فصل ۴:

جریان آب در خاک

جزوه درس مکانیک خاک (کارشناسی مهندسی عمران)

استاد: عبدالمتین ستایش

@ME2CH

WWW.ME2CH.ROZBLOG.COM

فهرست مطالب فصل چهارم:

۴–۱	مقدمه
۴–۲	گرادیان (شیب هیدرولیکی)
۴–۳	قانون دارسی
۴–۴	ضریب نفوذپذیری
۴–۵	آزمایش های تعیین نفوذپذیری
۴–۶	نفوذپذیری معادل در خاک های لایه بندی شده
۴–۷	رابطه پیوستگی و شبکه جریان
۴–۸	محاسبه تراوش به وسیله شبکه جریان (تعیین دبی زهاب)
۴–۹	فشار بر کنش در زیر سازه های هیدرولیکی
–	منابع و مراجع

۴-۱ مقدمه

خاک مجموعه ای از ذرات جامد و حفرات بین آنهاست. درنتیجه آب می تواند 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 نیروهای نشت، و همچنین تحکیم خاک های رسی، حائز اهمیت می باشد.

۴-۲ گرادیان (شیب هیدرولیکی)

طبق رابطه برنولی، بار آبی کل یک نقطه آب در حال جریان مجموع بار فشار، بار سرعت و بار ارتفاعی می باشد. یعنی:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \qquad (۱-۴)$$

که در آن:

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

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 صرفنظر کرد و بار آبی کل را به صورت زیر نوشت:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + Z \qquad (۲-۴)$$

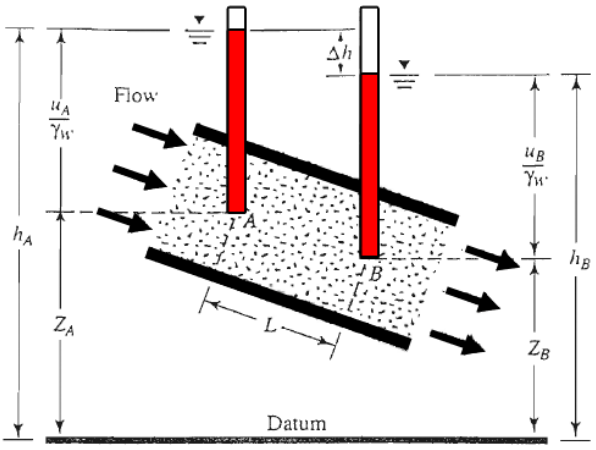
شکل ۴-۱ ارتباط بین فشار، ارتفاع و بار کل جریان در داخل خاک را نشان می دهد. پیزومترها در نقاط A و B نصب شده اند. تراز صعود آب در داخل لوله پیزومتری نصب شده در نقاط A و B به ترتیب تراز پیزومتری A و B خوانده می شود. بار فشار در هر نقطه، ارتفاع ستون آب در پیزومتر نصب شده در آن نقطه است. بار ارتفاعی هر نقطه، فاصله قائم آن نقطه تا یک تراز مبنا می باشد.

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

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{P_A}{\gamma_w} + Z_A\right) - \left(\frac{P_B}{\gamma_w} + Z_B\right) \qquad (۳-۴)$$

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

$$i = \frac{\Delta h}{L} \qquad (۴-۴)$$



شکل ۴–۱ فشار، ارتفاع و بار آبی کل برای جریان در داخل خاک

که در آن:

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. در حالت کلی، تغییرات سرعت v بر حسب تغییرات گرادیان i، مطابق شکل ۴-۲ می باشد. این شکل به سه ناحیه زیر تقسیم می شود.

الف– ناحیه جریان لایه ای (ناحیه I)

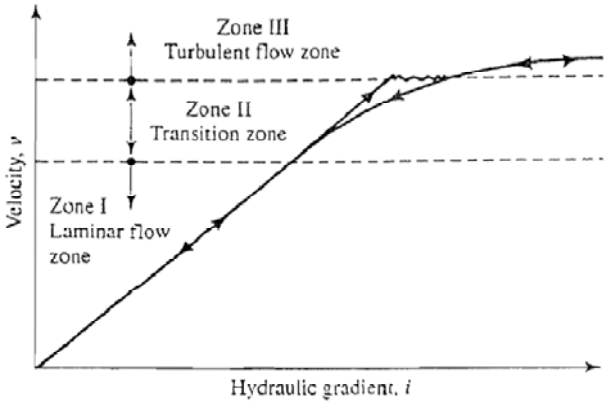
ب – ناحیه انتقال (ناحیه II)

