فصل ۵:

تنش موثر در توده خاک، فشار تراوش، جوشش

جزوه درس مکانیک خاک

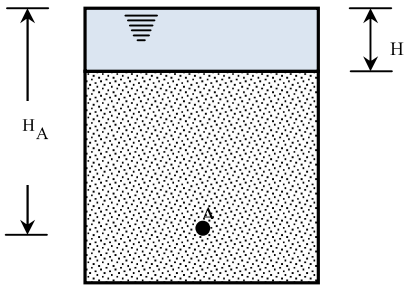
فهرست مطالب فصل پنجم:

۵-۱	تنش کل، تنش موثر و فشار حفره ای
۵-۲	موئینگی در خاک
۵-۳	تنش موثر در ناحیه صعود موئینگی
۵-۴	فشار تراوش
۵-۵	جوشش
-	منابع و مراجع

۵–۱ | تنش کل، تنش موثر و فشار حفره ای

شکل ۵-۱ ستونی از یک خاک اشباع را بدون هرگونه نشت (در هر امتداد) نشان می دهد. تنش کل در تراز نقطه A را می توان با استفاده از وزن مخصوص اشباع خاک و وزن مخصوص آب موجود در بالای نقطه مورد نظر بدست آورد. داریم:

$$\sigma = H\gamma_w + (H_A - H)\times\gamma_{sat} \qquad (۵-۱)$$



σ = تنش کل در تراز نقطه A
γ_w = وزن مخصوص آب
γ_{sat} = وزن مخصوص اشباع خاک
H = ارتفاع سفره آب از سطح فوقانی خاک
H_A = ارتفاع سفره آب تا نقطه A

شکل ۵–۱ تنش موثر در یک ستون خاک بدون نشت

تنش کل σ در رابطه ۵-۱ را می توان به دو قسمت زیر تقسیم نمود:

۱. قسمتی که توسط آب موجود در فضای بین دانه ها حمل می شود. این قسمت دارای شدت مساوی در تمام امتداد هاست.
۲. باقیمانده تنش کل توسط قسمت جامد خاک در نقاط تماس دانه ها حمل می شود. مجموع مولفه های قائم نیروهای بوجود آمده در نقاط تماس ذرات جامد در واحد سطح توده خاک، تنش موثر نامیده می شود. تنش موثر را می توان از حاصلضرب وزن مخصوص غوطه ور خاک در ارتفاع ستون خاک تعیین کرد.

بنابراین رابطه ۵-۱ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma = \sigma' + u \qquad (۵-۲)$$

که در رابطه فوق $u = H\cdot\gamma_w$ فشار منفذی و $\sigma' = (H_A - H)\cdot\gamma_w$ تنش موثر است.

با قرار دادن σ از رابطه ۵-۱ در رابطه ۵-۲ به دست می آید:

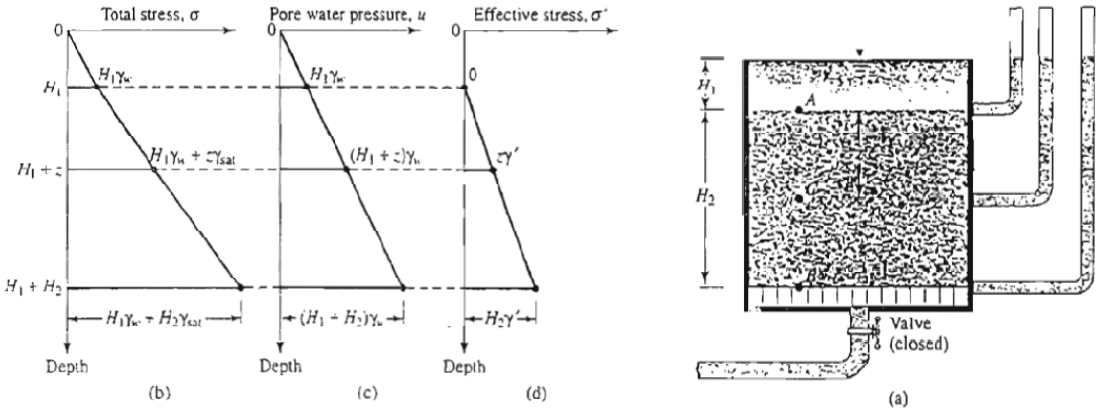
$$\sigma' = [H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}] - H_A\gamma_w = (H_A - H)(\gamma_{sat} - \gamma_w) = \text{(ارتفاع ستون خاک)}\times\gamma'$$

که در آن $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$، وزن مخصوص غوطه ور خاک است. بنابراین مشاهده می شود که تنش موثر در نقطه دلخواهی مثل A مستقل از ارتفاع H آب در بالای سطح خاک است.

شکل ۵-۲-الف، یک لایه خاک اشباع را در داخل یک مخزن بدون هرگونه نشت نشان می دهد. در اشکال ۵-۲-ب،پ و ت، نمودارهای تغییرات تنش کل، فشار حفره ای و تنش موثر در ارتفاع خاک نشان داده شده است.

مفهوم تنش موثر (رابطه ۵-۲) اول بار توسط ترزاقی (در حدود سال های ۱۹۲۵ تا ۱۹۳۶) معرفی شد. اسکمپتون (۱۹۶۰) کار ترزاقی را ادامه داد و رابطه ای برای ارتباط تنش کل و تنش موثر پیشنهاد نمود.

به طور خلاصه، تنش موثر تقریباً نیرو بر واحد سطح حمل شده توسط اسکلت خاک می باشد. در یک توده خاک، تنش موثر است که تغییرات حجم و مقاومت را کنترل می کند. تنش موثر بزرگتر، باعث تراکم و تبدیل خاک به یک توده متراکم تر و کم حجم تر می شود.

