به نام خدا



سایت گروه آموزشی آلم

ابتدایی، راهنمایی، دبیرستان، کنکور و دانشگاه

www.g-alm.ir	
www.g-alm.ir/ac	دانشگاه
www.g-alm.ir/forum	انجمن
www.g-alm.ir/azmoon	آزمون های آلم
www.g-alm.ir/shop	فروشگاه
www.film.g-alm.ir	فیلم های آموزشی

www.AMS.ir
عبدالمتین ستایش



فصل ۷:

نشست خاک

جزوه درس مکانیک خاک (کارشناسی مهندسی عمران)



Website: www.AMS.ir
Email1: a_matin_s@yahoo.com
Email2: Setayesh@outlook.com
Edition: 02, 01/1390
Copyright: Abdul Matin Setayesh
Filename: SoilMech_Ch7

نظرات، پیشنهادات و انتقادات خود را از طریق سایت شخصی و یا پست الکترونیک با مولف در میان بگذارید.

آخرین ویرایش: فروردین ۹۰ (ویرایش دوم)

www.g-alm.ir

فهرست مطالب فصل هفتم:

۱–۷	مقدمه
۲–۷	مبانی نشست تحکیم
۳–۷	آزمون آزمایشگاهی یک بعدی
۴–۷	رسهای عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته
۵–۷	تأثیر دست خوردگی در نمودار تخلخل – فشار
۶–۷	تأثیر سایرعوامل در رابطهٔ **e - log p**
۷–۷	محاسبه نشست تحکیم اولیه یک بعدی
۸–۷	نشانه فشردگی
۹–۷	نشانه تورم
۱۰–۷	نشست به علت تحکیم ثانویه
۱۱–۷	سرعت تحکیم
۱۲–۷	محاسبه نشست تحکیم زیر یک شالوده
۱۳–۷	نشست آنی (ارتجاعی)
۱۴–۷	محاسبه نشست آنی بر پایه تئوری الاستیسیته
۱۵–۷	نشست کل شالوده
–	

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

۷-۱ مقدمه

با تأثیر سربار، تنشهای فشاری در لایه های خاک به وجود آمده و باعث فشرده شدن آن می شود. فشردگی خاک ناشی از تغییر شکل فشاری و جابجایی ذرات خاک، رانده شدن هوا و آب از حفرات خاک و عوامل دیگر می باشد. در یک خاک بخصوص، یک و یا تعدادی از عوامل فوق ممکن است مشارکت داشته باشند. از آنجایی که فشرده شدن[1] خاک باعث نشست سازه واقع بر روی آن می شود، از نقطه نظر مهندسی به این پدیده، نشست[2] خاک میگویند. درحالت کلی نشست های خاک به دو گروه زیر تقسیم می شوند:

۱- نشست تحکیم[3] که ناشی از تغییر حجم خاک اشباع به علت رانده شدن آبهای موجود در حفرات است.
۲- نشست آنی[4] که ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک خشک و یا خاکهای مرطوب و اشباع بدون هرگونه تغییری در میزان آب می باشد. محاسبات نشست آنی معمولاً بر پایه روابط به دست آمده از تئوری الاستیسیته قرار دارد.

در این فصل مفاهیم پایه برای تخمین نشستهای تحکیم و آنی در لایه های خاک تحت تأثیر سربارهای خارجی ارائه می شود.

۷-۲ مبانی نشست تحکیم

وقتی که یک لایه خاک اشباع تحت تأثیر افزایش تنش قرار گیرد، فشار آب حفره ای به طور ناگهانی افزایش می یابد. درخاکهای ماسه ای که نفوذ پذیری بالاست، زهکشی ناشی از افزایش فشار آب حفره ای سریعاً انجام میشود. زهکشی آب حفره ای همراه با کاهش حجم توده خاک می باشد که نتیجه آن ایجاد نشست است. به علت زهکشی سریع آب حفره ای در خاکهای ماسه ای، نشست تحکیم و آنی در آنها به طور همزمان رخ می دهد.

وقتی که یک لایه خاک رس اشباع ، تحت تأثیر افزایش تنش قرار گیرد ، ابتدا نشست آنی رخ میدهد. اما از آنجایی که ضریب نفوذ پذیری رس به طور قابل ملاحظه ای کوچکتر از ضریب نفوذ پذیری ماسه است، زهکشی آب حفره ای سریعاً انجام نشده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره ای ناشی از بارگذاری به طور تدریجی و در یک زمان طولانی رخ میدهد. بنابراین کاهش حجم خاک که از این به بعد آن را تحکیم می نامیم به مدت طولانی بعد از بارگذاری و نشست آنی ادامه خواهد داشت. درخاکهای رسی نرم نشست تحکیم چندین برابر نشست آنی است. شکل ۷-۱ نحوه تبدیلات اضافه تنش در توده خاک اشباع را به هنگام نشست تحکیمی نشان می دهد:

حالتی را در نظر بگیرید که یک لایه رس اشباع به ضخامت **H** که بین دو لایه ماسه ای محدود است تحت افزایش آنی تنش کل $\Delta\sigma$ قرار گیرد. این افزایش تنش کل به آب حفره ای و ذرات خاک انتقال خواهد یافت. این بدان معنی است که تنش کل $\Delta\sigma$ به نسبتی بین تنش موثر و فشار آب حفره ای تقسیم میشود. با استفاده از اصل تنش موثر می توان نوشت:

---

[1] - Compressibility of soil
[2] - Settlement
[3] - Consolidation settlement
[4] - Immediate settlement

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

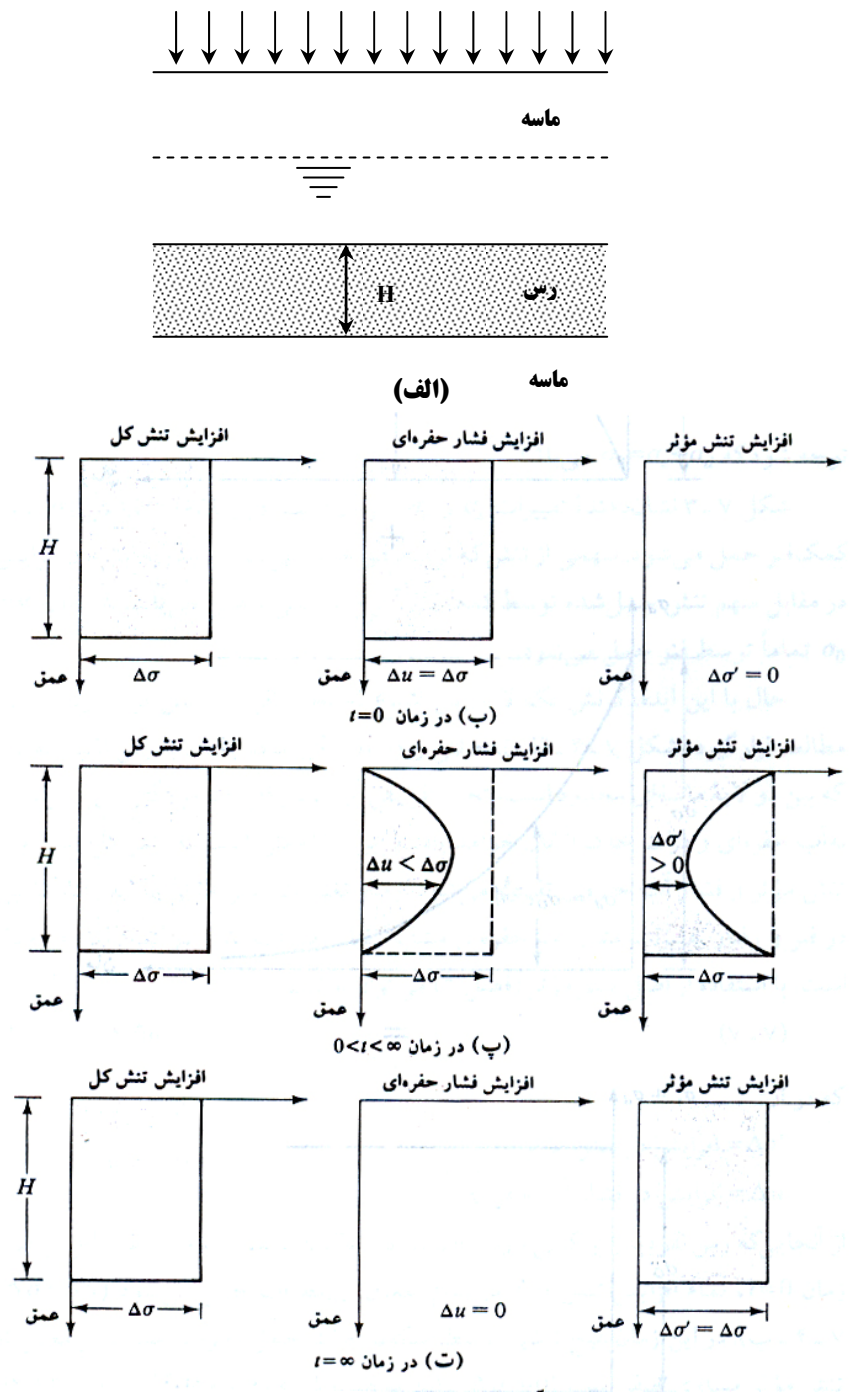
$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \qquad (۱-۷)$$

که در آن:

$\Delta\sigma'$ = افزایش در تنش موثر

Δu = افزایش در فشار آب حفره ای

از آنجایی که رس نفوذ پذیری کمی دارد و آب نیز در مقایسه با اسکلت خاک غیرقابل تراکم است در زمان $t = 0$، تمام افزایش تنش $\Delta\sigma$ در تمام اعماق توسط آب حمل می شود $(\Delta\sigma = \Delta u)$ (شکل ۷-۱- ب). در این زمان هیچ تنشی توسط اسکلت خاک حمل نخواهد شد. بدین معنی که افزایش تنش موثر مساوی صفر است $(\Delta\sigma' = 0)$.



شکل ۷–۱ تغییرات تنش کل، فشار آب حفره ای و تنش موثر در یک لایه رس با زهکشی از بالا و پایین در نتیجه افزایش تنش کل $\Delta\sigma$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

بعد از اعمال افزایش تنش $\Delta\sigma$ به لایه رس آب موجود در حفرات فشرده شده و از هر دو طرف به سمت ماسه ای زهکشی می شود. با این فرآیند اضافه فشار حفره ای در هر عمق در لایه رسی به تدریج کاهش می یابد و با همین نرخ تنش حمل شده توسط ذرات جامد خاک (تنش موثر) افزایش می یابد. بنابراین در زمان $0 < t < \infty$ داریم:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \qquad (\Delta\sigma' > 0 \text{ و } \Delta u < \Delta\sigma)$$

لیکن مقادیر $\Delta\sigma$ و Δu در اعمال مختلف بسته به طول مسیر زهکشی آن نقطه تا لایه تحتانی و یا فوقانی متفاوت است (شکل ۷-۱-پ).

به طور نظری در زمان $t = \infty$، تمام فشارهای آب حفره ای اضافی با زهکشی تمام نقاط لایه رسی زایل شده و $\Delta u = 0$ می گردد. حال تمام افزایش تنش $\Delta\sigma$ توسط اسکلت خاک حمل می شود (شکل ۷-۱- ت). بنابراین:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma'$$

فرآیند تدرجی زهکشی تحت تأثیر اضافه بار و انتقال فشار اضافی آب حفره ای به تنش موثر باعث نشست تابع زمان لایه رسی می شود.

۷-۳ | آزمون آزمایشگاهی یک بعدی

روش آزمایشگاهی تحکیم یک بعدی اول بار توسط ترازقی پیشنهاد شد. این آزمایش در یک تحکیم سنج که ادئومتر نامیده میشود انجام میگردد. ادئومتر در شکل ۷-۲ به طور شماتیک نشان داده شده است. 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 می شود. قطر نمونه معمولاً ۲/۵ اینچ (۶۳/۵ میلیمتر) و ضخامت آن یک اینچ (۲۵/۴ میلیمتر) است. بارگذاری نمونه به وسیله یک اهرم اعمال شده و میزان فشردگی توسط یک میکرومتر عقربه ای اندازه گیری می شود. در حین آزمایش نمونه در داخل آب نگهداری می شود. هر بارگذاری برای مدت ۲۴ ساعت حفظ می شود. بعد از آن میزان بار معمولاً دو برابر می گردد. با دو برابر کردن بار، میزان فشردگی و اندازه گیری فشردگی ادامه می یابد. در انتهای آزمایش، وزن خشک نمونه آزمایشی تعیین می گردد.