پ – ناحیه جریان در هم (آشفته) (ناحیه III)

وقتی که شیب هیدرولیکی به تدریج افزایش می یابد، جریان در نواحی I و II به صورت لایه ای باقی مانده و سرعت v رابطه خطی با شیب هیدرولیکی خواهد داشت. در شیب هیدرولیکی زیاد، جریان آشفته می شود. وقتی که شیب هیدرولیکی کاهش می یابد، جریان لایه ای فقط در ناحیه I وجود خواهد داشت. در خیلی از خاک ها، جریان آب از فضال حفرات بین دانه های خاک را می توان لایه ای فرض نمود که برای آن:

$$v \propto i \qquad (۵-۴)$$

در سنگ ها، شن و ماسه درشت ممکن است جریان آشفته وجود داشته باشد که برای این حالت رابطه فوق اعتبار خود را از دست می دهد.



شکل ۴–۲ تغییرات سرعت v با گرادیان هیدرولیکی i

۴-۳ | قانون دارسی

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

$$v = ki \qquad (۴-۶)$$

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

رابطه ۴-۶ بر مبنای مشاهدات تجربی دارسی از حرکت آب در ماسه تمیز تدوین یافته است. مشاهده می شود که رابطه فوق مشابه رابطه ۴-۵ است و هر دو رابطه برای شرایط جریان لایه ای و هر نوع خاکی معتبر هستند. در رابطه ۴-۶، v سرعت جریان آب بر پایه سطح مقطع کلی خاک می باشد. لیکن سرعت واقعی جریان آب (به عبارت دیگر سرعت تراوش) در فضای بین ذرات بزرگتر از v است. سرعت واقعی جریان در داخل خاک v_s را به صورت زیر می توان محاسبه نمود:

$$v_s = \frac{v}{n} \qquad (۴-۷)$$

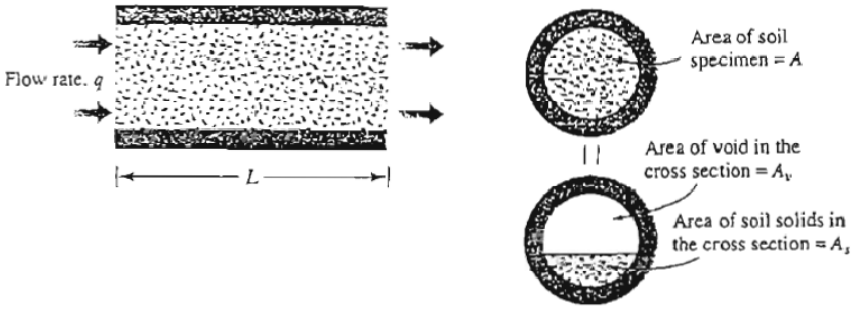
اثبات:

برای اثبات رابطه فوق شکل ۴-۳ را درنظر بگیرید. در این شکل خاکی به طول L با سطح مقطع کلی A نشان داده شده است. اگر مقدار آب جریان یافته در خاک در واحد زمان با q نمایش داده شود می توان نوشت: $q = vA = A_v v_s$ که در این رابطه v_s = سرعت تراوش و A_v = سطح مقطع حفرات در مقطع عرضی نمونه است. از طرفی داریم: $A = A_v + A_s$ که A_s سطح مقطع قسمت جامد در مقطع عرضی نمونه می باشد. با ترکیب روابط فوق می توان نوشت:

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

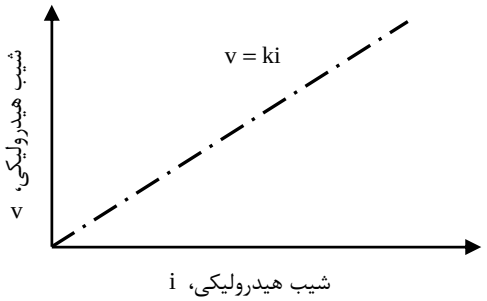
$$\Rightarrow v_s = v\left[\frac{1 + V_v / V_s}{V_v / V_s}\right] = v\left(\frac{1+e}{e}\right) = \frac{v}{n}$$

که در فوق e = نسبت تخلخل و n = پوکی



شکل ۴-۳ شکل مربوط به حصول رابطه ۴-۷

از رابطه دارسی (رابطه ۴-۶)، این طور بر می آید که بین سرعت جریان v و شیب هیدرولیکی i یک رابطه خطی وجود دارد که از مرکز مختصات می گذرد (شکل ۴-۴).



