

فصل ۲:

ترکیب خاک، حدود اتربرگ

جزوه درس مکانیک خاک مقدماتی (مکانیک خاک ۱)

استاد: عبدالمتین ستایش

برای ارسال نظرات و پیشنهادات به سایت شخصی اینجانب رجوع نموده و یا نظرات و یا پیشنهادات خود را به آدرس
پست الکترونیک زیر ارسال نمایید:

Website: www.ams.ir, Email: a_matin_s@yahoo.com

آخرین ویرایش: پاییز ۸۹

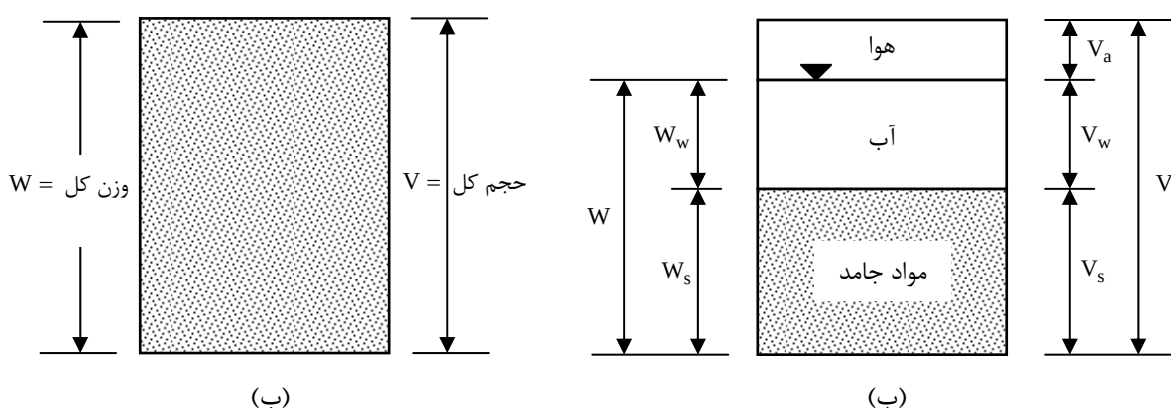


۱-۲ | مقدمه

در وضعیت طبیعی، خاک یک سیستم سه قسمتی مرکب از مواد جامد، آب و هوا می باشد. در این فصل روابط وزنی - حجمی خاک را مورد بررسی قرار می دهیم.

۲-۲ | روابط وزنی - حجمی

در شکل ۱-۲ الف یک توده خاک با حجم V و وزن W به همان صورتی که در طبیعت یافت می شود نشان داده شده است. برای حصول روابط وزنی-حجمی، سه قسمت خاک (یعنی مواد جامد، آب و هوا) مطابق شکل ۱-۲ ب از یکدیگر جدا می شوند. در نتیجه حجم کل نمونه خاک به صورت زیر قابل بیان است:



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

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

$$\text{حجم قسمت جامد} = V_s$$

$$\text{حجم حفرات} = V_v$$

$$\text{حجم آب درون حفرات} = V_w$$

$$\text{حجم هوای درون حفرات} = V_a$$

با صرف نظر کردن از وزن هوا، وزن کل نمونه را می توان به صورت زیر نوشت:

$$W = W_s + W_w$$

که در آن:

$$\text{وزن قسمت جامد} = W_s$$

$$\text{وزن آب} = W_w$$

روابط حجمی معمول در مکانیک خاک، عبارتند از نسبت تخلخل، پوکی و درجه اشباع.

نسبت تخلخل به صورت نسبت حجم حفرات به حجم قسمت جامد تعریف می شود:

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

که در آن e نسبت تخلخل می باشد.

پوکی، نسبت حجم حفرات به حجم کل است:

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

درجه اشباع به صورت نسبت حجم آب به حجم حفرات تعریف می شود:

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

که در آن S درجه اشباع است که معمولاً بر حسب درصد بیان می شود. رابطه بین نسبت تخلخل و پوکی را می توان از رابطه ۱-۲، ۲-۲ و ۴-۲ به صورت زیر بدست آورد:

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

و به طور معکوس، از رابطه ۶-۲ می توان نتیجه گرفت:

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

روابط وزنی معمول در مکانیک خاک عبارتند از: درصد رطوبت و وزن مخصوص. **درصد رطوبت** ω که میزان آب نیز گفته می شود به صورت نسبت آب به وزن قسمت جامد تعریف می شود:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

وزن مخصوص را می توان بر حسب وزن قسمت جامد، میزان رطوبت و حجم کل نوشت:

برای این کار از روابط ۲-۲، ۸-۲ و ۹-۲ می توان نوشت:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s [1 + W_w / W_s]}{V} = \frac{W_s (1 + \omega)}{V}$$

مهندسین خاک اغلب به وزن مخصوص تعریف شده طبق رابطه ۹-۲ وزن مخصوص مرطوب می گویند. در مقابل، وزن مخصوص خشک خاک، γ_d به صورت زیر تعریف می شود:

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

با استفاده از روابط ۱۰-۲ و ۱۱-۲، رابطه بین وزن مخصوص مرطوب و وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت به صورت زیر نوشته می شود:

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

وزن مخصوص در دستگاه آحاد SI معمولاً بر حسب نیوتن بر متر مکعب (N/m^3) یا کیلونیوتن بر متر مکعب (kN/m^3) و در دستگاه MKS عملی بر حسب کیلوگرم نیرو بر متر مکعب (kgf/m^3) و یا تن بر متر مکعب (T/m^3) بیان می شود.

۳-۲ | روابط بین وزن مخصوص، نسبت تخلخل، درصد رطوبت و چگالی دانه ها

برای اثبات روابط بین پارامترهای وزنی و حجمی خاک علاوه بر استفاده از روابط پایه، از دو رابطه مفید زیر استفاده می نماییم:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \times \gamma_w} \rightarrow W_s = v_s G_s \gamma_w$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \rightarrow W_w = \omega W_s = \omega V_s G_s \gamma_w$$

حال با استفاده از تعریف وزن مخصوص و جایگزینی دو رابطه کاربردی فوق می توان نوشت:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{V_s G_s \gamma_w + \omega V_s G_s \gamma_w}{V_s + V_v}$$

با تقسیم صورت و مخرج رابطه فوق بر V_s نتیجه می شود:

$$\gamma = \frac{\frac{V_s G_s \gamma_w + \omega V_s G_s \gamma_w}{V_s}}{\frac{V_s + V_v}{V_s}} = \frac{G_s \gamma_w + \omega G_s \gamma_w}{1 + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} (1 + \omega) \rightarrow \gamma = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} (1 + \omega)$$

چنانچه رابطه وزن مخصوص خشک γ_d را برحسب روابطه پایه به صورت فوق بنویسیم نتیجه می شود:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{V_s G_s \gamma_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

