 \times (18/62 - 9/81) = 632/05 \text{ (kpa)}$$

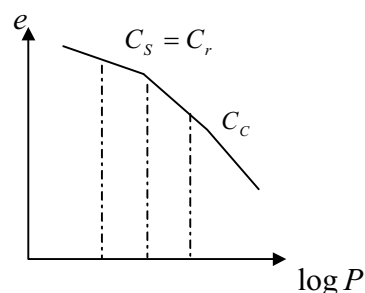
$$\Delta p = \bar{p}_2 - \bar{p}_1 = 294/3$$

$$\bar{p}_o = 337/75$$

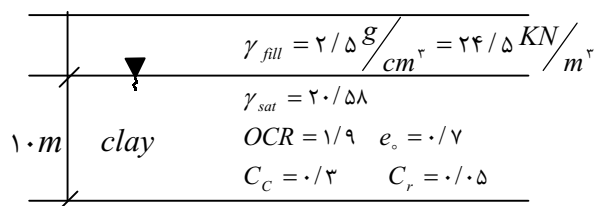
$$OCR = \frac{\bar{p}_c}{\bar{p}_o} \quad \bar{p}_c = \bar{p}_o \times OCR = 337/75 \times 1/5 = 50.7 \text{ (kpa)}$$

$$\bar{p}_o + \Delta p = 337/75 + 294/3 = 632 \text{ (kpa)}$$

$$S = \frac{C_r L}{1+e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_c}{\bar{p}_o}\right) + \frac{C_c L}{1+e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_c}\right) = 0/171 \text{ m}$$



مثال ۵: مطلوبست نشست نشست لایه رس به ضخامت  $10\text{ m}$  در اثر  $3\text{ m}$  خاکریز گسترده از خاک درشت دانه



حل:

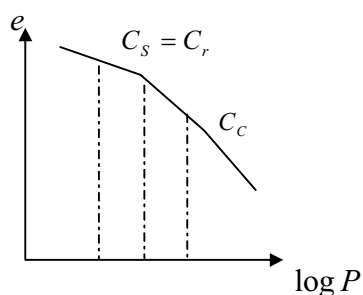
$$\gamma_{fill} = \frac{W}{V} = \frac{W}{\gamma_{sat} A} = 24/5 \quad W = 73/5 A$$

$$\Delta P = \frac{W}{A} = \frac{73/5 A}{A} = 73/5$$

$$\bar{p}_o = (20/58 - 9/81)5 = 53/85$$

$$\bar{p}_c = \bar{p}_o \cdot OCR = 53/85 \times 1/9 = 10.1/8$$

$$\bar{p}_o + \Delta p = 53/85 + 73/5 = 127/35$$



$$S = \frac{C_c L}{1+e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta P}{\bar{p}_o}\right) + \frac{C_r L}{1+e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o}{\bar{p}_o}\right) = 2$$

$$\frac{0.3 \times 10}{1.7} \log\left(\frac{127/35}{53/85}\right) + \frac{0.5 \times 10}{1.7} \log 1/9 = 0.75 \text{ m}$$

نشست به علت تحکیم ثانویه:

در پایان تحکیم اولیه (یعنی بعد از زایل شدن کامل فشار آب اضافی)، بعلت تغییر شکل پلاستیک اسکلت خاک، مقداری نشست رخ می‌دهد. این مرحله از تحکیم به تحکیم ثانویه معروف است در حین تحکیم ثانوی، نمودار تغییر شکل در مقابل لگارتیم زمان عملاً خطی است تغییرات نسبت تخلخل  $e$  در مقابل زمان  $t$  برای یک افزایش بار، مشابه چیزی است که در نمودار نشان داده شده است.

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)}$$

$C_\alpha$ : نشانه تحکیم ثانویه

$\Delta e$ : تغییرات نسبت تخلخل

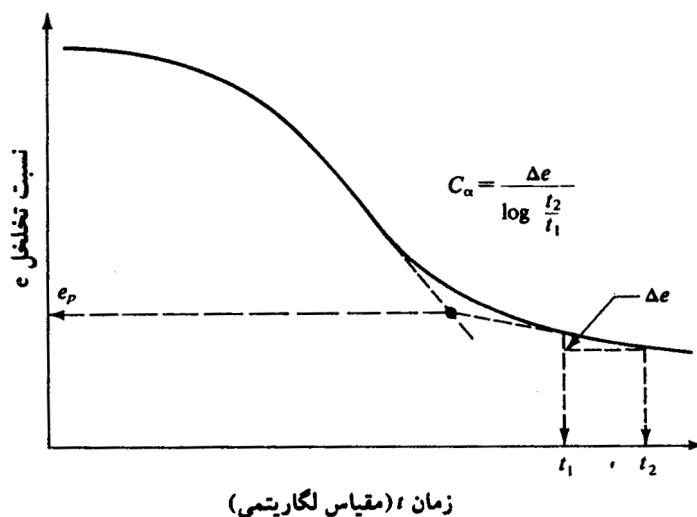
زمان:  $t_1, t_2$

$$S_s = \frac{C_\alpha H}{1+e_p} \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

نشست در اثر تحکیم ثانویه

مهم: چون تفاوت  $e_p$  با  $e_0$  در حد صدم است می توان بجای  $e_p$  از  $e_0$  استفاده کرد

نشست تحکیم ثانویه + نشست تحکیم اولیه = نشست تحکیم کل



در بحث تحکیم به دو مقوله باید توجه نمود:

نشست کل: مجموع نشست اولیه + ثانویه

سرعت تحکیم: در اینحالت هدف اینست که در نهایت منحنی نشست زمان را بدست آوریم.

تحکیم

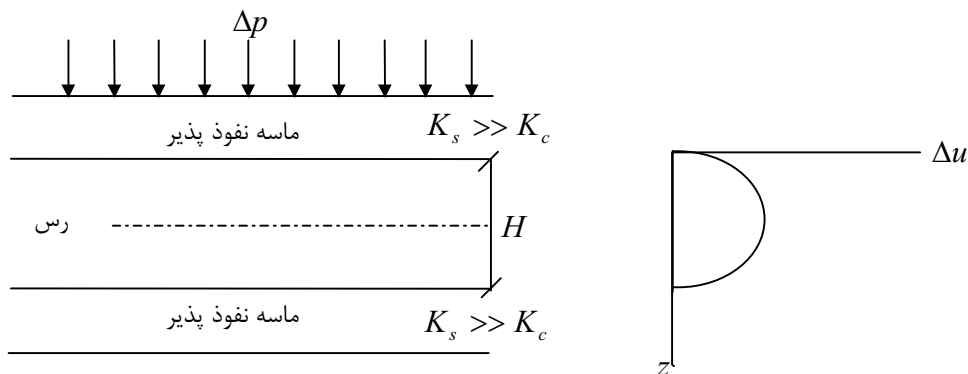
برای تعیین سرعت نشست از تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی استفاده می کنیم.

**فرضیات تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی:**

- (۱) اشباع بودن خاک.
- (۲) خاک اشباع که از دانه های خاک و آب تشکیل شده همگن باشد.
- (۳) دانه خاک و آب هر دو تراکم ناپذیر باشند (در این حالت فقط زمانی تراکم اتفاق می افتد که آب از مجموعه فرار کند).
- (۴) برای تمامی  $i$  ها (گرادیان هیدرولیکی) رابطه دارسی صادق است  $V = ki$
- (۵) خروج آب در راستای بارگذاری می باشند.
- (۶) نشست خاک بصورت یک بعدی است.