شکل ۴–۴ تغییرات سرعت جریان با شیب هیدرولیکی در خاک رس

۴–۴ | ضریب نفوذپذیری

ضریب نفوذپذیری دارای همان واحد سرعت جریان است. در دستگاه آحاد SI، ضریب نفوذپذیری بر حسب cm/s یا m/day بیان می شود. ضریب نفوذپذیری خاک ها به عوامل متعددی بستگی دارد. این عوامل عبارتند از: **ویسکوزیته سیال**، **اندازه و توزیع اندازه حفرات**، **منحنی دانه بندی**، **نسبت تخلخل**، **زبری سطح دانه ها** و **درجه اشباع خاک**. درخاک های رس دار، ساختار خاک تاثیر مهمی در ضریب نفوذپذیری دارد. سایر عوامل مهم که در نفوذپذیری رس های موثرند عبارتند از: تمرکز یونی و ضخامت لایه آبی که اطراف ذرات رسی نگه داشته شده است. ضریب نفوذپذیری برای خاک های مختلف به مقدار زیادی تفاوت می کند. در جدول ۴-۱ حدود تغییرات ضریب نفوذپذیری برای خاک های مختلف ارائه شده است.

ضریب نفوذپذیری، طبق رابطه زیر به وزن مخصوص و ویسکوزیته سیال بستگی دارد:

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta}\overline{K} \qquad (۸-۴)$$

که در آن:

γ_w = وزن مخصوص آب

η = ویسکوزیته آب

$\overline{K}$ = ضریب نفوذپذیری مطلق

نفوذپذیری مطلق $\overline{K}$ دارای بعد L^2 (سانتیمتر به توان ۲ یا متر به توان ۲) می باشد.

جدول ۴–۱ مقادیر نمونه ضریب نفوذپذیری

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}	کمتر از 0.00086

پس می توان نتیجه گرفت که نفوذپذیری خاک به عوامل زیر بستگی دارد:

(الف) نفوذپذیری مطلق خاک: نفوذپذیری مطلق خاک، از خاکی به خاک دیگر متفاوت بوده و بستگی به فضای خالی خاک دارد. به عنوان مثال در درشت دانه ها که فضال خالی بیشتر است، نفوذپذیری نیز بیشتر است و یا در خاکی که دارای دانه های تیز گوشه است، نفوذپذیری کمتر از خاکی است که دارای دانه های گرد گوشه می باشد. عامل دیگری که در نفوذپذیری مطلق خاک موثر است زبری سطح دانه ها است. به این شکل که هرچه دانه های خاک سطح زبرتری داشته باشند، به علت اصطکاک و تلاف بیشتر انرژی آب، باعث کاهش نفوذپذیری می شوند.

(ب) 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 می توان نوشت:

$$\frac{K\theta_1}{K\theta_2}=\frac{\gamma_w\theta_1\cdot\eta\theta_2}{\gamma_w\theta_2\cdot\eta\theta_1} \qquad (۹-۴)$$

نکته :

ضریب نفوذپذیری خاک های غیر اشباع کوچکتر از خاک های اشباع بوده و با افزایش درجه اشباع به سرعت افزایش می یابد.

نکته :

برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک در دمای ثابت، برخی رابط تجربی نیز ارائه شده است که مهمترین آن ها عبارتند از:

برای خاک های ماسه ای:

$$K\propto\frac{e^3}{1+e} \qquad (۱۰-۴)$$

برای ماسه نسبتاً یکنواخت:

$$K\propto D_{10}^2 \qquad (۱۱-۴)$$

۴-۵ آزمایش های تعیین نفوذپذیری

نفوذپذیری خاک را با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی در آزمایشگاه می توان تعیین نمود. برای خاک هایی با نفوذپذیری بین 1×10^{-3} تا $1\times10^{-2}\,cm/s$ می توان از نفوذسنج با هد ثابت و خاک های با نفوذپذیری بین 10^{-6} تا $10^{-2}\,cm/s$ می توان از روش هد افتان استفاده نمود. **در رس ها، نفوذپذیری را می توان از طریق آزمایش ادئومتر (تحکیم) نیز بدست آورد**.