با توجه با روابط فوق بار دیگر می توان نتیجه گرفت:

$$\gamma = \gamma_d (1 + \omega)$$

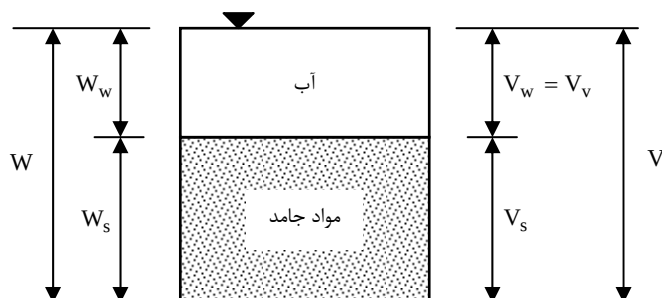
برای تعریف درجه اشباع بر حسب درصد رطوبت، چگالی و نسبت تخلخل به صورت زیر عمل می نماییم:

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w}}{\frac{V_s}{\gamma_w}} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w V_s}}{\frac{1}{e}} = \frac{\omega V_s G_s \gamma_w}{\gamma_w V_s} = \frac{\omega G_s}{e} \quad \text{یا} \quad S_e = \omega G_s$$

رابطه بدست آمده برای حل مسائلی که شامل روابط سه قسمتی می باشند بسیار مفید است.

اگر نمونه خاک اشباع باشد، بدین معنی که فضای حفرات کاملاً از آب پر باشد (شکل ۲-۳) روابط مربوط به وزن

مخصوص اشباع می تواند به طریق مشابه بدست آید:



$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V_v + V_s} = \frac{\omega V_s G_s \gamma_w + V_s G_s \gamma_w}{V_v + V_s} = \frac{\omega G_s \gamma_w + G_s \gamma_w}{\frac{V_v}{V_s} + 1} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} (1 + \omega)$$

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

وزن مخصوص خاک در حالت مستغرق یعنی وقتی که نیروی ارشمیدس از پایین اثر می کند به صورت زیر تعریف می شود:

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

به وزن مخصوص فوق، وزن مخصوص غوطه وری خاک اطلاق می شود.

نکته: !

چنانچه بخواهیم وزن مخصوص خاک به ازاء درصد درجه اشباع مشخص را بدست آوریم به دو طریق می توانیم عمل نماییم:

۱- از رابطه $Se = \omega G_s$ درصد رطوبت معادل درجه اشباع مشخص را بدست آورد و سپس آنرا در رابطه وزن مخصوص خاک قرار دهیم.

۲- مستقیماً از رابطه زیر استفاده نماییم:

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

$$\omega G_s = Se \rightarrow \gamma_{(s\%)} = \frac{G_s + Se}{1 + e} \gamma_w$$

مثال: در خاکی، پوکی 0.28 و چگالی دانه ها 2.65 می باشد. مطلوب است تعیین وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص در درجه اشباع 56%، وزن مخصوص اشباع و وزن مخصوص غوطه وری خاک.

$$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{0.28}{1 - 0.28} = 0.39$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} = \frac{2.65 \times 9.81}{1 + 0.29} = 18.7 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{s=56\%} = \frac{G_s + Se}{1 + e} \gamma_w = \frac{2.65 + 0.56 \times 0.39}{1 + 0.39} \times 9.81 = 20.24 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w = \frac{2.65 + 0.39}{1 + 0.39} \times 9.81 = 21.45 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 21.45 - 9.81 = 11.64 \text{ kN/m}^3$$

نکته: !

بین وزن مخصوص اشباع و وزن مخصوص خشک رابطه زیر بر قرار است:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} + \frac{e}{1 + e} \gamma_w \rightarrow \gamma_{sat} = \gamma_d + \frac{e}{1 + e} \gamma_w = \gamma_d + n \gamma_w \quad \text{یا} \quad \gamma_d = \gamma_{sat} - n \gamma_w$$

نکته: !

اگر بدون تغییر در حجم خاک رطوبت آن را تغییر دهیم، تغییری در وزن مخصوص خشک خاک بوجود نخواهد آمد و خواهیم داشت:

$$\gamma_{d1} = \gamma_{d2} \rightarrow e_1 = e_2 \rightarrow \frac{\gamma_1}{1 + \omega_1} = \frac{\gamma_2}{1 + \omega_2}$$

به عبارت دیگر تغییر درصد رطوبت بدون تغییر حجم خاک باعث ثابت ماندن نسبت تخلخل خاک می شود.

مثال: وزن مخصوص طبیعی خاکی با رطوبت 20%، 21.6 kN/m^3 است. اگر مقداری از رطوبت این خاک بدون کاهش حجم

خاک تبخیر شود و وزن مخصوص آن به 20 kN/m^3 برسد، درصد رطوبت آن چقدر خواهد شد؟

$$\frac{21.6}{1 + 0.2} = \frac{20}{1 + \omega} \rightarrow \omega = 0.1111 = 11.11\%$$

نکته: !

اگر بخواهیم مقدار آبی را که باید به خاک اضافه شود تا آن را اشباع کند بدست آوریم باید وزن خاک در حالت اشباع را بدست آورده ($W_{sat} = \gamma_{sat} \times V$) و سپس وزن موجود خاک را از آن کسر نماییم.

مثال:

در خاکی پوکی 0.39، چگالی دانه ها 2.67 و درصد رطوبت 0.15 است. مطلوب است وزن آبی که باید به 20m^3 از آن خاک افزود تا 80% اشباع شود.

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.39}{1-0.39} = 0.64$$

$$\gamma = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} (1+\omega) = \frac{2.67 \times 9.81}{1+0.64} (1+0.15) = 18.37 \text{ kN/m}^3 \rightarrow W = \gamma \times V = 18.37 \times 20 = 367.4 \text{ kN}$$

$$\gamma_{s=80\%} = \frac{G_s + Se}{1+e} \gamma_w = \frac{2.67 + 0.8 \times 0.64}{1+0.64} \times 9.81 = 19 \text{ kN/m}^3 \rightarrow W_{s=80\%} = 19 \times 20 = 380 \text{ kN}$$

$$\Delta\omega = 380 - 367.4 = 12.6 \text{ kN}$$

مثال:

در وضعیت طبیعی یک خاک مرطوب دارای حجم $v = 9345\text{cm}^3$ و وزن 177.86N می باشد. وزن خشک شده در کوره خاک 153.82N است. مطلوب است محاسبه میزان رطوبت، وزن مخصوص مرطوب، وزن مخصوص خشک، نسبت تخلخل، پوکی و درجه اشباع. $G_s = 2.71$ و $\gamma_w = 9.81\text{kN/m}^3 = 1980\text{kN/m}^3$

حل مسئله:

با توجه به رابطه درصد رطوبت داریم:

$$\omega = \frac{177.86 - 153.82}{153.82} \times 100 = 15.6\%$$

از آنجائی که حجم مرطوب و خشک خاک و همچنین حجم کل خاک معلوم هستند وزن مخصوص مرطوب و خشک خاک به راحتی بدست می آید:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{177.86 \times 10^{-3}}{9345 \times 10^{-6}} = 19.03 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{153.82 \times 10^{-3}}{9345 \times 10^{-6}} = 16.46 \text{ kN/m}^3$$

با داشتن چگالی دانه های جامد و وزن مخصوص آب می توان حجم هر یک از فازهای خاک را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$W_s = V_s G_s \gamma_w \rightarrow V_s = \frac{153.82}{2.71 \times 9810} \times 10^6 = 5786 \text{ cm}^3$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{24}{9810} \times 10^6 = 2446 \text{ cm}^3$$

$$V_a = V - V_w - V_s = 9345 - 5786 - 2446 = 1113 \text{ cm}^3$$

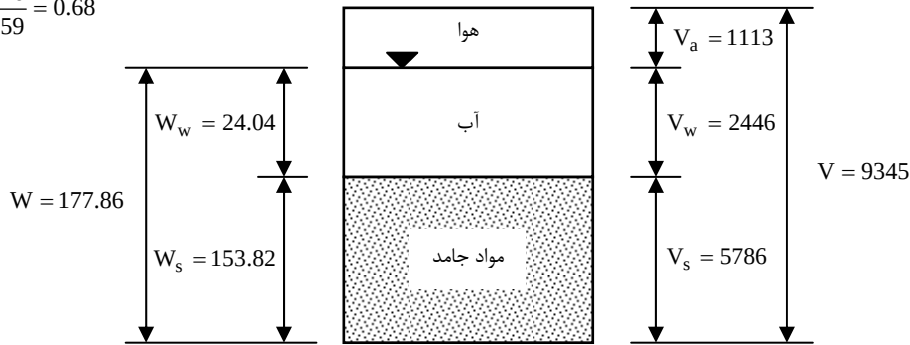
حال با استفاده از روابط پایه می توان تخلخل، پوکی و درجه اشباع را محاسبه نمود:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{2446 + 1113}{5786} = \frac{3559}{5786} = 0.615$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.615}{1+0.615} = 0.38$$

۷

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{2446}{3559} = 0.68$$



مثال :

وزن مرطوب 0.00283 m^3 خاک 55.4 N می باشد. اگر میزان رطوبت $\omega = 14\%$ و چگالی دانه ها $G_s = 2.72$ باشد، مطلوب است تعیین (الف) وزن مخصوص مرطوب (ب) وزن مخصوص خشک (پ) نسبت تخلخل (ت) توپی (ث) درجه اشباع و (ج) حجم اشغال شده توسط آب. $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{55.4 \times 10^{-3}}{0.00283} = 19.58 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} = \frac{19.58}{1 + 0.12} = 17.48 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \rightarrow 17.48 = \frac{2.72 \times 9.81}{1 + e} \rightarrow e = 0.526$$

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{0.526}{1 + 0.526} = 0.345$$

$$S = \frac{\omega G_s}{e} = \frac{0.12 \times 2.72}{0.526} = 0.621$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W - W_s}{W_s} \rightarrow 0.12 = \frac{55.4 - W_s}{W_s} \rightarrow W_s = 49.494 \text{ N} \quad \text{یا} \quad W_s = \frac{W}{1 + \omega} = \frac{55.4}{1 + 0.12} = 49.494 \text{ N}$$

$$W_w = W - W_s = 55.4 - 49.494 \text{ N}$$

$$V_w = \frac{5.936}{9810} \times 10^6 = 605 \text{ cm}^3$$

مثال :

وزن مخصوص خشک خاکی با پوکی $n = 0.387$ مساوی $\gamma_d = 15.67 \text{ kN/m}^3$ می باشد. نسبت تخلخل و چگالی دانه های خاک را تعیین نمایید. $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$

$$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{0.387}{1 - 0.387} = 0.631$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \rightarrow 15.67 = \frac{G_s \times 9.81}{1 + 0.631} \rightarrow G_s = 2.60$$

مثال :

نمونه ای از یک خاک رس اشباع با رطوبتی معادل $\omega = 56\%$ در دست است. چنانچه $G_s = 2.72$ باشد، مطلوب است تعیین مقادیر n ، e و γ_{sat} .

$$e = G_s \cdot \omega = 2.72 \times 0.56 = 1.52$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{1.52}{1+1.52} = 0.6$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{2.72 + 1.52}{1+1.52} \times 9.81 = 16.5 \text{ kN/m}^3$$

مثال: 

نمونه ای از خاک رس مرطوب به حجم 50 cm^3 با استفاده از یک نمونه بردار فلزی استوانه ای شکل بدست آمده است. جرم نمونه برابر با 85gr در حالت مرطوب و 60gr در حالت خشک می باشد. مطلوب است محاسبه درصد رطوبت، نسبت تخلخل، درجه اشباع و وزن مخصوص خشک. $G_s = 2.7$

$$\omega = \frac{85 - 60}{60} = 0.4167$$

$$\gamma = \frac{85 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6}} = 16.67 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{16.67}{1 + 0.4167} = 11.767 \text{ kN/m}^3$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.7 \times 9.81}{11.767} - 1 = 1.25$$

$$S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.7 \times 0.4167}{1.25} \times 100 = 90\%$$

مثال: 

خاکی با 12% درصد رطوبت، متراکم و وزن مخصوص آن به 21.5 kN/m^3 می رسد. اگر چگالی دانه ها $G_s = 2.65$ باشد، مطلوب است تعیین وزن مخصوص خشک، نسبت تخلخل و درجه اشباع خاک.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} = \frac{21.5}{1 + 0.12} = 19.19 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \rightarrow 19.19 = \frac{2.65 \times 9.81}{1 + e} \rightarrow e = 0.354$$

$$S \cdot e = G_s \cdot \omega \rightarrow S \times 0.354 = 2.65 \times 0.12 \rightarrow S = 0.9$$

۴-۲ | تراکم نسبی

تراکم نسبی معمولاً برای نشان دادن میزان تراکم یا سستی خاک های دانه ای در محل، مورد استفاده قرار می گیرد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (1-2)$$

که در آن:

D_r = تراکم نسبی که معمولاً به صورت درصدی بیان می شود

e = نسبت تخلخل در محل

e_{max} = نسبت تخلخل خاک در شل ترین وضعیت

e_{min} = نسبت تخلخل خاک در متراکم ترین وضعیت

دامنه تغییرات D_r از ۰ برای خاک های شل تا حداکثر ۱ برای خاک های خیلی متراکم می باشد. با توجه به تراکم نسبی، خاک های دانه ای مطابق جدول ۱-۲ توصیف می شوند. در جدول ۲-۲ نیز برای بعضی خاک ها در حالت طبیعی، مقادیر نمونه برای نسبت تخلخل، میزان رطوبت در شرایط اشباع و وزن مخصوص خشک ارائه شده است.

