فصل ۲:

ترکیب خاک، حدود اتربرگ

جزوه درس مکانیک خاک (کارشناسی مهندسی عمران)

استاد: عبدالمتین ستایش

Email1: a_matin_s@yahoo.com

Email2: Setayesh@outlook.com

Edition: 05, 01/1391

Copyright: Abdul Matin Setayesh

Filename: Soilmech_Ch2

@ME2CH

WWW.ME2CH.ROZBLOG.COM

فهرست مطالب فصل دوم:

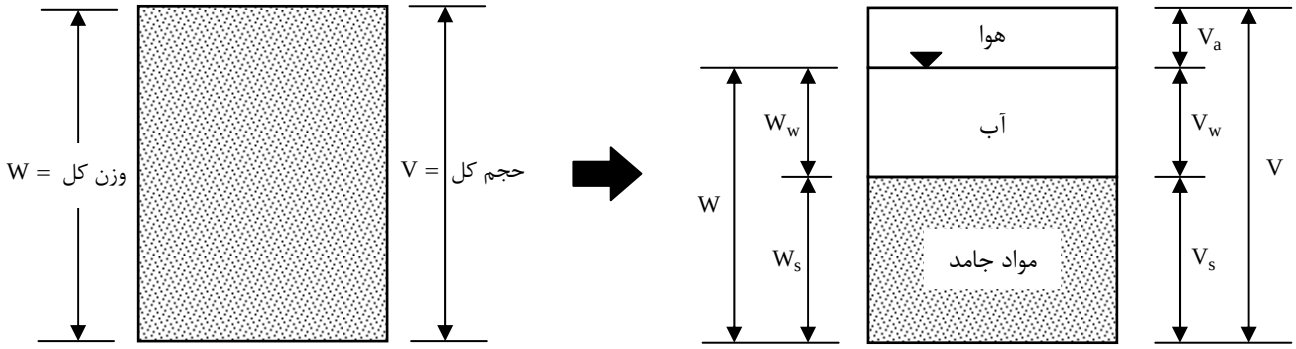
۱-۲	مقدمه
۲-۲	روابط وزنی - حجمی
۳-۲	روابط بین وزن مخصوص، نسبت تخلخل، درصد رطوبت و چگالی دانه ها
۴-۲	تراکم نسبی
۵-۲	سفتی (قوام) خاک
۶-۲	نشان مایع
۷-۲	فعالیت
۸-۲	نمودار خمیری
۹-۲	مسائل حل شده
-	منابع و مراجع

۲–۱ مقدمه

در وظعیت 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 ۲-۱-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 ۲-۱-ب از یکدیگر جدا می شوند. در نتیجه حجم کل نمونه خاک به صورت زیر قابل بیان است:



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

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

V_s = حجم قسمت جامد

V_v = حجم حفرات

V_w = حجم آب درون حفرات

V_a = حجم هوای درون حفرات

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:

W_s = وزن قسمت جامد

W_w = وزن آب

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 ۲-۱، ۲-۳ و ۲-۴ 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 ۲-۶ 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، ۲-۸ و ۲-۹ می توان نوشت:

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

مهندسین خاک اغلب به وزن مخصوص تعریف شده طبق رابطه ۲-۹ 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 ۲-۱۰ و ۲-۱۱، 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.

۲-۳ 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:

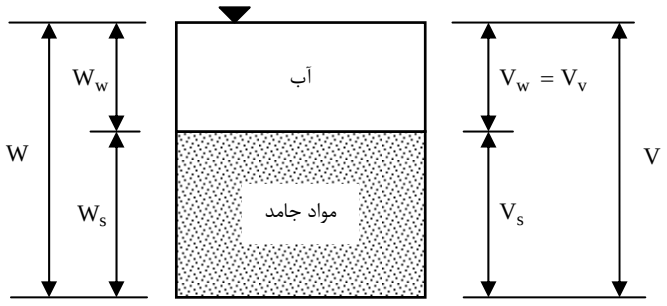
$$\gamma = \gamma_d (1+\omega)$$

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

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{V_w}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s}} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w V_s}}{e} = \frac{\frac{\omega V_s G_s \gamma_w}{\gamma_w V_s}}{e} = \frac{\omega G_s}{e} \qquad \text{یا} \qquad Se = \omega G_s$$

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:



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

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

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.