التبه تعیین نفوذپذیری خاک در آزمایشگاه به طور کلی نتایج قابل اطمینانی بدست نمی دهد زیرا نمونه خاک دستخورده شده و این مسأله می تواند مقادیر نفوذپذیری خاک را تغییر دهد (به خصوص در ماسه ها). رس ها و سیلت ها ممکن است دارای لنز ماسه ای بوده و نسبت به نفوذپذیری ناهمسانگرد باشند بنابراین مقادیر بدست آمده در آزمایشگاه می تواند تفاوت چشمگیری نسبت به مقادیر محلی داشته باشند.

۴-۵-۱ تعیین ضریب نفوذپذیری در آزمایشگاه

دو روش استاندارد برای تعیین ضریب نفوذپذیری در آزمایشگاه وجود دارد:

(الف) آزمایش با بار آبی ثابت

(ب) آزمایش با بار آبی نزولی

در زیر به طور خلاصه هر دو آزمایش تشریح می شود.

(الف) آزمایش با بار آبی ثابت در آزمایشگاه

در شکل ۴-۵ اصول کلی دستگاه آزمایش با بار ثابت نشان داده شده است. در این آزمایش دبی آب ورودی طوری تنظیم می شود که اختلاف بار بین ورودی و خروجی در طی آزمایش ثابت بماند. بعد از ثابت شدن اختلاف بار و دبی ورودی، توسط یک ظرف مدرج، مقدار آب خروجی در مدت زمان مشخصی اندازه گیری می شود. کل آب جمع شده را می توان مطابق زیر تعریف کرد:

$$Q = Avt = A(ki)t \qquad (۱۲-۴)$$

که در آن: Q = حجم آب جمع شده، A = سطح مقطع نمونه خاک، t = مدت جمع آوری آب

از طرفی می توان نوشت:

$$i = \frac{h}{L} \qquad (۱۳-۴)$$

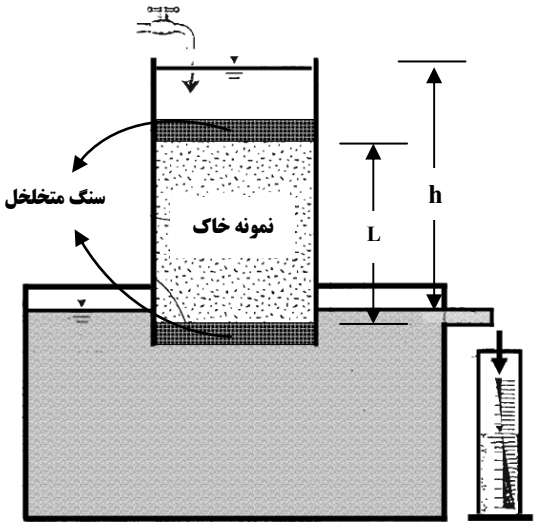
که در آن L طول نمونه می باشد. با قرار دادن رابطه ۴-۱۳ در رابطه ۴-۱۲ به دست می آید:

$$Q = A\left(k\frac{h}{L}\right)i \qquad (۱۴-۴)$$

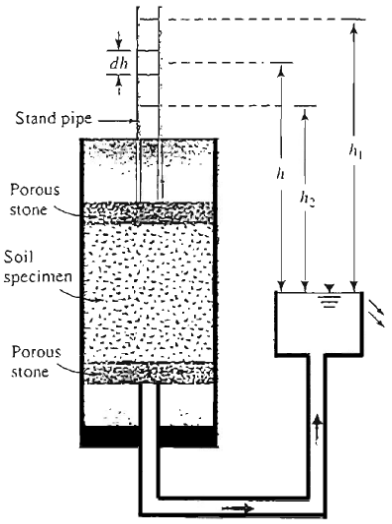
یا:

$$k = \frac{QL}{Aht} \qquad (۱۵-۴)$$

آزمایش بار ثابت برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک های درشت دانه که دارای ضریب نفوذپذیری بزرگی هستند، مفید می باشد.