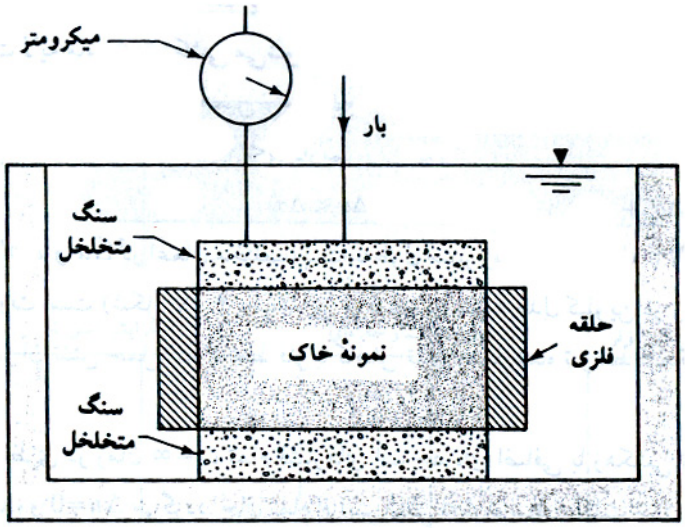
شکل عمومی نمودار تغییر شکل نمونه در مقابل زمان، **برای هر افزایش بار** (به این نکته به دقت توجه نمایید) مطابق شکل ۷-۳ می باشد. در روی نمودار سه مرحله مجزا قابل تشخیص است:

مرحله ۱: فشردگی اولیه که اکثرا به علت پیش بارگذاری است .
مرحله ۲: تحکیم اولیه که طی آن به علت زهکشی آب حفره ای ، فشار اضافی آب حفره ای به تدریج به تنش مؤثر تبدیل است.
مرحله ۳: تحکیم ثانویه که بعد از اتمام زایل شدن فشار اضافی آب حفره ای رخ میدهد و علت آن به وجود آمدن تغییر شکلهای پلاستیک در اسکلت خاک است.

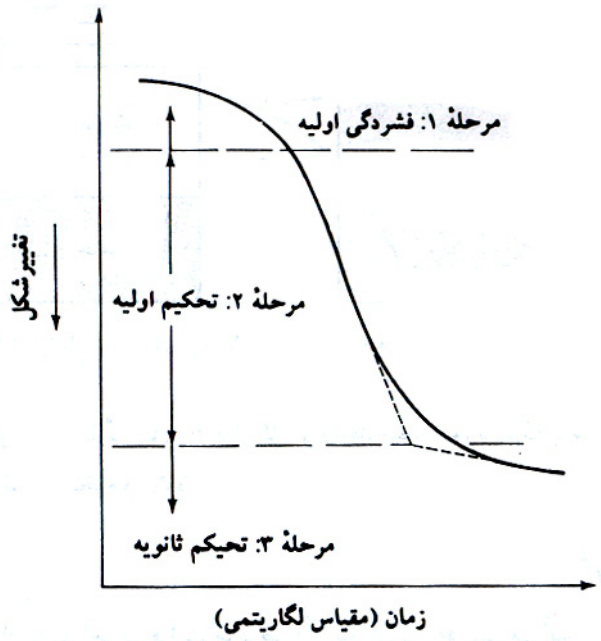
www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷–۲ دستگاه تحکیم یک بعدی (ادئومتر)



شکل ۷–۳ نمودار تغییر شکل – زمان در حین تحکیم برای افزایش بار معلوم

بعد از تعیین نمودارهای تغییر شکل – زمان برای بارگذاری های مختلف درآزمایشگاه لازم است تغییرات نسبت تخلخل نمونه با فشار مورد مطالعه قرار گیرد. در زیر روش گام به گام برای انجام عمل فوق تشریح می شود:

گام ۱ – نسبت تخلخل اولیه نمونه (e_o) را به صورت زیر محاسبه نمایید (شکل ۷-۴):

$$e_o = \frac{V_{vo}}{V_s} \qquad (۲-۷)$$

که در آن :

V_{vo} = حجم حفرات در ابتدای آزمایش

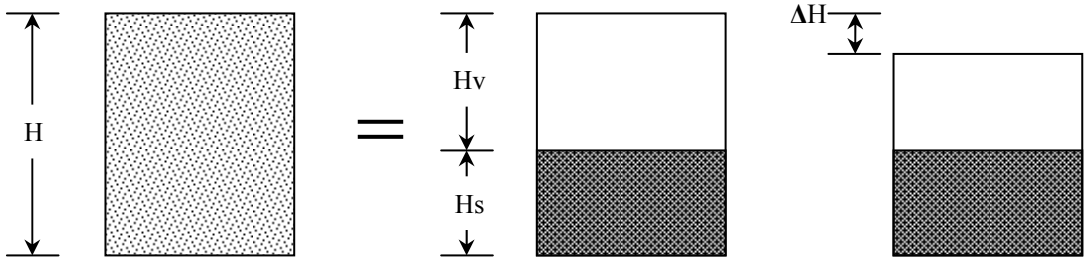
V_s = حجم دانه های جامد

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

برای بدست آوردن نسبت تخلخل اولیه نیاز به وزن دانه های جامد داریم ولی برای تعیین وزن دانـه هـای جامـد بایـد منتظـر بمانیم تا آزمایش تحکیم به اتمام برسد پس از اتمام آزمایش نمونه را در گرمخانه (اون) خشک نموده و وزن می نماییم.



شکل ۷ – ۴ تغییرات ارتفاع نمونه در آزمایش تحکیم یک بعدی

پس از تعیین وزن مواد جامد، حجم دانه های جامد به صورت زیر به دست می آید:

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_w \cdot G_s} \qquad (۳-۷)$$

که در رابطه فوق:

W_s = وزن خشک نمونه که در آخرین مرحله تعیین کردیم

G_s = چگالی دانه ها

γ_w = وزن مخصوص آب

و V_{vo} که حجم حفرات در ابتدای آزمایش است، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_{vo} = V_o - V_s \qquad (۴-۷)$$

که در رابطه فوق V_o = حجم نمونه در ابتدای آزمایش است.

گام ۲ – پس از بدست آوردن e_o به روش فوق، کاهش نسبت تخلخل نمونه به ازای هر بارگذاری (Δe) را به کمک رابطه زیـر می توان بدست آورد:

$$\frac{\Delta e}{1+e_o} = \frac{\Delta h}{H_o} \qquad (۵-۷)$$

که در این رابطه:

ΔH = نشست نمونه (عقربه میکرومتر) تا پایان روز i ام

H_o = ارتفاع اولیه نمونه خاک

e_o = تخلخل اولیه نمونه

اثبات رابطه فوق:

$$\left.\begin{aligned} e_o = \frac{V_v}{V_s} = \frac{A\times H_v}{A\times H_s} = \frac{H_v}{H_s} = \frac{H-H_s}{H_s} = \frac{H}{H_s} - 1 \rightarrow 1+e_o = \frac{H}{H_s} \\ \Delta e_i = e_o - e_i \rightarrow e_i = \frac{H_v - \Delta H}{H_s} = \frac{H_v}{H_s} - \frac{\Delta H}{H_s} = e_o - \frac{\Delta H}{H_s} \rightarrow \Delta e = e_o - e_i = \frac{\Delta H}{H_s} \end{aligned}\right\} \rightarrow \frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta e}{1+e_o} \qquad (۶-۷)$$

گام ۳ – با در دست داشتن Δe می توانیم نسبت تخلخل در پایان روز i ام را به صورت زیر بدست آوریم:

$$\Delta e = e_o - e_i \qquad (۷-۷)$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

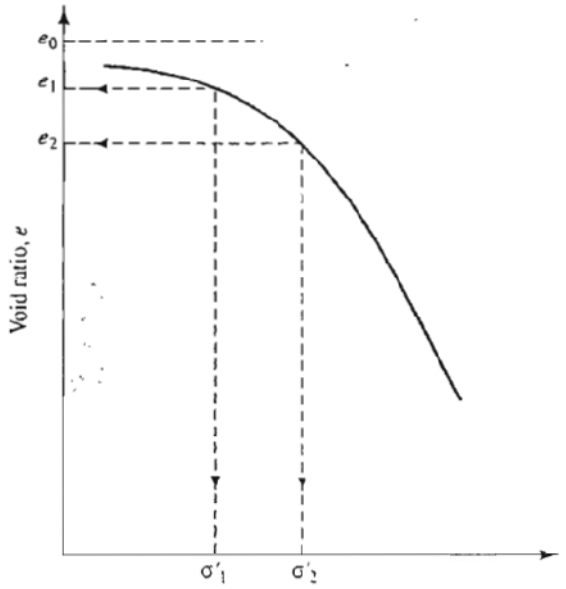
www.g-alm.ir

نکته :

ΔH و Δe نشست و کاهش نسبت تخلخل تا پایان روز i ام می باشند. حال اگر روز i ام را آخرین روز آزمایش تحکیم در نظر بگیریم، در آنصورت ΔH و Δe به ترتیب نشست و کاهش نسبت تخلخل در پایان عمل تحکیم خواهند بود.

۷–۴ رسهای عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته

قسمت فوقانی نمودارنسبت تخلخل e در مقابل $\log p$، درشکل ۷ – ۵ ، یک منحنی با شیب ملایم است که با یک قسمت تقریباً خطی و شیب تند دنبال میشود. این موضوع را این طور می توان توجیه نمود:



شکل ۷–۵ منحنی تیپ برای نسبت تخلخل e در مقابل لگاریتم فشار تجمعی p

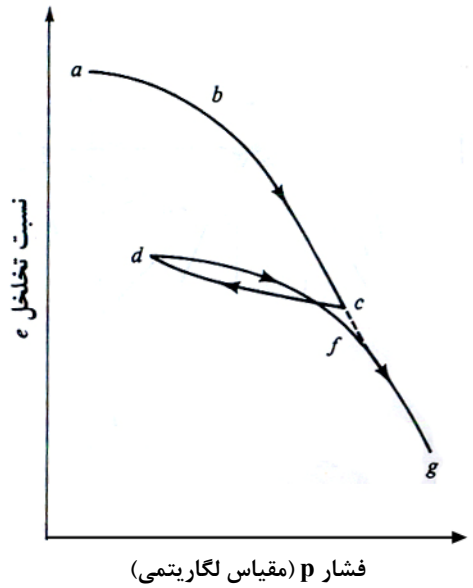
از نقطه نظرتاریخچه زمین شناسی نمونه به دست آمده از عمق تحت تأثیر فشار سربار مؤثری قرار داشته و تحت آن تحکیم یافته است. حداکثرفشار سربار مؤثر ممکن است مساوی و یا بزرگتر از فشار سربار موجود در هنگام نمونه گیری باشد . کاهش سربار ممکن است دارای فرآیند طبیعی (مثل فرسایش) و یا فرآیند انسانی باشد. در هر صورت پس از نمونه گیری، نمونه از فشار سربار موجود نیز آزاد شده و در نتیجه مقداری منبسط میشود. وقتی که این نمونه تحت آزمایش تحکیم قرار گیرد، تا جایی که فشار وارده مساوی فشار سربار مؤثر صحرایی در گذشته باشد، مقدار فشردگی (و یا تغییر در نسبت تخلخل) کوچک خواهد بود و در واقع فقط انبساط ایجاد شده به علت آزاد شدن فشار سربار در هنگام نمونه گیری جبران میشود . وقتی که فشار کل مؤثربرنمونه در هنگام آزمایش از فشار سربار مؤثر در گذشته باشد ، تغییرات تخلخل بزرگتر شده و نمودار در مقابل خطی با شیب تندتر خواهد شد.

موضوع فوق را میتوان در آزمایشگاه با انجام باربرداری در فشاری بزرگتر از فشار سربار مؤثر،اثبات کرد. نمودار تخلخل لگاریتم فشار برای چنین تحقیقی مشابه شکل ۷ – ۶ خواهد شد که در آن شاخه cd نشان دهنده باربرداری و شاخه dfg نشان دهنده فرآیند بارگذاری مجدد است.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷ – ۶ نمودار $\log p$ در مقابل که نشان دهنده تأثیر باربرداری و بارگذاری مجدد است.

برپایه مطالب ارائه شده از نقطه نظر تاریخچه سربار مؤثر، رسها به دو گروه طبقه بندی می شوند:

۱. رسهای عادی تحکیم یافته که برای آنها فشار سربار موجود حداکثر فشار سربار مؤثری است که نمونه در گذشته تحت تأثیر آن بوده است .
۲. رسهای پیش تحکیم یافته که فشار سربار موجود بر روی آنها ، کمتر از فشار سربار حداکثری است که در گذشته نمونه آن را تجربه کرده است . حداکثر فشار سربار مؤثر در گذشته فشار پیش تحکیم نامیده می شود .