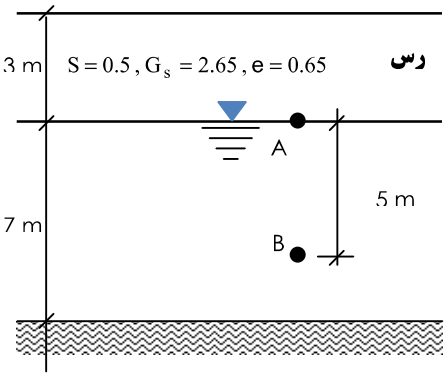


شکل ۵–۲ (الف) یک لایه خاک درون مخزن بدون هرگونه نشت، (ب) نمودار تغیرات تنش کل، (پ) نمودار تغییرات فشار حفره ای و (ت) نمودار تنش موثر

مثال :

در نیمرخ خاک رس نشان داده شده در شکل، مطلوب است محاسبه تنش کل، تنش حفره ای و تنش موثر در نقاط A و B.

$\gamma_w = 10 N/m^3$



حل مسئله:

$$\gamma = \left(\frac{G_s + S\cdot e}{1+e}\right)\times\gamma_w = \frac{2.65+0.5\times0.65}{1+0.65}\times10 = 18\,kN/m^3$$

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{G_s + e}{1+e}\right)\times\gamma_w = \frac{2.65+0.65}{1+0.65}\times10 = 20\,kN/m^3$$

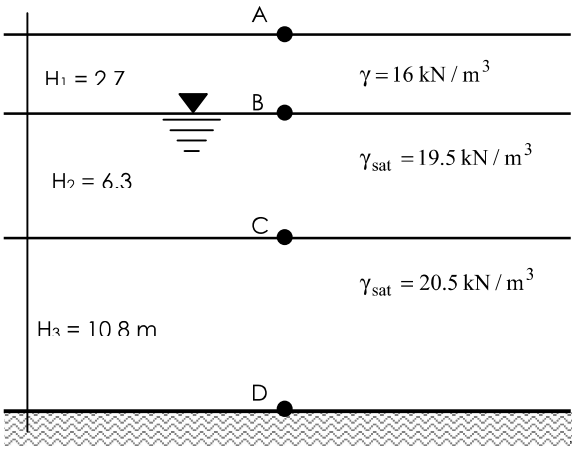
$\sigma_A = 3\times18 = 54\text{kPa}$
$\sigma_B = 3\times18 + 5\times20 = 154\text{kPa}$
$u_A = 0$
$u_B = 5\times10 = 50\text{kPa}$
$\sigma'_A = 54-0 = 54\text{kPa}$
$\sigma'_B = 154-54 = 100\text{kPa}$

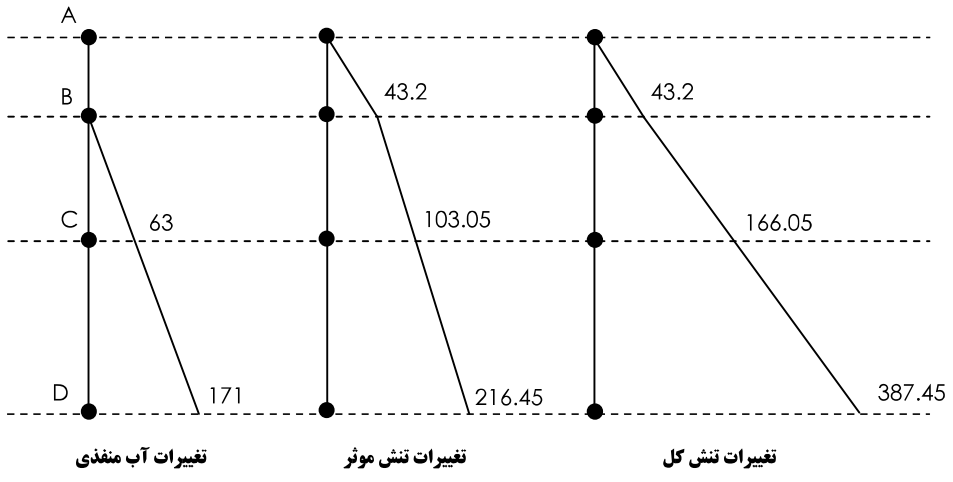
مثال :

در نیمرخ خاک نشان داده شده در شکل زیر مقادیر تنش های کل σ، فشار حفره ای و تنش های موثر σ' را در نقاط A، B، C و D محاسبه نموده و تغییرات مقادیر فوق را در عمق ترسیم نمایید.

حل مسئله:

$\sigma_A = 0 \quad , u_A = 0$
$\sigma_B = 16\times2.7 = 43.2\text{ kPa}$
$u_B = 0 \rightarrow \sigma'_B = 43.2\text{kPa}$
$\sigma_C = 16\times2.7 + 6.3\times19.5 = 166.05\text{ kPa}$
$u_C = 6.3\times10 = 63\text{ kPa} \rightarrow \sigma'_C = \sigma_C - u_C = 166.05-63 = 103.05\text{ kPa}$
$\sigma_D = 16\times2.7 + 19.5\times6.3 + 20.5\times10.8 = 387.45\text{ kPa}$
$u_D = 17.1\times10 = 171\text{ kPa} \rightarrow \sigma'_D = \sigma_D - u_D = 387.45-171 = 216.45\text{ kPa}$





نکته :

در لایه هایی که نفوذپذیری آن ها خیلی کم است (نظیر لایه رس)، تغییر سطح آب پس از مدتی طولانی بر لایه مورد نظر اثر می گذارد و فشار آنرا تغییر می دهد و بلافاصله پس از تغییر سطح آب اثری بر لایه نفوذناپذیر ندارد.