جدول ۱-۲ توصیف خاک های دانه ای بر حسب تراکم نسبی

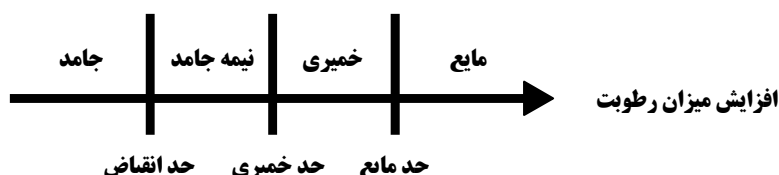
تراکم نسبی (درصد)	توصیف خاک های دانه ای
0 - 15	خیلی شل
15 - 50	شل
50 - 70	متوسط
70 - 85	متراکم
85 - 100	خیلی متراکم

جدول ۲-۲ مقادیر نمونه برای نسبت تخلخل، میزان رطوبت در شرایط اشباع و وزن مخصوص خشک

نوع خاک	نسبت تخلخل e	میزان رطوبت طبیعی در وضعیت اشباع (%)	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)
ماسه شل یکنواخت	0.8	30	14.5
ماسه شل متراکم	0.45	16	18
ماسه لای دار شل با دانه های تیز گوشه	0.65	25	16
ماسه لای دار متراکم با دانه های تیز گوشه	0.4	15	19
رس سفت	0.6	21	17
رس نرم	0.9-1.4	30 - 50	11.5-14.5
ماسه بادی	0.9	25	13.5
رس آبی نرم	2.5-3.2	90 - 120	6-8
تیل یخرفت	0.3	90 - 120	21

۵-۲ | سفتی (قوام) خاک

وقتی در خاکهای ریزدانه، کانی های رسی ظاهر شود، با مرطوب کردن، خاک حالت خمیری به خود می گیرد و آن را می توان بدون خرد شدن شکل داد. این خاصیت چسبندگی به علت آب جذب شده ای است که ذرات رس را احاطه کرده است. در اوایل دهه ۱۹۰۰، دانشمند سوئدی، اتربرگ روشی برای توصیف سفتی خاک های ریزدانه بر حسب میزان رطوبت ابداع نمود. در میزان رطوبت خیلی کم، خاک مثل یک جسم جامد عمل می کند. در طوبت خیلی بالا، مخلوط آب و خاک می تواند به صورت یک مایع جاری شود. به طور کلی همانند شکل ۲-۲ بر حسب میزان رطوبت، طبیعت رفتار خاک به یکی از چهار حالت جامد، نیمه جامد، خمیری و مایع خواهد بود.



شکل ۲-۲ حدود اتربرگ

میزان رطوبت (برحسب درصد) در نقطه انتقال از جامد به نیمه جامد، حد انقباض و در نقطه انتقال از نیمه جامد به خمیری، حدی خمیری و از خمیری به مایع، حد مایع یا حد روانی نامیده می شود. حدود نامبرده به حدود اتربرگ معروف هستند.

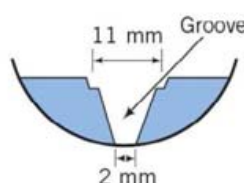
حد مایع (حد روانی)

در شکل ۲-۳ نمای جانبی وسیله اندازه گیری حد مایع نشان داده شده است. این وسیله شامل یک فنجان برنجی و یک پایه لاستیکی سخت می باشد. با پیچاندن دسته ای، فنجان از روی پایه قدری بلند شده و به طور ناگهانی روی آن می افتد.

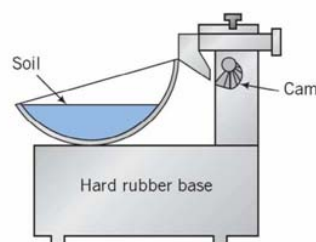
برای انجام آزمایش تعیین حد روانی خمیر خاک در فنجان قرار داده شده و با استفاده از شیازن استاندارد شیری در وسط نمونه خمیری خاک ایجاد می شود. سپس با پیچاندن دسته دستگاه، فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰ میلیمتری بر آن می افتد. درصد رطوبتی که به ازای آن به علت ۲۵ ضربه فنجان، شیاز ایجاد شده در نمونه داخل فنجان، بسته می شود حد روانی خوانده می شود.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۲-۳ آزمایش حد روانی (الف) نمای جانبی دستگاه تعیین حد روانی (ب) شیاز زن (پ) دستگاه تعیین حد روانی

تنظیم رطوبت به طوری که دقیقاً به علت ۲۵ ضربه، عرض شیاز بسته شود مشکل است. بنابراین حداقل چهار آزمایش برای خاک مورد مطالعه با رطوبت های مختلف انجام شده و تعداد ضربات لازم برای بستن شیاز اندازه گیری می شود. میزان رطوبت باید طوری باشد که تعداد ضربات N بین ۱۵ تا ۳۵ قرار گیرد. سپس مطابق شکل ۲-۴، میزان رطوبت بر حسب درصد در مقابل تعداد ضربات N در روی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم می شود. رابطه بین میزان رطوبت و $\log N$ تقریباً به صورت خط مستقیم است و به نمودار آن، نمودار جریان می گویند. با داشتن نمودار می توان درصد رطوبت نظیر $N=25$ را که همان حد روانی می باشد را بدست آورد. شیب خط جریان، نشانه جریان نامیده شده و به صورت زیر بیان می شود:

$$I_F = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\log \left(\frac{N_2}{N_1} \right)} \quad (2-2)$$

I_F = نشانه جریان

ω_1 = میزان رطوبت (بر حسب درصد) نظیر تعداد ضربات N_1

ω_2 = میزان رطوبت (بر حسب درصد) نظیر تعداد ضربات N_2

بنابراین رابطه منحنی جریان در شکل کلی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\omega = -I_F \log N + c \quad (3-2)$$

رابطه تجربی برای تعیین حد مایع به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$LL = \omega_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad (4-2)$$