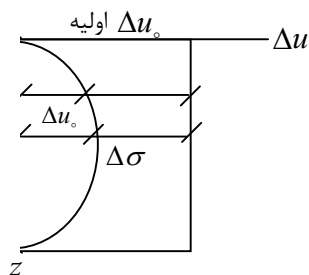


توزیع اضافه فشار منفذی در اثر  $\Delta p$ :



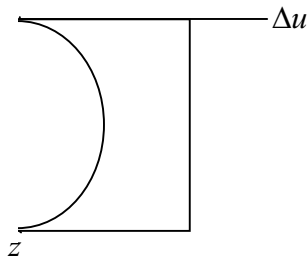
درست در لحظه وارد شدن تنش ب خاک تمام این فشار به آب وارد می شود و فشار آب برابر کل می شود ولی در مرزها بدلیل نفوذپذیری زیاد فشار آب در لحظه ای بعد به صفر می رسد و در قسمتهای دیگر خاک با توجه به مسافت آنها نسبت به مرزها این فشار بتدریج صفر می شود.

**نکته:** بیشترین مقدار گرادیان هیدرولیکی نزدیکی مرزها می باشد و در وسط گرادیان صفر است.  $\Delta u$  در لحظه  $t = 0$  برابر بیشترین مقدار یعنی تنش کل می باشد و بمرور زمان اضافه فشار به تنش موثر تبدیل شده و از  $\Delta u_0$  کاسته می شود.



**منحنی های همزمان:**

یعنی در زمان مشخص اضافه فشار موجود در اعماق مختلف خاک رس مشاهده شود مثلاً بعد از یکسال شیب منحنی همزمان گرادیان هیدرولیکی می باشند.



درجه تحکیم در زمان  $t$  و در عمق  $z$ :

$$U_z = \left( \frac{u_i - u}{u_i} \right) \times 100$$

درجه تحکیم

$u_i$ : فشار اولیه

$u$ : فشار آب کنونی

$$U_z = \left( 1 - \frac{u}{\Delta p} \right) \times 100$$

چون در لحظه اول تمام تنش را آب می‌گیرد

پس  $u_i = \Delta p$  است.

**نکته مهم:** می‌توان گفت که نقاط مرزها بیشترین درجه تحکیم و کمترین فشار آب را دارند و نقاط وسطی کمترین درجه تحکیم و بیشترین فشار آب را دارند (در زهکشی دو طرفه)

### معادله تحکیم

$$U = f(t, h)$$

در هر لحظه فشار آب تابع زمان و ارتفاع است

$$\frac{\partial U}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

معادله تحکیم

$$C_v = \frac{K(1+e_o)}{a_v \gamma_w}$$

$$\left( \frac{m^2}{s} \right) \text{ ضریب تحکیم } C_v$$

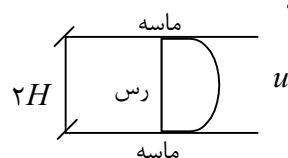
$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}$$

$a_v$  ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک

حل معادله تحکیم با توجه به شرایط مرزی و اولیه:

$$t = 0 \quad u(0, z) = \Delta p$$

$$t > 0 \quad \begin{cases} u(t, 0) = 0 \\ u(t, H) = 0 \end{cases}$$

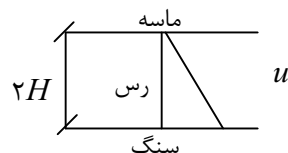


الف) برای زهکشی دو طرفه

$$t = 0 \quad u(0, z) = \Delta p$$

$$t > 0 \quad u(t, 0) = 0$$

$$z = 2H \quad \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$



ب) زهکشی یکطرفه

بدون بعد  $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$

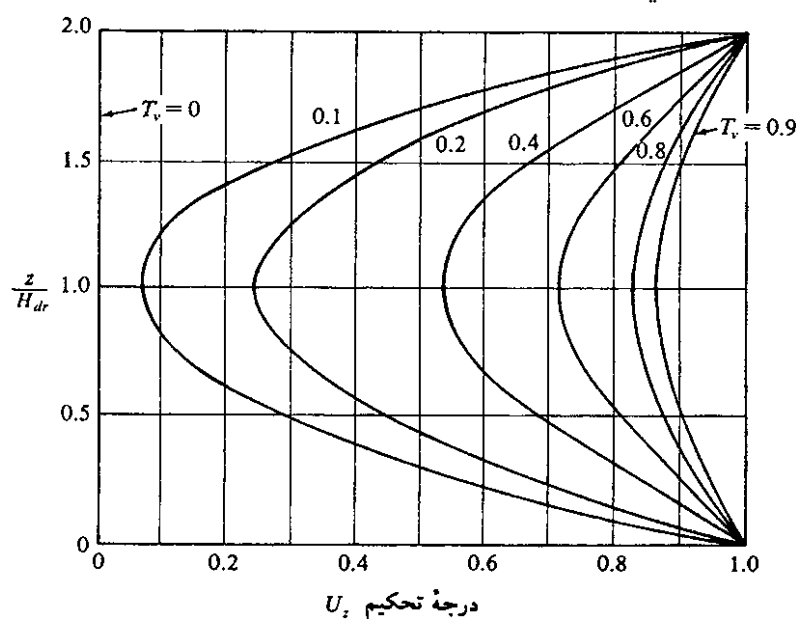
I)  $u_z = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\gamma \Delta p}{M} \left[ \sin\left(\frac{M z}{H}\right) \cdot \exp(-M^2 T_v) \right]$  درجه تحکیم

$M = \frac{\pi}{2} (\gamma m + 1)$

$z$ : نقطه‌ای که فشار آبرای آن تعیین می‌کنیم

$T_v$ : فاکتور زمانی

$H$ : ماکزیمم فاصله زهکشی. که در حالت زهکشی دو طرفه نصف ضخامت لایه است و در زهکشی یک طرفه نصف ضخامت لایه است.



اگر در یک زمان معین بخواهیم مقادیر فشار آب را در ارتفاعهای مختلف بدست آوریم باید در معادله (I) و  $T_v$  را ثابت فرض کرده و ارتفاعهای مختلفی برای  $H$  قرار دهیم تا درجه تحکیم و از روی آن فشار آب بدست آید.

**مثال ۷:** فاکتور زمان ( $T_v$ ) برای یک لایه رسی به ضخامت  $12m$  که از بالا و پایین در حال زهکشی تحت بار وارده می‌باشد  $0.2$  است مطلوبست درجه تحکیم در وسط لایه و در

$\frac{Z}{H} = 0.25, 1/75$  درجه تحکیم برای کل لایه چقدر است؟

**حل:** از روی شکل صفحه ۲۷۶ برای  $T_v = 0.2$

$$\frac{z}{H} = 1 \quad U_z = 0.24 \times 100 = 24\%$$

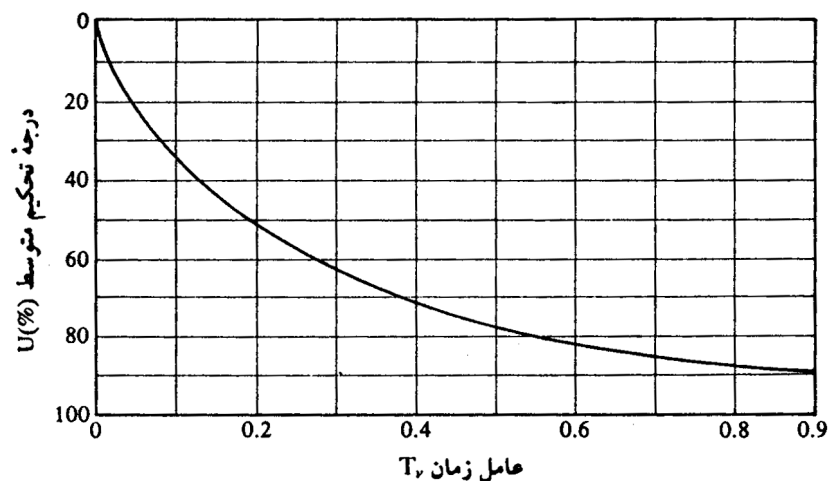
$$\frac{z}{H} = 0.25 \quad U_z = 0.46 \times 100 = 46\%$$

$$\frac{z}{H} = 1/75 \quad U_z = 0.56 \times 100 = 56\%$$

مثال ۸: اگر نشست اولیه نهایی برای لایه رس در مثال ۷ یک متر پیش بینی شده باشد چه

مقدار نشست اتفاق افتاده است (الف)  $T_v = 0.2$  (ب)  $T_v = 0.7$

حل:



$$T_U = 0.2 \rightarrow U_z = 50\%$$

$$U_z = \frac{S}{S_p} \times 100 \quad 50 = \frac{S}{1} \rightarrow S = 0.5^m$$

$$T_v = 0.7 \quad U_z = 85\%$$

$$85 = \frac{S}{S_p} \rightarrow S = 0.85^m$$

مثال ۹: محاسبه نشست برای یک ساختمان نشان می‌دهد که ۶ cm نشست در مدت ۴ سال اتفاق

می‌افتد و از طرفی نشست کل برابر ۲۵ cm خواهد بود این محاسبه بر اساس این فرض صورت گرفته که زهکشی دو طرفه است اگر زهکشی فقط از بالا صورت می‌پذیرد محاسبه کنید.