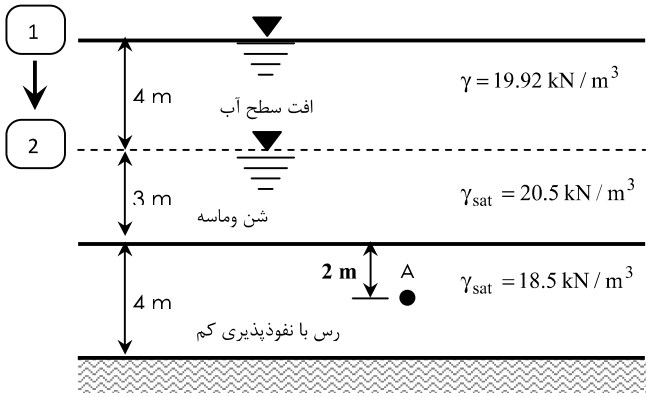
مثال :

در زمینی به شکل زیر، سطح آب ۴ متر پایین آورده می شود، مطلوب است:

(الف) تعیین مقدار تنش موثر در نقطه A، قبل از افت سطح آب.

(ب) تعیین مقدار تنش موثر در نقطه A بلافاصله بعد از افت سطح آب.

(ج) تعیین تنش موثر در نقطه A، مدت مدیدی بعد از افت سطح آب.



حل مسئله:

قسمت (الف)

$$\sigma_A = 7\times20.5 + 2\times18.5 = 180.5\ kN/m^2$$

$$u_A = 9\times10 = 90\ kN/m^2$$

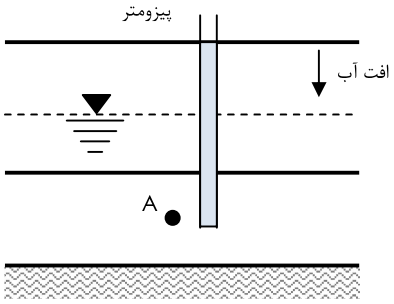
$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = 180.5 - 90 = 90.8\ kN/m^2$$

قسمت (ب) افت آب در مدت زمانی کوتاه بر لایه رس اثر نمی گذارد و فشار آن را تغییر نخواهد داد.

$$\sigma_A = 4\times19.92 + 3\times20.5 + 2\times18.5 = 178.18\ kN/m^2$$

$$u_A = 9\times10 = 90\ kN/m^2$$

$$\sigma'_A = 178.18 - 90 = 88.18\ kN/m^2$$

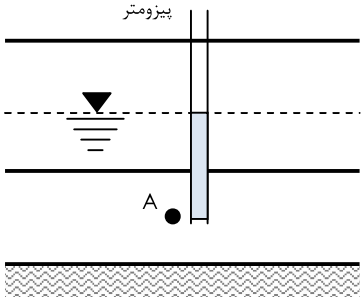


قسمت (ج) افت آب پس از گذشت مدت مدیدی بر لایه رس اثر می گذارد و فشار آن را تغییر خواهد داد.

$$\sigma_A = 4\times19.92 + 3\times20.5 + 2\times18.5 = 178.18\ kN/m^2$$

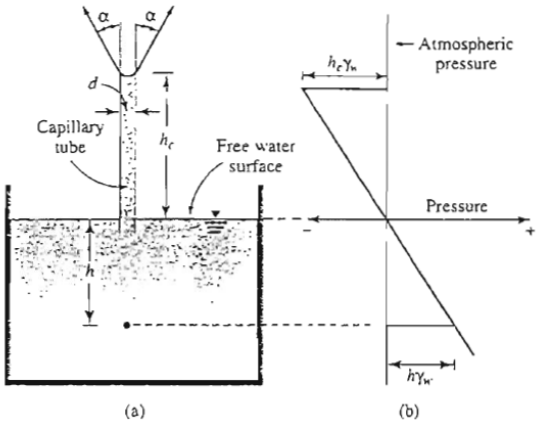
$$u_A = 5\times10 = 50\ kN/m^2$$

$$\sigma'_A = 178.18 - 50 = 128.18\ kN/m^2$$



۵–۲ | موئینگی در خاک

فضای حفرات پیوسته موجود در خاک می تواند به صورت دسته ای از لوله های موئینگی با سطح مقطع متغییر عمل کند. به علت نیروی کشش سطحی، آب زیرزمینی در لوله های موئینگی مذکور صعود کرده و تراز واقعی آن از تراز آزاد سطح آب زیرزمینی بالاتر خواهد ایستاد.



شکل ۵–۳ (الف) صعود آب در یک لوله موئینه (ب) تغییرات فشار در ارتفاع لوله موئینه (فشار اتمسفر به عنوان مبنا انتخاب شده است)

شکل ۵-۳ مفهوم پایه ای ارتفاع صعود آب در یک لوله موئین را نشان می دهد. ارتفاع صعود آب را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$T\cdot(\cos\alpha)\times 2\pi R=\pi R^2 h_c\gamma_w \rightarrow h_c=\frac{4T\cos\alpha}{d\cdot\gamma_w} \qquad (۵-۳)$$

که در آن:

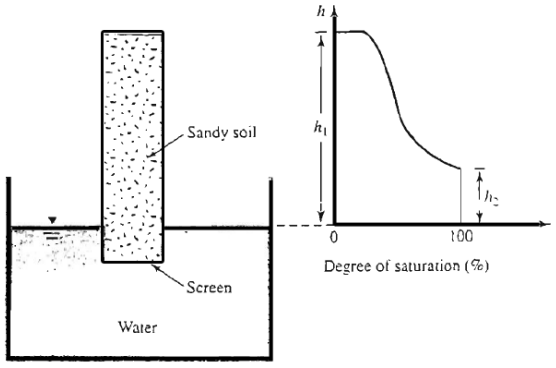
T = کشش سطحی ، α = زاویه تماس ، d = قطر لوله موئینه ، γ_w = وزن مخصوص آب

با استفاده از رابطه ۵-۳ مشاهده می شود که با T ، α و γ ثابت، ارتفاع صعود نسبت عکس با قطر لوله موئینه دارد. یعنی:

$$h_c\propto\frac{1}{d} \qquad (۵-۴)$$

فشار در هر نقطه در لوله موئینه در بالای سطح آزاد آب، نسبت به فشار اتمسفر منفی است و مقدار آن طبق رابطه $h\times\gamma_w$ می باشد که در آن h ارتفاع صعود آزاد آب است.

اگر چه مفهوم صعود موئینگی برای یک لوله موئینه قابل کاربرد برای خاک نیست هست، لیکن باید توجه داشت که حفرات به هم پیوسته خاک دارای مقطع متغییر هستند. نتایج غیر یکنواخت بودن صعود موئینگی را می توان با مطالعه ستونی از خاک ماسه دار خشک که در تماس با آب قرار گرفته مشاهده نمود (شکل ۵-۴-الف). بعد از گذشت زمان کافی، تغییرات درجه اشباع ستون خاک در ارتفاع مطابق با شکل ۵-۴-ب خواهد شد. درجه اشباع تا ارتفاعی معادل h_2 مساوی ۱۰۰ درصد است و آب حتی در حفرات درشت نیز صعود کرده است. در بالای ارتفاع h_2، آب می تواند فقط در حفرات ریز صعود نماید و در نتیجه درجه اشباع کمتر از ۱۰۰ درصد است. حداکثر ارتفاع صعود آب، بستگی به اندازه ریزترین حفرات موجود دارد.



شکل ۵–۴ اثر موئینگی در خاک ماسه دار (الف) ستون خاک در تماس با آب، (ب) تغییرات درجه اشباع در ستون خاک

هازن (۱۹۳۰) رابطه ای برای تعیین تقریبی ارتفاع صعود به شکل زیر ارائه کرد:

$$h_1(mm) = \frac{C}{eD_{10}} \qquad (۵-۵)$$

که در آن:

D_{10} = اندازه موثر (میلیمتر)

r = نسبت تخلخل

C = ثابتی که بین ۱۰ تا ۵۰ میلیمتر مربع تغییر می کند.

رابطه ۵-۵ دارای مفهومی مشابه رابطه ۵-۴ است. با کاهش D_{10}، اندازه حفرات خاک کاهش خواهد یافت که نتیجه آن افزایش صعود موئینگی است. در جدول ۵-۱، حدود ارتفاع صعود موئینگی برای انواع خاک ها ارائه شده است.

جدول ۵–۲ حدود ارتفاع صعود موئینگی برای بعضی از خاک ها

نوع خاک	ارتفاع صعود به متر
ماسه درشت	۰/۱۸ تا ۰/۱۲
ماسه ریز	۱/۲ تا ۰/۳
لای	۷/۶ تا ۰/۷۶
رس	۲۳ تا ۷/۶

۵–۳ تنش موثر در ناحیه صعود موئینگی

رابطه عمومی بین تنش کل، تنش موثر و فشار آب حفره ای طبق رابطه ۵-۴ به صورت زیر می باشد:

$$\sigma = \sigma' + u$$

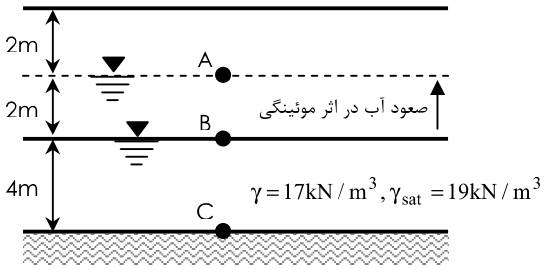
فشار آب حفره ای u در لایه ای از آب که به وسیله صعود موئینگی کاملاً اشباع شده است مساوی $-\gamma_w \cdot h$ با فرض فشار اتمسفر به عنوان مبنا می باشد. h ارتفاع نقطه مورد نظر از سطح آب زیرزمینی است. در صورتی که به علت موئینگی، اشباع ناقص وجود داشته باشد، فشار آب حفره ای را می توان به صورت زیر نوشت:

$$u = -\left(\frac{S}{100}\right) \cdot \gamma_w \cdot h \qquad (۶-۵)$$

که در آن S درجه اشباع بر حسب درصد است.

مثال :

در زمینی به شکل زیر مطلوب است محاسبه تنش موثر در نقاط A، B و C.



حل مسئله:

سطح تراز نقطه B سطح فشار صفر می باشد.

