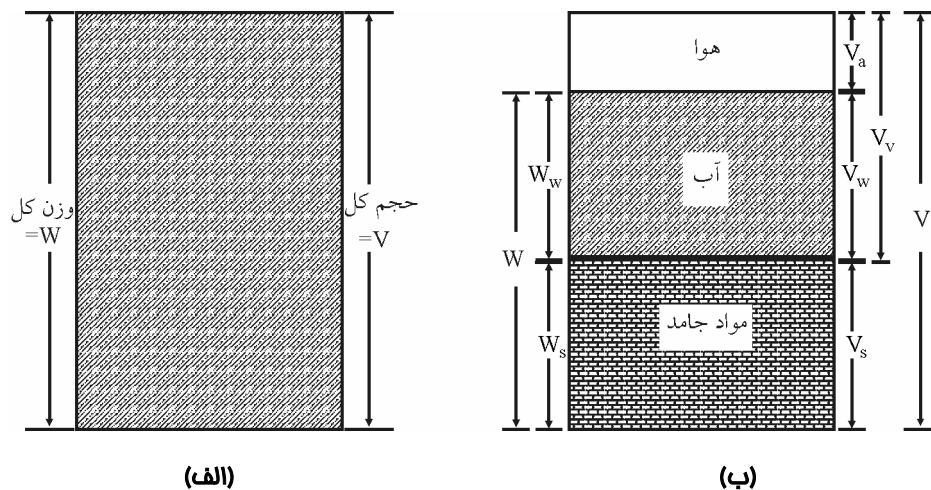


فصل

۲

ترکیب خاک

در فصل اول، به آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری خاک پرداخته شد. در حالت طبیعی، خاک به صورت یک سیستم سه‌قسمتی مرکب بوده که از مواد جامد، آب و هوا تشکیل شده است. در شکل (۱-۲) اجزای خاک در حالت طبیعی و سه قسمت خاک نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. اجزای خاک در وضعیت طبیعی، (ب) سه قسمت خاک (الف)

در شکل فوق، یک توده‌ی خاک با حجم V و وزن W ، به همان حالت طبیعی آورده شده است. بنابراین، در مورد حجم کل نمونه خاک داریم:

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

در رابطه فوق V_s حجم قسمت جامد، V_v حجم حفرات، V_w حجم آب درون حفرات، V_a حجم هوای درون حفرات می‌باشد. در خصوص وزن کل نمونه با صرف‌نظر از وزن هوا، داریم:

$$W = W_s + W_w$$

در رابطه فوق W_s وزن قسمت جامد و W_w وزن آب است. در مکانیک خاک، روابط حجمی شامل موارد زیر می‌باشد:

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

نسبت تخلخل:

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

نسبت پوکی:

درجه‌ی اشباع: $S = \frac{V_w}{V_v}$

در این رابطه، درجه‌ی اشباع معمولاً برحسب درصد بیان شده، برای خاک کاملاً خشک صفر و برای خاک کاملاً اشباع که در آن آب تمامی حفرات آن را پر کرده است، برابر یک یا ۱۰۰٪ می‌باشد. برای رابطه بین نسبت تخلخل و پوکی داریم:

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

در مکانیک خاک، روابط وزنی معمول شامل موارد زیر است:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \text{۱- میزان رطوبت:}$$

۲- وزن مخصوص:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \text{۱-۲ وزن مخصوص مرطوب خاک:}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V} \quad \text{۲-۲ وزن مخصوص دانه‌های جامد:}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_s} \quad \text{۲-۳ وزن مخصوص خشک خاک:}$$

در پیرامون رابطه بین وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت، داریم:

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

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_w + V_s} \quad \text{۲-۴ وزن مخصوص اشباع:}$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad \text{۲-۵ وزن مخصوص غوطه‌وری:}$$

حال، با استفاده از تعریف وزن مخصوص و وزن مخصوص خشک، داریم:

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

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

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

در رابطه‌های مشروحه بالا، G_s چگالی دانه و برابر $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ است. بین رابطه حجمی و وزنی، رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$\omega \times G_s = e \times S \Rightarrow e = \frac{\omega \times G_s}{S}$$