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

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

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

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

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

نکته :

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

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

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 ۲-۱:

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.

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

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

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

$$\Delta\omega = 380 - 367.4 = 12.6\ kN$$

مثال ۲-۲ :

در وضعیت طبیعی یک خاک مرطوب دارای حجم $v = 9345cm^3$ 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. $\gamma_w = 9.81kN/m^3 = 1980kN/m^3$ و $G_s = 2.71$

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:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{117.86 \times 10^{-3}}{9345 \times 10^{-6}} = 19.03\ kN/m^3$$

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

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

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

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

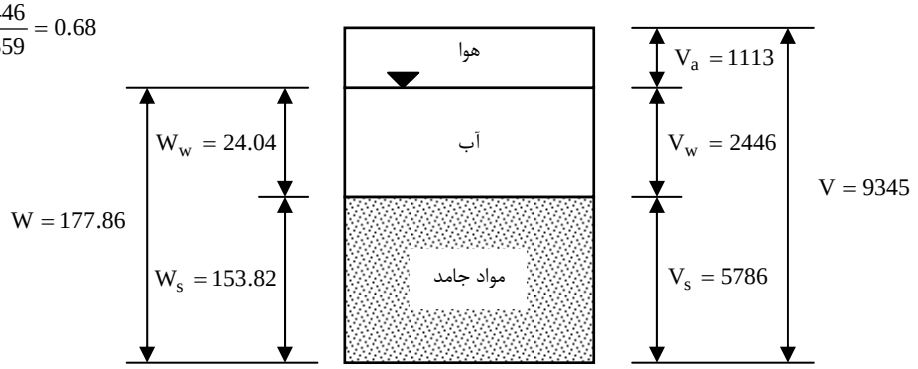
$$Va = V - V_w - V_s = 9345 - 5786 - 2446 = 1113\ cm^3$$

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

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

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

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



مثال ۲–۳:

وزن مرطوب $0.00283\,m^3$ خاک $55.4N$ 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. $\gamma_w = 9.81\,kN/m^3$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{55.4\times10^{-3}}{0.00283} = 19.58\,kN/m^3$$

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

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \rightarrow 17.48 = \frac{2.72\times9.81}{1+e} \rightarrow e = 0.526$$

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

$$S = \frac{\omega G_s}{e} = \frac{0.12\times2.72}{0.526} = 0.621$$

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

$$W_w = W - W_s = 55.4 - 49.464\ N$$

$$V_w = \frac{5.936}{9810}\times10^6 = 605\,cm^3$$

مثال ۲–۴:

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

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

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \rightarrow 15.67 = \frac{G_s\times9.81}{1+0.631} \rightarrow G_s = 2.60$$

مثال ۲–۵:

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 e ، n و γ_{sat}.

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

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

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

مثال ۲–۶:

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. $G_s = 2.7$

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

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

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

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

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

مثال ۲–۷:

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.

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

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

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

مثال ۲–۸:

یک نمونه خاک اشباع با حجم $22cm^3$ و وزن 43gr موجود است. این نمونه پس از خشک شدن در کوره 8gr کاهش وزن از خود نشان می دهد. اگر حد انقباض برابر ۱۰ درصد باشد، مطلوب است:

(الف) حجم خاک در چه درصد رطوبتی به $21cm^3$ می رسد؟

(ب) برای هر دو حالت اشباع و خشک مطلوب است محاسبه $\gamma_d, \gamma_{sat}, G_s$.

جواب (الف):

پس از خشک شدن 8gr از وزن خاک کم می شود بنابراین می توان نتیجه گرفته که:

$$w_w = 8gr \rightarrow v_w = \frac{w_w}{\gamma_w} = \frac{8}{1} = 8cm^3 \rightarrow v_s = 22 - 8 = 14cm^3$$

$$w_s = 43 - 8 = 35gr$$

حد انقباض خاک ۱۰٪ است بنابراین می توان نتیجه گرفت:

$$SL = \omega = \frac{w_w}{w_s} = 0.1 \rightarrow w_w = 0.1 \times 35 = 3.5gr \rightarrow v_w = 3.5cm^3$$

