

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh



مکانیک خاک

فصل ۴. نشست آب در خاک

دکتر علیرضا غنی زاده

دانشکده مهندسی عمران-دانشگاه صنعتی سیرجان

مقدمه

- ✓ خاک مجموعه ای از ذرات جامد و حفرات بین آنهاست.
- ✓ در نتیجه آب می تواند در داخل خاک از یک نقطه پر انرژی به نقطه کم انرژی تر جریان پیدا کند.
- ✓ این مسئله از نقطه نظر تخمین میزان جریان های زیرزمینی تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، زهکشی در حین اجرای ساختمان ها در داخل سفره های آب زیرزمینی، مطالعه پایداری سدهای خاکی و سازه های حائل خاک تحت نیروی نشست و همچنین تحکیم خاک های رسی، حائز اهمیت است.

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

گرادیان (شیب هیدرولیکی)

✓ طبق رابطه برنولی، بار آبی کل یک نقطه آب در حال جریان مجموع بار فشار، بار سرعت و بار ارتفاعی است.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 Pressure head Velocity head Elevation head

h = بار آبی کل
 u = فشار
 v = سرعت
 g = شتاب ثقل
 γ_w = وزن مخصوص آب

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

3

گرادیان (شیب هیدرولیکی)

✓ اگر رابطه برنولی برای حالت جریان آب از داخل محیط متخلخل خاک در نظر گرفته شود، به علت سرعت کم جریان، از بار سرعت می توان صرف نظر کرد و بار آبی کل را به صورت زیر نوشت:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z$$

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A \right) - \left(\frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B \right)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

4

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

گرادیان (شیب هیدرولیکی)

افت بار هیدرولیکی بین دو نقطه

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A \right) - \left(\frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B \right)$$

شیب یا گرادیان هیدرولیکی

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

5

گرادیان (شیب هیدرولیکی)

✓ افت (اتلاف) بار بین دو نقطه به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A \right) - \left(\frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B \right)$$

✓ افت بار Δh را می توان در شکل بی بعد به صورت زیر نوشت:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

i = گرادیان (شیب) هیدرولیکی

L = فاصله بین نقاط A و B, به عبارت دیگر طولی از جریان که افت بار در آن رخ می دهد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

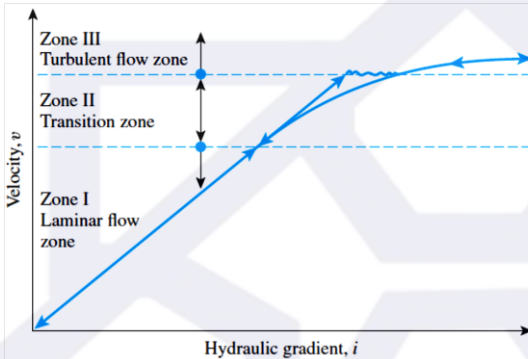
6

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

انواع جریان با توجه به شیب هیدرولیکی

✓ تغییرات سرعت جریان بر حسب تغییرات گرادیان i در شکل زیر نشان داده شده است. این شکل به سه ناحیه قابل تفکیک است:



- ناحیه جریان لایه‌ای (ناحیه I)
- ناحیه انتقال (ناحیه II)
- ناحیه جریان آشفته (ناحیه III)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

7

انواع جریان با توجه به شیب هیدرولیکی

✓ وقتی که شیب هیدرولیکی به تدریج افزایش می‌یابد، جریان در نواحی I و II به صورت لایه‌ای باقی‌مانده و سرعت V رابطه خطی با شیب هیدرولیکی خواهد داشت.

✓ در شیب هیدرولیکی زیاد، جریان آشفته می‌شود.

✓ در خاکهای با نفوذپذیری کم و متوسط جریان به صورت لایه‌ای است.

✓ در سنگ‌ها، شن و ماسه درشت ممکن است جریان آشفته وجود داشته باشد که برای این حالت قانون دارسی اعتبار خود را از دست می‌دهد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

8

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

رابطه دارسی

✓ در سال ۱۸۵۶، دارسی رابطه ساده خود را برای سرعت جریان آب در خاک اشباع به صورت زیر پیشنهاد نمود:

$$v = ki$$

که در آن:

v = سرعت جریان که عبارت است از مقدار آبی که در واحد زمان از واحد سطح عمود بر امتداد جریان عبور می کند.

K = ضریب نفوذپذیری

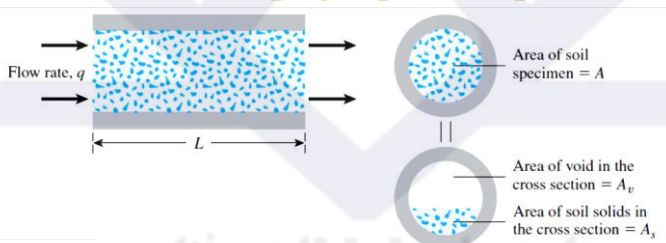
$$Q = v \cdot A$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

9

سرعت نشت واقعی در خاک



$$q = vA = A_v v_s \quad \Rightarrow \quad q = v(A_v + A_s) = A_v v_s \quad \Rightarrow \quad v_s = \frac{v(A_v + A_s)}{A_v} = \frac{v(A_v + A_s)L}{A_v L} = \frac{v(V_v + V_s)}{V_v}$$

$$v_s = v \left[\frac{1 + \left(\frac{V_v}{V_s} \right)}{\frac{V_v}{V_s}} \right] = v \left(\frac{1 + e}{e} \right) = \frac{v}{n}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

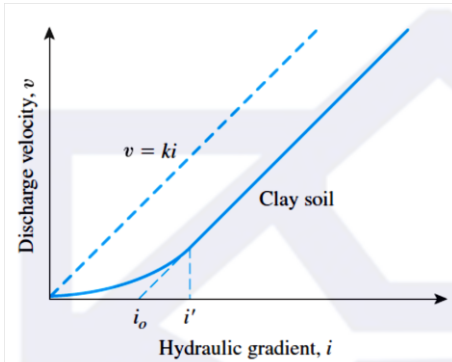
مکانیک خاک

10

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

رابطه شیب هیدرولیکی و سرعت جریان در خاک رس (Hansbo, 1960)



$$v = k(i - i_0) \quad (\text{for } i \geq i_0)$$

$$v = ki^m \quad (\text{for } i < i_0)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

11

ضریب نفوذ پذیری

✓ ضریب نفوذپذیری دارای همان واحد سرعت جریان است و در دستگاه آحاد SI، ضریب نفوذپذیری برحسب cm/s یا m/day بیان می‌شود.

✓ عوامل مؤثر بر ضریب نفوذپذیری خاکها عبارت‌اند از: ویسکوزیته سیال، اندازه و توزیع اندازه حفرات، منحنی دانه‌بندی، نسبت تخلخل، زبری سطح دانه‌ها و درجه اشباع خاک.