خلاصه‌ای از این روابط در جدول (۲-۱) آورده شده است:

جدول ۲-۱. اشکال مختلفی از روابط γ ، γ_d و γ_{sat}

رابطه	شماره رابطه
$\gamma = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1+e}$	(۲-۱۵)
$\gamma = \frac{(G_s + Se)\gamma_w}{1+e}$	(۲-۲۶)
$\gamma = \frac{(1+\omega)G_s\gamma_w}{1 + \frac{\omega G_s}{S}}$	(۲-۲۷)
$\gamma = G_s\gamma_w(1-n)(1+\omega)$	(۲-۲۸)
وزن مخصوص خشک	
$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$	(۲-۱۲)
$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e}$	(۲-۱۶)
$\gamma_d = G_s\gamma_w(1-n)$	(۲-۲۲)
$\gamma_d = \frac{G_s}{1 + \frac{\omega G_s}{S}}\gamma_w$	(۲-۲۹)
$\gamma_d = \frac{eS\gamma_w}{(1+e)\omega}$	(۲-۳۰)
$\gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$	(۲-۳۱)
$\gamma_d = \gamma_{sat} - \left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$	(۲-۳۲)
وزن مخصوص اشباع	
$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e}$	(۲-۱۸)
$\gamma_{sat} = [(1-n)G_s + n]\gamma_w$	(۲-۲۴)
$\gamma_{sat} = \left(\frac{1+\omega}{1+\omega G_s}\right)G_s\gamma_w$	(۲-۳۳)
$\gamma_{sat} = \left(\frac{e}{\omega}\right)\left(\frac{1+\omega}{1+e}\right)\gamma_w$	(۲-۳۴)
$\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$	(۲-۳۵)
$\gamma_{sat} = \gamma_d + \left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma_w$	(۲-۳۶)

تراکم نسبی

معمولاً، برای نشان دادن میزان و یا سستی خاک‌های دانه‌ای در محل، از تراکم نسبی استفاده می‌شود که به صورت زیر می‌باشد:

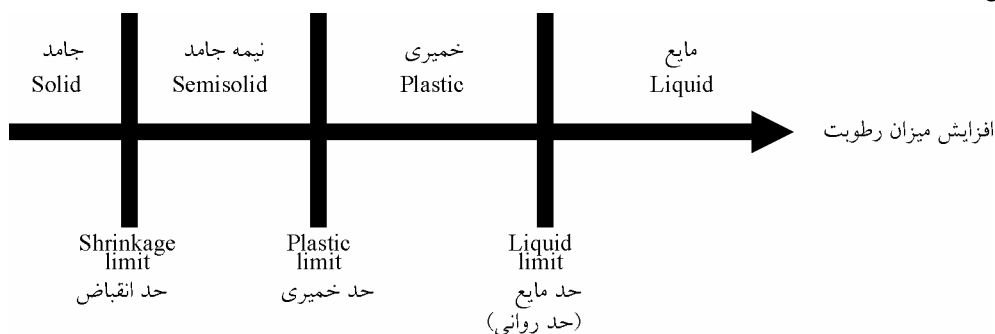
$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

در رابطه فوق e_{\max} و e_{\min} به ترتیب نسبت تخلخل خاک در شل‌ترین و متراکم‌ترین وضعیت خاک می‌باشد. محدوده D_r ، برای خاک‌های خیلی شل از صفر تا حداکثر و برای خاک‌های خیلی متراکم برابر یک است. با استفاده از تعریف وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر در خصوص تراکم نسبی، داریم:

$$D_r = \frac{\left[\frac{1}{\gamma_{d(\min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_d} \right]}{\left[\frac{1}{\gamma_{d(\min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_{d(\max)}} \right]} = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(\min)}}{\gamma_{d(\max)} - \gamma_{d(\min)}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_d} \right]$$

سفتی خاک: (حدا تر برگ)

این روش، برای توصیف سفتی خاک‌های ریزدانه براساس میزان رطوبت می‌باشد. در صورت مقدار پایین رطوبت در خاک به صورت یک جسم جامد و در صورت مقدار بالای رطوبت، به صورت یک مایع رفتار می‌کند.