(الف) نشست کل (ب) زمان لازم برای ۶ cm نشست

حل:

الف) نشست کل به زهکشی یکطرفه با دو طرفه بستگی ندارد پس در این شرایط نیز  $25\text{ cm}$  نشست داریم.

ب)

$$U_z = \frac{S}{S_p} \times 100 = \frac{6}{25} \times 100 = 24\%$$

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{100} \right)^2 = \frac{\pi}{4} (0.24)^2 = 0.45$$

$$C_{v1} = \frac{T_v H_d^2}{t_p} = \frac{0.45 H_d^2}{4}$$

برای دو طرفه

$$C_{v1} = \frac{T_v H_d^2}{t_p} = \frac{1/13 (2H_d)^2}{t_p} = \frac{1/13 \times 4 H_d^2}{t_p}$$

برای یکطرفه

$$C_{v1} = C_{v2} \quad \frac{0.45}{4} H_d^2 = \frac{1/13 \times 4 H_d^2}{t_p} \quad t_p = 16 \text{ year}$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \left( \frac{H_{d1}}{H_{d2}} \right)^2$$

روشهای پیدا کردن  $U_z$  و  $T_v$  بر حسب هم:

(۱) از روی نمودار صفحه ۲۷۷

(۲) جدول

$U_z$	.	۵۰	۹۰	۹۸
$T_v$	.	۰/۱۹۷	۰/۸۴۸	۱/۱۳

(۳) فرمول

$$U\% = 60\% \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U_z}{100} \right)^2$$

$$U\% > 60\% \quad T_v = 1/781 - 0/933 \log(100 - U\%)$$

روش گام به گام برای رسم منحنی نشست - زمان :

نکته مهم: منحنی نشست بضامت بستگی دارد زیرا در فرمول  $S_C$  مقدار  $H$  تغییر کرده پس درصد تحکیم نیز تغییر خواهد کرد پس منحنی نیز تغییر می کند.

$$S_C = \frac{CH}{1+e_0} \log\left(\frac{\bar{p} + \Delta p}{\bar{p}}\right) \quad (1) \text{ محاسبه نشست کل}$$

(2) در نظر گیری یک مقدار مشخص و دلخواه برای زمان  $t$

$$T_V = \frac{C_v t}{H_d^2} \quad (3) \text{ محاسبه فاکتور زمان به یک رابطه موجود}$$

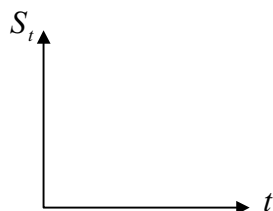
(4) برآورد  $u_z$  از مقدار  $T_V$  بکمک فرمول، نمودار، جدول

$$S_t = U_z \cdot S_e \quad \Leftrightarrow \quad U_z \% = \frac{S_t}{S_C} \times 100 \quad (5) \text{ محاسبه مقدار } S_T \text{ بکمک رابطه}$$

(6) مشخص کردن نقطه ای به مختصات ( $t$  و  $S_t$ ) روی محورهای

(7) تکرار گامهای 2 تا 6

(8) رسم بهترین منحنی عبوری از نقاط.



روشهای محاسبه  $C_V$  از روی نمودارهای حاصله از آزمایش :

الف) لگاریتم زمان

(1) قسمتهای مستقیم تحکیم اولیه و ثانویه را امتداد دهید تا همدیگر را در  $A$  قطع کنند ( $d_{100}$ )

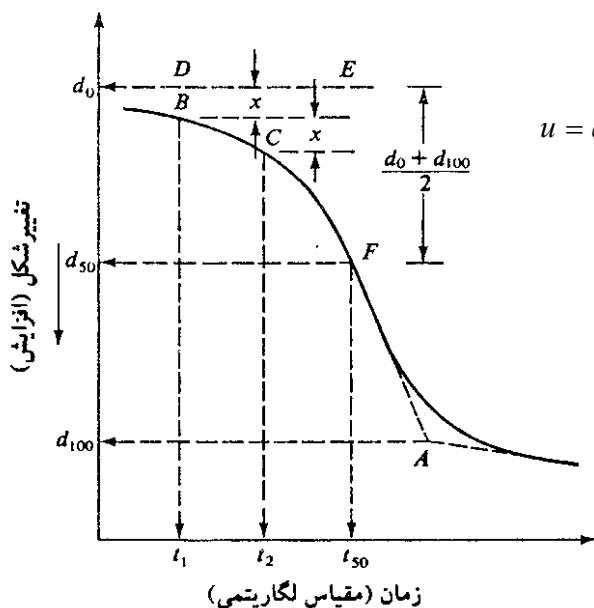
(2)  $t_1$  و  $t_2$  را بگونه‌ای انتخاب کنید  $t_2 = 4t_1$  باشد فاصله عمودی این دو نقطه روی نمودار  $x$  است

(3) فاصله  $x$  از عرض نقطه  $B$  به بالا حرکت کنید عرض مربوطه  $d_0$  است.

$$d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2} \quad (4)$$

(5) از روی نمودار  $t_{50}$  را پیدا کنید

$$u = 50\% \rightarrow T_V = 0.197 \rightarrow C_V = \frac{0.197(Hd)^2}{t_{50}} \quad (6)$$

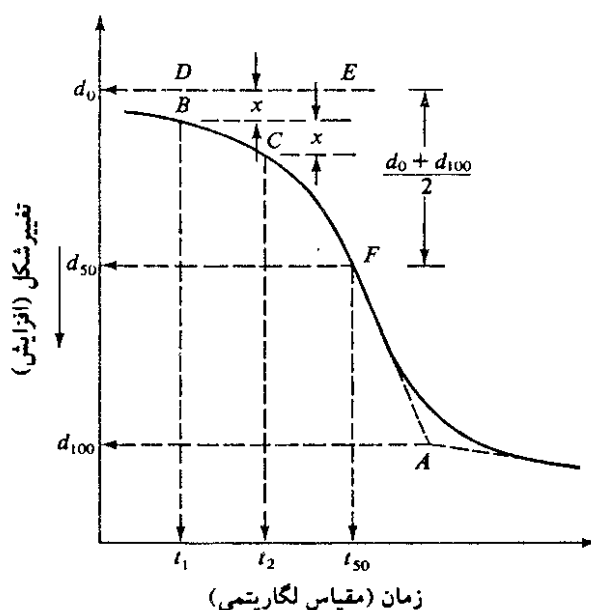


(ب) روش جذر زمان:

- (۱) خط  $AB$  را از میان قسمت ابتدایی منحنی رسم کنید
- (۲) خط  $AC$  را طوری رسم کنید که  $OC = 1/15 OB$  باشد طول نقطه  $D$  که محل تقاطع  $AC$  با منحنی تحکیم است جذر زمان برای ۹۰٪ تحکیم است  $\sqrt{t_{90}}$ .
- (۳) محاسبه  $C_v$

$$t_{90} = 0.148 H_d^2$$

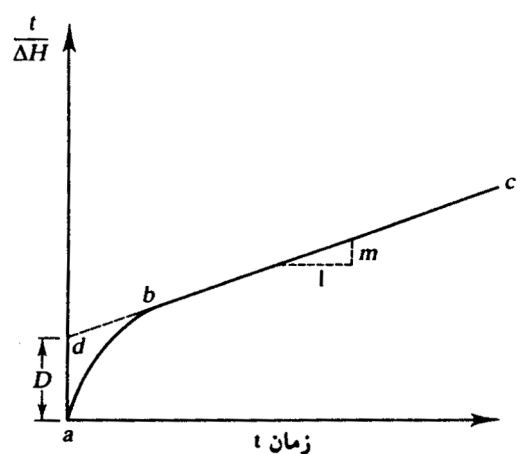
$$C_v = \frac{0.148 H_d^2}{t_{90}}$$



(ج) روش سهمی:

روش سهمی برای تعیین  $C_v$

- (۱) برای نمونه آزمایشگاهی، زمان  $t$  و تغییر شکل  $\Delta H$  نمونه را تعیین نمایید.
- (۲) نمودار  $t/\Delta H$  را در مقابل  $t$  رسم نمایید.
- (۳) شاخه  $Cb$  از نمودار را بعقب ادامه دهید تا محور قائم را در  $d$  قطع نمایید مقدار  $D$  را از روی شکل بخوانید.
- (۴) شیب  $m$  شاخه  $bc$  را تعیین کنید.
- (۵) مقدار  $C_v$  از رابطه زیر محاسبه می شود.

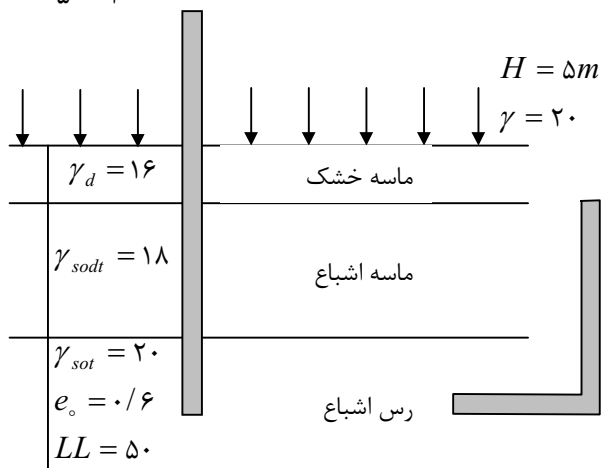


$$C_v = 0.3 \left( \frac{MH_d^2}{D} \right)$$

مثال ۱۰:

در سطح بسیار وسیعی یک خاکریز به ارتفاع ۴ و وزن مخصوص ۲۰ احداث می‌کنیم نشست خاک را وقتی که سطح آب در پیزومتر مرکز رس ۲m بالاتر از زمین باشد، نشست خاک چقدر است؟

$$C_s = \left(\frac{1}{\delta} \approx \frac{1}{10}\right) C_c \quad \gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$$



حل:

$$\bar{p}_o = 1/5 \times 16 + 3/5(18 - 10) + \frac{3}{2}(20 - 10) = 67 \text{ (kpa)}$$

$$\Delta p = 5^m \times 20 = 100 \text{ (kpa)}$$

$$C_s = \frac{1}{\lambda} C_c = \frac{1}{\lambda} (0.009(LL - 10)) = \frac{1}{\lambda} (0.009 \times (50 - 10)) = 0.45$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\bar{p}_o + \Delta p}{\bar{p}_o}\right) = \frac{0.45 \times 300}{1 + 0.6} \log\left(\frac{167}{67}\right) = 3/3 \text{ cm}$$

$$\Delta \sigma = \Delta U_o = \Delta(Z\gamma_w) = \Delta(H\gamma_w) = \gamma_w \Delta H$$

یعنی به محض ریختن خاکریز سطح آب به اندازه  $\Delta H$  بالا می‌آید.

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\gamma_w} = \frac{100}{10} = 10^m$$

بلافاصله پس از احداث خاکریز سطح آب در پیزومتر مرکز لایه رس به اندازه ۸/۵ متر از سطح زمین ارتفاع می‌گیرد. و چون سطح باید به ۲ متر برسد پس ۶/۵ متر آن زایل می‌شود.

$$H_d = 6/5^m$$

$$\Delta u_d = \gamma_w H_d = 10 \times 6/5 = 65$$

$$\Delta u_o = 100$$

$$U_z \% = \frac{\Delta u_d}{\Delta u_o} = \frac{\gamma_w H_d}{\gamma_w H_o} = \frac{6/5}{10} \times 100 = 65\%$$

$$S_t = \frac{65}{100} \times 3/3 \text{ cm} = 2/15 \text{ cm}$$



## فصل نهم

### مقاومت برشی خاکها

#### شکست خاک و رابطه کولمب :

شکست یا گسیختگی در خاک، مانند بیشتر مواد جامد، تحت کشش و یا برش اتفاق می‌افتد. تنش برشی عامل اصلی شکست خاک می‌باشد. لذا در بیشتر پروژه‌های مهندسی خاک، تنها مقاومت برشی خاک مورد توجه قرار می‌گیرد. البته نباید از نظر دور داشت که شکافهایی که بر اثر کشش در توده خاک بوجود می‌آید، در بعضی موارد، عملاً می‌تواند عاملی تعیین کننده در پایداری توده خاک باشد. شکست برشی، موقعی در نقطه‌ای از توده خاک اتفاق می‌افتد که تنش برشی از مقاومت برشی خاک در آن نقطه بیشتر گردد. از آنجا که بر اساس نظر به کولمب مقاومت برشی تابع تنش عمودی است، می‌توان گفت که شکست برشی موقعی در نقطه‌ای از توده خاک شروع می‌شود که در روی یکی از صفحاتی که از آن نقطه می‌گذرد ترکیب تنش عمودی و برشی به یک حد بحرانی رسیده باشد.

کولمب مقاومت برشی خاک  $\tau_f$  را یک تابع خطی از تنش عمودی می‌داند.

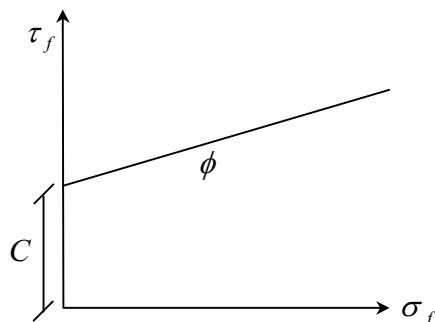
$$\tau_f = C + \sigma_f \cdot \tan \phi$$

$\tau_f$  تنش عمودی در روی صفحه گسیختگی

$C_F$  چسبندگی ظاهری

$\phi$  زاویه اصطحاک داخلی

$C, \phi$  پارامترهای مقاومت برشی

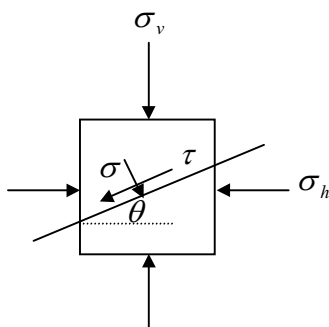


در بخش قبل بر اساس نظریه ترزاقی گفته شد که تنها اسکلت جامد خاک است که در مقابل تنش برشی مقاومت می‌کند. بنابراین

$$\tau'_f = C' + \sigma'_f \tan \phi$$

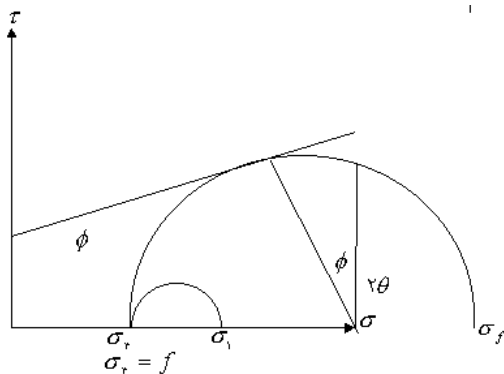
صفحه اصلی: هر صفحه‌ای که تنش برشی در آن صفر است را صفحه اصلی و تنشهای موجود در آن را تنش اصلی گویند.