✓ در خاک‌های رس دار، ساختار خاک تأثیر مهمی بر ضریب نفوذپذیری دارد. سایر عوامل مهم که در نفوذپذیری رس‌های مؤثرند عبارت‌اند از: تمرکز یونی و ضخامت لایه آبی که اطراف ذرات رسی نگه داشته شده است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

12

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

ضریب نفوذ پذیری برخی از خاکها

نوع خاک	k	
	cm / sec	m / day
شن تمیز	1.0 – 100	864 – 86400
ماسه درشت	1.0 – 0.01	864 – 8.64
ماسه ریز	0.01 – 0.001	8.64 – 0.86
لای	0.001 – 0.00001	0.86 – 0.0086
رس	کمتر از 10^{-6}	0.00086 کمتر از

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

13

عوامل مؤثر بر ضریب نفوذ پذیری

✓ ضریب نفوذ پذیری، طبق رابطه زیر به وزن مخصوص و ویسکوزیته سیال بستگی دارد:

$$k = \frac{\gamma_w \bar{K}}{\eta}$$

γ_w = وزن مخصوص آب

η = ویسکوزیته آب

\bar{K} = ضریب نفوذ پذیری مطلق

نفوذ پذیری مطلق \bar{K} دارای بعد L^2 (سانتیمتر به توان ۲ یا متر به توان ۲) می باشد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

14

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

عوامل مؤثر بر ضریب نفوذپذیری

- ✓ **نفوذپذیری مطلق خاک:** نفوذپذیری مطلق خاک، از خاکی به خاک دیگر متفاوت بوده و بستگی به فضای خالی خاک دارد.
- در خاک‌های درشت‌دانه که فضای خالی بیشتر است، نفوذپذیری نیز بیشتر است.
- در خاکی که دارای دانه‌های تیز گوشه است، نفوذپذیری کمتر از خاکی است که دارای دانه‌های گرد گوشه است.
- هر چه دانه‌های خاک سطح زبرتری داشته باشند، به علت اصطکاک و اتلاف بیشتر انرژی آب، نفوذپذیری کاهش می‌یابد.
- ✓ **وزن مخصوص و ویسکوزیته دینامیکی آب جریان یافته در خاک:** ویسکوزیته و وزن مخصوص آب خود تابعی از درجه حرارت محیط هستند بنابراین برای یک نمونه خاک در دو دمای مختلف می‌توان نوشت:

$$\frac{k_{T_1}}{k_{T_2}} = \left(\frac{\eta_{T_2}}{\eta_{T_1}} \right) \left(\frac{\gamma_{w(T_1)}}{\gamma_{w(T_2)}} \right)$$

$$\gamma_{w(T_1)} \approx \gamma_{w(T_2)}$$

$$k_{20^\circ\text{C}} = \left(\frac{\eta_{T^\circ\text{C}}}{\eta_{20^\circ\text{C}}} \right) k_{T^\circ\text{C}}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

15

تأثیر درجه حرارت بر ویسکوزیته آب

Temperature, T (°C)	$\eta_{T^\circ\text{C}}/\eta_{20^\circ\text{C}}$	Temperature, T (°C)	$\eta_{T^\circ\text{C}}/\eta_{20^\circ\text{C}}$
15	1.135	23	0.931
16	1.106	24	0.910
17	1.077	25	0.889
18	1.051	26	0.869
19	1.025	27	0.850
20	1.000	28	0.832
21	0.976	29	0.814
22	0.953	30	0.797

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

16

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌ها در آزمایشگاه

✓ آزمایش با بار آبی ثابت: برای خاک‌هایی با نفوذپذیری بین 1×10^{-3} تا 1×10^{-2} cm/s می‌توان از نفوذسنج با بار آبی ثابت استفاده نمود.

✓ آزمایش با بار آبی نزولی: در خاک‌های با نفوذپذیری بین 1×10^{-6} تا 1×10^{-3} cm/s می‌توان از روش بار آبی نزولی استفاده نمود.

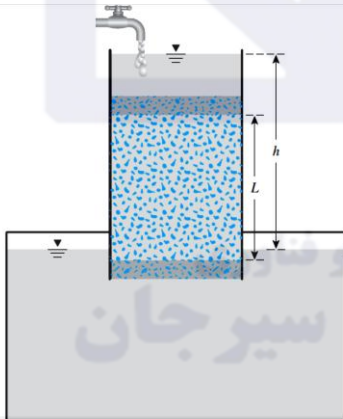
✓ در رس‌ها، نفوذپذیری را می‌توان از طریق آزمایش ادنومتر (تحکیم) نیز به دست آورد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

17

آزمایش با بار آبی ثابت



$$Q = Avt = A(ki)t$$

$$i = \frac{h}{L}$$

$$Q = A \left(k \frac{h}{L} \right) t$$

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

Porous stone
 Soil specimen

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

18

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۱

استوانه ای از خاک، به سطح مقطع 6cm^2 و ارتفاع 12cm تحت آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت قرار می گیرد. اگر اختلاف بار بین ابتدا و انتهای ستوانه 17cm و مقدار آب جمع شده در ظرف در مدت 90sec برابر 20cm^3 باشد، مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک.

$$K = \frac{QL}{Aht} = \frac{20 \times 12}{6 \times 17 \times 90} = 2.6 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

19

مثال ۲

نتایج یک آزمایش نفوذپذیری با پتانسیل ثابت برای یک نمونه ماسه ریز با قطر 150 میلیمتر و طول 300 میلیمتر به صورت زیر می باشد: اختلاف بار = 500 میلیمتر، زمان جمع آوری آب = 5 دقیقه، حجم آب جمع آوری شده = 350 سی سی
مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک.
حل: برای آزمایش با پتانسیل ثابت داریم:

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

$$Q = 350\text{cc} \text{ و } L = 300\text{mm} \text{ و } A = (\pi/4)(150^2) = 17671.46\text{mm}^2 \text{ و } h = 500\text{mm} \text{ و } t = 5 \times 60 = 300\text{sec}$$

بنابراین:

$$k = \frac{(350 \times 10^3) \times 300}{17671.46 \times 500 \times 300} = 3.96 \times 10^{-2} \text{ mm/sec} = 3.96 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

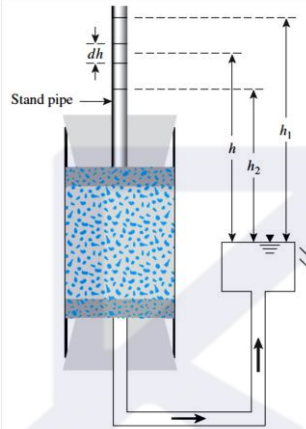
مکانیک خاک

20

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

آزمایش با بار آبی متغیر



$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt}$$

$$dt = \frac{aL}{Ak} \left(-\frac{dh}{h} \right)$$

$$t = \frac{aL}{Ak} \log_e \frac{h_1}{h_2}$$

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

سطح مقطع لوله قائم، a

سطح مقطع نمونه خاک $= A$

طول نمونه خاک $= L$

t = مدت زمانی که در آن آب از ارتفاع h_1 به h_2 کاهش می یابد

■ Porous stone ■ Soil specimen
 دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

21

آزمایش با بار آبی متغیر

در یک آزمایش نفوذپذیری با بار آبی متغییر، مساحت نمونه خاک ۲۰ برابر مساحت لوله قائم و طول آن 10cm است. اگر اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه 30cm باشد و ضریب نفوذپذیری خاک $1.44 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ تعیین گردد، در این صورت پس از ۳۸۰ ثانیه اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه چقدر خواهد بود؟

$$K = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) = \frac{1 \times 10}{20 \times 380} \ln \frac{30}{h_2} = 1.44 \times 10^{-3} \rightarrow h_2 = 10 \text{ cm}$$

■ دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

22

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۳

اطلاعات زیر در مورد یک آزمایش نفوذپذیری با پتانسیل نزولی در دست است:

سطح مقطع نمونه خاک = 1200mm^2

طول نمونه خاک = 150mm

سطح مقطع لوله پیرومتر = 50mm^2

اختلاف بار در زمان $t = 0$ = 400mm

اختلاف بار در زمان $t = 5\text{min}$ = 200mm

$$k = 2.3 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

$a = 50\text{mm}^2$ و $A = 1200\text{mm}^2$ و $L = 150\text{mm}$ و $h_1 = 400\text{mm}$ و $h_2 = 200\text{mm}$ و $t = 5\text{min}$