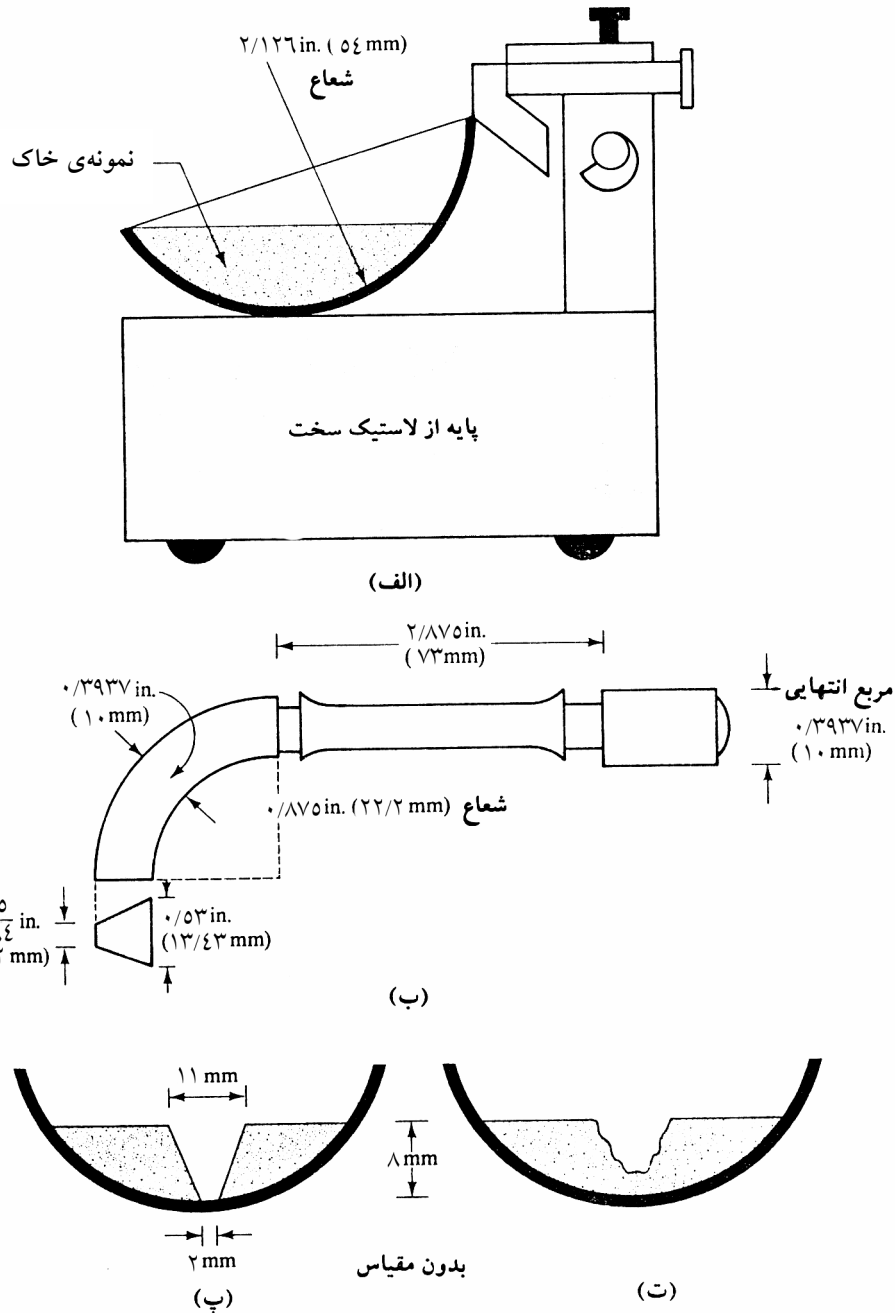
شکل ۲-۲. محدوده اتر برگ

آزمایش‌های مختلف خاک

۱- آزمایش حد مایع

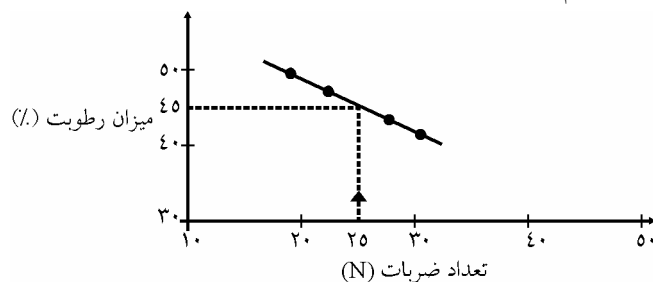
در شکل (۲-۳)، وسیله اندازه‌گیری حد مایع آورده شده است. این وسیله، دارای یک فنجان برنجی و یک پایه از جنس لاستیک می‌باشد. برای انجام این آزمایش، ابتدا مقداری خاک روی فنجان ریخته و با استفاده از شیپارزن استاندارد، شیاری در وسط نمونه خمیری خاک ایجاد می‌کنیم. حال، با پیچاندن دسته دستگاه، فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰ میلی‌متری روی پایه می‌افتد. میزان رطوبتی که به ازای آن به

علت ۲۵ ضربه فنجان، موجب بسته شدن شیار می شود، حد مایع یا روانی به دست می آید.



شکل ۲-۳. آزمایش مد مایع (الف) وسیله تعیین مد مایع، (ب) شیار زن، (پ) شیار خاک قبل از آزمایش، (ت) شیار خاک بعد از آزمایش

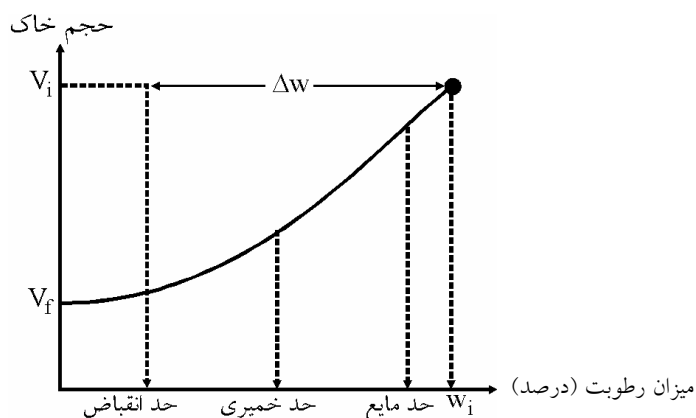