در صورتیکه دایره مور متشکله از این تنشهای اصلی را روی مختصات  $\tau - \sigma$  رسم کنیم دایره حاصله پوش گسیختگی را قطع می‌کند.



$$\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

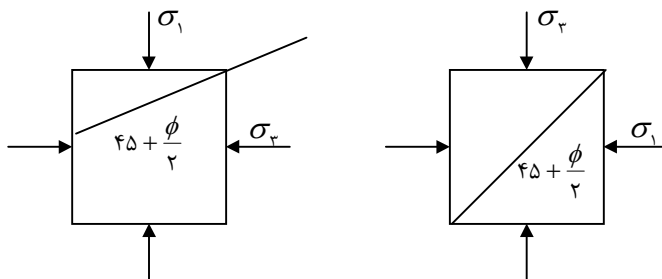


هر نقطه در پیرامون دایره موریک نقطه است که تنشهای برشی و نرمال وارد بر آن از فرمول های ذیل محاسبه می شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_r}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{2} \cdot \cos 2\theta \\ \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{2} \cdot \sin 2\theta \end{array} \right.$$

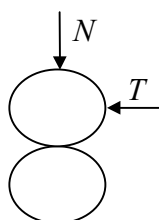
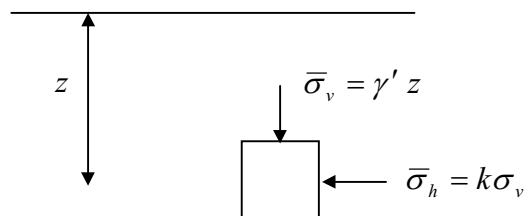
زاویه صفحه خرابی وقتی که لغزش اتفاق می افتد.

$$2\theta = \phi + 90 \rightarrow \theta = 45 + \frac{\phi}{2}$$



فاصله سطح تا وسط المان است

$K < 1$	$\bar{\sigma}_v = \bar{\sigma}_r$ $\bar{\sigma}_h = \bar{\sigma}_1$
$K > 1$	$\bar{\sigma}_h = \bar{\sigma}_1$ $\bar{\sigma}_v = \bar{\sigma}_r$



اگر دو ذره مجزا از خاک را که نیروی قائم بر آنها وارد نمی شود را در نظر بگیریم و نیروی افقی بر آن وارد کنیم نیروی برشی ایجاد نمی شود ولی اگر نیروی قائم نیز اعمال شود بعلت وجود اصطکاک مقاومت برشی ایجاد می شود.

$$T = N \times \tan \phi \quad \rightarrow \quad \tau = \sigma \cdot \tan \phi$$

ضریب اصطحکاک × نیروی عمودی = نیروی افقی

رابطه بین  $\sigma_r, \sigma_1$  در خاک:

از مکانیک خاک

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

از مقاومت مصالح

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{2} \sin 2\theta$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_r}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{2} \cos 2\theta$$

مقدار  $\sigma_r, \sigma_1$  را از حل معادلات همزمان فوق بدست می آوریم.

$$\sigma_1 = \sigma_r + \frac{\sigma_r \tan \phi + C}{\frac{1}{2} \sin 2\theta - \cos^2 \theta \tan \phi}$$

رابطه بین تنش اصلی حداکثر و حداقل در آستانه خرابی:

$$\sigma_1 = \sigma_r \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2C \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\sigma_r = \sigma_1 \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2C \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

هر دایره‌ای که مماس بر خط باشد در معادلات فوق صدق می کند

$$\tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

آزمایشهای مقاومت برشی ( برای تعیین  $\phi, C$  ):

(۱) برش مستقیم: که در این روش بصورت مستقیم در سطح نیرو وارد می کنیم

(۲) سه محوری: از سه طرف نیرو وارد می کنیم

(۳) تک محوری:

(۴) آزمایش صحرایی برش پره برای رس اشباع

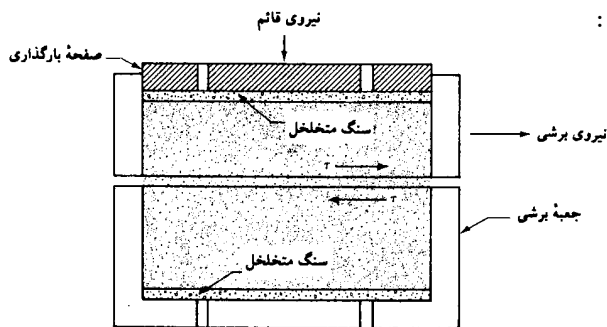
نکته: هر آزمایش برش در دو مرحله انجام می‌شود:

مرحله اول: تحکیم کردن نمونه

مرحله دوم: برش دادن نمونه

(۱) برش مستقیم: دستگاه برش مستقیم دو نیم جعبه دارد

در آزمایش برش مستقیم چهار قرائت داریم:



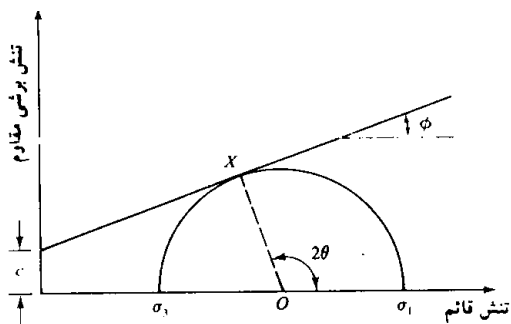
(۱) تنش افقی

(۲) جابجایی افقی

(۳) تنش قائم

(۴) نشست

مراحل مختلف استفاده از نتایج آزمایش:



(۱) یافتن نقاط خرابی

(۲) رسم خط خرابی

(۳) یافتن  $\phi, C$

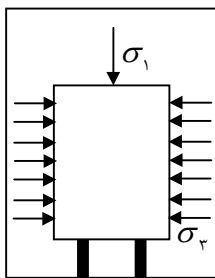
(۲) سه محوری:

در ابتدا که فقط تنش همه جانبه بر نمونه وارد می‌شود

به این دلیل نمونه گسیخته نمی‌شود چون دایره مور

تبدیل به یک نقطه می‌شود زیرا  $\sigma_1 = \sigma_3$

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma \Rightarrow \Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_c$$

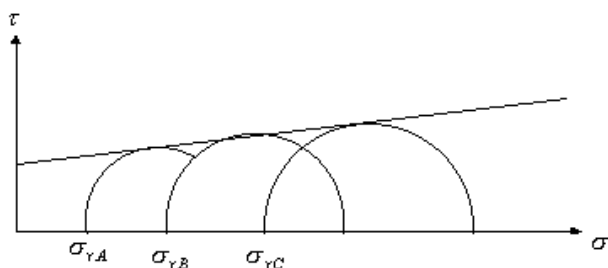


بتدریج  $\sigma_1$  را افزایش می‌دهیم تا خاک گسیخته شود بار میزان میله‌ای که بصورت محوری وارد

می‌شود تفاضل تنش اصلی حداکثر و حداقل که این تفاضل قطر دایره موهر است.