با قرار دادن مقادیر فوق داریم:

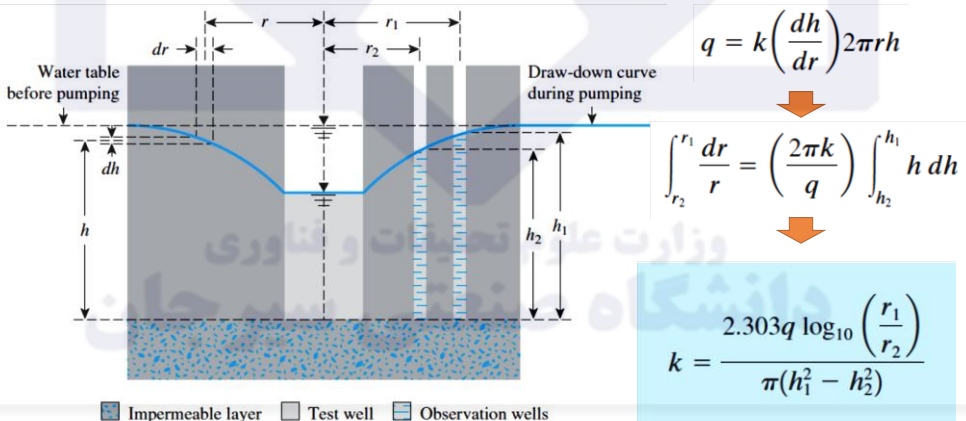
$$k = \left[\frac{2.3 \times 50 \times 150}{1200 \times (5 \times 60)} \right] \log \left(\frac{400}{200} \right) = 1.44 \times 10^{-2} \text{ mm/sec} = 1.44 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

23

تعیین ضریب نفوذپذیری با استفاده از روش‌های صحرایی



دانشگاه صنعتی سیرجان

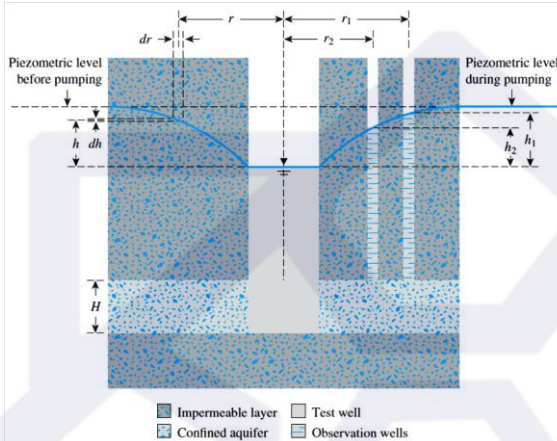
مکانیک خاک

24

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

تعیین ضریب نفوذپذیری با استفاده از روش‌های صحرائی



$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) 2\pi r H$$

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{2\pi k H}{q} dh$$

$$k = \frac{q \log_{10} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)}{2.727 H (h_1 - h_2)}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

25

مثال ۴

با دبی 250lit/min آب در چاه پمپاژ می شود و سطح آب را ۱۲ متر پایین می برد. دبی پمپاژ چقدر باشد تا سطح آب ۱۸ متر افت کند؟ (شعاع تاثیر چاه در هر دو حالت برابر بوده و ضخامت لایه آبدار برابر ۱۰۰ متر می باشد)

ضریب نفوذپذیری در هر دو حالت یکسان بوده و به دبی پمپاژ بستگی ندارد.

$$K = \frac{q \text{Ln}(r_e / r_w)}{\pi(h_e^2 - h_w^2)} \rightarrow \frac{q_1 \text{Ln}(r_e / r_w)}{\pi(h_e^2 - h_{w1}^2)} = \frac{q_2 \text{Ln}(r_e / r_w)}{\pi(h_e^2 - h_{w2}^2)} \rightarrow \frac{q_1}{q_2} = \frac{h_e^2 - h_{w1}^2}{h_e^2 - h_{w2}^2}$$

$$h_e = 100\text{m} \text{ و } h_{w1} = 100 - 12 = 88 \text{ و } h_{w2} = 100 - 18 = 82$$

$$\frac{250}{q_2} = \frac{100^2 - 88^2}{100^2 - 82^2} \rightarrow q_2 = 363 \text{ lit / min}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

26

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۵

از چاهی به قطر 60cm آب با دبی $1.36 \text{ m}^3/\text{min}$ پمپاژ می شود. با توجه به داده های زیر مطلوب است تعیین k و مقدار افت آب در چاه.

$$r_1 = 6\text{m}, h_1 = 84\text{m}, r_2 = 15\text{m}, h_2 = 88.5\text{m}, h_e = 100\text{m}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

27

روابط تجربی برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک های درشت دانه

$$k \propto \frac{e^3}{1+e}$$

$$k(\text{cm/sec}) = 35 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} (D_{10})^{2.32}$$

Amer and Awad (1974)

$$k(\text{cm/s}) = 2.4622 \left[D_{10}^2 \frac{e^3}{(1+e)} \right]^{0.7825}$$

Chapuis (2004)

دانشگاه صنعتی سیرجان

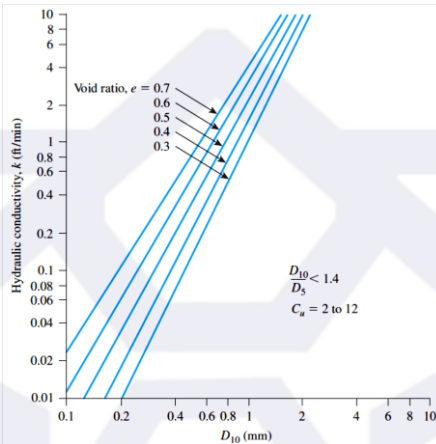
مکانیک خاک

28

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روابط تجربی برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌های درشت‌دانه



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

29

روابط تجربی برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه

رابطه زیر در صورتی که e_0 کمتر از 2.5 باشد جواب خوبی می‌دهد. مقدار C_k برابر با $0.5e_0$ در نظر گرفته می‌شود.

Taylor (1948)

$$\log k = \log k_o - \frac{e_o - e}{C_k}$$

$k_o = \textit{in situ}$ hydraulic conductivity at a void ratio e_o
 $k =$ hydraulic conductivity at a void ratio e
 $C_k =$ hydraulic conductivity change index

دانشگاه صنعتی سیرجان

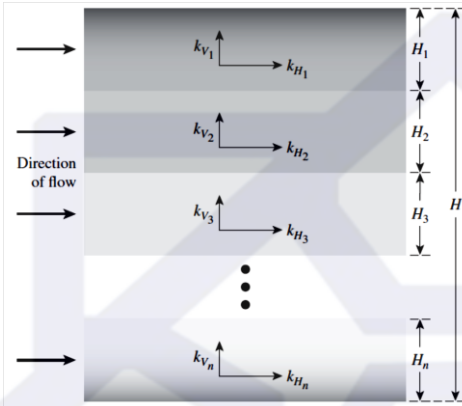
مکانیک خاک

30

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

ضریب نفوذپذیری معادل خاک در حالت جریان افقی



$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad 1$$

$$i = i_1 = i_2 = \dots = i_n \quad 2$$

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H} (k_{H1}H_1 + k_{H2}H_2 + k_{H3}H_3 + \dots + k_{Hn}H_n)$$