برای رسم منحنی جریان، با ثبت تعداد و ضربات لازم برای بسته شدن شیار و اندازه‌گیری رطوبت نمونه خاک، مختصات یک نقطه از منحنی جریان به دست می‌آید. در این منحنی، محور افقی تعداد ضربات به صورت لگاریتمی و محور عمودی میزان رطوبت برحسب درصد می‌باشد. معمولاً این آزمایش را در مورد یک خاک برای ۴ نمونه انجام می‌دهند.



۲- آزمایش حد انقباض

با کاهش رطوبت خاک، خاک منقبض می‌شود. این مسئله در واقع موجب کاهش حجم خاک می‌گردد. با ادامه این کار یعنی کاهش رطوبت، مقدار حجم ثابت بوده و برابر V_f می‌شود. بدین ترتیب، میزان رطوبت در این شرایط را حد انقباض می‌گویند و به صورت زیر می‌باشد:

$$S.L = \omega_i(\%) - \Delta\omega(\%)$$



حال در خصوص حد انقباضی، داریم:

$$S.L = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) \times 100 - \left(\frac{(V_i - V_f) \rho_w}{m_2} \right) \times 100$$

در رابطه فوق، m_1 جرم خاک مرطوب در شروع آزمایش، m_2 جرم خاک خشک، V_i حجم اولیه خاک مرطوب، V_f حجم خاک خشک در کوره و ρ_w جرم مخصوص آب است.