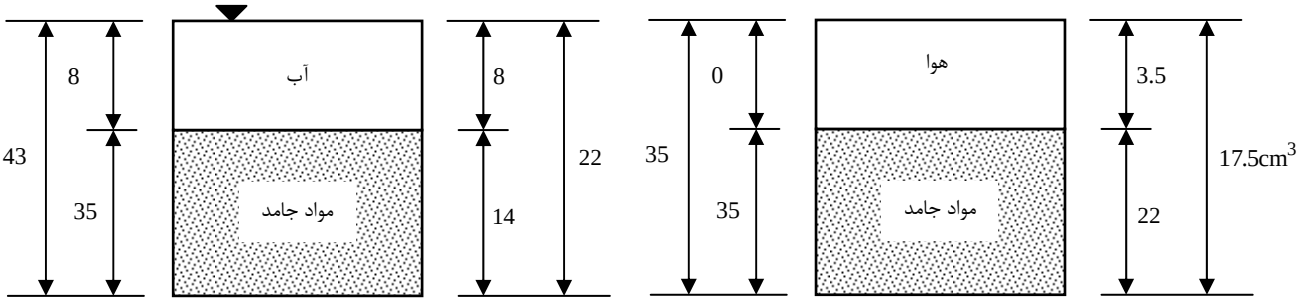
بنابراین نتیجه می گیریم که چناچه پس از خشک شدن خاک $35cm^3$ آب به آن اضافه کنیم اشباع می شود بدون اینکه حجم خاک تغییر کند. بدین ترتیب حجم خاک هنگامی که کاملاً خشک است برابر خواهد بود با:

$$v = v_s + v_w = 14 + 3.5 = 17.5cm^3$$

هنگامی که حجم خاک $21cm^3$ است حجم آن تغییر می کند به عبارت دیگر در این حالت خاک هنوز کاملاً اشباع است بنابراین:

$$v = 21cm^3 \rightarrow w_w = 8 - 1 = 7gr \rightarrow \omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{7}{35} = 0.2 = 20\%$$

تغییر فاز خاک در شکل های زیر نشان داده شده است.



جواب (ب): با توجه به شکل های فوق داریم:

پارامتر	V	v_s	W	w_s	w_w	G_s	γ_{sat}	γ_d
در حالت اشباع	۲۲	۱۴	۴۳	۳۵	۸	۲/۵	۱/۹۵	۱/۵۹
در حالت خشک	۱۷/۵	۱۴	۳۵	۳۵	۰	۲/۵	۲/۲	۲

مثال ۲-۹:

در داخل ظرفی مکعب شکل به ابعاد یک متر را از گلوله های کروی از جنس شیشه تا حد امکان پر کرده ایم. اگر وزن مخصوص شیشه ۲/۵ تن بر متر مکعب باشد مطلوبست:

(الف) تعیین تخلخل و وزن مخصوص مجموعه گلوله های موجود در داخل ظرف.

(ب) اگر ۱۰۰ لیتر آب داخل این ظرف بریزیم وزن مخصوص مرطوب کل گلوله ها در این حالت چقدر خواهد شد؟ و همچنین میزان آب لازم جهت اشباع شدگی کامل گلوله ها و وزن مخصوص اشباع و شناور مجموعه گلوله ها را در این حالت حساب کنید.

جواب:

با توجه به قانون گلوله ها در متراکم ترین حالت نسبت تخلخل برابر خواهد بود با ۰/۳۵ بنابراین:

$$G_s = 2.5t/m^3 \rightarrow \gamma = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.5+0.35}{1+0.35}\times 1 = 2.111t/m^3$$

$$\gamma = \gamma_d = \frac{w_s}{V} \rightarrow w_s = \gamma \times V = 2.111\times 1 = 2.111ton$$

$$V_s = \frac{w_s}{G_s\gamma_s} = \frac{2.111}{2.5\times 1} = 0.844m^3 \rightarrow V_v = V - V_s = 1 - 0.844 = 0.1556m^3$$

$$\omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{100kg}{2111kg}\times 100 = 4.73\%$$

$$\gamma = \gamma_d(1+\omega) = 2.111\times 1.0473 = 2.21ton/m^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{2.111 + 0.1556\times 1}{1} = 2.266ton/m^3$$

میزان آب لازم جهت اشباع نمودن نمونه برابر است با:

$$w = 0.1556 - 0.1 = 0.0556$$

یا به روش دیگر:

$$w = \gamma_{sat} - \gamma = 2.266 - 2.21 = 0.056ton = 56kg$$

۲-۴ 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:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