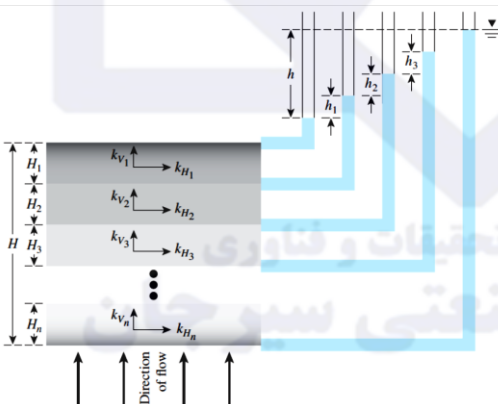
اثبات؟

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

31

ضریب نفوذپذیری معادل خاک در حالت جریان قائم



$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \quad 1$$

$$h = h_1 + h_2 + \dots + h_n \quad 2$$

$$k_{V(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_{V_1}}\right) + \left(\frac{H_2}{k_{V_2}}\right) + \left(\frac{H_3}{k_{V_3}}\right) + \dots + \left(\frac{H_n}{k_{V_n}}\right)}$$

اثبات؟

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

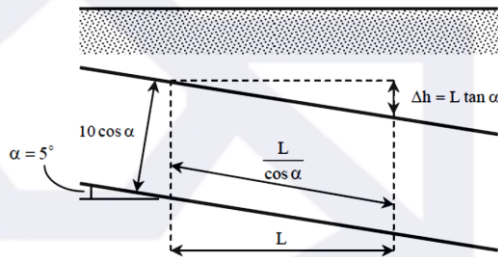
32

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۶

مطابق شکل ۴-۱۱-الف یک لایه خاک نفوذپذیر در روی لایه نفوذناپذیر قرار دارد. با فرض $k = 0.000158 \text{ m/sec}$ ، برای لایه نفوذپذیر، مطلوب است تعیین دبی از میان این لایه بر حسب m^3/hr بر واحد عرض. مقدار $H = 10$ و $\alpha = 5^\circ$ است.



$$i = \frac{\text{افت بار}}{\text{طول}} = \frac{L \tan \alpha}{\left(\frac{L}{\cos \alpha}\right)} = \sin \alpha$$

$$q = kiA = (k)(\sin \alpha)(10 \cos \alpha)(1)$$

$$k = 0.000158 \text{ m/sec} \rightarrow q = (0.000158)(\sin 5^\circ)(10 \sin 5^\circ)(3600) = 0.493 \text{ m}^3 / \text{h/m}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

33

مثال ۷

یک نمونه خاک برای آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت دارای ارتفاع 35cm و مساحت 125cm² می باشد. در حین آزمایش برای اختلاف بار 42cm، آب جمع آوری شده در 3 دقیقه مساوی 580cm³ اندازه گیری شده است. اگر نسبت تخلخل خاک 0.61 باشد سرعت واقعی جریان آب عبوری از داخل خاک چقدر است؟

$$k = \frac{QL}{Aht} = \frac{580 \text{ cm}^3 \times 35 \text{ cm}}{125 \text{ cm}^2 \times 42 \text{ cm} \times 180 \text{ sec}} = 2.15 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$$

$$v_s = \frac{v}{n} = v \left(\frac{1+e}{e} \right); v = ki$$

$$v_s = ki \left(\frac{1+e}{e} \right) = 0.0215 \left(\frac{42}{35} \right) \left(\frac{1+0.61}{0.61} \right) = 0.068 \text{ cm/sec}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

34

Soil Mechanics

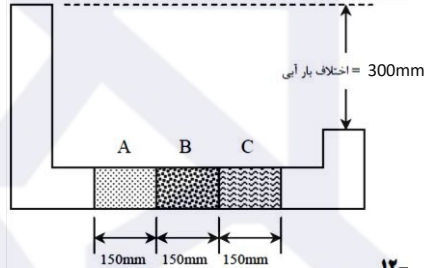
© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۸

شکل ۴-۱۲ یک خاک لایه بندی شده را درون یک لوله آزمایش با مقطع $100 \times 100 \text{mm}$ نشان می دهد. جریان ورودی آب طوری تنظیم شده است که اختلاف بار هیدرولیکی ثابت 300m به وجود آید. ضرایب نفوذپذیری خاک در امتداد جریان به شرح زیر می باشد:

مطلوب است تعیین دبی آب ورودی بر حسب cm^3 / hr (سانتی متر مکعب بر ساعت)

خاک	$k(\text{cm}/\text{sec})$
A	1×10^{-2}
B	3×10^{-3}
C	4.9×10^{-4}

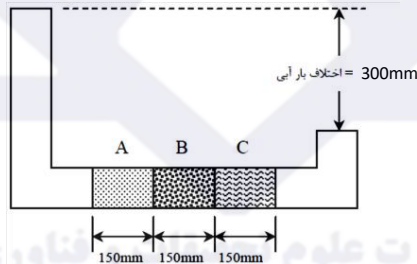


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

35

ادامه مثال ۸



$$k_{eq} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \frac{H_3}{k_3}} = \frac{450 \text{mm}}{\frac{150}{10^{-2}} + \frac{150}{3 \times 10^{-3}} + \frac{150}{4.9 \times 10^{-4}}} = 0.01212 \text{mm} / \text{sec} = 0.001212 \text{cm} / \text{sec}$$

$$q = k_{eq} i A = (0.001212 \text{cm} / \text{sec}) \left(\frac{300 \text{mm}}{450 \text{mm}} \right) \left(\frac{100}{10} \times \frac{100}{10} \text{cm}^2 \right) = 0.0807 \text{cm}^3 / \text{sec} = 290.58 \text{cm}^3 / \text{hr}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

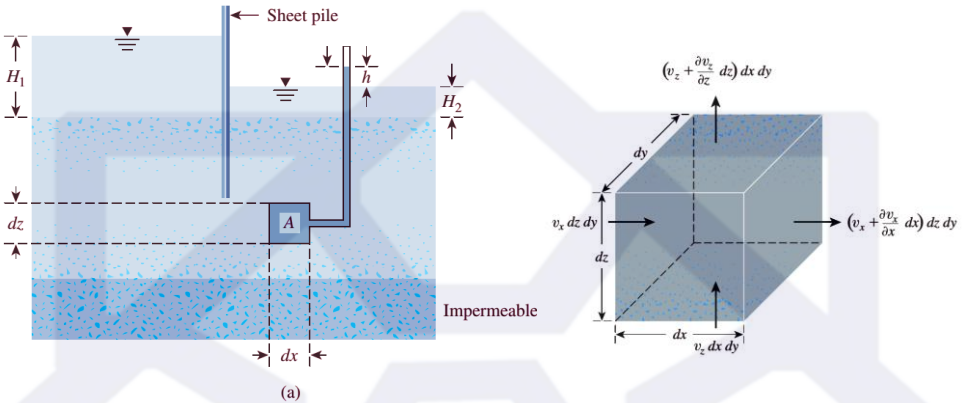
مکانیک خاک

36

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

معادله پیوستگی

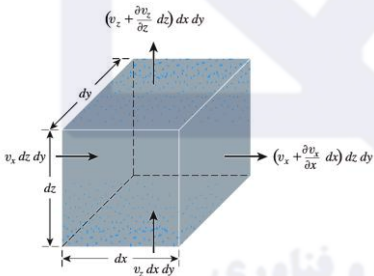


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

37

معادله پیوستگی



نرخ (دبی) جریان خروجی از جزء خاک:

$$\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dz dy$$

$$\left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dx dy$$

با فرض غیر قابل تراکم بودن آب و عدم تغییر حجم توده خاک، کل دبی جریان ورودی مساوی با کل دبی جریان خروجی است:

$$\left[\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dz dy + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dx dy \right] - [v_x dz dy + v_z dx dy] = 0$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

38

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

}

معادله دیفرانسیل لاپلاس

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

قانون دارسی

$$v_x = k_x i_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

}

$$v_z = k_z i_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

در خاک ایزوتروپ

→

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

39

خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل

✓ رابطه زیر که رابطه پیوستگی برای یک محیط ایزوتروپیک است، نشان دهنده دو دسته منحنی متعامد است که **خطوط جریان** و **خطوط هم پتانسیل** نامیده می شوند.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

✓ **خط جریان خطی** است که ذرات آب در امتداد آن از بالادست به پایین دست در خاک نفوذپذیر جریان می یابند.