$\sigma_A = 2\times17 = 34\ kPa$

$u_A = -2\times10 = -20kPa \rightarrow \sigma'_A = \sigma_A - u_A = 34-(-20) = 54kPa$ (اثر موئینگی)

$\sigma_B = 2\times17 + 2\times19 = 72kPa$

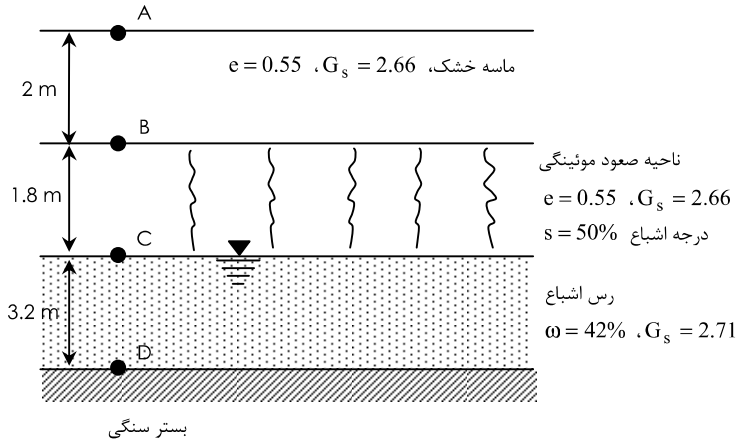
$u_B = 0 \rightarrow \sigma'_B = 72 - 0 = 72kPa$

$\sigma_C = 2\times17 + 6\times19 = 148kPa$

$u_C = 4\times10 = 40kPa \rightarrow \sigma'_C = 148 - 40 = 108kPa$

مثال :

یک لایه خاک دانه ای نفوذپذیر که در بالای یک لایه نفوذناپذیر قرار دارد، در شکل زیر نشان داده شده است. مطلوب است رسم تغییرات تنش کل، فشار آب حفره ای و تنش موثر.



حل مسئله:

محاسبه وزن مخصوص

بین ترازهای A و B (ماسه خشک)

$$\gamma_{d(sand)} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e} = \frac{2.66\times9.81}{1+0.55} = 16.84kN/m^2$$

بین ترازهای B و C (ماسه مرطوب)

$$\gamma_{sand} = \frac{(G_s + Se)\cdot\gamma_w}{1+e} = \frac{[2.66+0.5\times0.55]\times9.81}{1+0.55} = 18.576\ kN/m^2$$

بین ترازهای C و D (رس اشباع)

$$e=\frac{G_s\cdot\omega}{S}=\frac{2.71\times0.42}{1}=1.1382$$

$$\gamma_{sat(clay)}=\frac{(G_s+e)\gamma_w}{1+e}=\frac{(2.71+1.1382)\times9.81}{1+1.1382}=17.66kN/m^2$$

محاسبات تنش:

سطح زمین (نقطه A)

$$\sigma=0$$

$$u=0$$

$$\sigma'=\sigma-u=0$$

عمق H_1 (نقطه B)

$$\sigma=\gamma_{d(sand)}(2)=16.84\times2=33.68kN/m^2$$

$u=0$ بلافاصله بالای نقطه

$u=-(S\cdot\gamma_w\cdot H_2)=-(0.5)(9.81)(1.8)=-8.83kN/m^2$ بلافاصله پایین نقطه

$\sigma'=33.68-0=33.68kN/m^2$ بلافاصله بالای نقطه

$\sigma'=33.68-(-8.83)=42.51kN/m^2$ بلافاصله زیر نقطه

عمق H_1+H_2 (نقطه C)

$$\sigma=16.84\times2+18.576\times1.8=67.117kN/m^2$$

$$u=0\rightarrow\boldsymbol{\sigma'}=67.117-0=67.117kN/m^2$$

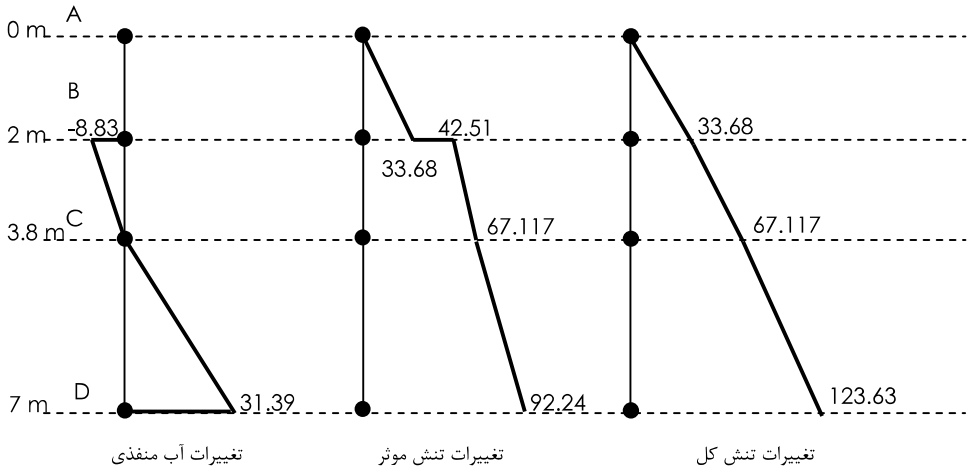
در عمق $H_1+H_2+H_3$ (نقطه D)

$$\sigma=67.117+17.66\times3.2=123.68kN/m^2$$

$$u=3.2\gamma_w=3.2\times9.81=31.39kN/m^2$$

$$\sigma'=123.63-31.39=92.24kN/m^2$$

در اشکال زیر نمودارهای تغییرات تنش کل، فشار حفره ای و تنش موثر نشان داده شده است:



۵-۴ | فشار تراوش

اگر آب موجود در یک توده خاک، حرکت داشته باشد (نشت)، تنش موثر در نقاط مختلف تغییر خواهد کرد. بر حسب امتداد حرکت آب این تنش ممکن است کم یا زیاد شود. مقداری که به این تنش افزوده یا از آن کاسته می شود را فشار نفوذ یا فشار تراوش می گویند و از رابطه زیر به دست می آید:

$$P = i \cdot z \cdot \gamma_w \qquad (۵-۷)$$

که در آن:

P = فشار نفوذ یا فشار تراوش

γ_w = وزن مخصوص آب

z = عمق نقطه مورد نظر از سطح خاک

i = شیب هیدرولیکی در توده خاک

حال اگر حرکت آب در توده خاک به سمت بالا باشد، از مقدار تنش موثر کاسته خواهد شد، به عبارت دیگر علامت فشار تراوش منفی خواهد شد. ولی اگر حرکت آب به سمت پایین باشد، به مقدار تنش موثر افزوده می شود و علامت فشار تراوش مثبت خواهد بود.