کاساگرانده (۱۹۳۶) یک روش ترسیمی ساده برای تعیین فشار پیش تحکیم P_c در روی نمودار آزمایشگاهی e در مقابل $\log p$ ارائه داده که با توجه به شکل ۷ – ۷، مطابق زیر است:

۱. با بررسی چشمی در روی نمودار e در مقابل $\log p$ نقطه ای مثل a تعیین نمایید که دارای حداقل شعاع انحنا باشد.
۲. خط افقی ab را رسم کنید.
۳. مماس ac را در نقطه a بر منحنی رسم کنید.
۴. خط cd یعنی نیمساز زاویه bac را رسم کنید.
۵. قسمت خطی gh نمودار e در مقابل $\log p$ را به سمت عقب ادامه دهید تا ad را در f قطع کند. طول نقطه f فشار پیش تحکیم یافته است.

نسبت پیش تحکیم (OCR) برای یک خاک به صورت زیر تعریف میشود:

$$OCR = \frac{P_c}{P} \qquad (۸-۷)$$

که در آن:

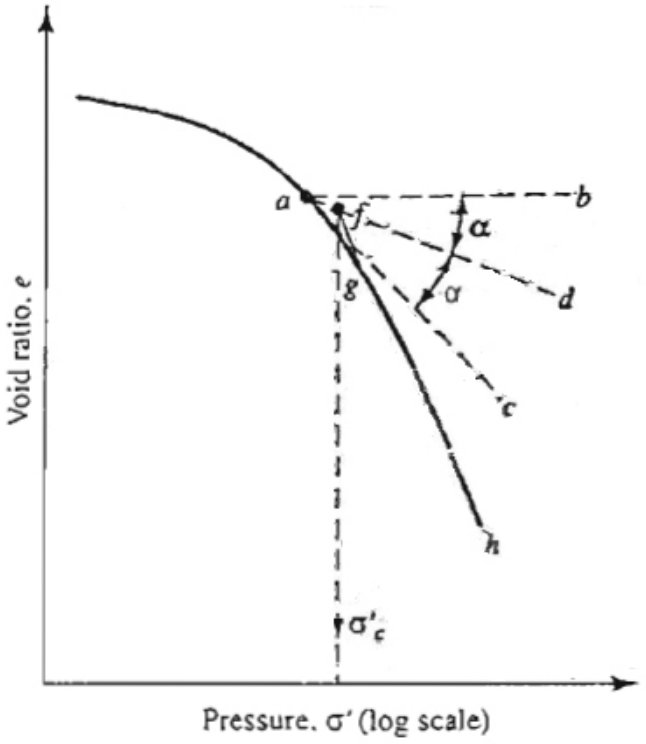
P_c = فشار پیش تحکیم در روی نمونه

P = فشار سربار موجود در روی نمونه

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷ – ۷ روش ترسیمی برای تعیین فشار پیش تحکیمی

۷–۵ تأثیر دست خوردگی در نمودار تخلخل – فشار

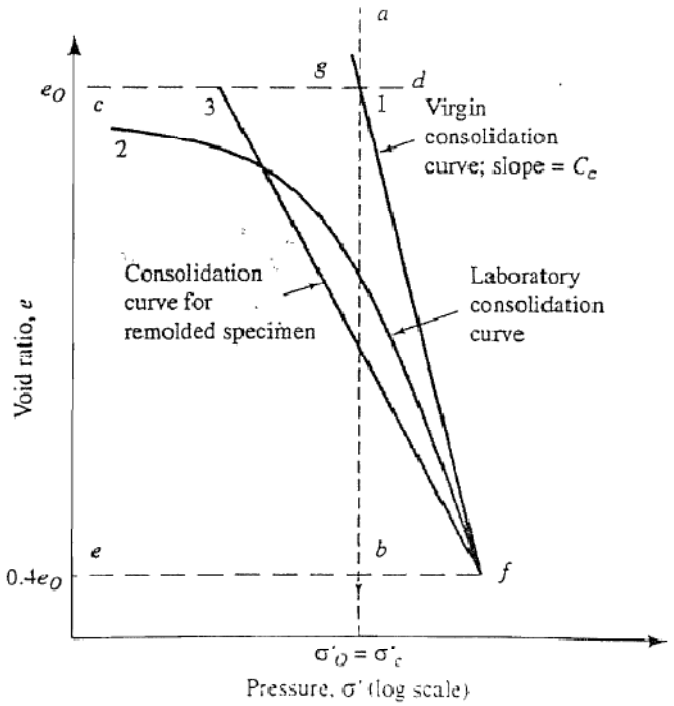
دست خوردگی نمونه در روی نمودار تخلخل – فشار تأثیر می گذارد . برای یک خاک رس عادی تحکیم یافته با حساسیت کم تا متوسط (شکل ۷ – ۸) تحت فشار سربار مؤثر P_o با نسبت تخلخل e_o، تغییرات نسبت تخلخل با افزایش فشار در صحرا تقریباً به صورت منحنی ۱ خواهد بود که منحنی تحکیم بکر نامیده میشود و تقریباً در روی مقیاس نیمه لگاریتمی به صورت خط مستقیم است. لیکن منحنی تحکیم آزمایشگاهی برای یک نمونه نسبتا دست نخورده از همان خاک مطابق منحنی ۲ خواهد بود که در سمت چپ منحنی ۱ قرار دارد. اگرنمونه کاملا به هم خورده و آزمایش تحکیم روی آن انجام شود منحنی تحکیم مطابق منحنی شماره ۳ خواهد بود. منحنی های ۱ و ۲ و ۳ یکدیگر را تقریباً در نسبت تخلخل $e = 0.4e_o$ قطع میکنند (ترزاقی و پک ۱۹۶۷).

برای یک خاک رسی پیش تحکیم یافته با حساسیت کم تا متوسط که تحت فشار پیش تحکیم P_c قرار داشته است (شکل ۷ – ۹) و فشار سربار موجود و نسبت تخلخل نظیر به ترتیب مساوی P_o و e_o میباشد منحنی تحکیم صحرایی تقریباً دارای مسیر cbd خواهد بود. اشمرتمن (۱۹۵۳) چنین نتیجه گیری کرد که شیب خط cb، که مسیر تحکیم مجدد صحرایی است تقریبا مشابه شیب منحنی باربرداری fg است.

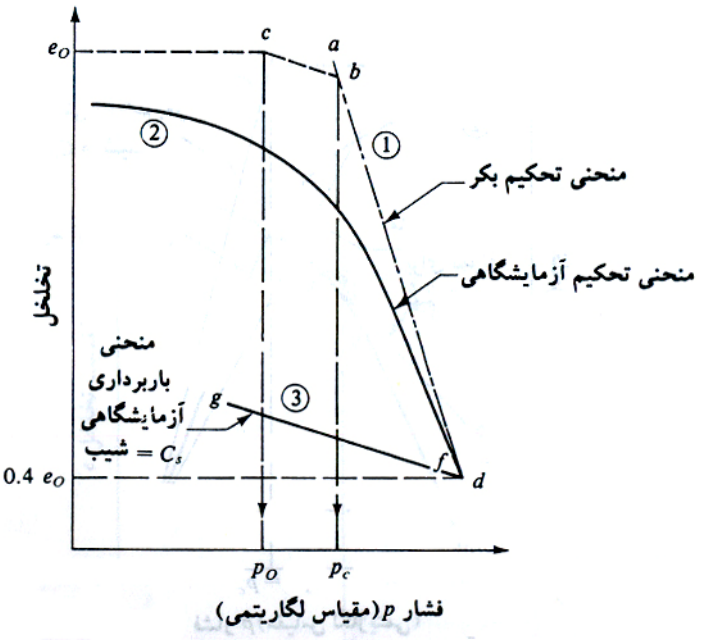
www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷ – ۸ خصوصیت تحکیم رس عادی تحکیم یافته با حساسیت کم تا متوسط



شکل ۷ – ۹ خصوصیت تحکیم رس پیش تحکیم با حساسیت کم تا متوسط

۷–۶ تأثیر سایرعوامل در رابطهٔ e - log p

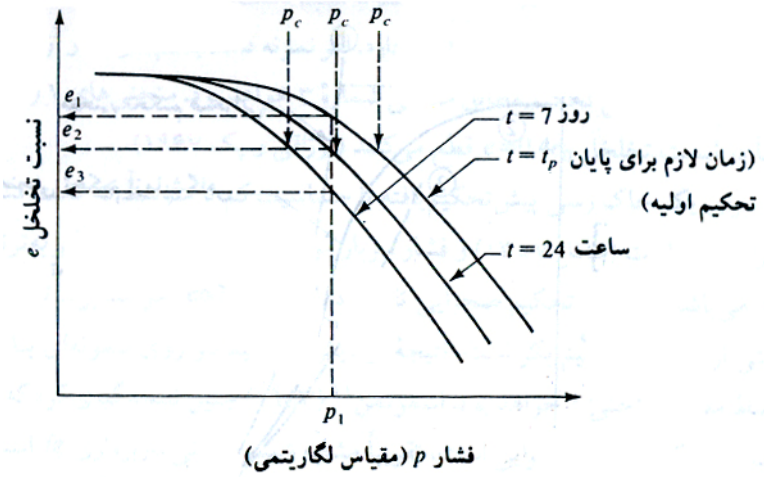
در ابتدای فصل اشاره شد که در آزمایش تحکیم مرسوم هر بارگذاری روی نمونه به مدت ۲۴ ساعت حفظ میشود. بعد از آن بار روی نمونه دو برابر میشود. این سوال پیش می آید که چه تغییری در روی نمودار **e** در مقابل **log p** پیش می آید اگـر (الـف) زمان حفظ بار روی نمونه غیر از ۲۴ ساعت باشد (ب) با ثابت بودن تمام عوامل نسبت افزایش بار $\Delta p/p$ غیر از ۱ انتخاب شـود (ΔP =افزایش بار بر واحد سطح نمونه، p =بار موجود در روی نمونه بر واحد سطح).

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

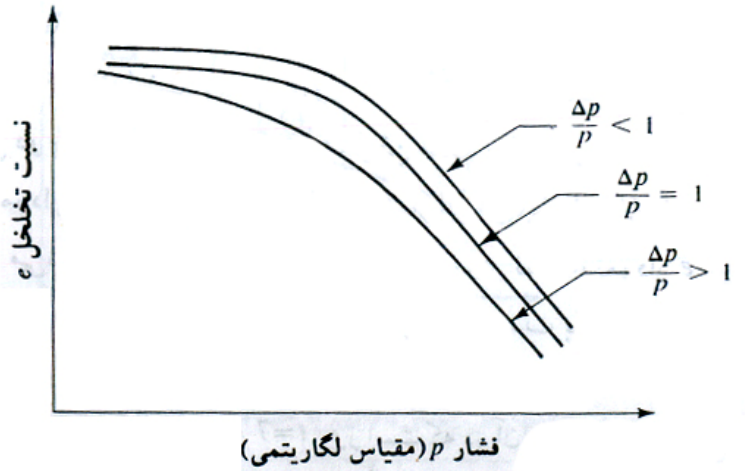
کرافورد (۱۹۶۴) آزمایشهای متعددی روی خاک رس لدا انجام داد که در آنها میزان بار در دو مرحله پی در پی دو برابر می شد ($\Delta p/p = 1$) ، لیکن مدت حفظ بار در روی نمونه ها متغیر بود. در شکل ۷ – ۱۰ نمودارهای **e** در مقابل **log p** حاصل از این آزمایشها نشان داده شده است. از این منحنی ها مشاهده می شود که با افزایش زمان حفظ بار در روی نمونه، نمودار **e** در مقابل **log p** به تدریج به سمت چپ حرکت می کند. بدین معنی که برای هر شدت بار وارد بر روی نمونه **p**، نسبت تخلخل در انتهای تحکیم، با افزایش **t**، کاهش می یابد. برای مثال در شکل ۷ – ۱۰، در $p = p_1$ ، $e = e_2$ برای $t = 24$ ساعت و $e = e_3$ برای $t = 7$ روز است که در آن $e_3 < e_2$ می باشد.



شکل ۷ – ۱۰ تأثیر دوام بار در روی نمودار نسبت تخلخل – فشار

علت چنین تغییراتی در روی منحنی **e** در مقابل **log p** این است که با افزایش زمان **t** مقدار تحکیم ثانویه نمونه افزایش می یابد که این موضوع باعث کاهش نسبت تخلخل **e** می شود. توجه شود که در منحنی های شکل ۷ – ۱۵، مقادیر نسبتاً مختلفی برای فشار پیش تحکیم p_c به دست می آید. با کاهش زمان **t** مقدار p_c افزایش می یابد.