نکته: بر طبق آیین نامه سه نوع دایره باید رسم کنیم

مراحل مختلف استفاده از نتایج آزمایش:



(۱) قدم اول رسم دایره خرابی

(۲) رسم پوش گسیختگی

(۳) یافتن  $\phi, C$

## روشهای مختلف انجام آزمایش سه محوری :

(۱) تحکیم یافته - زهکشی شده (CD) (آهسته S)  $\Delta u = 0$  (جنبه تحقیقاتی دارد)

(۲) تحکیم یافته - زهکشی نشده (CU) (سریع R)  $\Delta u \neq 0$  زهکشی نشده (جنبه عملی دارد)

(۳) تحکیم نیافته - زهکشی نشده UU (خیلی سریع Q)

## توضیح روشها :

(۱) تحکیم یافته - زهکشی نشده (CD):

جهت انجام این آزمایش ابتدا نمونه را تحت فشار همه جانبه تحکیم می‌دهیم که در حین انجام این مرحله زهکشها را باز می‌کنیم تا فشار آب ایجاد در حین انجام این مرحله از سیستم خارج شود. (آب موجود در اطراف محفظه ربطی به آب حفره‌ای داخل نمونه ندارد) پس از اتمام تحکیم تفاوت تنشهای اصلی از طریق میله و کلاهدک بارگذاری به نمونه وارد می‌شود. سرعت افزایش تفاوت تنشهای اصلی باید بقدری آهسته باشد که فشاری در آب منفذی ایجاد نگردد تا پارمترهای مقاومت برشی درست اندازه گیری شوند مدت زمان لازم ممکن است تا دو هفته باشد با توجه به زمان زیادی که این آزمایش نیاز دارد به آن آزمایش آهسته نیز گویند

$$\sigma_c = \sigma_r = \bar{\sigma}_r$$

$$\sigma_1 = \sigma_r + \Delta\sigma = \bar{\sigma}_r + \Delta\sigma$$

(۱) تحکیم یافته - زهکشی نشده (CU):

فشار آب محفظه در حد مورد نظر تنظیم می‌گردد. شیر زهکش باز گذارده می‌شود تا تحت این فشار تحکیم انجام شود. پس از اتمام عمل تحکیم شیر زهکش را بسته و تنشهای تفاضلی به نمونه وارد می‌شود این افزایش تنش تفاضلی ادامه می‌یابد تا نمونه گسیخته گردد. پس از بستن شیر زهکش می‌توان فشار آب منفذی را نیز اندازه گیری کرد. بنابراین می‌توان پارامترهای مقاومت برشی را بر حسب تنش موثر نیز بیان کرد.

در صورتیکه نمونه‌ای تحت تنش همه جانبه  $\sigma_r$  تحکیم بیاورد و سپس زهکشها بسته شوند. و تحت تنش تفاضلی قرار گیرند تنشهای کل و موثر آن بصورت ذیل هستند

$$\sigma_r = \sigma_c \qquad \bar{\sigma}_r = \sigma_c - \Delta u$$

$$\sigma_1 = \sigma_r + \Delta\sigma \qquad \bar{\sigma}_1 = (\sigma_r - \Delta u) + \Delta\sigma$$

۲) آزمایش تحکیم نیافته - زهکشی نشده ( $UU$ ):

که به اختصار به آن  $UU$  گویند در این آزمایش، در تمام مدت شیرهای زهکشی بسته باقی می‌مانند.

در این آزمایش ابتدا محفظه را پر از آب می‌کنند و صبر می‌نمایند تا فشار آن به فشار مورد نظر برسد. بلافاصله پس از تثبیت فشار محفظه در اندازه مورد نظر، تفاوت تنشهای اصلی، از طریق میله و کلاهک بارگذاری به نمونه وارد می‌شود. افزایش تفاوت تنشهای اصلی ادامه می‌یابد تا نمونه گسیخته گردد این آزمایش حدود ۱۵-۱۰ دقیقه طول می‌کشد از این آزمایش برای بدست آوردن پارمترهای مقاومت برشی در شرایط غیر زهکشی ( $C_{cu}, \phi_{cu}$ ) استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_c & \bar{\sigma}_r &= \sigma_r - \Delta u \\ \sigma_1 &= \sigma_r + \Delta \sigma & \bar{\sigma}_1 &= (\sigma_r - \Delta u) + \Delta \sigma\end{aligned}$$

**نکته بسیار مهم:**

در حالت کلی دو  $\Delta u$  داریم یکی در اثر تنشهای تحکیمی (همه جانبه) که همیشه مثبت است و دیگری  $\Delta u$  ایجاد شده حین برش است که هم اکنون است مثبت باشد و هم ممکن است منفی باشد.

باید توجه داشت که  $\Delta u$  ایجاد شده در حین آزمایش  $UU$  حاصل از مجموع  $\Delta u$  های ایجاد شده از برش و تحکیم است که مقادیر این دو را نمی‌توان از هم تفکیک نمود و در مسایل  $UU$  تحکیم نیافته - زهکشی نشده مقدار  $\Delta u$  بیان شده منظور همین مجموع است که در محاسبات وارد می‌شود.

چگونگی تولید فشار آب حفره‌ای (اضافی) در نمونه‌های اشباع خاک حین آزمایش سه محوری

تحکیم شده: یعنی  $\Delta u$  تولید شده صفر است.

تحکیم نشده:  $\Delta u$  ایجاد می‌شود و این فشار مثبت است. مثل زمانی که تازه ساختمان را ساخته‌ایم و هنوز آب از خاک خارج نشده است

تحکیم: تولید  $\Delta u$  در اثر اعمال تنش همه جانبه

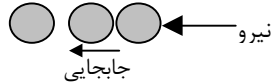
- خاکهای نسبتاً سست (ماسه سست)

- رسهای NC

$\Delta V = 0$  } الف) اگر اجازه زهکشی نباشد  
 $\Delta u^+ \neq 0$  }



$\Delta u = 0$  } ب) اگر اجازه زهکشی باشد  
 $\Delta V^- \neq 0$  } کاهش حجم داریم



برش: در اثر تنش تفاضلی تولید  $\Delta u$  می‌کند

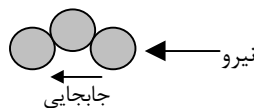
- خاکهای متراکم (ماسه بسیار متراکم)

- رسهای OC

$\Delta V = 0$  } الف) اگر اجازه زهکشی نباشد  
 $\Delta u^- \neq 0$  }



$\Delta V^+ \neq 0$  } ب) اگر اجازه زهکشی باشد  
 $\Delta u = 0$  }



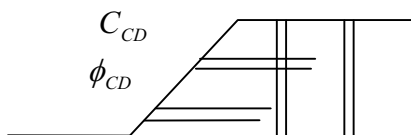
نمودارهای حاصله از نتایج آزمایش :

$CU$   $\Delta u \neq 0$ $\Delta V = 0$		$CD$   $\Delta u = 0$ $\Delta V \neq 0$	
رِس $NC$ ماسه سست	رِس $OC$ ماسه متراکم	رِس $NC$ ماسه سست	رِس $OC$ ماسه متراکم

مثالهای عملی :

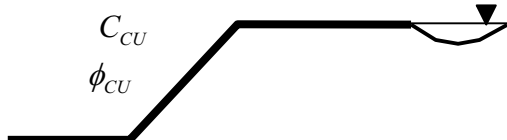
الف)  $CD$  :

مثل خاکهای که در درون خود زهکش دارند و در اثر گذشت زمان زهکش نمی شوند و اضافه فشار تولیدی صفر می شود. یا زمان زیادی از ساخت گذشته باشد. اگر این خاک ماسه باشد همیشه  $CD$  است.



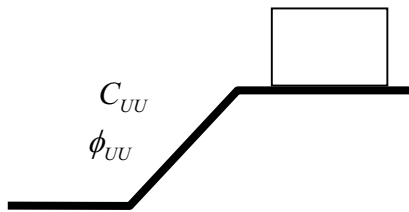
ب)  $CU$  :

این شرایط مربوط به زمانی است که تحکیم صورت گرفته ولی چون در لحظه نشست آب خارج نشده پس  $CU$  است. یا در زمانی که سد ساخته شده و در اثر وزن خود تحکیم یافته است ولی بعد از آگیری تحت برش نیز قرار می گیرد ولی آب موجود در خاک در اینحالت فرصت خروج را پیدا نکرده است.