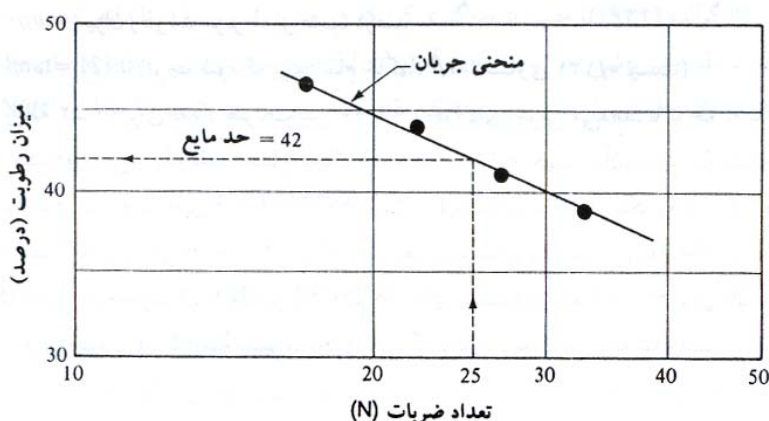
که در آن:

$N =$ تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار استاندارد در وسیله تعیین حد مایع

$\omega_N =$ میزان رطوبت مربوطه بر حسب درصد

$\tan \beta = 0.121$ (توجه شود که برای تمام خاک ها، $\tan \beta$ مساوی ۰/۱۲۱ نیست)

رابطه ۴-۲ برای تعداد ضربات بین ۲۰ تا ۳۰ جواب های خوبی می دهد. با توجه به اینکه در هنگام استفاده از این رابطه فقط احتیاج به یک نقطه است، از این جهت به آن، **روش یک نقطه ای** گفته می شود. علت اینکه روش یک نقطه ای نتایج مناسب به دست می دهد این است که در دامنه تغییرات رطوبت برای $N = 20$ تا $N = 30$ کوچک است. در جدول ۳-۲ مقادیر $(N/25)^{0.121}$ برای استفاده در رابطه ۴-۲ برای $N = 20$ تا $N = 30$ و در جدول ۴-۲ دامنه تغییرات حدود اتربرگ برای کانی های رسی ارائه شده است.



شکل ۴-۲ منحنی جریان برای تعیین حد مایع

جدول ۳-۲ مقدار $(N/25)^{0.121}$

N	$(N/25)^{0.121}$	N	$(N/25)^{0.121}$
20	0.973	26	1.005
21	0.979	27	1.009
22	0.985	28	1.014
23	0.990	29	1.018
24	0.995	30	1.022
25	1.000		

جدول ۴-۲ حدود اتربرگ برای کانی های رسی

حد انقباض	حد خمیری	حد روانی	کانی
8.5-15	50-100	100-900	مونت موریلونیت Montmorillonite
	19-27	37-72	مونترونیت Nontronite
15-17	35-60	60-120	ایلیت Illite
25-29	25-40	30-110	کائولینیت Kaolinite
	47-60	50-70	هالوزیت هیدراته Hydrated Halloysite
	30-45	35-55	هالوزیت Dehydrated halloysite
	100-120	160-230	آتاپولگیت Attapulgite
	36-40	44-47	کلریت Chlorite
	130-140	200-250	الوفین Allophane

کاساگرانده (۱۹۳۲) چنین نتیجه گیری کرد که هر ضربه در وسیله استاندارد تعیین حد مایع متناظر با مقاومت برشی خاک در حدود 0.1 kN/m^2 می باشد. بنابراین حد مایع برای خاک های ریزدانه، میزان رطوبتی را به دست می دهد که مقاومت برشی به ازای آن تقریباً مساوی 2.5 kN/m^2 است

حد خمیری (PL)

حد خمیری میزان رطوبتی (بر حسب درصد) است که به ازای آن اگر فتيله ای به قطر $3/2$ میلیمتر از خمیر خاک نمونه (با روش غلتاندن) ساخته شود، خرد گردد. حد خمیری پایین ترین میزان رطوبت مربوط به حالت خمیری خاک است. روش آزمایش ساده است و مطابق شکل ۲-۵-ب با غلتاندن تکه ای از خمیر خاک بر روی یک صفحه شیشه ای به وسیله دست صورت گیرد.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۵ آزمایش تعیین حد خمیری (الف) وسایل مورد نیاز آزمایش (ب) روش غلتاندن نمونه

توجه: هرچه در خاکی ریزدانه هان آن جاذب آب بیشتری باشند، خاک چسبنده تر خواهد بود و این چسبندگی بیشتر سبب می شود تا اولاً حد روانی افزایش یابد چراکه خاک چسبنده دیرتر روان شده و برای روان شدن به رطوبت بیشتری نیاز دارد، ثانیاً سبب می شود حد خمیری کاهش پیدا کند زیرا خاک چسبنده استعداد خمیری شدن بیشتری را دارد و زودتر و با رطوبت کمتری به حالت خمیری در می آید.

بنابراین می توان نتیجه گرفت که هرچه فاصله بین حد خمیری و حد روانی بیشتر باشد، خاک چسبنده تر و خمیری تر خواهد بود. لذا این فاصله را نشانه خمیری می نامند.

نشانه خمیری (PI) اختلاف بین حد مایع و حد خمیری خاک می باشد:

$$PI = LL - PL$$

(۵-۲)

حد انقباض (SL)

با از دست دادن رطوبت، خاک منقبض می شود (حجم آن کم می گردد). با کاهش پیوسته رطوبت، مرحله ای می رسد که از آن به بعد، کاهش رطوبت دیگر سبب کاهش حجم نمی شود. میزان رطوبت، بر حسب درصد که در آن کاهش حجم خاک متوقف می گردد، حد انقباض نامیده می شود.

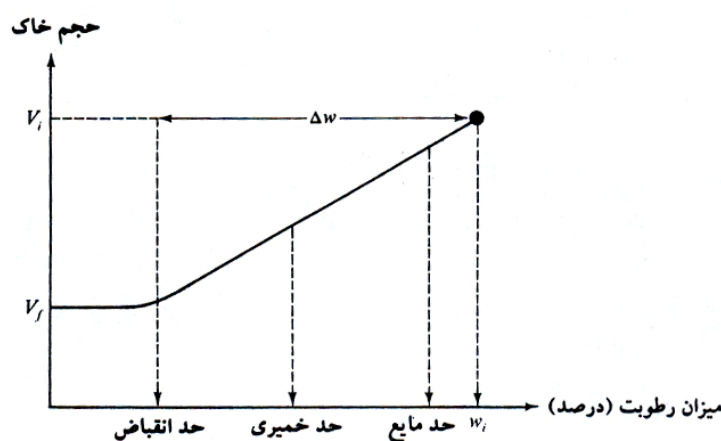
آزمایش حد انقباض (ASTM D427) در آزمایشگاه درون یک ظرف چینی به قطر ۱/۷۵ اینچ (۴۴/۴ میلی‌متر) و عمق ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) انجام می‌شود. داخل ظرف توسط یک روغن مخصوص چرب شده و سپس با خاک مرطوب کاملاً پر می‌شود. با یک وسیله لب تیز، سطح نمونه هم تراز با لبه های ظرف، صاف می‌شود. جرم خاک داخل ظرف یادداشت شده و سپس توسط کوره خشک می‌شود. پس از در آوردن از کوره، کاهش حجم خاک با ریختن جیوه اندازه گیری می‌گردد. با مراجعه به شکل ۶-۲، حد انقباض را می‌توان به روش زیر محاسبه نمود:

$$SL = \omega_i(\%) - \Delta\omega(\%) \quad (۶-۲)$$

که در آن:

ω_i = میزان رطوبت اولیه خاک وقتی که خاک درون ظرف آزمایش قرار داده می‌شود.