نسبت افزایش بار $\Delta p/p$ نیز در روی منحنی **e** در مقابل **log p** تأثیر می گذارد. این موضوع توسط لئوناردو اتشافل دقیقاً مورد بحث قرار گرفته است (۱۹۶۴). شکل ۷ – ۱۱ تغییرات منحنی **e** در مقابل **log p** را برای مقادیر مختلف $\Delta p/p$ نشان میدهد. با افزایش تدریجی $\Delta p/p$ منحنی های **e** در مقابل **log p** به تدریج به سمت چپ حرکت می کنند.



شکل ۷ – ۱۱ تأثیر نسبت افزایش بار در منحنی های e در مقابل log p

www.AMS.ir

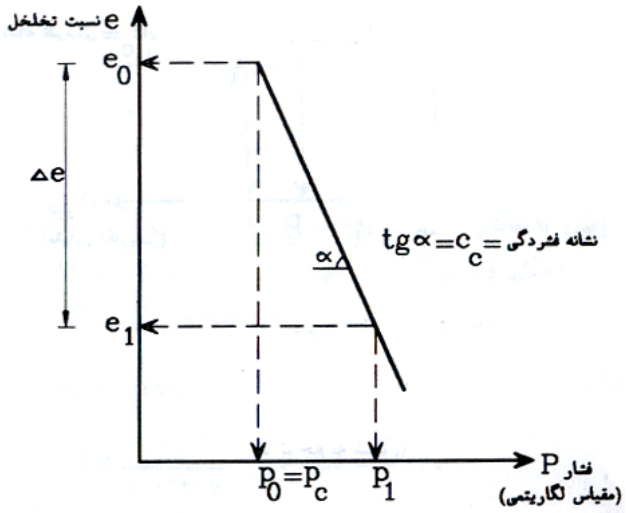
www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

۷-۷ محاسبه نشست تحکیم اولیه یک بعدی

(الف) رس عادی تحکیم یافته

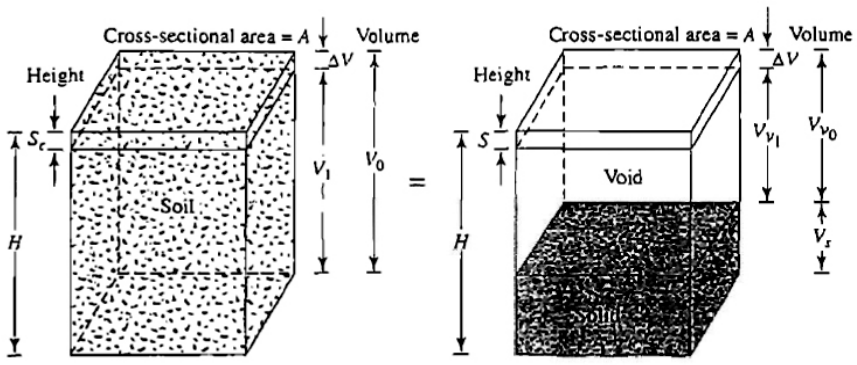
با اطلاعات به دست آمده از نتایج آزمایش تحکیم می توان محاسبات نشست احتمالی به علت تحکیم اولیه را با فرض تحکیم یک بعدی انجام داد. برای رس های عادی تحکیم یافته که نمودار نسبت تخلخل در مقابل **log p** آن ها خطی است می توان نوشت (شکل ۷-۱۲):



شکل ۷-۱۲ نمودار فشار - نسبت تخلخل صحرایی رس عادی تحکیم یافته

$$\Delta e = C_c[\log(p_o + \Delta p) - \log p_o] \qquad (۹-۷)$$

که در آن C_c شیب نمودار e در مقابل log p است که نشانه فشردگی نامیده می شود. با قرار دادن رابطه فوق در رابطه زیر:



شکل ۷-۱۳ نشست ناشی از تحکیم یک بعدی

$$\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta e}{1 + e_o}$$

به دست می آید:

$$\Delta H = S = \frac{C_c \cdot H_o}{1 + e_o} \log\left(\frac{P_o + \Delta p}{P_o}\right) \qquad (۱۰-۷)$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

برای یک لایه رس ضخیم دقیقتر است که لایه به لایه هایی با ضخامت کمتر تقسیم شده و برای هر لایه محاسبات به طورجداگانه انجام شود مجموع این نشستهای جزیی نشست کل برای تمام لایه ها را به دست میدهد:

$$S = \sum\left[\frac{C_c \cdot H_i}{1+e_o}\log\left(\frac{p_{o(i)}+\Delta p_{(i)}}{p_{o(i)}}\right)\right] \qquad (۱۱-۷)$$

که درآن:

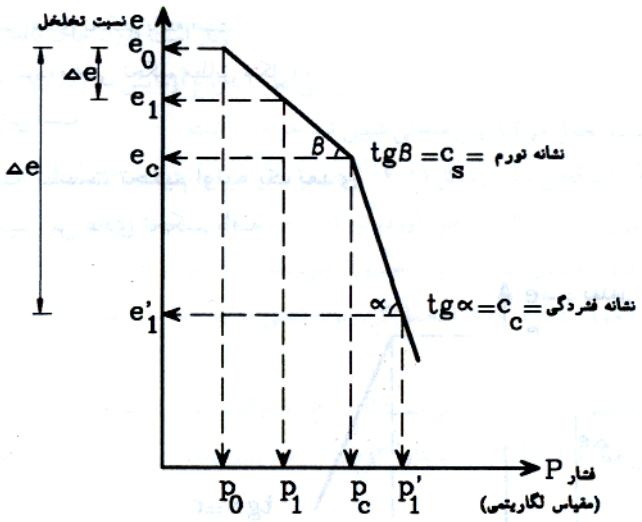
H_i = ضخامت لایه i

$p_{o(i)}$ = فشار سربار موثر متوسط اولیه برای لایه i

$\Delta p_{o(i)}$ =افزایش فشار قائم برای لایه i

(ب) رس پیش تحکیم یافته

دررس پیش تحکیم یافته (شکل ۷ – ۱۴) ،برای $p_o + \Delta p \le p_c$ تغییرات صحرایی e درمقابل log p درامتداد خط خواهد بود که شیب آن تقریباً مساوی شیب منحنی برگشت درآزمایشگاه است. شیب منحنی برگشت C_s نشانه تورم نامیده میشود بنابراین:



شکل ۷–۱۴ نمودار فشار–نسبت تخلخل صحرایی رس پیش تحکیم یافته

$$\Delta e = C_s[\log(p_o+\Delta p) - \log p_o] \qquad (۱۲-۷)$$

$$\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta e}{1+e_o}$$

با ترکیب روابط فوق داریم:

$$\Delta H = S = \frac{C_s \cdot H}{1+e_o}\log\left(\frac{p_o+\Delta p}{p_o}\right) \qquad (۱۳-۷)$$

اگر $p_o + \Delta p > p_c$ باشد داریم:

$$\Delta H = S = \frac{C_s H}{1+e_o}\log\frac{p_c}{p_o} + \frac{C_c H}{1+e_o}\log\left(\frac{p_o+\Delta p}{p_c}\right) \qquad (۱۴-۷)$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

۷–۸ | نشانه فشردگی

با داشتن نمودار آزمایشگاهی **e** درمقابل **log p** میتوان بطور ترسیمی نشانه فشردگی را برای انجام محاسبات نشست تحکیم به دست آورد. ترازقی و پک (۱۹۶۷) روابط تجربی زیر را برای نشانه فشردگی توصیه کرده اند:

برای رسهای دست نخورده:

$$C_c = 0.009(LL-10) \qquad (۱۵-۷)$$

برای رسهای بهم خورده:

$$C_c = 0.007(LL-10) \qquad (۱۶-۷)$$

که درآنها **LL** حد مایع (حد روانی) برحسب درصد است.

درنبود اطلاعات آزمایشگاهی تحکیم رابطه ۷-۱۵ معمولاً برای محاسبات تقریبی تحکیم درصحرا بکارگرفته میشود.

۷–۹ | نشانه تورم

نشانه تورم به طورقابل ملاحظه ای کوچکترازنشانه فشردگی است و آن را معمولاً میتوان از نتایج آزمایشگاهی به دست آورد. دراغلب حالات میتوان نوشت:

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ to } \frac{1}{10} C_c \qquad (۱۷-۷)$$

مثال :

نتایج یک آزمون آزمایشگاهی تحکیم برروی نمونه رسی به صورت زیراست:

نسبت تخلخل **e**	فشار **p** (kN/m^2)
1.112	23.94
1.105	47.88
1.080	95.76
0.985	191.52
0.850	383.04
0.731	766.08

مطلوب است:

الف: رسم نمودار

ب: تعیین فشارپیش تحکیمی

پ: تعیین نشانه فشردگی

حل مسئله:

الف : نمودار **e-log p** این نمودار مطابق شکل ۷-۱۹ میباشد:

قسمت ب: با استفاده از روش پیشنهادی کاساگرانده، فشار پیش تحکیمی از نمودار **e-log p** شکل ۷-۱۹ به دست می آید. داریم:

$$p_c = 117.5 kN/m^2$$

قسمت پ: با استفاده از نمودار **e-log p** میتوان نوشت:

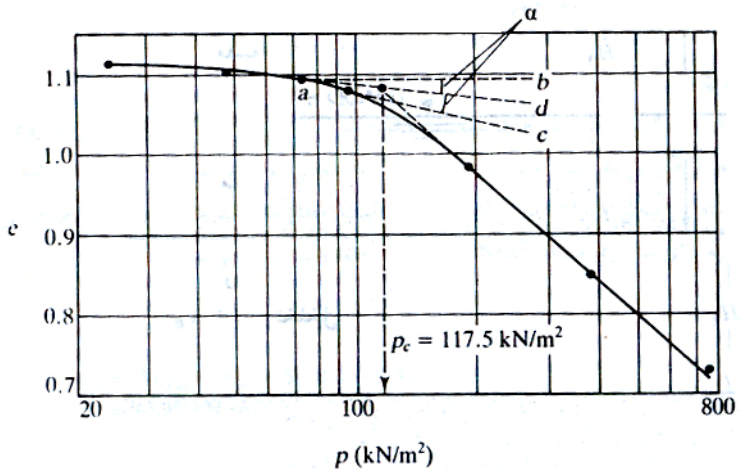
$$p_2 = 500 kN/m^2, e_2 = 0.8$$

$$p_1 = 300 kN/m^2, e_1 = 0.9$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



درنتیجه:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{p_2}{p_1}\right)} = \frac{0.9 - 0.8}{\log\left(\frac{500}{300}\right)} = 0.451$$

۷–۱۰ | نشست به علت تحکیم ثانویه

دربخش ۷-۳ نشان داده شد که در پایان تحکیم اولیه (یعنی بعد از زایل شدن کامل فشارآب اضافی) به علت تغییرشکل پلاستیک اسکلت خاک مقداری نشست رخ میدهد این مرحله از تحکیم به تحکیم ثانویه معروف است. در حین تحکیم ثانویه نمودار تغییر شکل در مقابل لگاریتم زمان عملاً خطی است (شکل ۷-۳). تغییرات نسبت تخلخل **e** درمقابل زمان **t** برای یک افزایش بار مشابه چیزی است که درشکل ۷-۳ نشان داده شده است. این موضوع درشکل ۷-۱۵ نیزقابل مشاهده است. با استفاده از شکل ۷-۱۵ نشانه تحکیم ثانویه به صورت زیر تعریف میشود:

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2 / t_1)} \qquad (۱۸-۷)$$

که درآن:

C_α = نشانه تحکیم ثانویه

Δe = تغییرات نسبت تخلخل

t_1, t_2 = زمان

مقدارتحکیم ثانوی میتواند به صورت زیرمحاسبه شود:

$$S_s = C'_\alpha H \log(t_2 / t_1) \qquad (۱۹-۷)$$

که در آن:

$$C'_\alpha = C_\alpha /(1 + e_p) \qquad (۲۰-۷)$$

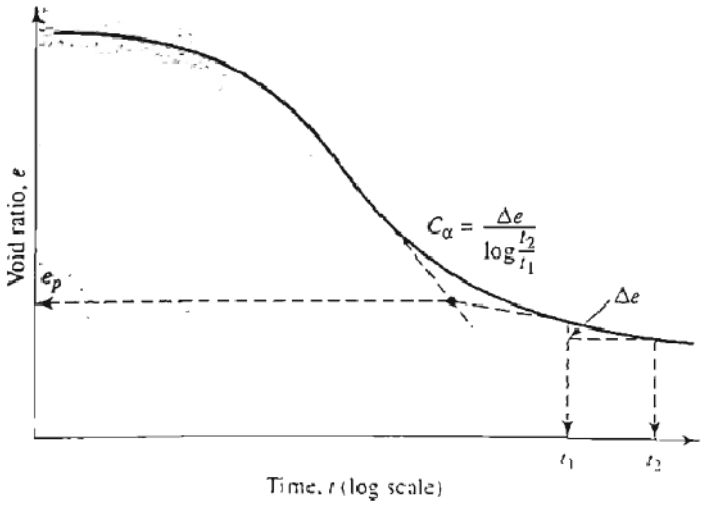
e_p = نسبت تخلخل در انتهای تحکیم اولیه

H = ضخامت لایه رسی

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷–۱۵ تغییرات e در مقابل log t تحت افزایش بار و تعریف نشانه تحکیم ثانویه

عوامل زیادی وجود دارد که ممکن است در روی مقدارتحکیم ثانویه مؤثر باشند و بعضی از آنها تاکنون به طور روشن فهمیده نشده اند (مصری – ۱۹۷۳). نسبت تحکیم ثانوی به تحکیم اولیه برای یک لایه خاک بستگی به نسبت افزایش تنش Δp به تنش مؤثر اولیه p دارد برای نسبتهای کوچک $\Delta p / p$ نسبت تحکیم ثانویه به اولیه بزرگتراست.