ج) UU :



چون هنوز از احداث ساختمان زمان زیادی نمی‌گذرد آب خارج نشده است و تحکیم نیز رخ نداده است پس UU است

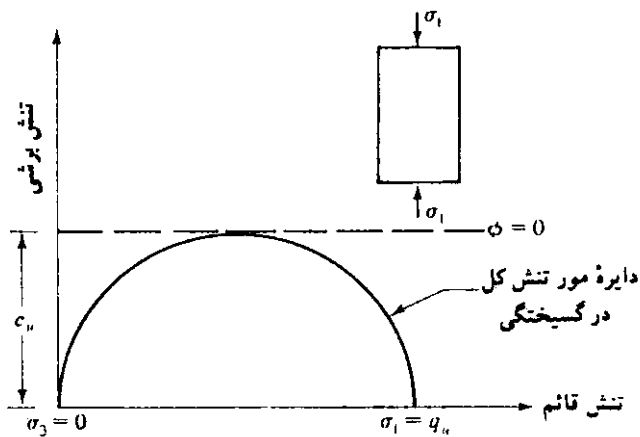
**نکته مهم:** بر روی ماسه‌ها همیشه آزمایش CD انجام می‌دهند زیرا هم تحکیم و هم زهکشی سریعاً انجام می‌شود.

آزمایش تک محوری (فشاری غیر محصور):

این آزمایش در واقع حالت خاصی از آزمایش سه محوری است که در آن فشار محفظه‌ای  $\sigma_c$  برابر صفر است. نتایج این آزمایش بصورت دایره مور و پوش گسیختگی در زیر نشان داده شده است. توجه به این که فقط یک دایره می‌شود رسم کرد آزمایش تنها در مورد خاکهایی که در آنها  $\phi_{CU} = 0$  می‌باشند یعنی خاکهای رس اشباع بدون درز و شکاف انجام می‌شود.

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

$q_u$  فشار محوری روی نمونه در لحظه شکست است.



آزمایش برش پره :

با استفاده از آزمایش برش پره، می‌توان یک نتیجه نسبتاً قابل اعتماد از چسبندگی زهکشی نشده  $C_U (\phi = 0)$  برای خاکهای چسبنده خیلی خمیری بدست آورد. برش پره متشکل از ۴ ورق به ابعاد مساوی می‌باشد که به یک میله پیچشی جوش شده‌اند. برای آزمایش، ابتدا پره در داخل خاک فرو رانده می‌شود. سپس در بالای میله، لنگر پیچشی اعمال می‌شود بطوری که پره با سرعت ثابتی

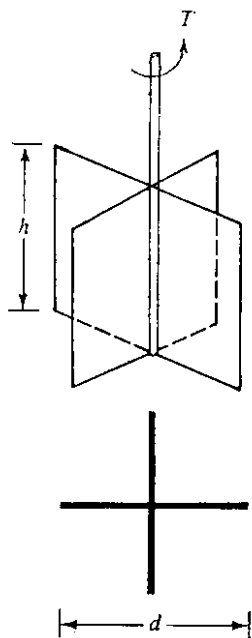
بچرخد. استوانه‌ای از خاک به ارتفاع  $h$  و قطر  $d$  در مقابل لنگر پیچشی مقاومت خواهد کرد تا لحظه‌ای که خاک گسیخته شود. چسبندگی زهکشی نشده خاک بصورت زیر محاسبه می‌شود:

اگر  $T$  حداکثر لنگر پیچشی وارد بر بالای میله پیچشی برای ایجاد گسیختگی باشد، مقدار آن باید مساوی مجموع لنگر مقاوم نیروی برشی در امتداد سطح جانبی، استوانه خاک  $M_S$  و لنگر مقاوم نیروی برشی در بالا و پایین استوانه خاک  $M_e$  باشد.

$$T = \frac{M_S + M_e + M_e}{\text{دو انتها}}$$

لنگر مقاوم  $M_S$  بصورت زیر بدست می‌آید

$$M_S = (\pi dh) \cdot C_U \cdot \left(\frac{d}{\rho}\right)$$



$d$ : قطر پره برش

$h$ : ارتفاع پره برش

$\pi db$ : سطح جانبی

$\frac{d}{\rho}$ : بازوی لنگر

برای محاسبه  $M_e$  محققین توزیع‌های مختلفی برای تحریک مقاومت برشی در دو انتهای استوانه خاک فرض کرده‌اند که به قرار زیر باشند:

(الف) توزیع مثلثی

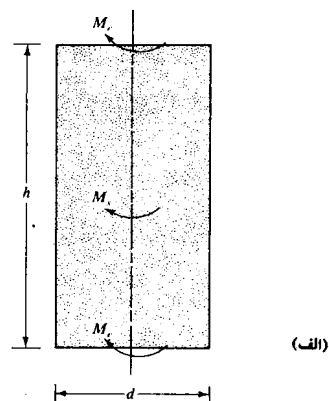
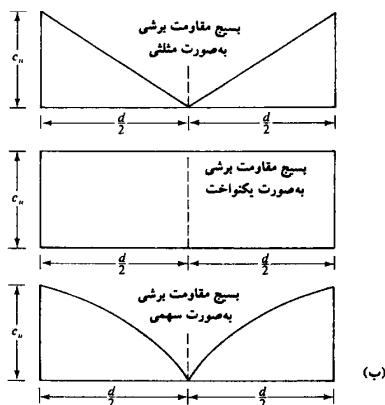
(ب) توزیع یکنواخت

(ج) توزیع سهمی

$$T = \pi C_U \left[ \frac{d^x h}{\rho} + \beta \frac{d^x}{\rho} \right]$$

$$C_U = \frac{T}{\pi \left[ \frac{d^x h}{\rho} + \beta \frac{d^x}{\rho} \right]}$$

$T$  لنگر پیچشی  $C_U$  در لحظه گسیختگی



مثال ۱: آزمایش  $CU$  بر روی یک خاک  $NC$  ( $c = 0$ ) انجام می‌دهیم

$$\Delta u = 16/4 \text{ kpa}$$

$$\Delta p = \Delta \sigma_d = \sigma_1 - \sigma_r = 170/4 \text{ kpa}$$

$$p_c = 276 \text{ kpa} \quad \text{در لحظه شکست}$$

پیدا کنید  $\phi_{cu}, \phi'$  ؟

$$\sigma_r = 276 \text{ kpa}$$

$$\bar{\sigma}_r = \sigma_r - \Delta u = 276 - 168/4 = 107/6 \text{ kpa}$$

$$\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_r + \Delta p = 107/6 + 170/4 = 276 \text{ kpa}$$

$$\sigma_r = 276 \text{ kpa} \quad \sigma_1 = 276 + \Delta p = 446/4 \text{ kpa}$$

$$\sin \phi = \frac{\frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_r)}{\frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_r)} = \frac{276 - 107/6}{276 + 107/6} \quad \phi' = 26/22^\circ$$

$$\sin \phi_{cu} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_r)}{\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_r)} = \frac{446/4 - 276}{446/4 + 276} \quad \phi_{cu} = 13/64^\circ$$

مثال ۲: خاک رس  $NC$  با  $\phi' = 30^\circ, C' = 0$  داریم که روی آن دو آزمایش انجام می‌دهیم.

$$CU \quad P_r = 276 \text{ kpa} \quad \Delta u_f = 179 \quad (\Delta p)_{CU} = ?$$

$$CD \quad P_r = 276 \text{ kpa} \quad \Delta u_f = 179 \quad (\Delta p)_{CU} = ?$$

حل:

**CD**

$$\sigma_1 = \bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - \Delta u = p_r + (\Delta p)_{CD} - \Delta u = p_r + \Delta p_{CD}$$

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_r = p_r - \Delta u = 276 - 0 = 276$$

$$\sin(30^\circ) = \frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_r}{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_r} = \frac{\Delta p_{CD}}{276 \times 2 + \Delta p_{CD}} \quad (\Delta p)_{CD} = 552$$

**CU**

$$\sin \phi' = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{\sigma_1 + \sigma_r} = \frac{\Delta p_{CU}}{2p_r - 2\Delta u + \Delta p_{CU}} = \frac{\Delta p_{CU}}{2 \times 276 + \Delta p_{CU} - 2 \times 179}$$

$$\Delta p_{CU} = 194 \text{ kpa}$$

مثال ۳: آزمایش سه محوری با سرعت کم (CD) بر روی نمونه‌ای از یک خاک درشت دانه انجام