۳- آزمایش حد خمیری

میزان رطوبتی که به ازای آن در صورتی که فتیله‌ای به قطر ۳/۲ میلی‌متر به روش غلتاندن از خمیر خاک نمونه ساخته و آن خرد گردد، حد خمیری گفته می‌شود و با PL نشان می‌دهند. به عبارتی، حد خمیری حداقل میزان رطوبت مربوط به حالت خمیری خاک است.

نشانه خمیری

اختلاف بین حد مایع و حد خمیری خاک را نشانه‌ی خمیری می‌گویند.

$$PI = LL - PL$$

نشانه مایع

در یک خاک چسبنده در شرایط طبیعی، برای بیان سفتی نسبی از نشانه‌ی مایع (LI) استفاده می‌شود. نشانه مایع، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL}$$

در رابطه فوق، ω میزان رطوبت در جای خاک می‌باشد.

در جای نهشته خاکی تحکیم نیافته، میزان رطوبت می‌تواند بزرگ‌تر از حد مایع باشد.

$$LI > 1$$

در جای نهشته خاکی تحکیم یافته، میزان رطوبت می‌تواند کوچک‌تر از حد خمیری باشد.

$$LI < 1$$

حل مسائل

۱- ۱ تا ۵ روابط زیر را اثبات نمایید:

(رابطه ۲- ۳۱)

(مسئله ۱) $\gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$

(رابطه ۲- ۳۴)

(مسئله ۲) $\gamma_{sat} = \left(\frac{e}{\omega}\right)\left(\frac{1+\omega}{1+e}\right)\gamma_w$

(مسئله ۳) $e = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_d - \gamma_{sat} + \gamma_w}$

(مسئله ۴) $G_s = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w - \omega_{sat}(\gamma_{sat} - \gamma_w)}$

(مسئله ۵) $\omega_{sat} = \frac{n\gamma_w}{\gamma_{sat} - n\gamma_w}$

☑ حل:

مسئله ۱:

از رابطه وزن مخصوص اشباع، داریم:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V} = \frac{n\gamma_w V + W_s}{V} = n\gamma_w + \frac{W_s}{V}$$

از طرفی، براساس رابطه زیر، داریم:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

$$\gamma_{sat} = n\gamma_w + \frac{W_s}{V} = n\gamma_w + \gamma_d \Rightarrow \gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$$

☑ حل:

مسئله ۲:

از رابطه وزن مخصوص اشباع، داریم:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V} = \frac{\omega W_s + W_s}{V_v + V_s} = \frac{W_s(\omega + 1)}{V_s(e + 1)} = \frac{W_s}{V_s} \times \left(\frac{1 + \omega}{1 + e}\right) \quad (1)$$

از سوی دیگر، داریم:

$$\frac{W_s}{V_s} = \frac{V_v}{V_s} \times \frac{W_s}{V_v} = e \times \frac{W_s}{V_v \times W_w} \times W_w = e \times \frac{1}{\frac{W_w}{W_s} \times V_v} \times W_w$$

$$\Rightarrow \frac{W_s}{V_s} = \frac{e}{\omega} \times \frac{W_w}{V_v} = \frac{e}{\omega} \times \gamma_w \quad (2)$$

در نهایت، با قرار دادن رابطه (۲) در معادله (۱)، داریم:

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{e}{\omega} \right) \left(\frac{1 + \omega}{1 + e} \right) \gamma_w$$

☑ حل:

مسئله ۳:

رابطه فوق رابطه‌ای درست نیست و به نظر اشتباه تایپی بوده و معادله درست، به صورت زیر می‌باشد:

$$e = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_d}{\gamma_d - \gamma_{sat} + \gamma_w}$$

براساس رابطه‌ی اثبات شده در مسئله (۱)، داریم:

$$\gamma_d = G_s \gamma_w (1 - n), \quad \gamma_{sat} = G_s \gamma_w (1 - n) + n \gamma_w$$

با جاگذاری در رابطه خواسته شده، داریم:

$$e = \frac{(G_s \gamma_w (1 - n) + n \gamma_w) - (G_s \gamma_w (1 - n))}{(G_s \gamma_w (1 - n) - (G_s \gamma_w (1 - n) + n \gamma_w)) + \gamma_w}$$

با ساده‌سازی، داریم:

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

که رابطه فوق درست می‌باشد.