شکل ۴–۵ آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت



شکل ۴–۶ آزمایش نفوذپذیری با بار نزولی

مثال :

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 $90\,\text{sec}$ برابر 20cm^3 باشد، مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک.

$$K = \frac{QL}{Aht} = \frac{20\times12}{6\times17\times90} = 2.6\times10^{-2}\,\text{cm/s}$$

(ب) آزمایش با بار آبی متغییر در آزمایشگاه

در شکل ۴-۶ اصول کلی دستگاه آزمایش تعیین نفوذپذیری با بار آبی متغییر نشان داده شده است. آب از طریق یک لوله قائم وارد خاک می شود. در زمان $t=0$ اختلاف پتانسیل اولیه h_1 ثبت شده و به آب اجازه داده می شود که از میان نمونه خاک جریان یابد. اختلاف پتانسیل نهایی در زمان $t=t_F$ مساوی h_2 ثبت می گردد. نفوذپذیر در روش بار آبی متغییر با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$k=2.303\frac{aL}{At}\log_{10}\frac{h_1}{h_2} \qquad (۱۶-۴)$$

که در آن:

a = سطح مقطع لوله قائم، A = سطح مقطع نمونه خاک، L = طول نمونه خاک

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

آزمایش با پتانسیل (بار آبی) متغییر یا نزولی برای خاک های ریزدانه با ضریب نفوذپذیری کم مفید است.

مثال :

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 $1.44\times10^{-3}\,cm/s$ تعیین گردد، در این صورت پس از ۳۸۰ ثانیه اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه چقدر خواهد بود؟

$$K=\frac{aL}{At}Ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)=\frac{1\times10}{20\times380}Ln\frac{30}{h_2}=1.44\times10^{-3}\rightarrow h_2=10cm$$

۴-۵-۲ آزمایش های محلی

آزمایش های محلی یا صحرایی، نتایج قابل اطمینان تری از نفوذپذیری بدست می دهند زیرا منعکس کننده شرایط واقعی خاک محل می باشند.

(الف) آزمایش پمپاژ:

در آزمایش پمپاژ آب از داخل یک گمانه مرکزی به بیرون پمپاژ شده و سطح آب در چاه های شاهد اطراف، ثبت و کنترل می گردد (شکل ۴-۷). آب آنقدر از داخل گمانه به بیرون پمپاژ می شود تا شرایط جریان پایدار حاکم گردد. این مسأله ممکن است چندین روز به طول انجامد. اگر فرض شود که خاک همگن و همسانگرد بوده و گمانه یا چاه به طور کامل در داخل خاک اشباع نفوذ می نماید آنگاه نفوذپذیری خاک را با استفاده از رابطه زیر می توان محاسبه نمود:

$$q=\frac{\pi k(h_2^2-h_1^2)}{2.3\log_{10}(r_2/r_1)}$$

یا

$$k=\frac{2.3q\log_{10}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi(h_2^2-h_1^2)}$$

که در این معادله:

q = آهنگ جریان (یا آهنگ پمپاژ)

h_1, h_2 = ترازهای آب در چاه های مشاهده ۱ و ۲

r_1, r_2 = فواصل شعاعی چاه های مشاهده ۱ و ۲

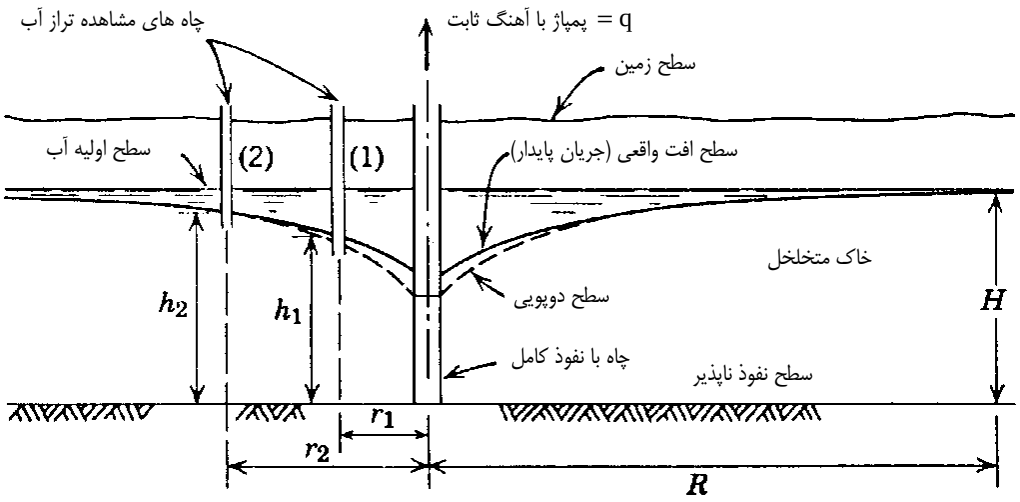
k = نفوذپذیری خاک

نکته :

هرچه گمانه ها از چاه اصلی دورتر شوند، سطح آب در آن ها بالاتر خواهد رفت. اگر گمانه را آنقدر از چاه اصلی دور کنیم تا سطح آب در آن برابر سطح آب زیرزمینی قبل از پمپاژ شود، آنگاه فاصله مرکز گمانه تا مرکز چاه اصلی، شعاع تاثیر چاه خواهد بود و با r_e نمایش داده می شود.