✓ **خط هم پتانسیل خطی** است که نقاط واقع در روی آن دارای انرژی پتانسیل یکسان هستند.

✓ بنابراین اگر پیزومترهایی در روی نقاط واقع در روی یک خط هم پتانسیل نصب شوند، تراز فوقانی سطح آب در تمام پیزومترها یکسان خواهد بود.

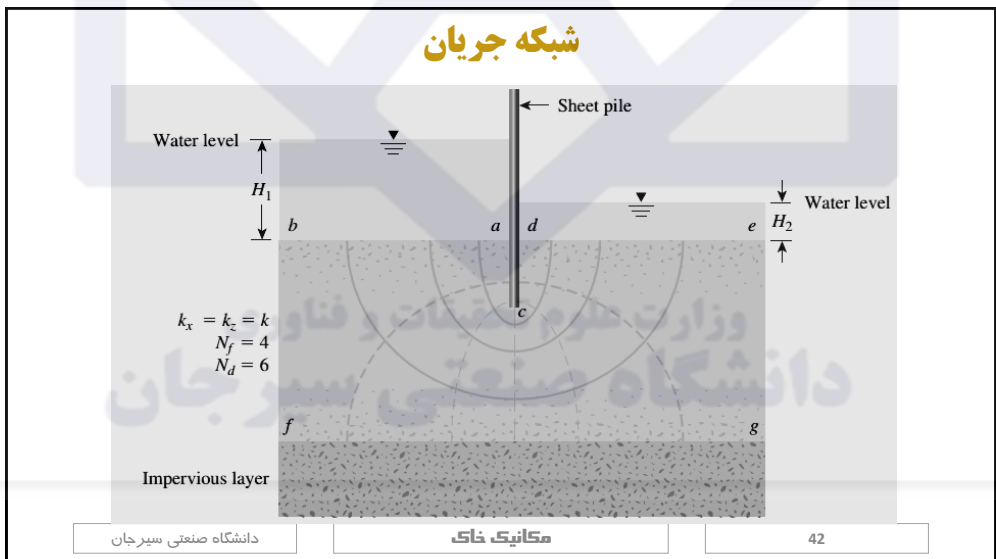
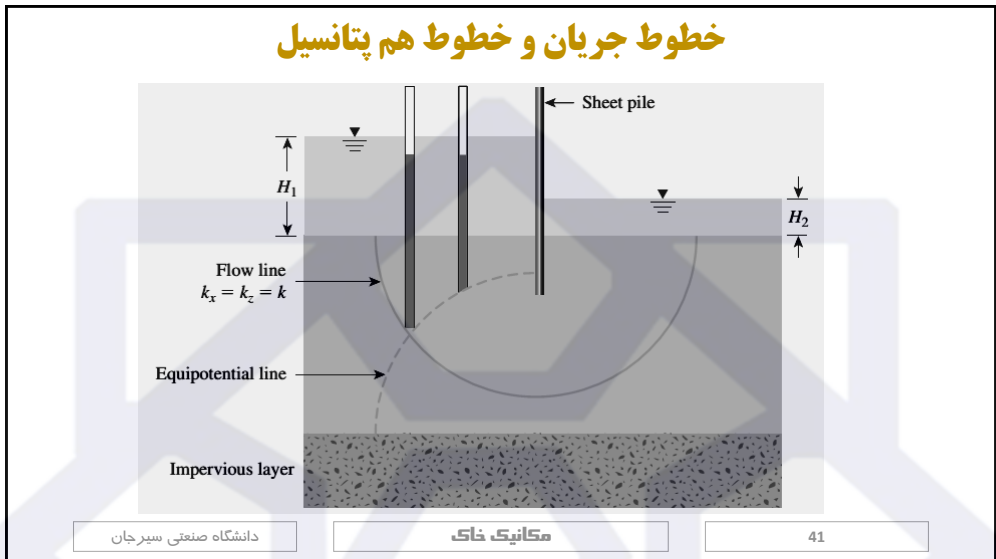
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

40

Soil Mechanics

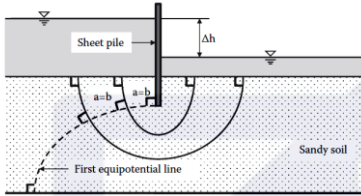
© Dr. Ali Reza Ghanizadeh



Soil Mechanics

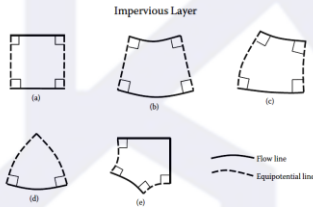
© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

قواعد کلی ترسیم شبکه جریان



ترکیبی از تعداد خطوط جریان و تعدادی خطوط هم‌پتانسیل، شبکه جریان نامیده می‌شوند. در ترسیم شبکه جریان دو قاعده زیر را باید مراعات نمود:

1. خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل بر هم عمودند.
2. هر یک از چشمه‌های شبکه جریان تقریباً باید مربع باشند.
3. سطح لایه نفوذناپذیر در بالادست و پایین‌دست (خطوط ab و de)، خطوط هم‌پتانسیل هستند.
4. چون ab و de خطوط هم‌پتانسیل هستند، تمام خطوط جریان این دو خط را با زاویه قائمه قطع می‌کنند.
5. مرزهای لایه نفوذناپذیر یعنی خط fg یک خط جریان است و به همین ترتیب سطح پرده نفوذناپذیر (سطح سپر) یعنی خط acd ، نیز یک خط جریان است.
6. خطوط هم‌پتانسیل، خطوط جریان acd و fg را به زاویه قائمه قطع می‌کنند.