D_r = تراکم نسبی که معملاً 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 ۲-۱ 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 ۲-۱ توصیف خاک های دانه ای بر حسب تراکم نسبی

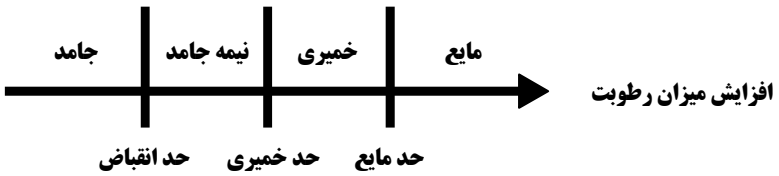
توصیف خاک های دانه ای	تراکم نسبی (درصد)
خیلی شل	0 – 15
شل	15 – 50
متوسط	50 – 70
متراکم	70 – 85
خیلی متراکم	85 - 100

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 تیزگوشه	0.65	25	16
ماسه لای دار متراکم با دانه های تیزگوشه	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

۲–۵ 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.



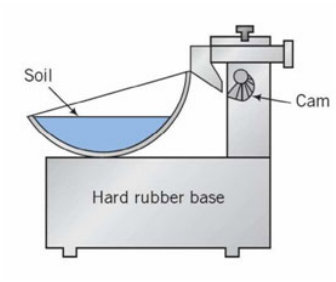
شکل ۲–۲ حدود اتربرگ

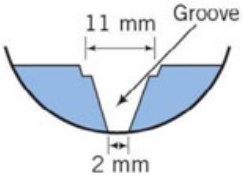
میزان رطوبت (برحسب درصد) در نقطه انتقال از جامد به نیمه جامد، حد انقباض و در نقطه انتقال از نیمه جامد به خمیری، حدی خمیری و از خمیری به مایع، حد مایع یا حد روانی نامیده می شود. حدود نامبرده به حدود اتربرگ معروف هستند.

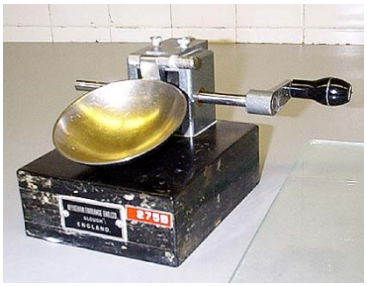
حد مایع (حد روانی)

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 شیارزن استاندارد شیاری 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 ضربهٔ فنجان، شیار ایجاد شده در نمونهٔ داخل فنجان، بسته می شود حد روانی خوانده می شود.







(الف) **(ب)** **(پ)**

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

تنظیم رطوبت به طوری که دقیقاً به علت ۲۵ ضربه، عرض شیار بسته شود مشکل است. بنابراین حداقل چهار آزمایش برای خاک مورد مطالعه با رطوبت های مختلف انجام شده و تعداد ضربات لازم برای بستن شیار 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. رابطهٔ 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:

$$I_F = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\text{Log}\left(\frac{N_2}{N_1}\right)} \qquad (۲-۲)$$

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:

$$\omega = -I_F \log N + c \qquad (۲-۳)$$

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

$$LL = \omega_N \left(\frac{N}{25}\right)^{\tan\beta} \qquad (۲-۴)$$

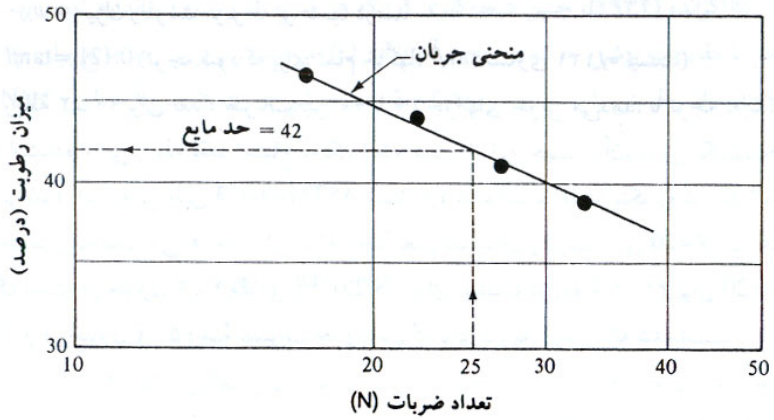
که در آن:

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

ω_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 ۲-۴ 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 ۲-۳ مقادیر $(N/25)^{0.121}$ برای استفاده در رابطه ۲-۴ برای $N = 20$ تا $N = 30$ و در جدول ۲-۴ دامنه تغییرات حدود اتربرگ برای کانی های رسی ارائه شده است.