نکته :

ارتفاع سطح آب در چاه اصلی h_w به ازاء شعاع چاه r_w بدست می آید.



شکل ۴–۷ روش انجام آزمایش نفوذپذیری خاک به روش چاه پمپاژ

مثال :

با دبی $250 lit/min$ 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)

حل مسئله:

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

$$K=\frac{qLn(r_e/r_w)}{\pi(h_e^2-h_w^2)}\rightarrow\frac{q_1Ln(r_e/r_w)}{\pi(h_e^2-h_{w1}^2)}=\frac{q_2Ln(r_e/r_w)}{\pi(h_e^2-h_{w2}^2)}\rightarrow\frac{q_1}{q_2}=\frac{h_e^2-h_{w1}^2}{h_e^2-h_{w2}^2}$$

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

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

مثال :

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

$$r_1 = 6m, h_1 = 84m, r_2 = 15m, h_2 = 88.5m, h_e = 100m$$

$$K = \frac{qLn(r_2/r_1)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \rightarrow K = \frac{1.36 \times Ln(15/6)}{\pi \times (88.5^2 - 84^2)} \rightarrow K = 5.1 \times 10^{-4}\, m/min$$

$$K = \frac{qLn(r_2/r_w)}{\pi(h_2^2 - h_w^2)} \rightarrow 5.1 \times 10^{-4} = \frac{1.36Ln(15/0.3)}{\pi(88.5^2 - h_w^2)} \rightarrow h_w = 67.15m$$

$$\Delta h_w = h_e - h_w = 100 - 67.15 = 32.85m$$

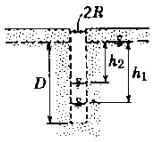
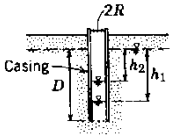
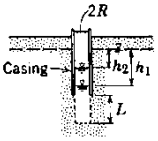
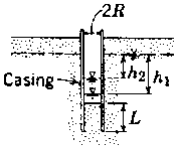
(ب) آزمایش هد افتان یا خیزان:

با مشاهده آهنگ کاهش یا افزایش تراز آب در داخل گمانه ای که می تواند دارای پوشش جدار کامل یا جزئی باشد آزمایش های ساده ای می توان در عمق های کم انجام داد. آزمایش با هد افتان می تواند به دلیل تجمع مواد سیلتی در کف گمانه یا دیگر عوامل همانند غیریکنواختی مصالح باعث ایجاد خطا در نتایج شود. سدرگرن (۱۹۶۷) تعدادی از روش های آزمایش با استفاده از هدهای متغییر را مورد بحث قرار داده است که بعضی از آن ها به همراه روابط مورد استفاده برای محاسبه نفوذپذیری در جدول ۴-۲ ارائه شده اند.

نکته :

به طور کلی، بهتر است که به جای انجام آزمایش های متعدد به روش هد متغییر چند آزمایش به روش پمپاژ انجام شود هرچند هزینه انجام این آزمایش ها بالاتر باشد.