$\Delta\omega$ = تغییر در میزان رطوبت (اختلاف بین میزان رطوبت اولیه و میزان رطوبت در حد انقباض) مقادیر مذکور با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:



شکل ۶-۲ تعریف حد انقباض

$$\omega_i(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (۷-۲)$$

که در آن:

m_1 = جرم خاک مرطوب در ظرف در شروع آزمایش (گرم)

m_2 = جرم خاک خشک در ظرف (به شکل ۷-۲ مراجعه شود) (گرم)

همچنین

$$\Delta\omega(\%) = \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2} \times 100 \quad (۸-۲)$$

که در آن:

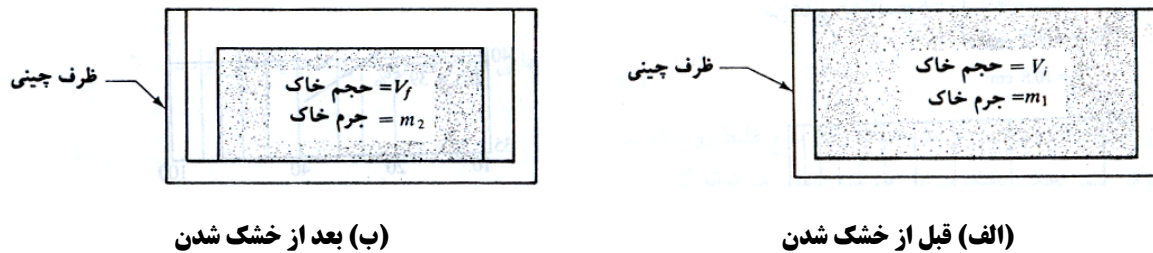
V_i = حجم اولیه خاک مرطوب (که همان حجم داخلی ظرف است cm^3)

V_f = حجم خاک خشک شده در کوره (cm^3)

ρ_w = جرم مخصوص آب (g/cm^3)

حال با ترکیب روابط ۶-۲، ۷-۲ و ۸-۲ خواهیم داشت:

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) (100) - \left[\frac{(V_i - V_f) \rho_w}{m_2} \right] (100) \quad (9-2)$$



شکل ۷-۲ آزمایش حد انقباض

مثال :

در یک آزمایش حد روانی و حد خمیری نتایج زیر حاصل شده است:

تعداد ضربات N	میزان رطوبت (%)	آزمایش حد روانی
15	42	
20	40.8	
28	39.1	

آزمایش حد خمیری
میزان رطوبت = 18.7%

(الف) منحنی جریان را برای داده های حد مایع رسم نموده و حد مایع را تعیین نمایید.

(ب) اندیس خمیری خاک چقدر است؟

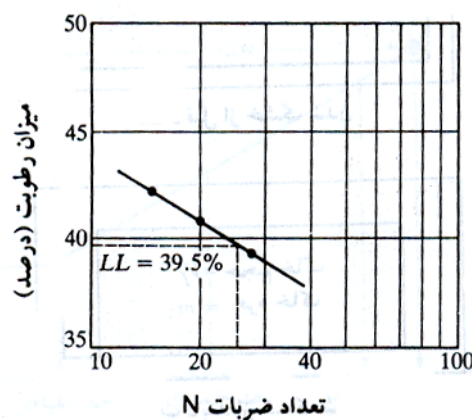
(الف) در شکل ۸-۲ نمودار میزان رطوبت ω در مقابل تعداد ضربات N (در مقیاس لگاریتمی) نشان داده شده است. برای

N = 25 به دست می آید:

$$\omega = 39.5\% = LL$$

(ب) با استفاده از رابطه ۲-۴۳ می توان نوشت:

$$PI = LL - PL = 39.5 - 18.7 = 20.8$$



شکل ۸-۲ نمودار میزان رطوبت در مقابل تعداد ضربات

مثال:

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

$$m_1 = 44.6g \quad m_2 = 32.8g \quad V_i = 16.2cm^3 \quad V_f = 10.8cm^3$$

حد انقباض را محاسبه کنید.

از رابطه ۲-۴۷

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) (100) - \left[\frac{(V_i - V_f) \rho_w}{m_2} \right] (100)$$

با قرار دادن مقادیر اندازه گیری شده در رابطه فوق به دست می آید:

$$SL = \left(\frac{44.6 - 32.8}{32.8} \right) 100 - \left[\frac{(16.2 - 10.8) \times 1}{32.8} \right] 100 = 35.97 - 16.46 = 19.5$$

۲-۶ | نشانه مایع

سفتی نسبی یک خاک چسبنده در وضعیت طبیعی را می توان توسط نسبتی که نشانه مایع (**LI**) نامیده می شود بیان نمود:

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} \quad (۲-۱۰)$$

که در آن ω میزان رطوبت درجای خاک می باشد.

میزان رطوبت درجای یک نهشته خاکی تحکیم نیافته می تواند بزرگتر از حد مایع باشد. در این حالت:

$$LI > 1$$

در صورت بهم خوردگی، چنین خاک هایی می توانند به شکل یک مایع غلیظ روان شوند (آبگونگی).

در نهشته های خاک پیش تحکیم یافته، میزان رطوبت طبیعی می تواند کمتر از حد خمیری گردد. در این حالت:

$$LI < 1$$

نشانه مایع چنین خاک هایی می تواند نزدیک به صفر یا منفی گردد.

مثال:

اگر میزان رطوبت درجای مثال قبل مساوی ۲۲ درصد باشد، نشانه مایع آن چقدر است؟ حدس شما در خصوص وضعیت

طبیعی خاک چیست؟

از رابطه ۲-۴۸ می توان نوشت:

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} = \frac{22 - 18.7}{39.5 - 18.7} = 0.16$$

چون میزان رطوبت ω بزرگتر از **PL** و کمتر از **LL** است، خاک به مقدار زیادی پیش تحکیم یافته است.