نکته :

همانطور که اشاره شد، i شیب هیدرولیکی در توده خاک است که می توان آن را به یکی از دو روش زیر به دست آورد:

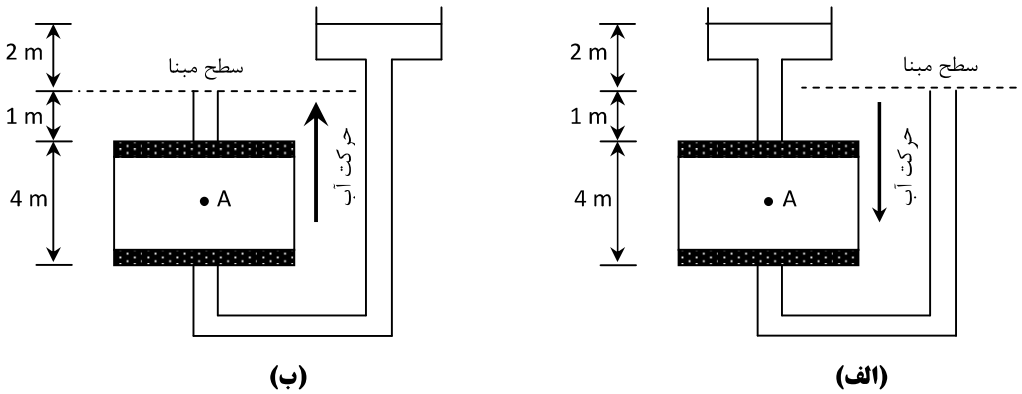
(الف) با در اختیار داشتن مقدار Q، A و K که به ترتیب دبی گذرنده از توده خاک، سطح مقطع نمونه خاک و ضریب نفوذپذیری خاک می باشند و با استفاده از رابطه $Q = KiA$.

(ب) با دانستن اختلاف بار آبی بین دو نقطه از مسیر حرکت آب در توده خاک و فاصله بین دو نقطه و با استفاده از رابطه

$$i = \Delta h / L$$

مثال :

با توجه به شکل، مطلوب است تعیین مقدار تنش موثر در وسط نمونه خاک. (وزن مخصوص اشباع خاک $\gamma_{sat} = 21 kN/m^3$)



راه حل اول:

ابتدا شیب هیدرولیکی را که برای هر دو حالت (الف) و (ب) یکسان می باشد، بدست می آوریم:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

حال فرض می کنیم آب در خاک حرکت ندارد و بر اساس تنش موثر در وسط نمونه خاک را بدست می آوریم:

$$\sigma'_A = \gamma' z = (21-10)\times 2 = 22\ \text{kPa}$$

پس از این مرحله، فشار نفوذ در وسط نمونه خاک را محاسبه می کنیم:

$$P = i \cdot z \cdot \gamma_w = \frac{1}{2}\times 2\times 10 = 10\text{kPa}$$

پس از انجام مراحل فوق، تنش موثر را با در نظر گرفتن اثر تراوش (حرکت آب) به صورت زیر بدست می آوریم:

حالت (الف)

$$\sigma'_A = \sigma'_A + P = 22+10 = 32\text{kPa} \quad \text{با تراوش}$$

حالت (ب)

$$\sigma'_A = \sigma'_{A-P} = 22-10 = 12\text{kPa} \quad \text{با تراوش}$$

راه حل دوم:

حالت (الف)

$$\sigma_A = 3\times 10 + 2\times 21 = 72\text{kPa}$$

$$u_A = \gamma_w \cdot (h_A - z_A) = 10\times[1-(-3)] = 40\text{kPa}$$

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = 72-40 = 32\text{kPa}$$

حالت (ب)

$$\sigma_A = 1\times 10 + 2\times 21 = 52\text{kPa}$$

$$u_A = \gamma_w \cdot (h_A - z_A) = 10\times[1-(-3)] = 40\text{kPa}$$

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = 52-40 = 12\text{kPa}$$

۵-۵ | جوشش

همانطور که اشاره شد حرکت رو به بالای آب در یک توده خاک باعث کاهش تنش موثر به اندازه $P = i \cdot z \cdot \gamma_w$ خواهد شد. اگر دبی گذرنده از مقطع نمونه خاک را افزایش دهیم، به علت ثابت بودن سطح مقطع نمونه و ضریب نفوذپذیری خاک، گرادیان هیدرولیکی افزایش می یابد و این افزایش باعث بیشتر شدن مقدار فشار نفوذ می گردد. در نتیجه مقداری از تنش موثر کسر خواهد شد. حال اگر دبی را آنقدر افزایش دهیم که باعث گردد تنش موثر صفر شود در آنصورت وضعیت پایدار خاک از بین می رود و پدیده جوشش (روانگرایی – سیلان – زیرشویی) رخ خواهد داد و خواهیم داشت:

$$\sigma'_A = 0 \rightarrow \gamma' \cdot z - i_{cr} \cdot z \cdot \gamma_w = 0 \rightarrow i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

گرادیان هیدرولیکی بدست آمده از رابطه فوق را گرادیان هیدرولیکی بحرانی می گویند و با i_{cr} نمایش می دهند. پس خواهیم داشت:

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

توجه: i_{cr} بین 0.9 تا 1.1 با متوسطی در حدود ۱ تغییر می کند.