جدول ۴-۲ بعضی از روش های محاسبه نفوذپذیری خاک ها در محل به روش هد افتان یا خیزان

	شرایط	نمودار	ضریب شکل	نفوذپذیری، k به روش هد متغییر	کاربرد
چاه مشاهده یا پیزومتر هد لایه همسانگرد اشباع با عمق نامحدود	گمانه بدون غلاف		$F = 16\pi DSR$	$k = \frac{R}{16DS} \times \frac{(h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}$ برای $\frac{D}{R} < 50$	ساده ترین روش محاسبه نفوذپذیری، در خاک های لایه ای قابل استفاده نیست. برای بدست آورد مقادیر S از طریق نمودارهای مربوطه بدست می آید
	گمانه غلاف دار		$F = \frac{11R}{2}$	$k = \frac{2\pi R}{11(t_2 - t_1)} \ln(\frac{h_1}{h2})$ برای $6in. \le D \le 60in.$	برای محاسبه نفوذپذیری در اعماق کم در زیر تراز آب زیر زمینی استفاده می شود. در صورت استفاده از روش هد افتان به علت سیلتی شدن کف گمانه ممکن است نتایج غیر قابل اطمینان بدست آید.
	گمانه غلاف دار به همراه غلاف متخلخل یا بدون غلاف در طول L		$F = \frac{2\pi L}{\ln(L/R)}$	$k = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln(\frac{L}{R}) \ln(\frac{h_1}{h_2})$ برای $\frac{L}{R} > 8$	برای محاسبه نفوذپذیری در اعماق زیاد در زیر سطح آب زیرزمینی استفاده می شود.
	گمانه غلاف دار به طوری که ستونی از خاک به طول L در داخل غلاف قرار گرفته		$F = \frac{11\pi R^2}{2\pi R + 11L}$	$k = \frac{2\pi R + 11L}{11(t_2 - t_1)} \ln\frac{h_1}{h_2}$	مهم ترین کاربرد این روش محاسبه نفوذپذیری قائم در خاک های ناهمسانگرد می باشد.

ملاحظات تعیین نفوذپذیری خاک در آزمایشگاه:

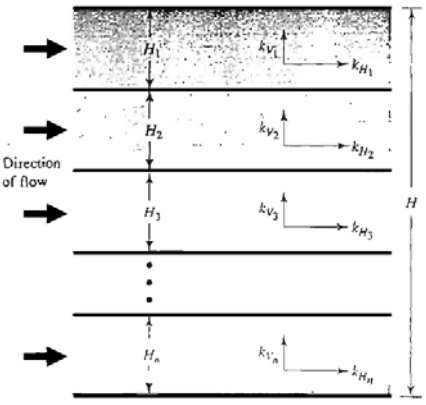
باید توجه داشت که تعیین قابلیت نفوذپذیری خاک در آزمایشگاه روشی غیر قابل اطمینان بوده و بعضی از علل آن به قرار زیر می باشد:

۱. در اکثر موارد ضریب قابلیت نفوذپذیری افقی خاک مورد نظر است ولی در آزمایشگاه ضریب نفوذپذیری عمودی حاصل می شود.
۲. در ماسه ضریب نفوذپذیری افقی و عمودی با هم اختلاف بسیار دارند و معمولاً به علت اینکه رسوبات ماسه ای به طرق مختلف ته نشین شده اند، ضریب قابلیت نفوذپذیری افقی ده ها و یا صدها برابر بیشتر از ضریب قابلیت نفوذپذیری عمودی است.
۳. برای خاک هایی با نفوذپذیری بین 1×10^{-3} تا $1\times10^{-2}\,cm/s$ می توان از نفوذسنج با هد ثابت و خاک های با نفوذپذیری بین 10^{-6} تا $10^{-2}\,cm/s$ می توان از روش هد افتان استفاده نمود. در رس ها، نفوذپذیری را می توان از طریق آزمایش ادئومتر نیز بدست آورد.
۴. زمانی که خاک های ریزدانه (رس و سیلت) مورد آزمایش قرار می گیرند، زمان یافتن ضریب نفوذپذیری طولانی است و در نتیجه نشست خاک و یا تبخیر آب در نتیجه آزمایش تاثیر بسیار دارد.
۵. در آزمایشگاه معمولاً برای کم کردن زمان آزمایش از شیب های هیدرولیکی زیاد استفاده می شود (معمولاً ۵ و یا بیشتر) ولی در طبیعت شیب هیدرولیکی معمولاً کم بوده و حدود آن بین ۰/۱ تا ۲ است.
۶. برای آزمایش خاک های رس احتیاج به شیب های هیدرولیکی زیاد است که آب در نمونه جریان یابد. در نتیجه مقدار ضریب نفوذپذیری بدست آمده قابل اطمینان نیست. در خاک های ماسه ای اگر شیب هیدرولیکی زیادتر از حد باشد باعث جوشش در ماسه شده و نسبت تخلخل را تغییر داده و ضریب نفوذیری غیر قابل اطمینانی حاصل می شود.
۷. رس ها و سیلت ها ممکن است دارای لنز ماسه ای بوده و نسبت به نفوذپذیری ناهمسانگرد باشند بنابراین مقادیر بدست آمده در آزمایشگاه می تواند تفاوت چشمگیری نسبت به مقادیر محلی داشته باشند.