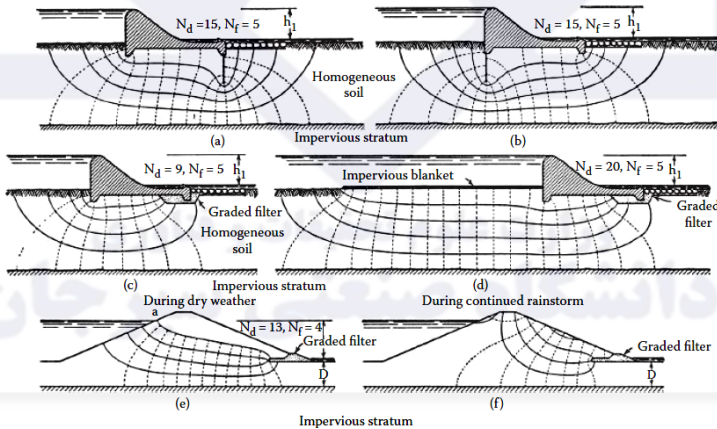


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

43

قواعد کلی ترسیم شبکه جریان



دانشگاه صنعتی سیرجان

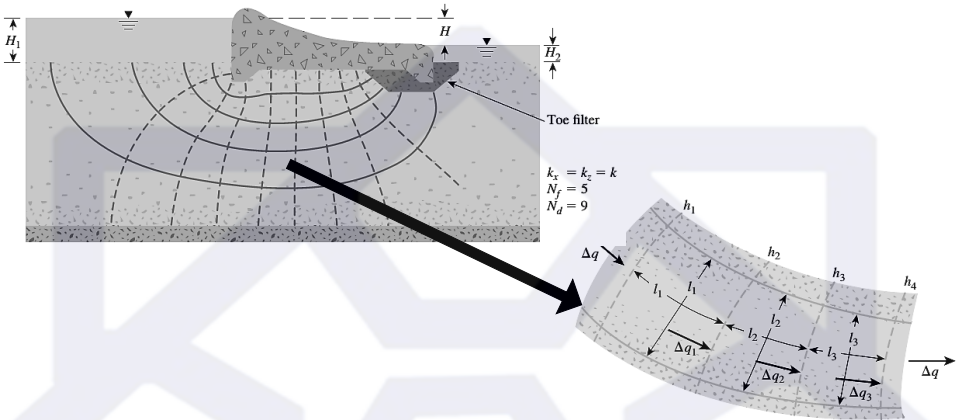
مکانیک خاک

44

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

محاسبه دبی نشت با استفاده از شبکه جریان



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

45

محاسبه دبی نشت با استفاده از شبکه جریان

دبی نشت از میان مجرای جریان برای واحد عرض:

$$\Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \dots = \Delta q$$

از رابطه دارسی داریم:

$$\Delta q = k \left(\frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) l_1 = k \left(\frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) l_2 = k \left(\frac{h_3 - h_4}{l_3} \right) l_3 = \dots$$

افت تراز پیزومتري بين هر دو خط هم پتانسيل مجاور:

$$h_1 - h_2 = h_2 - h_3 = h_3 - h_4 = \dots = \frac{H}{N_d}$$

$$\Delta q = k \frac{H}{N_d}$$

H = اختلاف پتانسيل بين بالادست و پايين دست (افت كلي بار آبي)

N_d = تعداد افت هاي پتانسيل

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

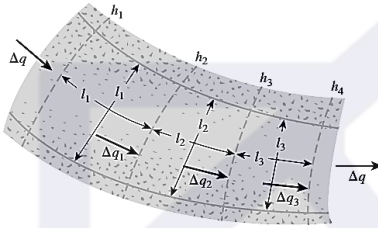
46

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

محاسبه دبی نشت با استفاده از شبکه جریان

اگر تعداد مجاری جریان در یک شبکه جریان برابر با N_f باشد داریم:



$$q = k \frac{HN_f}{N_d}$$

H = اختلاف پتانسیل بین بالادست و پایین دست (افت کلی بار آبی)
 N_d = تعداد افت های پتانسیل

باید توجه داشت که روابط فوق دبی نشت را برای عرض واحد می دهند و در برای محاسبه نشت باید این مقدار در عرض سازه ضرب شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

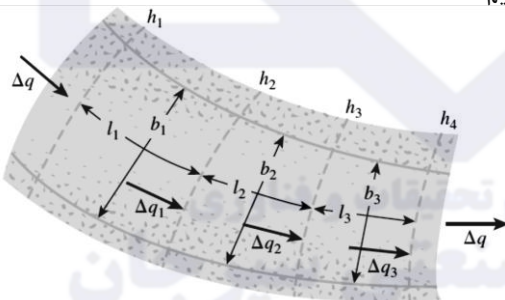
مکانیک خاک

47

محاسبه دبی نشت با استفاده از شبکه جریان

در صورتی که شبکه جریان مربعی نباشد و داشته باشیم:

$$b_1/l_1 = b_2/l_2 = b_3/l_3 = \dots = n$$



$$q = kH \left(\frac{N_f}{N_d} \right) n$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

48

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۹

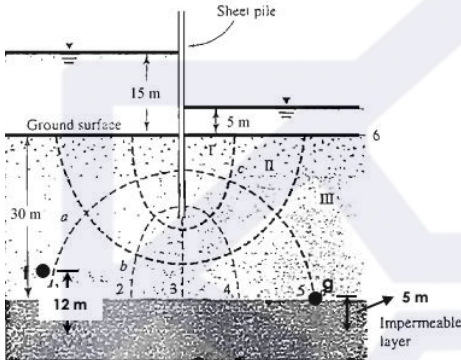
در شکل زیر شبکه جریان در اطراف یک ردیف سپرکوبی در یک لایه نفوذپذیر نشان داده شده است. با توجه به اینکه

$k_x = k_z = k = 5 \times 10^{-3}$ ، مطلوب است تعیین:

(الف) ارتفاع پیزومتری نسبت به تراز زمین در نقاط a ، b ، c و d .

(ب) دبی نشست از میان مجرای جریان شماره ۲ برای عرض واحد.

(پ) کل دبی نشست از میان لایه نفوذپذیر برای عرض واحد.



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

49

ادامه مثال ۹

با توجه به شکل، $N_f = 3$ و $N_a = 6$. افت کلی بار آبی بین بالادست و پایین دست مساوی ۱۰ متر است. بنابراین افت بار برای هر خط پتانسیل مساوی $10/6 = 1.667\text{m}$ است. نقطه a روی خط پتانسیل شماره ۱ قرار دارد. این بدان معنا است که افت پتانسیل در a مساوی 1×1.667 متر است. بنابراین سطح آب در پیزومتر واقع در a برابر است با:

$$\text{بالای سطح زمین } (15 - 1.667) = 13.33\text{m}$$

به طور مشابه تراز پیزومتری در سایر نقاط برابر است با:

$$b = (15 - 2 \times 1.667) = 11.67\text{m} \text{ بالای سطح زمین}$$

$$c = (15 - 5 \times 1.667) = 6.67\text{m} \text{ بالای سطح زمین}$$

$$d = (15 - 5 \times 1.667) = 6.67\text{m} \text{ بالای سطح زمین}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

50

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

ادامه مثال ۹

با توجه به شکل، $N_f = 3$ و $N_d = 6$. افت کلی بار آبی بین بالادست و پایین دست مساوی ۱۰ متر است. بنابراین افت بار برای هر خط پتانسیل مساوی $10/6 = 1.667\text{m}$ است. نقطه a روی خط پتانسیل شماره ۱ قرار دارد. این بدان معنا است که افت پتانسیل در a مساوی 1×1.667 متر است. بنابراین سطح آب در پیزومتر واقع در a برابر است با:

$$(15 - 1.667) = 13.33\text{m} \text{ بالای سطح زمین}$$

به طور مشابه تراز پیزومتری در سایر نقاط برابر است با:

$$b = (15 - 2 \times 1.667) = 11.67\text{m} \text{ بالای سطح زمین}$$

$$c = (15 - 5 \times 1.667) = 6.67\text{m} \text{ بالای سطح زمین}$$

$$d = (15 - 5 \times 1.667) = 6.67\text{m} \text{ بالای سطح زمین}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

51

ادامه مثال ۹

(ب)

$$\Delta q = k \frac{H}{N_d}$$

$$k = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec} = 5 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$$

$$\Delta q = 5 \times 10^{-5} \times 1.667 = 8.34 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{sec/m}$$

(پ)

$$q = k \frac{HN_f}{N_d} = (5 \times 10^{-5}) \times 1.667 \times 3 = 25 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{sec/m}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

52

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مفهوم سپر کوبی



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

53

مفهوم سپر کوبی



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

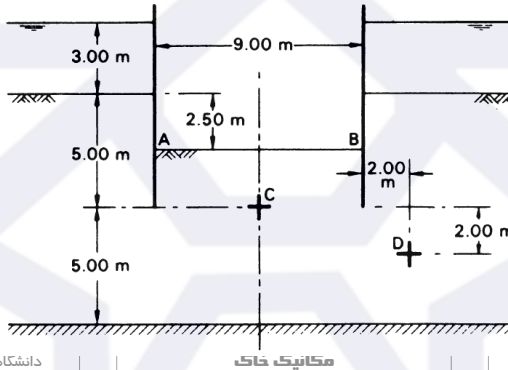
54

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۱۰

به منظور اجرای پایه‌های یک پل در یک رودخانه سپر کوبی تا عمق ۵ متر از کف رودخانه به صورت دو طرفه مطابق شکل زیر انجام شده است. میزان نشت آب به داخل جبهه کاری را به ازاء واحد طول سپر کوبی تعیین کنید.