ضریب اطمینان در برابر جوشش

برای ایجاد ایمنی در برابر جوشش، فشار نفوذ را در ضریبی موسوم به ضریب اطمینان ضریب می کنند. ضریب اطمینان (ایمنی) در برابر جوشش را به صورت های زیر می توان بدست آورد:

شرط جوشش $\sigma' = 0$

$$\text{بدون اثر تراوش } \sigma'_A - (\text{F.S})\text{P} = 0 \rightarrow \text{F.S} = \frac{\text{بدون اثر تراوش } \sigma'_A}{\text{فشار نفوذ } P}$$

$$\gamma' \cdot z - (\text{F.S}) \cdot i \cdot z \cdot \gamma_w = 0 \rightarrow \text{F.S} = \frac{\gamma'}{i \cdot \gamma_w}$$

که در این رابطه:

γ' = وزن مخصوص غوطه ور خاک

i = شیب هیدرولیکی

γ_w = وزن مخصوص هیدرولیکی

شرط جوشش $\sigma' = 0$ در نتیجه:

$$\sigma_A - u_A(\text{F.S}) = 0 \rightarrow \text{F.S} = \frac{\sigma_A}{u_A}$$

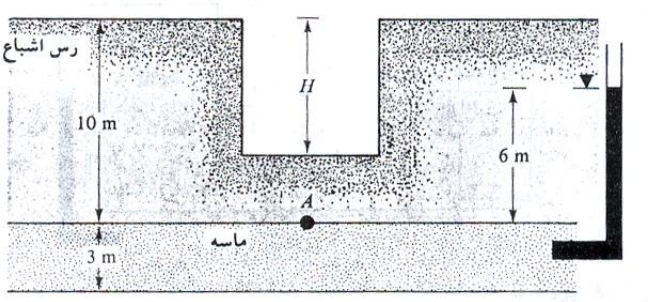
که در آن:

σ_A = تنش کل وارد بر نقطه مورد نظر در توده خاک

u_A = فشار آب حفره ای در نقطه مورد نظر با در نظر گرفتن اثر تراوش

مثال :

یک لایه رس سفت اشباع به ضخامت ۱۰ متر بر روی یک لایهٔ سفت ماسه ای به ضخامت ۳ متر قرار گرفته است. لایهٔ ماسه تحت فشار آرتزین قرار دارد. مطلوب است محاسبهٔ حداکثر عمق **H** که می توان در لایه رس حفر کرد.



$\gamma_{sat(clay)} = 18.88 kN/m^3$

$\gamma_{sat(sand)} = 18 kN/m^3$

حل: به علت گودبرداری، کاهشی در فشار سربار به وجود می آید. عمق بحرانی که در آن کف گود بالا می زند، مساوی **H** فرض می شود. اگر تعادل نقطه **A** در نظر گرفته شود، می توان نوشت:

$$\sigma_A = (10 - H) \cdot \gamma_{sat(clay)}$$

$$u_A = 6\gamma_w$$

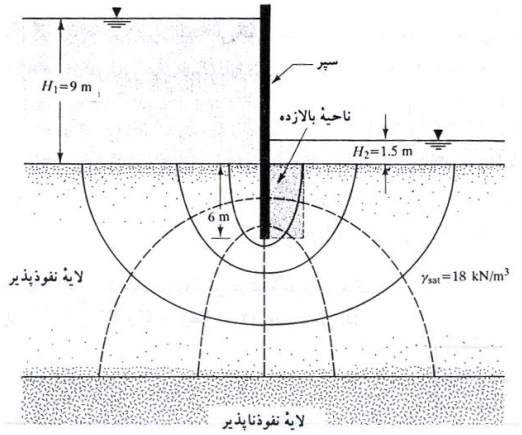
برای شروع بالا آمدن، σ'_A (تنش موثر در نقطه ***A***) باید مساوی صفر شود:

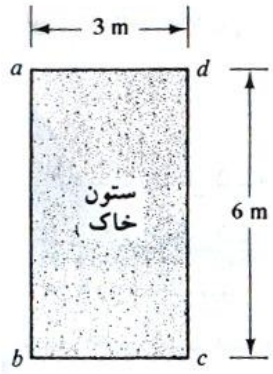
$$\sigma_A - u_A = (10 - H)\gamma_{sat(clay)} - 6\gamma_w$$

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

مثال :

در شکل زیر، شبکه جریان برای تراوش آب در اطراف یک سپر کوبیده شده در لایه نفوذپذیر نشان داده شده است. مطلوب است محاسبه ضریب ایمنی در پایین دست در مقابل بالازدگی (جوشش). وزن مخصوص اشباع γ_{sat} را برای لایه نفوذناپذیر مساوی ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب است.