نکته :

نشست ناشی از تحکیم ثانویه در خاک های آلی و غیر آلی با قابلیت فشردگی زیاد مهمتر است به طوری که در رس های غیر آلی پیش تحکیم نیافته، نشانه تحکیم ثانویه بسیار کوچک است.

نکته :

نسبت تحکیم ثانویه به تحکیم اولیه برای یک لایه خاک بستگی به نسبت افزایش بارگذاری $(\Delta p / p)$ دارد و برای نسبت های کوچک $(\Delta p / p)$، نسبت تحکیم ثانویه به تحکیم اولیه بزرگتر است.

۷–۱۱ | سرعت تحکیم

با استفاده از یکی از روابطی که در قسمت های قبل ارائه شد میتوان نشست کل ناشی از تحکیم اولیه را به علت افزایش تنش در روی لایه رسی محاسبه نمود. لیکن معادلات فوق هیچگونه اطلاعاتی درخصوص سرعت تحکیم به دست نمی دهند. ترازقی در سال ۱۹۲۵ اولین تئوری درخصوص سرعت تحکیم یک بعدی درخاکهای رسی را ارائه داد. حصول ریاضی تئوری بر پایه مفروضات زیر قرار دارد:

۱. سیستم آب – رس همگن است.
۲. خاک کاملاً اشباع است.
۳. آب غیر قابل تراکم است.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

۴. دانه های خاک غیرقابل تراکم است.

۵. جریان آب فقط دریک امتداد است (امتداد تأثیر نیروی فشاری)

۶. قانون دارسی معتبر است.

برای محاسبه توزیع فشار منفذی **u** در عمق لایه خاک با در نظر گرفتن اثر زمان، معادله دیفرانسیل زیر باید با توجه به شرایط مرزی مسئله حل شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۲۱-۷)$$

معادله فوق، معادله دیفرانسیل حاکم تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی نام دارد. پارامتر c_v در این معادله ضریب تحکیم بوده و برابر است با: $c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$ که در این رابطه داریم:

k = ضریب نفوذپذیری خاک

m_v = ضریب قابلیت فشردگی حجمی که برابر است با: $m_v = \frac{a_v}{1+e_o}$ و $a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$ که پارامتر a_v ضریب قابلیت فشردگی نام دارد.

حل معادله دیفرانسیل به دست می دهد:

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty}\left[\frac{2u_o}{M}\sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right)\right]e^{-M^2Tv} \qquad (۲۲-۷)$$

که در این رابطه:

m = عدد صحیح

u_o = فشار آب حفره ای اولیه

H_{dr} = طول مسیر زهکشی مساوی نصف ضخامت لایه در زهکشی دو طرفه از بالا و پایین و مساوی ضخامت لایه در زهکشی یک طرفه از بالا یا پایین

T_v = عامل زمان: عامل بدون بعدی است که قادر است در شرایط ماشبه آزمایشگاه و طبیعت، رابطه بین زمان و حداکثر مسافت زهکشی را در دو نمونه آزمایشگاهی و طبیعی بیان کند. این عامل را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H_{dr}^2} \qquad (۲۳-۷)$$

t = مدت زمانی که از شروع تحکیم گذشته است

از آنجایی که تحکیم با زائل شدن اضافه فشار آب حفره ای پیشرفت می کند، درجه تحکیم در عمق z در زمان t برابر است با:

$$U_z = \frac{u_o - u_z}{u_o} = 1 - \frac{u_z}{u_o} \qquad (۲۴-۷)$$

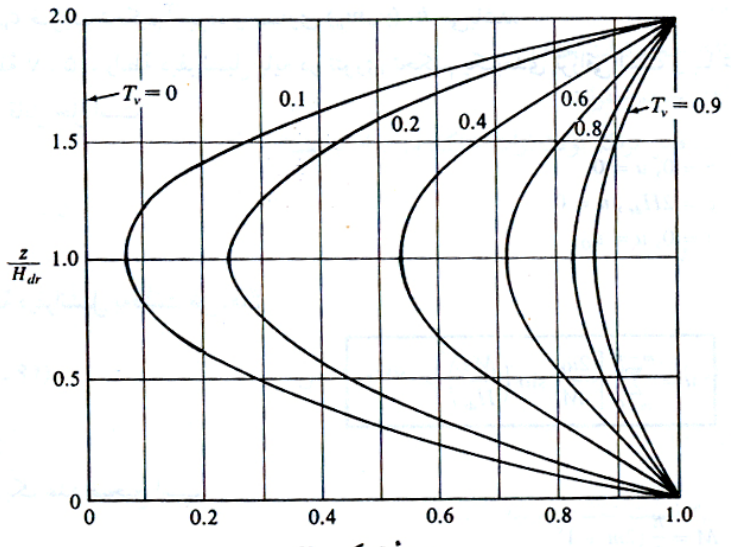
که در این رابطه u_z اضافه فشار آب حفره ای در زمان t است که از طریق رابطه ۷-۲۲ بدست می آید.

روابط ۷-۲۲ و ۷-۲۴ را می توان با هم ترکیب کرد تا درجه تحکیم در عمق z بدست آید. نتیجه حاصل در شکل ۷-۱۶ نشان داده شده است.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷–۱۶ تغییرات درجه تحکیم U_z با T_v و z/H_{dr}

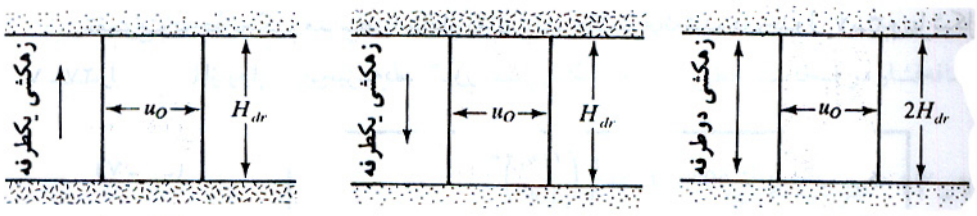
بنابراین برای بدست آوردن میزان پیشرفت تحکیم در هر نقطه از عمق خاک می توان با داشتن نسبت عمق و عامل زمان به راحتی و بدون نیاز به استفاده از معادله ۷-۴۶، پیشرفت تحکیم را با استفاده از شکل ۷-۲۶ بدست آورد.

درجه تحکیم معمولاً برای یک نقطه از خاک تحکیم پذیر تعیین می گردد ولی در کارهای عملی بجای تعیین درجه تحکیم در یک نقطه، درجه تحکیم متوسط لایه محاسبه می گردد. درجه تحکیم متوسط یک لایه در زمان t (مدت زمانی که از شروع عمل تحکیم گذشته است) را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$U = \frac{S_t}{S} = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \qquad (۲۵-۷)$$

که در این رابطه St و ΔH_t نشست لایه در زمان t و S و ΔH_∞ نشست نهایی لایه به علت تحکیم اولیه هستند.

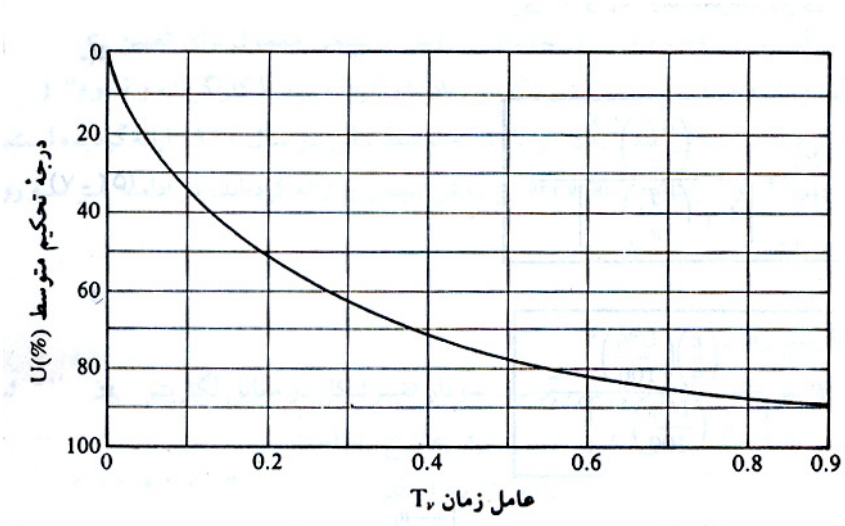
در جدول ۷-۱، تغییرات درجه تحکیم متوسط بر حسب عامل زمان بدون بعد T_v ارائه شده که جدول مذکور در شکل ۷-۱۷ نشان داده شده است. توجه به این نکته ضروری است که درجه تحکیم متوسط ارائه شده در جدول ۷-۱ و شکل ۷-۱۷ برای حالتی است که تغییرات فشار آب حفره ای اولیه u_o در ضخامت لایه ثابت باشد.



www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷–۱۷ تغییرات درجه تحکیم متوسط با عامل زمان T_v (u_o در عمق لایه ثابت است)

جدول ۷–۱ تغییرات درجه تحکیم بر حسب عامل زمان

درجه تحکیم U%	عامل زمان T_v
0	0
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197
60	0.287
70	0.403
80	0.567
90	0.848
100	∞

تغییرات درجه تحکیم متوسط با عامل زمان برای حالات ارائه شده در جدول ۷ – ۱ و یا شکل ۷ – ۱۷ را می توان از روابط زیر نیز به دست آورد:

$$\text{برای } U = 0 \text{ تا } 60\% \text{ ، } T_v = \frac{\pi}{4}\left(\frac{U\%}{100}\right)^2 \qquad (۲۶-۷)$$

$$\text{برای } U > 60\% \text{ ، } T_v = 1.781 - 0.933\log(100 - U\%) \qquad (۲۷-۷)$$

۷–۱۲ محاسبه نشست تحکیم زیر یک شالوده

همانطور که می دانیم افزایش تنش قائم در زیر خاک به علت باری که در روی سطحی محدود اعمال می شود با افزایش عمق کاهش می یابد. در این موارد نیز برای تخمین نشست تحکیم یک بعدی یک شالوده از روابط تحکیم یک بعدی استفاده می شود. لیکن افزایش تنش Δp در این روابط باید مساوی متوسط افزایش فشار در زیر مرکز شالوده منظور شود که برای تعیین آن از رابطه وزنی زیر استفاده میشود:

$$\Delta p_{av} = \frac{\Delta p_t + 4\Delta p_m + \Delta p_b}{6} \qquad (۲۸-۷)$$

www.AMS.ir

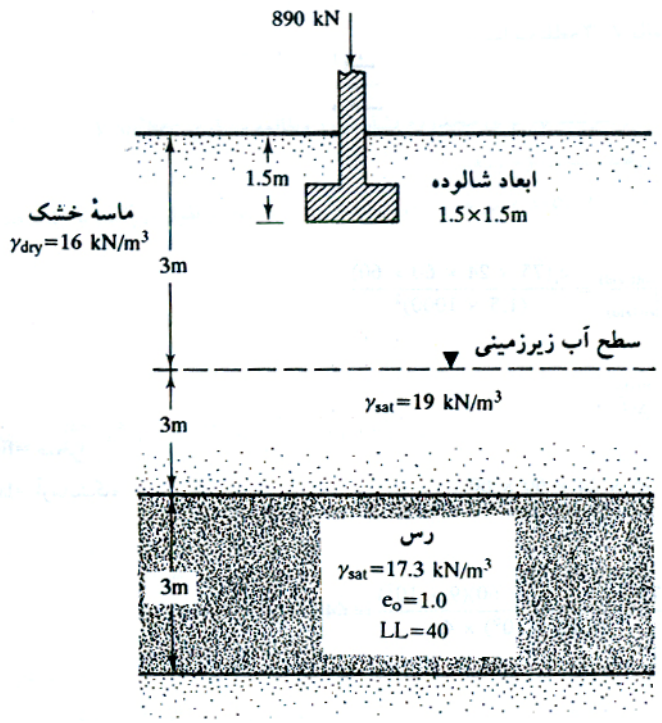
www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

که در آن Δp_t، Δp_m و Δp_b به ترتیب افزایش فشار بالا، وسط و پایین لایه می باشند. مقادیر فشارهای فوق می توانند با استفاده از روش شرح داده شده در فصل توزیع تنش تعیین گردد.