☑ حل:

مسئله ۴:

از رابطه‌ی وزن مخصوص اشباع، داریم:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V_v + V_s}$$

با جاگذاری $\omega_{sat} = \frac{W_w}{W_s}$ و $e = \frac{V_v}{V_s}$ در رابطه فوق داریم:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s (1 + \omega_{sat})}{V_s (1 + e)} = \frac{W_s}{V_s} \left(\frac{1 + \omega_{sat}}{1 + e} \right) = \gamma_s \frac{1 + \omega_{sat}}{1 + e}$$

با توجه به رابطه‌ی $\omega \cdot G_s = e \cdot S$ و در حالت اشباع $S=1$ ، داریم:

$$\omega_{sat} \cdot G_s = e$$

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

با طرفین و وسطین رابطه فوق، داریم:

$$\gamma_{sat} = \gamma_{sat} \omega_{sat} G_s = G_s \gamma_w + \gamma_w \omega_{sat} G_s$$

$$\gamma_{sat} = G_s (\gamma_w + \gamma_w \omega_{sat} - \omega_{sat} \gamma_{sat})$$

$$\Rightarrow G_s = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w - \omega_{sat} (\gamma_{sat} - \gamma_w)}$$

✓ حل:

مسئله ۵:

از میزان رطوبت اشباع، داریم:

$$\omega_{sat} = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_w}{W - W_w}$$

با ضرب صورت و منخرج رابطه‌ی فوق $\frac{n}{V_v}$ ، داریم:

$$\omega_{sat} = \frac{\frac{n}{V_v} \times W_w}{n \frac{W}{V_v} - \frac{n}{V_v} \times W_w} = \frac{n \gamma_w}{n \frac{W}{V_v} - n \gamma_w}$$

با در نظر گرفتن $n = \frac{V_v}{V}$ ، داریم:

$$\omega_{sat} = \frac{n \gamma_w}{\frac{V_v}{V} \times \frac{W}{V_v} - n \gamma_w} = \frac{n \gamma_w}{\frac{W}{V} - n \gamma_w} = \frac{n \gamma_w}{\gamma_{sat} - n \gamma_w}$$

۶- اطلاعات خاکی به صورت زیر هستند:

$$G_s = ۲٫۶۷, \quad \gamma = ۱۷٫۶ \text{ kN/m}^۳, \quad \omega = ۱۰٫۸\%$$

مطلوب است تعیین: الف) وزن مخصوص خشک، ب) نسبت تخلخل، پ) پوکی و ت) درجه اشباع؟

✓ حل:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} = \frac{۱۷٫۶}{1 + ۰٫۱۰۸} = ۱۵٫۸۸ \frac{\text{kN}}{\text{m}^۳}$$

الف) وزن مخصوص خشک خاک:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \Rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d} = \frac{۲٫۶۷ \times ۹٫۸۱ - ۱۵٫۸۸}{۱۵٫۸۸} = ۰٫۶۵$$

ب) نسبت تخلخل:

$$\Rightarrow e = ۰٫۶۵$$

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{۰٫۶۵}{1 + ۰٫۶۵} = ۰٫۳۹$$

پ) پوکی:

$$\omega G_s = e S \Rightarrow S = \frac{\omega G_s}{e} = \frac{۰٫۱۰۸ \times ۲٫۶۷}{۰٫۶۵} = ۰٫۴۴۴$$

ت) درجه‌ی اشباع:

$$\Rightarrow S = ۴۴٫۴\%$$

۷ و ۸- مسئله (۶) را با داده‌های زیر تکرار کنید:

$$(مسئله ۷) \quad G_s = ۲٫۷, \quad \gamma = ۲۰٫۸ \text{ kN/m}^۳, \quad \omega = ۱۸٫۶\%$$

$$(مسئله ۸) \quad G_s = ۲٫۷۴, \quad \gamma = ۲۰٫۶ \text{ kN/m}^۳, \quad \omega = ۱۶٫۶\%$$