شکل ۲–۴ منحنی جریان برای تعیین حد مایع

جدول ۲–۳ 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		

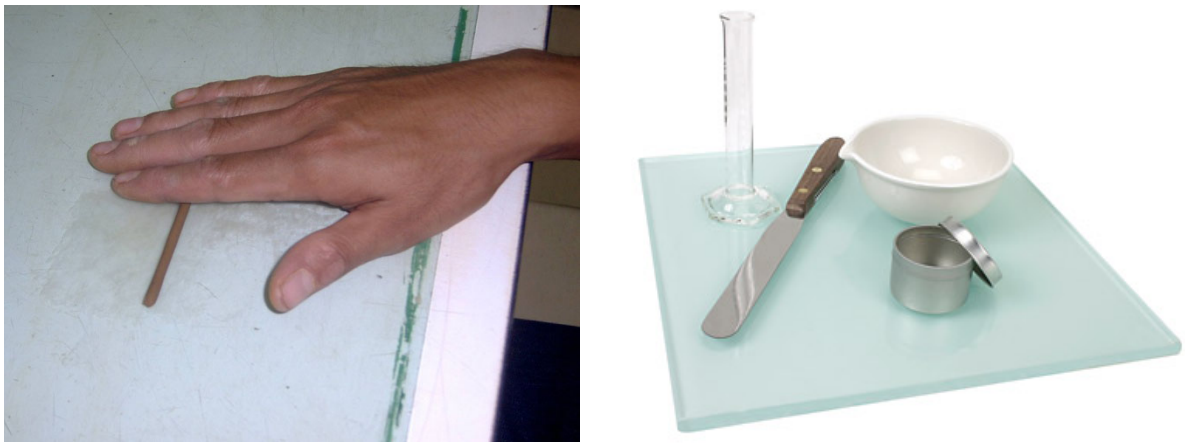
جدول ۲–۴ حدود اتربرگ برای کانی های رس

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

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

حد خمیری (PL)

حد خمیری میزان رطوبتی (بر حسب درصد) است که به ازای آن اگر فتیله ای به قطر ۳/۲ 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 صفحهٔ شیشه ای به وسیله دست صورت گیرد.



(الف) (ب)

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:

$$PI = LL - PL \qquad (۵-۲)$$

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.

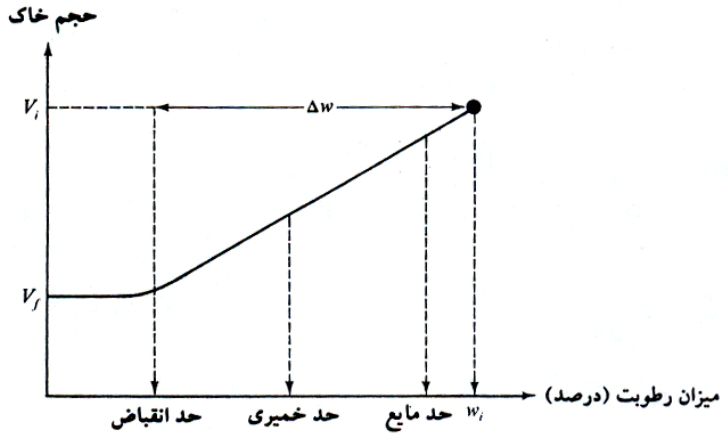
آزمایش حد انقباض **(ASTM D427)** در آزمایشگاه درون یک ظرف چینی به قطر ۱/۷۵ اینچ (۴۴/۴ میلیمتر) و عمق ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلیمتر) انجام می شود. داخل ظرف توسط یک روغن مخصوص چرب شده و سپس با خاک مرطوب کاملاً پر می شود. با یک وسیله لب تیز، سطح نمونه هم تراز با لبه های ظرف، صاف می شود. جرم خاک داخل ظرف یادداشت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

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

که در آن:

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

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



شکل ۲–۶ تعریف حد انقباض

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

که در آن:

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

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

همچنین

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

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_ω = جرم مخصوص آب (g/cm^3)

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

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2}\right)(100) - \left[\frac{(V_i - V_f)\rho_w}{m_2}\right](100) \qquad (۹-۲)$$

(الف) قبل از خشک شدن **(ب) بعد از خشک شدن**

شکل ۲–۷ آزمایش حد انقباض

مثال ۲–۱۰:

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

آزمایش حد خمیری

میزان رطوبت $= 18.7\%$

آزمایش حد روانی

میزان رطوبت (٪)	تعداد ضربات N
42	15
40.8	20
39.1	28

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

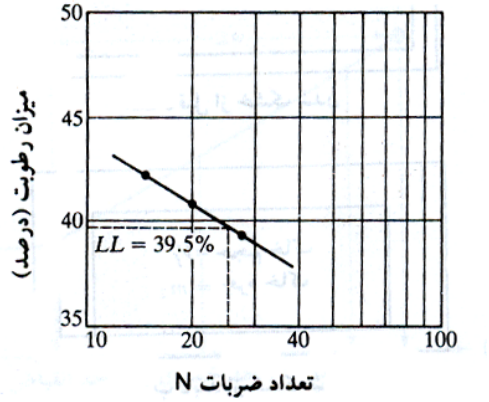
(ب) اندیس خمیری خاک چقدر است؟

(الف) در شکل ۲-۸ 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:

$PI = LL - PL = 39.5 - 18.7 = 208$



شکل ۲–۸ نمودار میزان رطوبت در مقابل تعداد ضربات

مثال ۲–۱۱:

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:

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

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:

$$LL > 1$$

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:

$$LI < 1$$

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

مثال ۲-۱۲:

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.

۲-۷ فعالیت

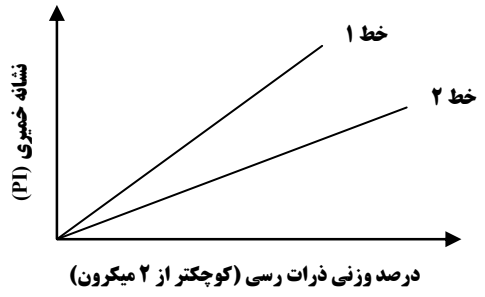
از آنجایی که خواص خمیری خاک به علت آب جذب سطحی است که ذرات رس را احاطه می کند، می توان انتظار داشت که نوع کانی رس و درصد آن در یک خاک، در روی حدهای مایع (روانی) و خمیری تاثیر بگذارد. اسکمتون (۱۹۵۳) مشاهده کرد که نشانه خمیری یک خاک به طور کلی با درصد ذرات رسی (درصد وزنی کوچکتر از ۲ میکرون) افزایش پیدا 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:

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

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 نشانهٔ 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 $(2H_2O)$	Halloysite
۰/۱	هالوزیت $(4H_2O)$	Halloysite
۰/۵ تا ۱/۲	آتاپولژیت	Attapulgite
۰/۵ تا ۱/۲	آلوفین	Allophane

مثال ۲-۱۳:

در آزمایش بر روی یک خاک رس با دامنه خمیری ۲۸، درصد وزنی ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر، برابر ۱۶ درصد بدست آمده است. این خاک رس احتمالاً دارای کانی از نوع ..... می باشد. (کنکور سراسری ۸۶)

۱) ایلیت

۲) کائولینیت

۳) مونت موریلونیت

۴) هالوزیت

جواب: گزینه «۳»

برای بررسی اینکه بخش رس یک خاک چسبیده تا چه درجه خاصیت خمیری دارد از شاخصی بنام اکتیویته (فعالیت)، **A** استفاده می شود:

$$A = \frac{PI}{\text{(درصد وزنی ذرات به اندازه رسی)}}$$

هر چه رس فعال تر (اکتیوتر) باشد تغییر حجم آن بر اثر رطوبت بیشتر است عدد اکتیویته برای بعضی کانیهای به شرح زیر است:

کانی رس	مسکویت	کائولینت	ایلیت	مونت موریلونیت
اکتیویته	۰/۲۵	۰/۴	۰/۹	> ۱/۲۵

برای مسأله حاضر چون $A = 28/16 = 1.75$ است پس احتمالاً کانی از نوع مونت موریلونیت است.