مثال :

با توجه به شکل (۷ – ۱۸)، مطلوب است محاسبه نشست لایه ۳ متری رس به علت تاثیر بار یک شالوده به ابعاد 1.5×1.5m. رس عادی تحکیم یافته است برای تعیین متوسط افزایش تنش در لایه رسی از رابطه وزنی استفاده نمایید.



شکل ۷–۱۸

حل مسئله:

برای رس به طور عادی تحکیم داریم:

$$S = \frac{C_c \cdot H}{1+e_o}\log\frac{p_o+\Delta p}{p_o}$$

$$C_c = 0.009(LL-10) = 0.009(40-10) = 0.27$$

$$H = 300cm$$

$$e_o = 1$$

$$p_o = 3\times16+3\times(19-9.81)+1.5\times(17.3-9.81) = 86.81kN/m^2$$

برای تعیین افزایش تنش متوسط با استفاده از رابطه وزنی میتوان نوشت:

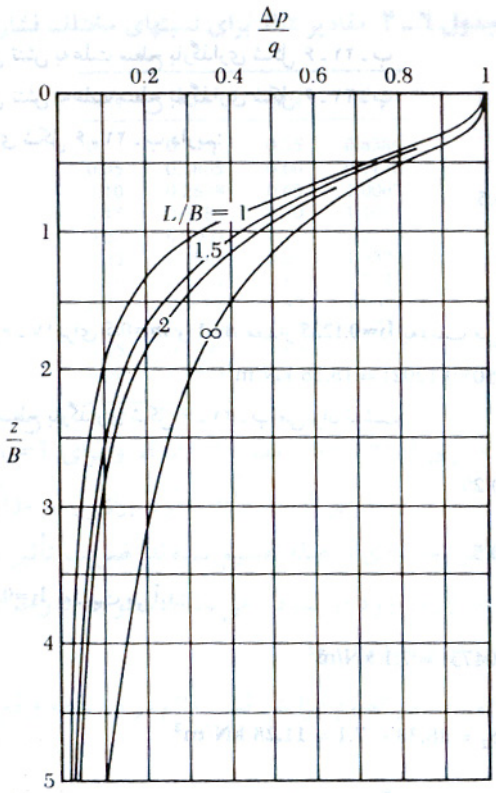
$$\Delta p = \frac{\Delta p_t + 4\Delta p_m + \Delta p_b}{6}$$

که در آن Δp_t، Δp_m و Δp_b در زیر مرکز شالوده با استفاده از شکل زیر قابل تعیین است.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



$$\Delta p_t\left(z=\frac{4.5}{1.5}B=3B\right)=0.055p$$

$$\Delta p_m\left(z=\frac{6}{1.5}B=4B\right)=0.028p$$

$$\Delta p_b\left(z=\frac{7.5}{1.5}B=5B\right)=0.02p$$

بنابراین:

$$\Delta p=\frac{[0.055+(4\times0.028)+0.02]p}{6}=0.03116p$$

از طرفی

$$p=\frac{890}{1.5\times1.5}=395.56kN/m^2$$

در نتیجه

$$\Delta p=0.03116\times395.56=12.33kN/m^2$$

با قراردادن مقادیر محاسبه شده در رابطه نشست به دست می آید:

$$S=\frac{0.27\times300}{1+1}\log\frac{86.81+12.33}{86.81}=2.34cm$$

۷–۱۳ | نشست آنی (ارتجاعی)

شالوده انعطاف پذیر و سخت

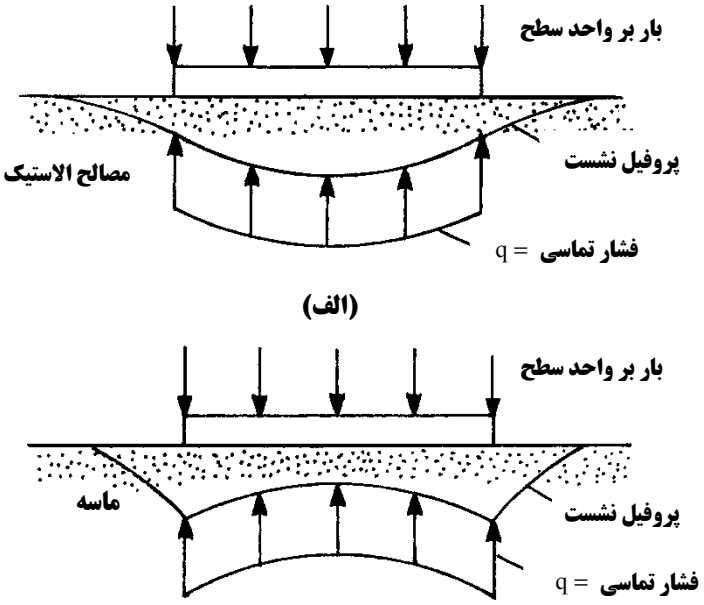
نشست آنی و یا الاستیک یک شالوده بلافاصله بعد از اعمال بار بدون تغییری در میزان رطوبت به دست می آید. مقدار نشست تماسی بستگی به انعطاف پذیری شالوده و نوع مصالح پی دارد.

وقتی که یک شالوده کاملاً انعطاف پذیر با بار گسترده در روی سطح الاستیک نظیر رس اشباع قرار گیرد به علت نشست الاستیک مطابق شکل ۷–۱۹–الف شکل مقعر به خود می گیرد لیکن وقتی که شالوده سخت باشد و در روی مصالح الاستیک نظیر رس قرار گیرد نشست حاصل یکنواخت خواهد بود ولی توزیع مجددی در تنش تماسی حاصل شده و از حالت یکنواخت خارج می شود (شکل ۷-۲۰-ب).

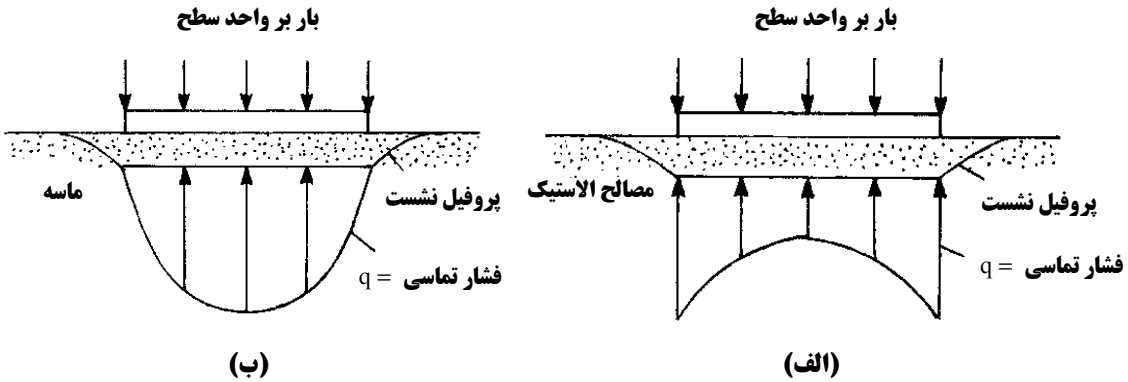
چگونگی توزیع منحنی نشست و نمودار توزیع فشار تماسی مذکور در فوق برای خاکهایی صادق است که ضریب ارتجاعی (الاستیسیته) آنها در عمق نسبتاً ثابت باشد. در ماسه بدون چسبندگی ضریب الاستیسیته با عمق افزایش می یابد. به علاوه فقدان محدودیت جانبی در سطح زمین در لبه های شالوده وجود دارد. در نتیجه ماسه در لبه های شالوده شکل پذیر به سمت بیرون رانده شده و منحنی تغییر شکل شالوده به شکل محدب در می آید (شکل ۷-۱۹-ب). توزیع فشار تماسی برای شالوده انعطاف پذیر و سخت (یعنی نشست مساوی) در روی ماسه و مصالح الاستیک در شکل های ۷-۱۹ و ۷-۲۰ نشان داده شده است.

www.AMS.ir
www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۷–۱۹ فشار تماسی و نشست فونداسیون انعطاف پذیر: (الف) مصالح الاستیک (ب) مصالح دانه ای



شکل ۷–۲۰ فشار تماسی و نشست فونداسیون صلب: (الف) مصالح الاستیک (ب) مصالح دانه ای

۷–۱۴ | محاسبه نشست آنی بر پایه تئوری الاستیسیته

نشست آنی متکی بر مصالح الاستیک (با ضخامت بی نهایت) را میتوان با روابط به دست آمده بر پایه اصول تئوری الاستیسیته محاسبه نمود. شکل کلی این روابط به صورت زیر است:

$$S_i = q \cdot B \frac{1-\mu^2}{E} I_p \qquad (۲۹-۷)$$

که در آن:

S_i = نشست الاستیک

q = فشار خالص موثر

B = عرض شالوده یا قطر شالوده دایره

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

μ = نسبت پواسون

E = ضریب ارتجاعی خاک

I_p = ضریب تاثیر بدون بعد

در جدول ۷ – ۲ ضرایب تأثیر برای شالوده های سخت و انعطاف پذیر و در جداول ۷ – ۳ و ۷ – ۴ نیز مقادیر بر ضرایب الاستیسیته و ضریب پواسون برای انواع خاکها ارائه شده است.

جدول ۷ – ۲ ضریب تأثیر برای شالوده ها (رابطه ۷ – ۵۹)

		I_p		
		انعطاف پذیر		سخت
شکل	m_1	مرکز	گوشه	
دایره	-	1.00	0.64	0.79
مستطیل				
	1	1.12	0.56	0.88
	1.5	1.36	0.68	1.07
	2	1.53	0.77	1.21
	3	1.78	0.89	1.42
	5	2.10	1.05	1.70
	10	2.54	1.27	2.10
	20	2.99	1.49	2.46
	50	3.57	1.8	3.0
	100	4.01	2.0	3.43

جدول ۷ – ۳ مقادیر ضرایب پواسون

نوع خاک	ضریب پواسون μ
ماسه شل	0.2 -0.4
ماسه متوسط	0.25 – 0.4
ماسه متراکم	0.3 – 0.45
ماسه لای دار	0.2 – 0.4
رس نرم	0.15 – 0.25
رس متوسط	0.2 – 0.5

جدول ۷ – ۴ مقادیر ضریب الاستیسیته برای انواع خاک

	ضریب الاستیسیته	
نوع خاک	kg/cm^2	kN/m^2
رس نرم	17.5 – 35	1750 – 3500
رس سخت	60 – 140	6000 - 14000
ماسه شل	105 – 280	10500 – 28000
ماسه متراک	350 - 700	35000 - 70000

توجه شود که حصول رابطه ۷ – ۲۹ با این فرض است که فشار **q** در سطح زمین تأثیر نماید. در عمل شالوده ها در عمق مشخصی در زیر سطح زمین قرار می گیرند. عمق شالوده مقدار نشست S_i را کاهش می دهد و استفاده از رابطه ۷ – ۲۹ در جهت محافظه کارانه خواهد بود.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

۷–۱۵ | نشست کل شالوده

نشست کل شالوده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_T = S_c + S_s + S_i \qquad (۳۰-۷)$$

که در آن :

S_T = نشست کل

Sc = نشست تحکیمی اولیه

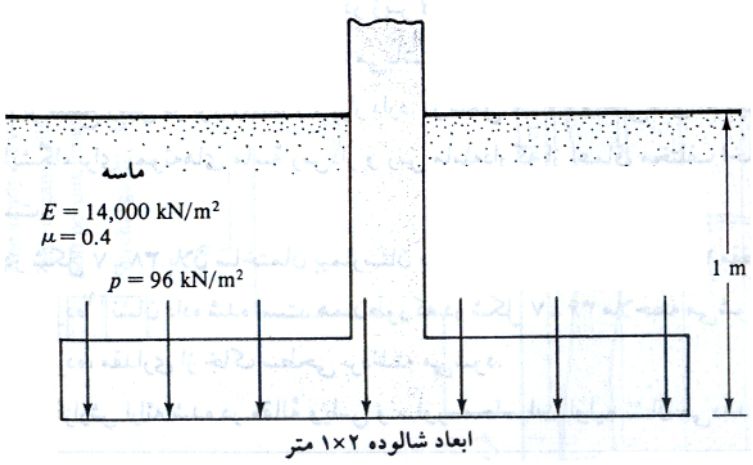
S_s = نشست تحکیمی ثانویه

S_i = نشست آنی

وقتی که شالوده در روی رس با قابلیت فشردگی زیاد قرار گیرد نشست تحکیم چندین برابر نشست آنی S_i خواهد بود.