۲-۶ | فعالیت

از آنجایی که خواص خمیری خاک به علت آب جذب سطحی است که ذرات رس را احاطه می کند، می توان انتظار داشت که

نوع کانی رس و درصد آن در یک خاک، در روی حدهای مایع (روانی) و خمیری تاثیر بگذارد. اسکمتون (۱۹۵۳) مشاهده کرد

که نشانه خمیری یک خاک به طور کلی با درصد ذرات رسی (درصد وزنی کوچکتر از ۲ میکرون) افزایش پیدا می کند. در

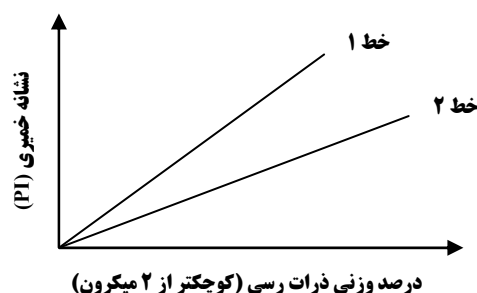
شکل ۲-۹ این رابطه به صورت ترسیمی نشان داده شده است. خطوط متوسط تمام خاک ها از مرکز مختصات می گذرد.

روابط بین نشانه خمیری و درصد ذرات رسی برای خاک های رسی مختلف، خطوط مختلفی به دست می دهد که ناشی از نوع کانی رس موجود در آن خاک می باشد. بر پایه نتایج، اسکمتون کمیتی به نام **فعالیت** تعریف نمود که همان شیب نمودار خطی PI در مقابل درصد ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون است. فعالیت را می توان طبق رابطه زیر نشان داد:

$$A = \frac{PI}{\text{(درصد وزنی ذرات با اندازه رسی)}} \quad (۱۱-۲)$$

که در آن A فعالیت خاک می باشد.

فعالیت به عنوان نشانه ای برای شناسایی پتانسیل تورم خاک های رسی است. در جدول ۲-۶ مقادیر فعالیت برای انواع کانی های رسی ارائه شده است.



شکل ۲-۹ رابطه بین نشانه خمیری و درصد وزنی ذرات رسی

جدول ۲-۶ فعالیت کانی های رس

فعالیت		کانی
۱ تا ۷	اسمکتایت	Smectites
۰/۵ تا ۱	ایلیت	Illite
۰/۵	کائولینیت	Kaolinite
۰/۵	هالوزیت (2H ₂ O)	Halloysite
۰/۱	هالوزیت (4H ₂ O)	Halloysite
۰/۵ تا ۱/۲	آتاپولژیت	Attapulgite
۰/۵ تا ۱/۲	آلوفین	Allophane

۲-۶ | نمودار خمیری

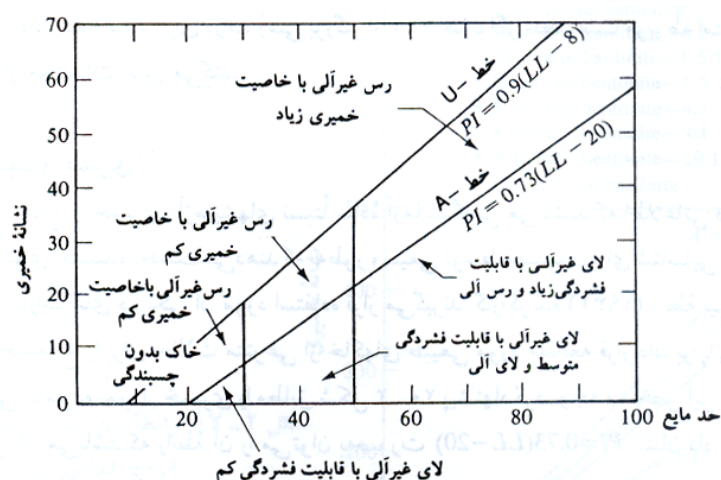
تعیین حدود مایع و خمیری، آزمایش های نسبتاً ساده آزمایشگاهی می باشند که اطلاعاتی در مورد طبیعت خاک های چسبنده به دست می دهند که به طور وسیعی توسط مهندسان برای شناسایی خاک و ارتباط دادن پارامترهای فیزیکی آن مورد استفاده قرار می گیرند. کاساگرانده (۱۹۳۲) رابطه بین نشانه خمیری و حد مایع را برای حالات متنوعی از خاک های طبیعی مورد مطالعه قرار داد. بر پایه نتایج آزمایشگاهی، نامبرده نمودار خمیری را مطابق شکل ۲-۱۰ پیشنهاد کرد. وجه مشخص این نمودار، خط تجربی A می باشد که رابطه آن را می توان به صورت $PI = 0.73(LL - 20)$ نشان داد. خط A رس غیر آلی را از لای غیرآلی جدا می کند. نقاط نشانه خمیری در مقابل حد مایع برای رس های غیر آلی در بالای خط A و برای لای های غیر آلی در پایین خط A قرار می گیرند (زیر خط A با حد مایع بین ۳۰ تا ۵۰). رس های آلی در ناحیه مربوط به

لای غیر آلی با قابلیت فشرده‌گی بالا قرار می‌گیرند (زیر خط A در حد مایع بزرگتر از ۵۰). اطلاعات فراهم آمده در نمودار خمیری بسیار با ارزش است و پایه‌ای برای طبقه‌بندی خاک‌های ریزدانه در سیستم طبقه‌بندی متحد خاک می‌باشد.

در بالای خط A خطی وجود دارد که به آن خط U می‌گویند. خط U به طور تقریبی حد بالای نقاط نشانه خمیری در مقابل حد مایع هر نوع خاکی می‌باشد که تا به حال شناخته شده است. رابطه خط U را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$PI = 0.9(LL - 8) \quad (۱۲-۲)$$

استفاده دیگری از خطوط A و U وجود دارد. کاساگرانده پیشنهاد کرده است که حد انقباض را می‌توان از نشانه خمیری و حد مایع به دست آورد. با توجه به شکل ۲-۱۱ این کار را می‌توان به صورت زیر انجام داد:

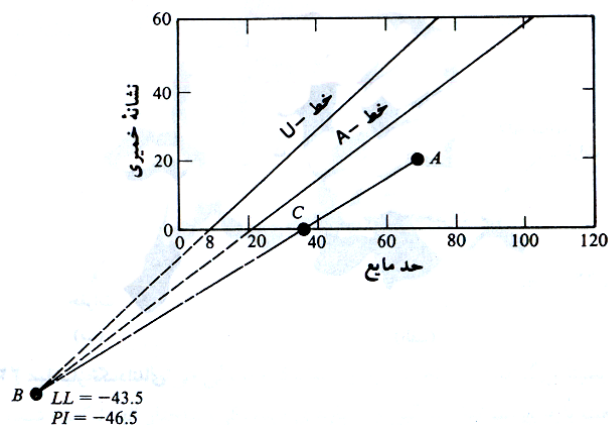


شکل ۲-۱۰ نمودار خمیری

(الف) نقطه‌ای با مختصات نشانه خمیری و حد مایع برای خاک مورد نظر همانند نقطه A در شکل ۲-۱۱ مشخص کنید.