۲-۸ | نمودار خمیری

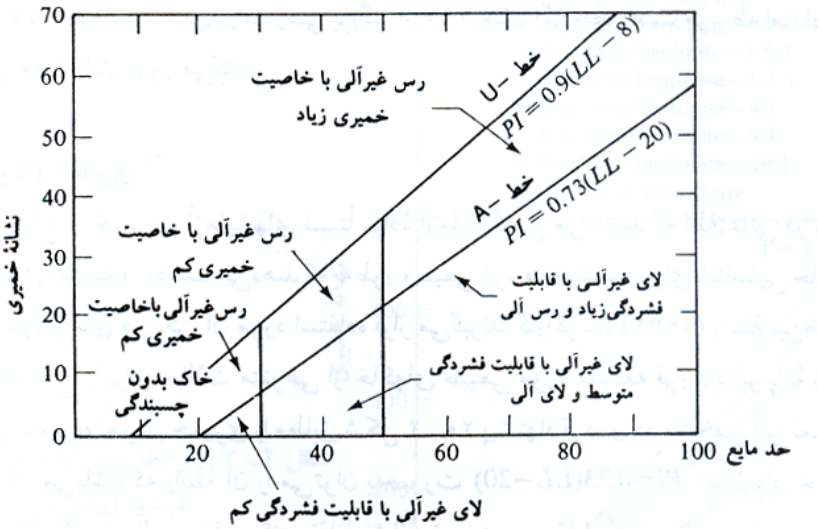
تعیین حدود مایع و خمیری، آزمایش های نسبتاً سادهٔ آزمایشگاهی می باشند که اطلاعاتی در مورد طبیعت خاک های چسبنده به دست می دهند که به طور وسیعی توسط مهندسان برای شناسایی خاک و ارتباط دادن پارامترهای فیزیکی آن مورد استفاده قرار می گیرند. کاساگرانده (۱۹۳۲) رابطه بین نشانه خمیری و حد مایع را برای حالات متنوعی 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 فشردگی بالا قرار می گیرند (زیر خط **A** در حد مایع بزرگتر از ۵۰). اطلاعات فراهم آمده در نمودار خمیری بسیار با ارزش است و پایه ای برای طبقه بندی خاک های ریزدانه در سیستم طبقه بندی متحد خاک می باشد.

در بالای خط **A** خطی وجود دارد که به آن خط **U** می گویند. خط **U** به طور تقریبی حد بالای نقاط نشانه خیمری در مقابل حد مایع هر نوع خاکی می باشد که تا به حال شناخته شده است. رابطه خط **U** را می توان به صورت زیر نوشت:

$$PI = 0.9\,(LL - 8) \qquad (۱۲-۲)$$

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

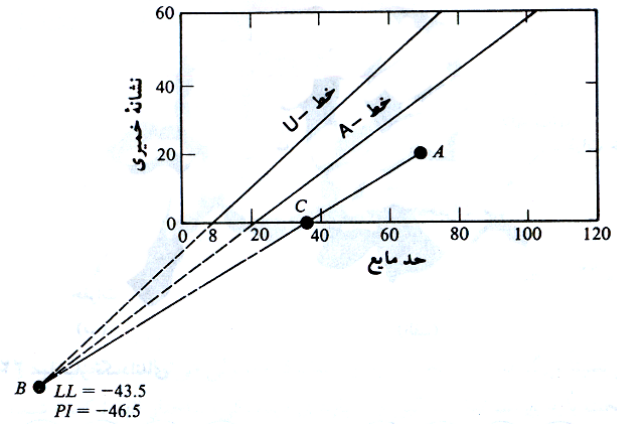


شکل ۲–۱۰ نمودار خمیری

(الف) نقطه ای 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 می کند. طول نقطه **C** همان حد انقباض خواهد بود.