مثال :

مطابق شکل ۷ – ۲۱ شالوده مستطیلی ستونی را در نظر بگیرید که در روی یک لایه ماسه ای با ضخامت زیاد قرار دارد با فرض شالوده صلب، $E_s = 14000 kN/m^2$ ، $\mu = 0.4$ و افزایش فشار خالص مساوی $96 kN/m^2$ مطلوب است تعیین نشست الاستیک (نشست آنی).



شکل ۷–۲۱

با استفاده از رابطه ۷ – ۲۹ میتوان نوشت:

$$S_i = qB\frac{1-\mu^2}{E_s}I_p$$

داریم :

$$B = 1m, L = 2m, m_1 = L/B = 2/1 = 2m$$

از جدول ۷ – ۲ برای شالوده صلب داریم:

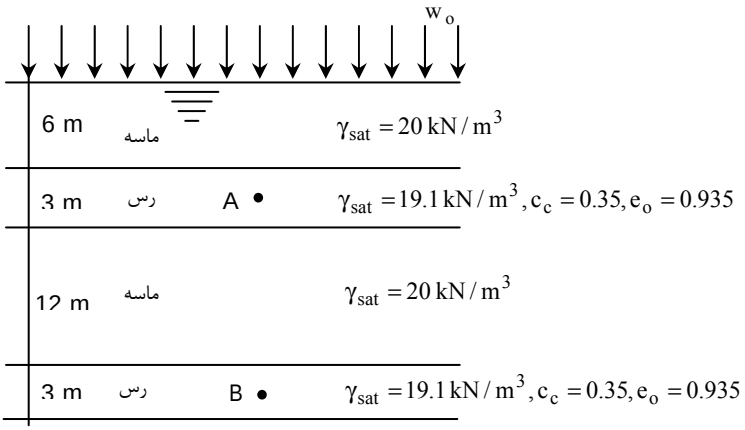
$$S_i = 96 \times 1 \times \left(\frac{1-0.4^2}{14000}\right) \times 1.21 = 0.00697 = 6.97mm$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مثال: بار یکنواختی به شدت $w_o = 145 kN/m^2$ بر روی یک سطح وسیع پخش شده است. با توجه به شکل، مطلوب است تعیین نشست تحکیم خاک.



$$\Delta H = \frac{C_c H_o}{1+e_o} \log\left[\frac{p_o + \Delta p}{p_o}\right]$$

نقطه A : $P_o = 6\times(20-10) + 3(19.1-10)\times 0.5 = 73.65\ kN/m^2$

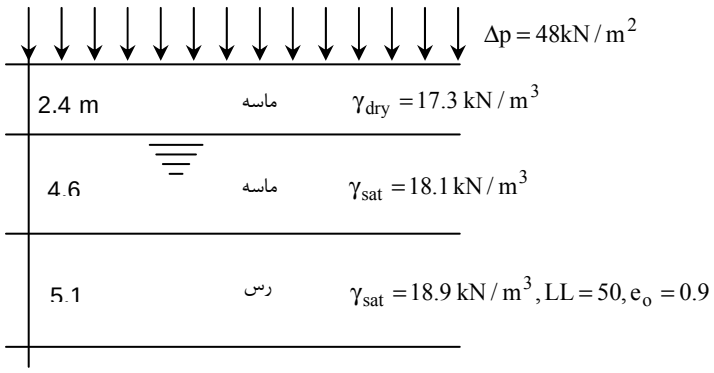
$$\Delta H_1 = \frac{0.35\times 3\times 1000}{1+0.935} \text{Log}\left[\frac{73.65+145}{73.65}\right] = 265.5mm$$

نقطه B : $P_o = 6\times(20-10) + 3\times(19.1-10) + 12\times(20-10) + 1.5(19.1-10) = 220.95 kN/m^2$

$$\Delta H_2 = \frac{0.35\times 3\times 1000}{1+0.935} \text{Log}\left[\frac{220.95+145}{220.95}\right] = 118.906mm$$

$$\rightarrow \Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = 256.5 + 118.9 = 375.4mm$$

مثال: در پروفیل خاک نشان داده شده در شکل زیر چنانچه بار یکنواختی به شدت ΔP در سطح زمین اعمال شود، نشست لایه رسی به علت تحکیم اولیه چقدر خواهد بود. ماسه موجود در بالای تراز آب زیرزمینی را کاملاً خشک فرض نمایید.



رس عادی تحکیم:

$$C_c = 0.009(LL-10) = 0.36$$

$$P_o = 17.3\times 2.4 + 4.6\times(18.1-10) + \frac{5.1}{2}(18.9-10) = 101.475kPa$$

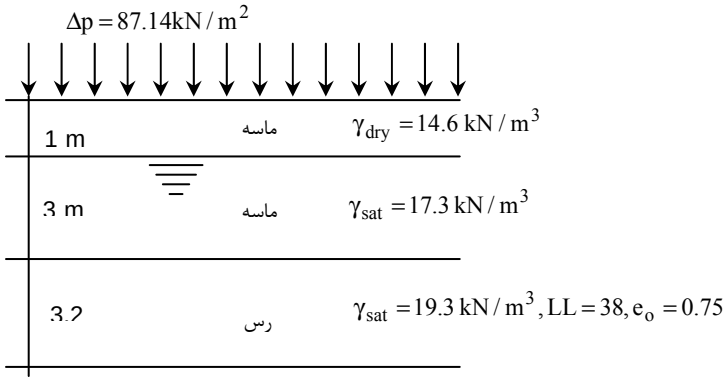
$$\Delta H = \frac{C_c H_o}{1+e_o} \text{Log}\left[\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right] = \frac{0.36\times 5.1\times 10^3}{1+0.9} \text{Log}\left[\frac{101.745+48}{101.475}\right] = 162.54mm$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مثال قبل را با داده های زیر مجدداً حل نمایید:



$$C_c = 0.009(LL-10) = 0.009(38-10) = 0.252$$

$$P_o = 14.6 + 3\times(17.3-10) + \frac{3.2}{2}(19.3-10) = 51.38\ kPa$$

$$\Delta H = \frac{C_c H_o}{1+e_o} Log\left[\frac{P_o+\Delta P}{P_o}\right] = \frac{0.252\times 3.2\times 10^3}{1+0.75} Log\left[\frac{51.38+87.14}{51.38}\right] = 198.475mm$$

مثال: اگر لایه رس مثال قبل پیش تحکیم یافته بوده و فشار پیش تحکیمی متوسط $P_c = 125kN/m^2$ باشد، تحت سربار $\Delta P = 48kN/m^2$ نشست اولیه چقدر خواهد بود. فرض کنید که $C_s = 1/6C_c$ می باشد.

$$P_o = 101.475kN/m^2$$

$$P_c = 125kN/m^2$$

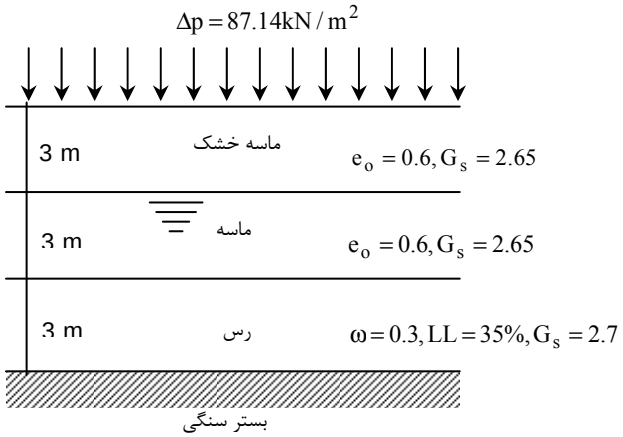
$$P_o + \Delta P > P_c$$

$$C_s = 1/6C_c = 1/6\times 0.36 = 0.06$$

$$\Delta H = \frac{C_s H_o}{1+e_o} Log\left(\frac{P_c}{P_o}\right) + \frac{C_c H_o}{1+e_o} Log\left(\frac{P_o+\Delta P}{P_o}\right)$$

$$\Delta H = \frac{0.06\times 3.2\times 10^3}{1+0.9} Log\left(\frac{125}{101.475}\right) + \frac{0.36\times 3.2\times 10^3}{1+0.9}\left(\frac{101.475+48}{125}\right) = 14.583+75 = 89.625mm$$

مثال: در مقطع خاکی نشان داده شده فشار پیش تحکیمی مساوی $163kN/m^2$ می باشد. مطلوب است تخمین نشست تحکیم اولیه به علت سربار $\Delta P = 72kN/m^2$. فرض نمایید $C_s = 1/5C_c$.



www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

$$\gamma_{d(sand)} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{2.65\times 9.81}{1+0.6} = 16.24 kN/m^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s+e}{1+e}\cdot\gamma_w = \frac{2.65+0.6}{1+0.6}\cdot 9.81 = 19.926$$

$$S\cdot e = G_s\cdot\omega \rightarrow e = 2.7\times 0.3 = 0.81$$

$$\gamma_{sat(clay)} = \frac{2.7+0.81}{1+0.81}\times 9.81 = 19 kN/m^3$$

$$C_c = 0.009(LL-10) = 0.009(35-10) = 0.225$$

$$C_c = 1/5C_c = 0.2\times 0.225 = 0.045$$

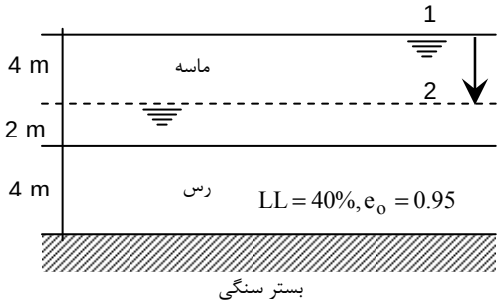
$$P_o = 3\times 16.5625 + 3(20.3125-10) + \frac{3}{2}(19.4-10) = 92 kN/m^2$$

$$P_c = 163 kN/m^2$$

$$OCR = \frac{163}{94.725} = 1.72$$

$$\Delta H = \frac{C_s H_o}{1+e_o}\,Log\left[\frac{P_o+\Delta p}{P_o}\right] = \frac{0.045\times 3\times 1000}{1+0.81}\,Log\left[\frac{92+72}{92}\right] = 18.725mm$$

مثال: در پروفیل خاک نشان داده شده در شکل زیر تراز آب زیرزمینی توسط پمپاژ از سطح ۱ به سطح ۲ کاهش داده شده است. با توجه به اطلاعات داده شده میزان نشست تحکیمی را محاسبه نمایید.



$$\gamma_{d(sand)} = 17 kN/m^3$$

$$\gamma_{sat(sand)} = 19 kN/m^3$$

$$\gamma_{sat(clay)} = 18.6 kN/m^3$$

$$C_c = 0.009(LL-10) = 0.09(40-10) = 0.27$$

$$P_o = 6\times(19-10) + \frac{4}{2}(18.6-10) = 71.2 kN/m^2$$

$$P_o+\Delta p = 4\times 17 + 2(19-10) + 2(18.6-10) = 103.2 kN/m^2$$

$$\Delta H = \frac{0.27\times 4\times 1000}{1+0.95}\,Log\left[\frac{103.2}{71.2}\right] = 89.28mm$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

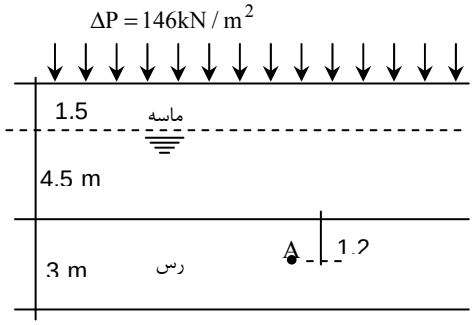
www.g-alm.ir

مثال: در پروفیل خاک نشان داده شده سربار $146kN/m^2$ بر سطح زمین وارد شده است. مطلوب است:

(الف) بلافاصله بعد از اعمال سربار، تراز سطح آب در پیزومتر نصب شده در نقطه A.