حل:

برای ابعاد نشان داده شده در شکل، ستونی از خاک که در خطر جوشش است مساوی $3\times6m$ است. با استفاده از شبکه جریان میانگین بار آبی در ستون خاکی را به صورت زیر محاسبه می نماییم:

افت به ازاء هر خط پتانسیل:

$$\frac{H_1-H_2}{N_d}=\frac{9-1.5}{6}=1.25m$$

اختلاف بار آبی نقطه b نسبت به پایین دست:

$$h_b=3\times1.25=3.75m$$

اختلاف بار آبی نقطه c نسبت به پایین دست:

$$h_c=1.8\times1.25=2.25m$$

بنابراین میانگین بار آبی در ستون خاکی برابر خواهد بود با:

$$h_{av}=\frac{h_b+h_c}{2}=\frac{3.75+2.25}{2}=3$$

با داشتن بار آبی میانگین، شیب هیدرولیکی متوسط، i_{av} در طول ستون خاکی را به صورت زیر می توان محاسبه نمود:

$$i_{av}=\frac{h_{av}}{L}=\frac{3}{6}=0.5$$

بنابراین ضریب اطمینان در مقابل جوشش در پای سپر برابر خواهد بود با:

$$FS=\frac{\gamma'}{i_{av}\cdot\gamma_w}=\frac{18-9.81}{0.5\times9.81}=1.67$$

توجه شود که برای حل مسئله فوق ما شمارش خطوط هم پتانسیل را نسبت به پایین دست انجام دادیم. این کار راحت تر و سریع تر به جواب می رسد. حال مسئله را بار دیگر با شمارش خطوط نسبت به بالادست حل می نماییم:

$$H_a = 6+9-3\times1.25 = 11.25\,m$$

$$H_b = 6+9-4.2\times1.25 = 9.75$$

بنابراین متوسط فشار آب منفذی در کف ستون خاک برابر خواهد بود با:

$$H_{avg} = \frac{11.25+9.75}{2} = 10.5m$$

حال می توان شیب هیدرولیکی میانگین در ستون خاک را محاسبه نمود:

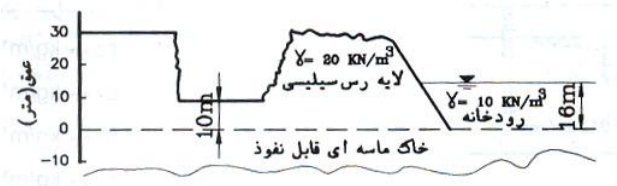
$$i_{avg} = \frac{10.5-(6+1.5)}{6} = 0.5$$

بنابراین بار دیگر می توان نوشت:

$$FS = \frac{\gamma'}{i_{av}\cdot\gamma_w} = \frac{18-9.81}{0.5\times9.81} = 1.67$$

مثال :

در کف خاکبرداری زیر ضریب اطمینان در برابر جوشش را محاسبه کنید. (کنکور سراسری ۷۴)



حل: فرض می نماییم که آب در اثر حرکت در لایه ماسه ای متحمل افت نمی شود. بنابراین ارتفاع صعود آب در پایین لایه رسی ۱۶ متر خواهد بود که این جریان باید فاصله ۱۰ متری را به سمت بالا طی نموده و ارتفاع صعود آن به صفر برسد.

بنابراین در طی این مسیر شیب هیدرولیکی برابر خواهد بود با:

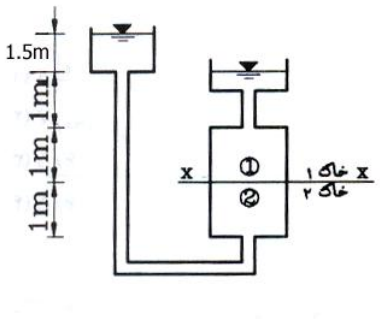
$$i = \frac{16-10}{10} = 0.6$$

بنابراین ضریب اطمینان در برابر جوشش برابر خواهد بود با:

$$FS = \frac{i_{cr}}{i} = \frac{\gamma'}{i\cdot\gamma_w} = \frac{20-10}{0.6\times10} = 1.67$$

مثال :

با توجه به شکل روبرو مقدار فشار آب حفره ای در سطح *x-x* چقدر است؟ (بر حسب kN/m^2).



$$\gamma_w = 10kN/m^2$$

$$k_1 = 0.001m/s$$

$$k_2 = 0.002m/s$$

با توجه به شکل می توان مشاهده نمود که به خاطر اختلاف پتانسیل دو طرف آب شروع به حرکت کرده و از دو خاک مختلف به صورت سری عبور می نماید که در این حالت داریم:

$$q_1 = q_2$$

$$q_1 = q_2 \rightarrow k_1 \cdot i_1 \cdot A_1 = k_2 \cdot i_2 \cdot A_2$$

$$A_1 = A_2 \rightarrow k_1 \cdot i_1 = k_2 \cdot i_2 \rightarrow k_1 \frac{\Delta h_1}{L_1} = k_2 \frac{\Delta h_2}{L_2} \rightarrow 0.001 \times \frac{\Delta h_1}{1} = 0.002 \times \frac{\Delta h_2}{1} \rightarrow \Delta h_1 = 2\Delta h_2$$

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 = 1.5 \rightarrow \Delta h_1 + \frac{\Delta h_1}{2} = 1.5 \rightarrow \Delta h_1 = 1m$$

بنابراین جریان آب در خاک ۱ به میزان ۱ متر و در خاک ۲ به میزان ۰/۵ متر افت کرده است. از این رو می توان گفت که جریان آب در لحظه ورود به خاک ۱ دارای اختلاف هد ۱ متر نسبت به پایین دست بوده است. بنابراین:

$$u = (1+1+1) \times 10 = 30kN/m^2$$

منابع و مراجع

۱. **اصول مهندسی ژئوتکنیک**، جلد اول: مکانیک خاک.، ترجمه شاپور طاحونی.، چاپ هفتم ۱۳۸۰، ویرایش دوم.

۲. **مجموعه سوالات طبقه بندی شده آزمون کارشناسی ارشد مکانیک خاک**.، تالیف: ساسان امیر افشاری.، چاپ سوم ۱۳۸۲.