شکل ۲–۱۱ تخمین حد انقباض از نمودار خمیری

۲–۹ | مسائل حل شده:

مثال ۲–۱۴:

حد انقباض خاکی ۸/۵ درصد است. درصد تخلخل آن در رطوبت حد انقباض کدام است؟ چگالی نسبی قسمت جامد G_s را برابر ۲/۶ در نظر بگیرید. (کنکور سراسری ۷۵)

$$SL = \frac{e}{G_s} \rightarrow 0.085 = \frac{e}{2.6} \rightarrow e = 0.221$$

مثال ۲–۱۵:

رابطه زیر را اثبات نمایید:

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

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

مثال ۲–۱۶:

رابطه زیر را اثبات نمایید:

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

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

$$(1+e)(\gamma_{sat} - \gamma_d) = e\gamma_w \rightarrow e\gamma_w = \gamma_{sat} - \gamma_d + e\gamma_{sat} - e\gamma_d \rightarrow e(\gamma_w - \gamma_{sat} + \gamma_d) = \gamma_{sat} - \gamma_d$$

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

مثال ۲–۱۷:

رابطه زیر را اثبات نمایید:

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

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

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

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

مثال ۲–۱۸:

برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

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

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

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

مثال ۲–۱۹:

در مسئله ۲-۱۸ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

با توجه به نکته بیان شده در جزوه: وزن آب مورد نیاز برای اشباع نمودن خاک = $\gamma_{sat} - \gamma$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.67 + 0.649}{1+0.649} \times 9.81 = 19.775 kN/m^3$$
$$19.775 - 17.6 = 2.145 kN/m^3 \rightarrow W = 2.145 kN/m^3 \times 1 m^3 = 2.145 kN$$

مثال ۲–۲۰:

برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

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

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

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

مثال ۲–۲۱:

در مسئله ۲-۲۰ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید (وزن آب بر حسب کیلونیوتن)

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

مثال ۲-۲۲:

برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

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

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

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{20.6}{1+0.166} = 17.667 kN/m^3 = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{G_s\gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.74\times 9.81}{17.667} - 1 = 0.5$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.5}{1+0.5} = 0.33$$

$$S\cdot e = G_s\cdot\omega \rightarrow S = \frac{G_s\cdot\omega}{e} = \frac{2.74\times 0.166}{0.5} = 0.9 = 90\%$$

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.

مثال ۲-۲۳:

در مسئله ۲-۲۲ وزن آبی را تعیین نمایید که باید به یک متر مکعب خاک اضافه شود تا به صورت اشباع درآید.

$$\gamma_{sat} = \frac{2.74+0.5}{1+0.5}\times 9.81 = 21.1896 kN/m^3$$

$$\gamma_{sat} - \gamma = 21.1896 - 20.6 = 0.5896 kN/m^3 \rightarrow W = 0.5896 kN/m^3 \times 1m^3 = 0.5896 kN$$

مثال ۲-۲۴:

وزن مرطوب $2832cm^3$ خاک $54.34N$ است. اگر میزان رطوبت ۱۲درصد 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)

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{54.34}{2832}\times\frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 19.18 kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \frac{19.18}{1+0.12} = 17.132 kN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} \rightarrow e = \frac{2.72\times 9.81}{17.132} - 1 = 0.5575$$

$$n = \frac{0.5575}{1+0.5575} = 0.358$$

$$S = \frac{G_s\cdot\omega}{e} = \frac{2.72\times 0.12}{0.5575}\times 100 = 58.547\%$$

$$W_s = \frac{W}{1+\omega} = \frac{54.34}{1+0.12} = 48.518N$$

$$W_w = \omega W_s = 0.12\times 48.518 = 5.822N$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \rightarrow V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{5.822}{9810}\times 10^6 = 593.49 cm^3$$

مثال ۲–۲۵:

برای خاکی اطلاعات زیر در دست است:

$\gamma = 17.3 kN/m^3$ ، $D_r = 82\%$ ، $\omega = 8\%$ ، $G_s = 2.65$

برای این خاک اگر $e_{min} = 0.44$ و باشد، e_{max} چقدر خواهد بود. در شل ترین وضعیت، وزن مخصوص خشک چقدر خواهد بود؟

$$\gamma = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e}(1+\omega) \rightarrow 17.3 = \frac{2.65 \times 9.807}{1+e}(1+0.08) \rightarrow e = 0.622$$

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \rightarrow 0.82 = \frac{e_{max} - 0.622}{e_{max} - 0.44} \rightarrow e_{max} = 1.45$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e_{max}} = \frac{2.65 \times 9.807}{1+1.45} = 10.6 kN/m^3$$

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.

3. Soil Mechanics,Basic Concept and Engineering Applications., A. Aysen., Balkema Publishers., 2002.

نکات و یادداشت ها