گرفته است  $\frac{\bar{\sigma}_1 f}{\bar{\sigma}_3 f} = \phi$  می‌باشد تنش اصلی موثر مینیمم  $\bar{\sigma}_3 = 100$  است مطلوبست رسم دایره مور و زاویه اصطکاک داخلی  $\phi' = ?$  ؟

$$\bar{\sigma}_{3f} = 100 \text{ kpa}$$

حل:

$$\bar{\sigma}_{1f} = \bar{\sigma}_{3f} = 400 \text{ kpa}$$

$$\sin \phi' = \frac{\frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)}{\frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)} = \frac{400 - 100}{400 + 100} \quad \phi' = 37^\circ$$

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2} = 63/43$$

$$2\theta = 126/86$$

مثال ۴: آزمایش سه محوری CU بر روی یک خاک ما سه‌ای انجام گرفته است فشار جانبی در

ابتدای مرحله برش برابر  $\sigma_3 = 150$  فشار آب منفذی در نقطه شکست  $\Delta U_f = 70$

و  $\frac{\bar{\sigma}_{1f}}{\bar{\sigma}_{3f}} = 3/7$  مطلوبست  $\bar{\sigma}_{1f}$  و  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  و  $\phi_{CU}$  و  $\phi'$  ؟

حل:

$$\sigma_{3f} = p_c = 150$$

$$\Delta u_f = 70 \text{ kpa}$$

$$\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - \Delta u_f = 150 - 70 = 80 \text{ kpa}$$

$$\bar{\sigma}_1 = 3/7 \times \bar{\sigma}_3 = 296 \text{ kpa}$$

$$\sigma_{1f} = \bar{\sigma}_1 + \Delta u_f = 296 + 70 = 366 \text{ kpa}$$

$$\Delta \sigma_{1f} = (\sigma_1 - \sigma_3)_f = (366 - 150) = 216 \text{ kpa}$$

$$\sin \phi_{CU} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)}{\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} = \frac{366 - 150}{366 + 150} \quad \phi_{CU} = 24/75^\circ$$

$$\sin \phi' = \frac{\frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)}{\frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)} = \frac{296 - 80}{296 + 80} \quad \phi' = 35/06$$

**مثال ۵:** نمونه‌ای از یک خاک رس در آزمایش سه محوری تحت فشار سل برابر  $20_{psi}$  تحکیم می‌یابد بعد از این مرحله زهکش‌ها را می‌بندیم و تنش محوری را افزایش می‌دهیم تا در نقطه گسیختگی  $\Delta\sigma_1 = 17_{psi}$  و  $\Delta u = 13_{psi}$  می‌گردد.  
 الف: ( مطلوبست محاسبه  $\phi'$  در معادله  $\tau = \bar{C} + \bar{P} \tan \phi'$  و قتیکه  $\bar{C} = 0$  باشد.  
 ب: ( مطلوبست محاسبه  $\phi_{CU}$   
 ج: ( اگر بعد از تحکیم تحت بار  $20_{psi}$  یک آزمایش آهسته انجام گردد مطلوبست محاسبه  $\Delta\sigma$  در زمان گسیختگی.

حل:

$$\sigma_r = p_c = 20 \text{ psi} \quad \Delta u = 13 \text{ psi} \quad \Delta\sigma_f = \sigma_1 - \sigma_r = 17 \text{ psi} \quad \text{الف)}$$

$$\sigma_1 = \Delta\sigma + \sigma_r = 17 + 20 = 37 \text{ psi}$$

$$\sigma_r = 20 \text{ psi}$$

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - \Delta u_f = 37 - 13 = 24 \text{ psi}$$

$$\bar{\sigma}_r = \sigma_r - \Delta u_f = 20 - 13 = 7 \text{ psi}$$

$$\sin \phi' = \frac{24 - 7}{24 + 7} \quad \phi' = 33/26^\circ$$

$$\sin \phi_{CU} = \frac{37 - 20}{37 + 20} \quad \phi_{CU} = 17/3^\circ$$

$$\sin \phi' = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{\sigma_1 + \sigma_r}$$

$$\sin 33/26 = \frac{\sigma_{1f} - 20}{\sigma_{1f} + 20} = 0/55 \quad \sigma_{1f} = 68/82$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{1f} - \sigma_{rf} = 68/82 - 20 = 48/82$$

**مثال ۶:** یک آزمایش  $R$  ( منظور  $CU$  ) بر روی یک نمونه خاک رس تحت فشار سل  $40_{psi}$  انجام می‌گیرد. نمونه برش داده می‌شود و در حالت گسیختگی  $\sigma_1 - \sigma_r = 24/7$  و  $\Delta u = 24/4$  است. مطلوبست محاسبه  $\phi'$  و  $\phi_{cu}$  و  $\sigma_1 - \sigma_r$  در صورتیکه نمونه در حالت زهکشی شده برش داده می‌شود.

حل:

$$\sigma_r = p_c = 40 \text{ psi}$$

$$\sigma_1 - \sigma_r = 24/7 \rightarrow \sigma_1 = 40 + 24/7 = 64/7$$

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - \Delta u = 64/7 - 24/4 = 40/3 \text{ psi}$$

$$\bar{\sigma}_r = \sigma_r - \Delta u = 40 - 24/4 = 15/6 \text{ psi}$$

$$\sin \phi' = \frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_r}{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_r} = \frac{40/3 - 15/6}{40/3 + 15/6} \quad \phi' = 26/2^\circ$$

$$\phi_{cu} = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{\sigma_1 + \sigma_r} = \frac{64/7 - 40}{64/7 + 40} \quad \phi_{cu} = 13/6^\circ$$

(ج)

$$\phi' = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{\sigma_1 + \sigma_r}$$

$$\sin 26/2 = \frac{\sigma_1 - 40}{\sigma_1 + 40} \quad \sigma_1 = 102/9 \text{ psi}$$

$$\sigma_1 - \sigma_r = 102/9 - 40 = 62/9$$

**مثال ۷:** برای یک خاک رسی عادی تحکیم یافته نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده بشرح

زیر می باشد

$$\text{فشار محفظه ای (سل)} = 140 \text{ kpa}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_r)_f = 263/5$$

مقدار  $\phi' = ?$  را حساب کنید؟

**حل:**

چون رس تحکیم یافته است و برش نیز بصورت زهکشی شده روی آن انجام می شود پس:

$$\Delta u = 0$$

$$\sigma_1 = \bar{\sigma}_1 \quad \sigma_c = p_c = \bar{\sigma}_r = 140 \text{ kpa}$$

$$\bar{\sigma}_r = \sigma_r \quad 263/5 = \sigma_1 - 140$$

$$\sigma_1 = 403/5$$

$$\sin \phi' = \frac{403/5 - 140}{403/5 + 140} \quad \phi' = 29^\circ$$

**مثال ۸:** نتایج دو آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی یک رس اشباع به شرح زیر است.

$$\text{نمونه ۱} \quad \sigma_r = 69 \text{ kpa}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_r)_f = 213 \text{ kpa}$$

$$\text{نمونه ۲} \quad \sigma_r = 120 \text{ kpa}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_r)_f = 258/7 \text{ kpa}$$

حل: چون زهکشی شده پس  $\Delta u = 0$

نمونه ۱

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_r = 69 \text{ kpa}$$

$$(\sigma_v - \sigma_r)_f = 213 \text{ kpa}$$

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_v = 282 \text{ kpa}$$

نمونه ۲

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_r = 120 \text{ kpa}$$

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_v = 258/7 + 120 = 378/7$$

$$\bar{\sigma}_v = \bar{\sigma}_r \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$1) \quad 282 = 69 \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$2) \quad 378/7 = 120 \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$2-1 \quad 96/7 = 51 \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$\boxed{\phi' = 18^\circ}$$

در معادله ۱ می‌گذاریم

$$282 = 69 \tan^2\left(45 + \frac{18}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{18}{2}\right)$$

$$\boxed{C = 54/94}$$