(ب) برای $h=6m$، درجه تحکیم در نقطه A چقدر است؟

(پ) وقتی درجه تحکیم در A به ۸۰ درصد می رسد ارتفاع h چقدر است؟



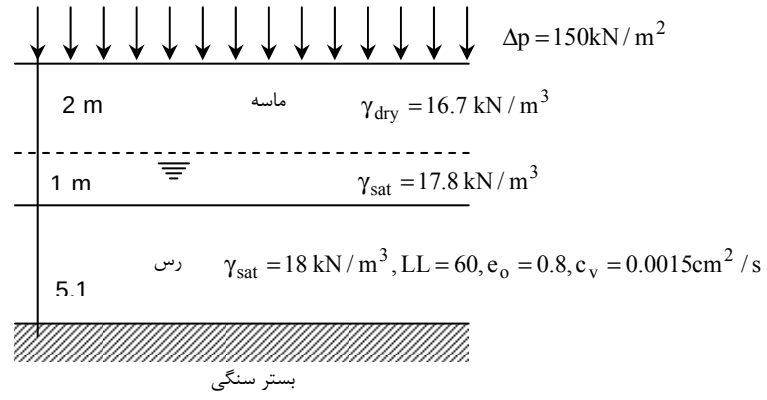
$$u_o=\Delta p=146kN/m^2 \rightarrow u_o=\gamma_w\cdot h \rightarrow h=\frac{u_o}{\gamma_w}=\frac{146}{9.81}=14.88m$$

$$h=6m \rightarrow u=6\times 9.81=58.86kPa$$

$$u_z=\left(1-\frac{u_z}{u_o}\right)\rightarrow u_z=\left(1-\frac{58.86}{146}\right)\times 100=59.7\%$$

$$0.8=1-\frac{u_z}{146}\rightarrow u_z=0.2\times 146=29.2kPa \rightarrow h=\frac{29.2}{9.81}=2.976m$$

در پروفیل نشان داده شده در شکل زیر چه مدت طول می کشد که ۵۰ درصد نشست نهایی رخ دهد.



$$C_c=0.009(LL-10)=0.45$$

$$P_o=16.7\times 2+(17.8-10)\times 1+2\times(18-10)=127.4kN/m^2$$

$$\Delta H=\frac{H_o C_c}{1+e_o}\text{Log}\left[\frac{P_o+\Delta P}{P_o}\right]=\frac{4\times 1000\times 0.45}{1+0.8}\text{Log}\left[\frac{127.4+150}{127.4}\right]=338mm$$

$$U=50\% \rightarrow T_v=\frac{\pi}{4}U^2=\frac{\pi}{4}(0.5)^2=0.1964$$

$$T_v=\frac{c_v t}{H_{dr}^2}\rightarrow 0.1964=\frac{0.0015\times t}{400^2}\rightarrow t=242days$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مثال: یک نمونه رس به ضخامت 25mm در آزمایشگاه تحت آزمایش تحکیم قرار گرفته و در طی ۱۰ دقیقه ۷۰ درصد تحکیم یافته است. چقدر طول می کشد که نمونه ای از همان خاک در طبیعت به ضخامت 3m به همان درجه تحکیم برسد؟

$$U_1 = U_2 \rightarrow T_{v1} = T_{v2} \rightarrow \frac{c_v t_1}{H_{dr1}^2} = \frac{c_v t_2}{H_{dr2}^2} \rightarrow \frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{H_{dr1}}{H_{dr2}}\right)^2$$

$$\rightarrow \frac{10}{t_2} = \left[\frac{25/2}{3000}\right]^2 \rightarrow t_2 = 576000\,\text{min} = 4000\,\text{days}$$

مثال: یک لایه رس اشباع به ضخامت 3m با زهکشی دوطرفه تحت سرباری، 90% تحکیم اولیه خود را در ۷۵ روز انجام می دهد. ضریب تحکیم رس نامبرده را برای دامنه فشار مورد مسئله بدست آورید.

$$T_{90} = \frac{c_v t}{H_{dr}^2} = 0.848$$

$$H_{dr} = \frac{3}{2} = 1.5\text{m}$$

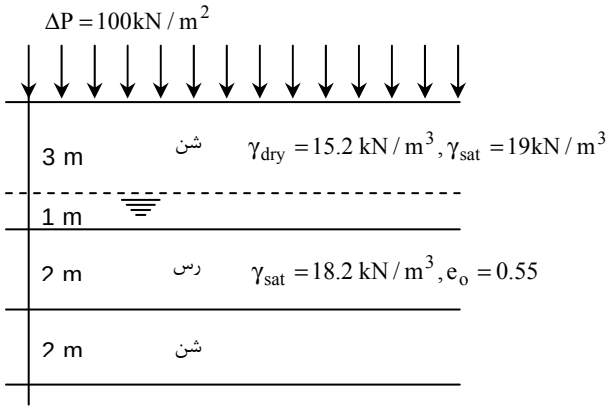
$$0.848 = \frac{c_v \times 75 \times 24 \times 60 \times 60}{(1.5 \times 1000)^2} \rightarrow c_v = 0.00284\ \text{cm}^2/\text{s}$$

مثال: چنانچه بار گسترده یکنواختی به شدت $q = 180\text{kN/m}^2$ مطابق شکل بر سطح زمین وارد شود، مطلوب است:

(الف) محاسبه نشست نهایی تحکیم لایه رس

(ب) محاسبه نشست ۴۰روز پس از اعمال سربار

(پ) محاسبه زمان متناظر با ۴۰ درصد تحکیم نهایی



$P_c = 210\,\text{kN/m}^2$

$C_c = 0.35$

$C_s = 0.05$

$c_v = 0.002\,\text{cm}^2/\text{sec}$

(الف)

$$P_o = 15.2 \times 3 + 1 \times (19 - 10) + 1 \times (18.2 - 10) = 62.8\text{kN/m}^2$$

$$P_o + \Delta P = 162.8 < Pc$$

$$\rightarrow \Delta H = \frac{C_s \cdot H_o}{1 + e_o} \text{Log}\left[\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right] = \frac{0.05 \times 2000}{1 + 0.55} \text{Log}\left[\frac{162.8}{62.8}\right] = 26.7\text{mm}$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

(ب)

$$t_v = \frac{c_v \cdot t}{H_{dr}^2} = \frac{0.002 \times 40 \times 24 \times 60 \times 60}{100^2} = 0.6912$$

$$0.6912 = 1.781 - 0.933 \text{Log}(100 - U) \rightarrow U = 85.3\%$$

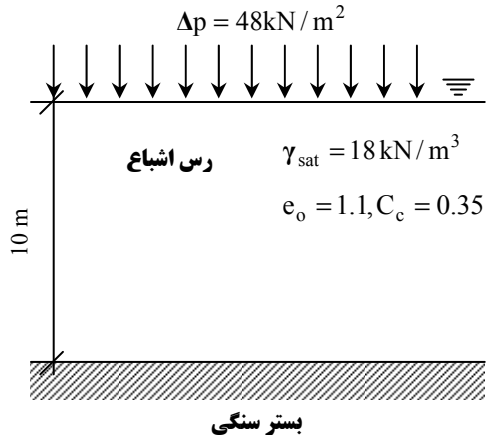
$$St = U \times \Delta H = 0.853 \times 26.7 = 22.768 \text{ mm}$$

(پ)

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H_{dr}^2} = \frac{\pi}{4} U^2 \rightarrow \frac{0.002 \times t}{100^2} = \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 \rightarrow t = 7.272 \text{ days}$$

مثال :

در پروفیل خاک نشان داده شده، میزان نشست تحکیمی اولیه را یک بار با در نظر گرفتن کل لایه و بار دیگر با تقسیم لایه رس به سه قسمت فرضی محاسبه نمایید.

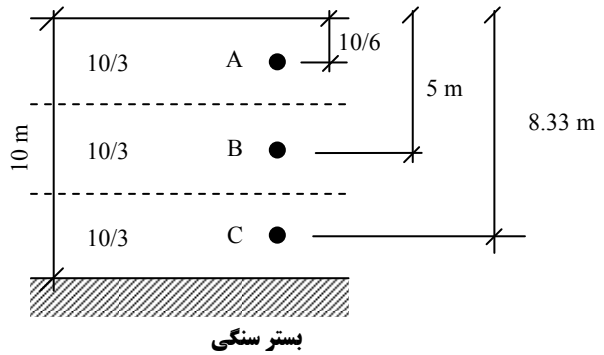


(الف)

$$P_o = (18 - 10) \times \frac{10}{2} = 40 \text{kPa}$$

$$\Delta H = \frac{C_c \cdot H_o}{1 + e_o} \text{Log}\left[\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right] = \frac{0.35 \times 10 \times 1000}{1 + 1.1} \text{Log}\left[\frac{40 + 48}{40}\right] = 570.7 \text{mm}$$

(ب)



www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

$$\Delta H = \Sigma \frac{C_c \cdot H_i}{1+e_o} \text{Log} \frac{P_{oi} + \Delta P_i}{P_{oi}}$$

$$P_{o(A)} = \frac{10}{6}(18-10) = 13.33\text{kPa} \rightarrow S_{c(A)} = \frac{0.35\times 3.33\times 1000}{1+1.1}\text{Log}\left[\frac{13.33+48}{13.33}\right] = 367.877\text{mm}$$

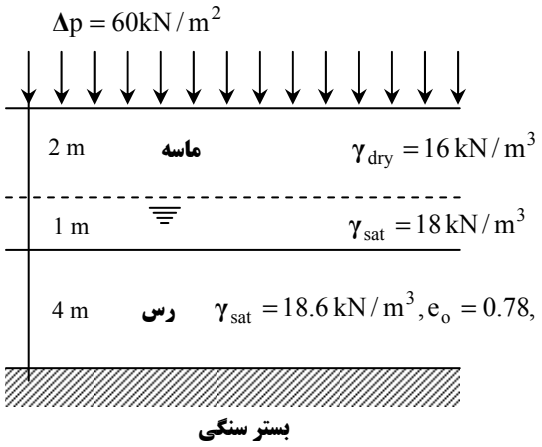
$$P_{o(B)} = 5\times(18-10) = 40\text{kPa} \rightarrow S_{c(B)} = \frac{0.35\times 3.33\times 1000}{1+1.1}\text{Log}\left[\frac{40+48}{40}\right] = 190.21$$

$$P_{o(C)} = 8.33\times(18-10) = 66.64\text{kPa} \rightarrow S_{c(C)} = \frac{0.35\times 3.33\times 1000}{1+1.1}\text{Log}\left[\frac{66.64+48}{66.64}\right] = 130.88$$

$$\Rightarrow S_c = 367.877 + 190.21 + 130.88 = 688.98\text{mm}$$

مثال :

در پروفیل خاک نشان داده شده فرض کنید تحکیم اولیه پس از ۴ سال تمام می شود مطلوب است محاسبه نشست تحکیمی کل پس از ۱۲ سال. $C_c = 0.38, C_s = 0.0475, P_c = 140\text{kPa}, C_\alpha = 0.022$



$$P_o = 2\times 16 + 1\times(18-10) + \frac{4}{2}(18.6-10) = 57.2\text{kPa}$$

$$P_o < P_c \rightarrow \text{خاک پیش تحکیم یافته است} \rightarrow \text{OCR} = \frac{P_c}{P_o} = \frac{140}{57.2} = 2.447$$

$$P_o + \Delta p = 57.2 + 60 = 117.2\text{kPa} < P_c = 140\text{kPa}$$

$$S_c = \frac{C_s \cdot H_o}{1+e_o}\text{Log}\left[\frac{P_o+\Delta P}{P_o}\right] = \frac{0.0475\times 4000}{1+0.78}\text{Log}\left[\frac{117.2}{57.2}\right] = 33.253\text{mm}$$

$$\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta e}{1+e_o} \rightarrow \frac{33.253}{4000} = \frac{\Delta e}{1+0.78} = 0.0148$$

$$\Delta e = e_o - e_p \rightarrow e_p = e_o - \Delta e = 0.78 - 0.0148 = 0.7652$$

$$S_s = \frac{C_\alpha \cdot H_c}{1+e_p}\text{Log}\left[\frac{t_2}{t_1}\right] = \frac{0.022\times 4000}{1+0.7652}\text{Log}\left[\frac{12}{4}\right] = 23.785$$

$$\Delta H = S = 23.785 + 33.253 = 57\text{mm}$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir



نکات و یادداشت ها