(ب) خطوط A و U را امتداد دهید تا یکدیگر را در نقطه B قطع کنند. نقطه B دارای مختصات $LL = -43.5$ و $PI = 46.4$ خواهد بود.

(پ) نقاط A و B را با یک خط مستقیم به هم وصل کنید. این خط محور مربوط به حد مایع را در نقطه C قطع می‌کند. طول نقطه C همان حد انقباض خواهد بود.



شکل ۲-۱۱ تخمین حد انقباض از نمودار خمیری



۱- رابطه زیر را اثبات نمایید:

$$\gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w = \frac{G_s}{1 + e} \gamma_w + \frac{e}{1 + e} \gamma_w = \gamma_d + n\gamma_w \rightarrow \gamma_d = \gamma_{sat} - n\gamma_w$$

۲- رابطه زیر را اثبات نمایید:

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

$$\begin{aligned} \gamma_{sat} &= \frac{G_s \gamma_w + e \gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} + \frac{e}{1 + e} \gamma_w = \gamma_d + \frac{e}{1 + e} \gamma_w \\ (1 + e)(\gamma_{sat} - \gamma_d) &= e \gamma_w \rightarrow e \gamma_w = \gamma_{sat} - \gamma_d + e \gamma_{sat} - e \gamma_d \rightarrow e(\gamma_w - \gamma_{sat} + \gamma_d) = \gamma_{sat} - \gamma_d \\ e &= \frac{\gamma_{sat} - \gamma_d}{\gamma_d - \gamma_{sat} + \gamma_w} \end{aligned}$$

۳- رابطه زیر را اثبات نمایید:

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

$$\begin{aligned} \gamma_{sat} &= \frac{(1 + \omega_{sat})G_s \gamma_w}{1 + \omega_{sat}G_s} \\ \gamma_{sat} + \omega_{sat}G_s \gamma_{sat} &= G_s \gamma_w + \omega_{sat}G_s \gamma_w \rightarrow G_s(\gamma_w + \omega_{sat}\gamma_w - \omega_{sat}\gamma_{sat}) = \gamma_{sat} \\ G_s &= \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w + \omega_{sat}\gamma_w - \omega_{sat}\gamma_{sat}} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w - \omega_{sat}(\gamma_{sat} - \gamma_w)} \end{aligned}$$

۴- برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$$G_s = 2.67, \gamma = 17.6 \text{ kN/m}^3, \omega = 10.8\%$$

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

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \frac{\gamma}{1 + \omega} = \frac{17.6}{1 + 0.108} = 15.884 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_d &= \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.67 \times 9.81}{15.554} - 1 = 0.649 \\ n &= \frac{e}{1 + e} = \frac{0.649}{1 + 0.649} = 0.396 \\ S \cdot e &= G_s \cdot \omega \rightarrow S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.67 \times 0.108}{0.649} = 0.444 = 44.4\% \end{aligned}$$

۵- برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$$G_s = 2.7, \gamma = 20.1 \text{ kN/m}^3, \omega = 18.6\%$$

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

$$\begin{aligned}\gamma_d &= \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{20.1}{1+0.186} = 16.948 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_d &= \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.7 \times 9.81}{16.948} - 1 = 0.5628 \\ n &= \frac{e}{1+e} = \frac{0.5628}{1+0.5628} = 0.36 \\ S \cdot e &= G_s \cdot \omega \rightarrow S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.7 \times 0.186}{0.5628} = 0.8923 = 89.23\%\end{aligned}$$

۶- برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$$G_s = 2.74, \gamma = 20.6 \text{ kN/m}^3, \omega = 16.6\%$$

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

$$\begin{aligned}\gamma_d &= \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{20.6}{1+0.166} = 17.667 \text{ kN/m}^3 = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.74 \times 9.81}{17.667} - 1 = 0.5 \\ n &= \frac{e}{1+e} = \frac{0.5}{1+0.5} = 0.33 \\ S \cdot e &= G_s \cdot \omega \rightarrow S = \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.74 \times 0.166}{0.5} = 0.9 = 90\%\end{aligned}$$

توجه شود که هرچند در دو مثال قبل هر دو خاک، وزن مخصوص طبیعی تقریباً یکسانی دارند اما با دقت در وزن مخصوص خشک آن ها می توان دریافت که خاک دوم دارای تراکم بیشتر و در نتیجه کیفیت مهندسی بهتری می باشد.

۷- در مسئله ۴ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{sat}} - \gamma &= \text{با توجه به نکته بیان شده در جزوه: وزن آب مورد نیاز برای اشباع نمودن خاک} \\ \gamma_{\text{sat}} &= \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{2.67 + 0.649}{1+0.649} \times 9.81 = 19.775 \text{ kN/m}^3 \\ 19.775 - 17.6 &= 2.145 \text{ kN/m}^3 \rightarrow W = 2.145 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m}^3 = 2.145 \text{ kN}\end{aligned}$$

۸- در مسئله ۵ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{sat}} &= \frac{2.7 + 0.5628}{1+0.5628} \times 9.81 = 20.488 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{sat}} - \gamma &= 20.488 - 20.1 = 0.38 \text{ kN/m}^3 \rightarrow W = 0.38 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m}^3 = 0.38 \text{ kN}\end{aligned}$$

۹- در مسئله ۶ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{sat}} &= \frac{2.74 + 0.5}{1+0.5} \times 9.81 = 21.1896 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{sat}} - \gamma &= 21.1896 - 20.6 = 0.5896 \text{ kN/m}^3 \rightarrow W = 0.5896 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m}^3 = 0.5896 \text{ kN}\end{aligned}$$

۱۰- وزن مرطوب 2832 cm^3 خاک 54.34 N است. اگر میزان رطوبت 12% درصد و $G_s = 2.72$ باشد، مطلوب است:

(الف) وزن مخصوص مرطوب (γ)

(ب) وزن مخصوص خشک (γ_d)

(پ) نسبت تخلخل (e)

(ت) پوکی (n)

(ث) درجه اشباع (S)

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{W}{V} = \frac{54.34}{2832} \times \frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 19.18 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_d &= \frac{\gamma}{1 + \omega} = \frac{19.18}{1 + 0.12} = 17.132 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_d &= \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \rightarrow e = \frac{2.72 \times 9.81}{17.132} - 1 = 0.5575 \\ n &= \frac{0.5575}{1 + 0.5575} = 0.358 \\ S &= \frac{G_s \cdot \omega}{e} = \frac{2.72 \times 0.12}{0.5575} \times 100 = 58.547\% \\ W_s &= \frac{W}{1 + \omega} = \frac{54.34}{1 + 0.12} = 48.518 \text{ N} \\ W_w &= \omega W_s = 0.12 \times 48.518 = 5.822 \text{ N} \\ \gamma_w &= \frac{W_w}{V_w} \rightarrow V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{5.822}{9.810} \times 10^6 = 593.49 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

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.