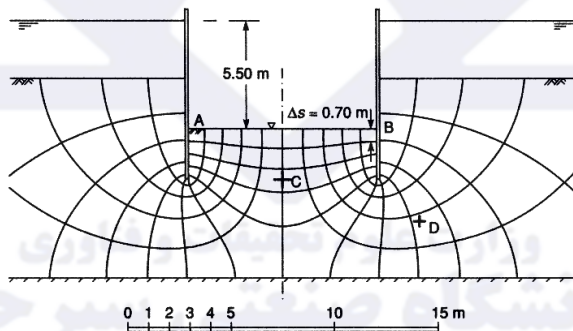


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

55

ادامه مثال ۱۰



$$q = kh \frac{N_f}{N_d} = 4.0 \times 10^{-7} \times 5.50 \times \frac{10}{11} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s per m}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

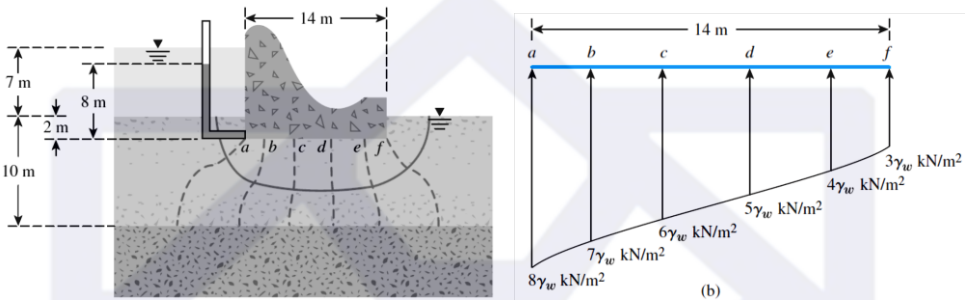
56

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

فشار برکنش در زیر سازه‌های هیدرولیکی

✓ از شبکه جریان می‌توان برای تعیین فشار برکنش در زیر سازه‌های هیدرولیکی استفاده کرد.



$$a \text{ (left corner of the base)} = (\text{Pressure head at } a) \times (\gamma_w) = [(7 + 2) - 1]\gamma_w = 8\gamma_w$$

$$b = [9 - (2)(1)]\gamma_w = 7\gamma_w$$

$$f = [9 - (6)(1)]\gamma_w = 3\gamma_w$$

✓ نیروی نشت یا برکنش در واحد طول برابر است با سطح زیر نمودار فشار.

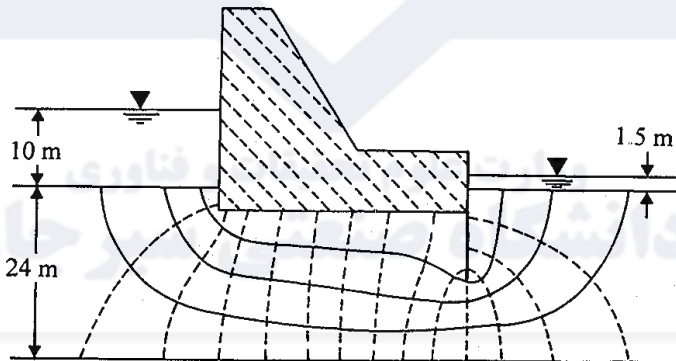
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

57

مثال ۱۱

مطلوبست محاسبه فشار برکنش در زیر سد نشان داده شده در شکل زیر:



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

58

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

ادامه مثال ۱۱

Refer to the flow net shown for Problem 7.7. At the bottom left-hand side of the weir, the number of drops is about 1.5. At the bottom right-hand side of the weir, the number of drops is 10.

$$\Delta h = \frac{H_1 - H_2}{N_d} = \frac{10 - 15}{14} = 0.607 \text{ m / drop}$$

So, at the bottom left-hand side of the weir, the uplift head is

$$(10 + 3) - (\Delta h)(1.5) = 13 - (0.607)(1.5) = 12.09 \text{ m}$$

At the bottom of the right-hand side of the weir, the uplift head is

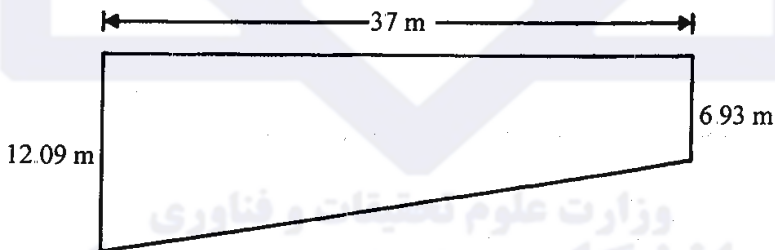
$$(10 + 3) - (\Delta h)(10) = 13 - (0.607)(10) = 6.93 \text{ m}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

59

مثال ۱۰



$$\text{So, uplift force} \approx 9.81 \times (37) \left(\frac{12.09 + 6.93}{2} \right) \approx 3452 \text{ kN / m}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

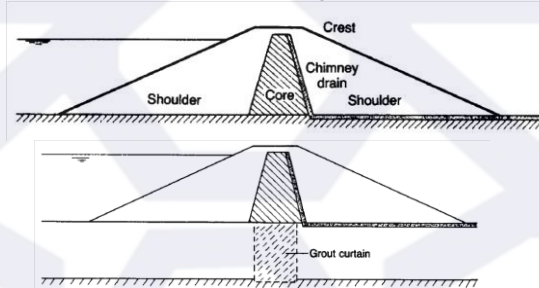
60

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

پدیده جوشش در سازه‌های هیدرولیکی

- ✓ اگر نشت از زیر یک سازه هیدرولیکی کنترل نشود، ممکن است که در محل خروجی آب از زیر زمین شیب هیدرولیکی زیادی به وجود آید.
- ✓ وجود شیب هیدرولیکی بزرگ باعث نیروی نشت بزرگ می‌شود که ممکن است باعث بروز پدیده جوشش و گاه مقاومت خاک گردد.

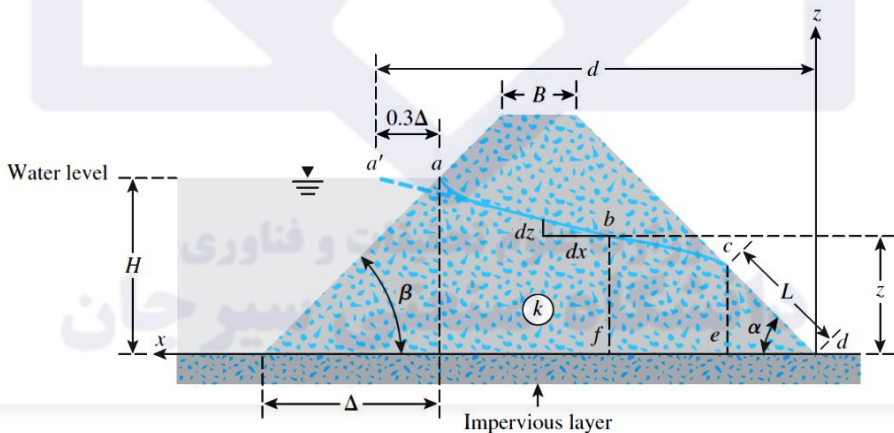


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

61

نشت آب از بدنه سد خاکی همگن واقع بر روی پی نفوذناپذیر



دانشگاه صنعتی سیرجان

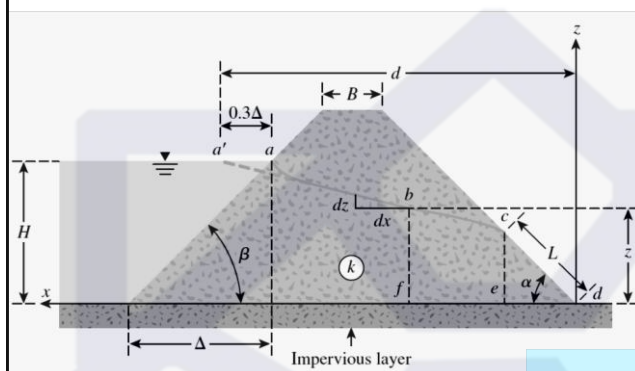
مکانیک خاک

62

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

نشت آب از بدنه سد خاکی همگن واقع بر روی پی نفوذناپذیر



فرض دیوپی: $i = \frac{dz}{dx}$

دبی نشت در واحد طول سد عمود بر cd:

$$q = kiA$$

$$i = \frac{dz}{dx} = \tan \alpha$$

$$A = (\overline{ce})(1) = L \sin \alpha$$

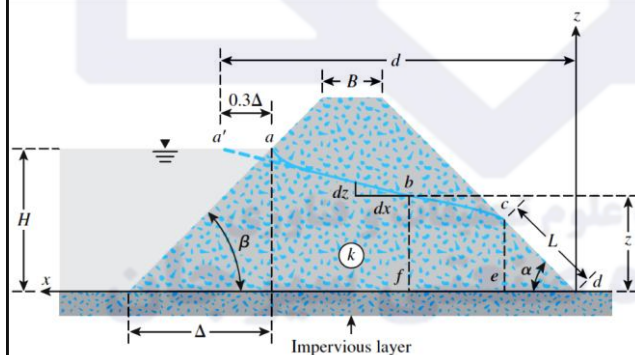
$$q = k(\tan \alpha)(L \sin \alpha) = kL \tan \alpha \sin \alpha$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

63

نشت آب از بدنه سد خاکی همگن واقع بر روی پی نفوذناپذیر



دبی نشت در واحد طول از میان مقطع bf:

$$q = kiA = k \left(\frac{dz}{dx} \right) (z \times 1) = kz \frac{dz}{dx}$$

بر اساس پیوستگی جریان داریم:

$$kz \frac{dz}{dx} = kL \tan \alpha \sin \alpha$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

64

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

نشت آب از بدنه سد خاکی همگن واقع بر روی پی نفوذناپذیر

$$\int_{z=L \sin \alpha}^{z=H} kz dz = \int_{x=L \cos \alpha}^{x=d} (kL \tan \alpha \sin \alpha) dx$$

$$\frac{1}{2}(H^2 - L^2 \sin^2 \alpha) = L \tan \alpha \sin \alpha (d - L \cos \alpha)$$

$$\frac{H^2}{2} - \frac{L^2 \sin^2 \alpha}{2} = Ld \left(\frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right) - L^2 \sin^2 \alpha$$

$$L = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}}$$

$$\frac{H^2 \cos \alpha}{2 \sin^2 \alpha} - \frac{L^2 \cos \alpha}{2} = Ld - L^2 \cos \alpha$$

$$L^2 \cos \alpha - 2Ld + \frac{H^2 \cos \alpha}{\sin^2 \alpha} = 0$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

65

مراحل محاسبه نشت آب از بدنه سد خاکی همگن واقع بر روی پی نفوذناپذیر

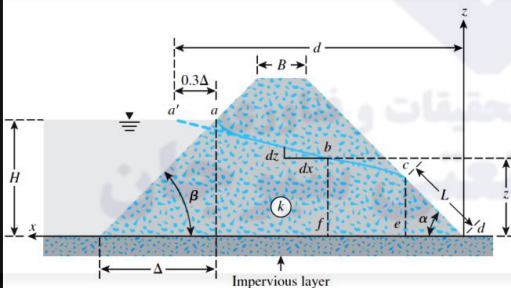
✓ تعیین α

✓ محاسبه Δ و سپس محاسبه 0.3Δ

✓ محاسبه d

✓ با داشتن α و d ، محاسبه L .

✓ با داشتن L ، محاسبه q .



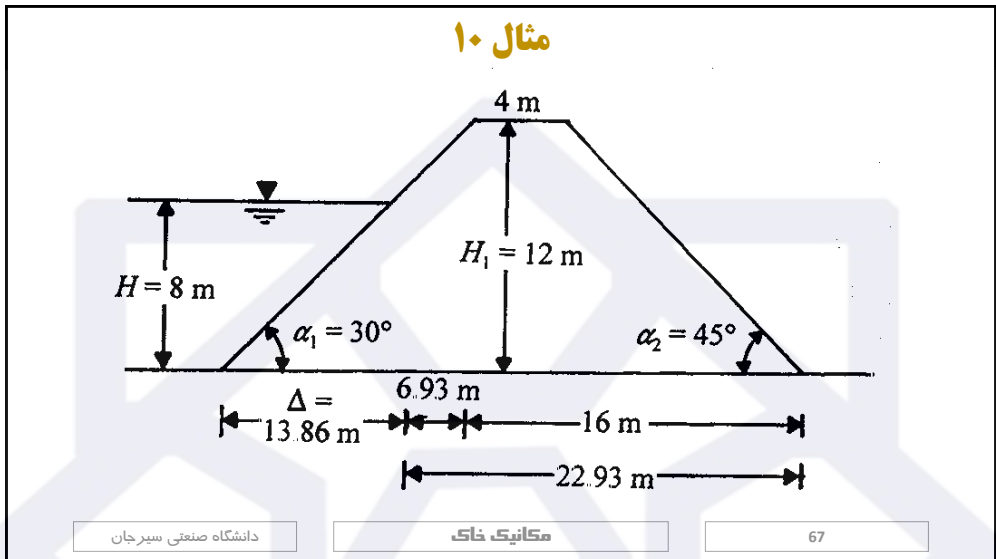
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

66

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh



ادامه مثال ۱۰

$$d = H_1 \cot \alpha_2 + L_1 + (H_1 - H) \cot \alpha_1 + 0.3 \Delta$$

$$= (12)(\cot 45^\circ) + 4 + (12 - 8) \cot 30^\circ + 4.16 \approx 27.09 \text{ m}$$

$$L = \frac{d}{\cos \alpha_2} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha_2} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha_2}} = \frac{27.09}{\cos 45^\circ} \sqrt{\left(\frac{27.09}{\cos 45^\circ}\right)^2 - \left(\frac{8}{\sin 45^\circ}\right)^2} = 1.71 \text{ m}$$

$$q = kL \tan \alpha_2 \sin \alpha_2 = \left[\left(\frac{2 \times 10^{-4}}{10^2} \right) (1.71) \right] [(\tan 45^\circ)(\sin 45^\circ)]$$

$$\approx 2.418 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{sec} / \text{m} \approx 0.209 \text{ m}^3 / \text{day} / \text{m}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان
مکانیک خاک
68