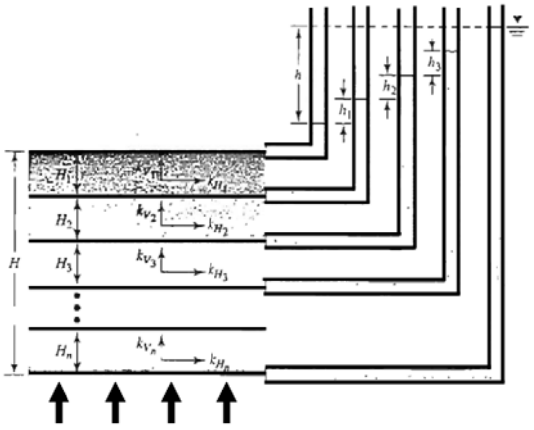
بنابراین آزمایشات صحرایی برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک بهتر است و نتایج بدست آمده قابل اطمینان تر می باشد زیرا منعکس کننده شرایط واقعی خاک محل می باشند ولی عیب آن ها طولانی تر بودن زمان آزمایش و زیاد بودن هزینه های اجرای آزمایش می باشد.

۴-۶ | نفوذپذیری معادل در خاک های لایه بندی شده

برحسب طبیعت رسوبات (نهشته های) خاک، ضریب نفوذپذیری یک لایه، ممکن است با جهت جریان تغییر یابد. در یک خاک لایه بندی شده، که در آن ضریب نفوذپذیری برای جریان در یک امتداد مشخص، برای لایه های مختلف متفاوت است، تعیین یک ضریب نفوذپذیری معادل برای جریان در امتداد قائم و افقی از میان یک خاک لایه بندی با لایه های افقی مورد توجه قرار می گیرد.



شکل ۴-۹ تعیین ضریب نفوذپذیری معادل جریان افقی در خاک های لایه بندی شده



شکل ۴-۱۰ تعیین ضریب نفوذپذیری معادل جریان قائم در خاک لایه بندی شده

شکل ۴-۹ یک خاک n لایه با جریان در امتداد افق را نشان می دهد به این نوع جریان، جریان موازی گفته می شود.. مقطعی با طول واحد که از n لایه عبور داده شده و عمود بر امتداد جریان است، در نظر گرفته می شود. نفوذپذیری معادل را در چنین حالتی با استفاده از رابطه زیر می توان بدست آورد:

$$k_{H(eq)} = \frac{1}{H}(k_{H1}H_1 + k_{H2}H_2 + k_{H3}H_3 + \cdots\cdots\cdots + k_{Hn}H_n) = \frac{\Sigma k_{Hi}H_i}{\Sigma H_i} \qquad (۱۷\text{-}۴)$$

نکته مهم :

در جریان موازی داریم:

۱. $q = q_1 + q_2 + \ldots\ldots\ldots + q_n$

۲. $i = i_1 = i_2 = \ldots\ldots\ldots = i_n$

شکل ۴-۱۰، یک خاک n لایه ای را با جریان در امتداد قائم نشان می دهد به این نوع جریان، جریان سری گفته میشود. نفوذپذیری معادل را در چنین حالتی با استفاده از رابطه زیر می توان بدست آورد:

$$k_{V(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_{V1}}\right) + \left(\frac{H_2}{k_{V2}}\right) + \left(\frac{H_3}{k_{V3}}\right) + \cdots\cdots + \left(\frac{H_n}{k_{Vn}}\right)} = \frac{\Sigma H_i}{\Sigma \frac{H_i}{K_{Vi}}} \qquad (۱۸\text{-}۴)$$

نکته مهم :

در جریان سری داریم:

۱. $q = q_1 = q_2 = \ldots\ldots\ldots = q_n$

۲. $h = h_1 + h_2 + \ldots\ldots\ldots + h_n$

مثال :

نتایج یک آزمایش نفوذپذیری با پتانسیل ثابت برای یک نمونه ماسه ریز با قطر ۱۵۰ میلیمتر و طول ۳۰۰ میلیمتر به صورت زیر می باشد: اختلاف بار = ۵۰۰ میلیمتر ، زمان جمع آوری آب = ۵ دقیقه ، حجم آب جمع آوری شده = ۳۵۰ سی سی

مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک.

حل: برای آزمایش با پتانسیل ثابت داریم:

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

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

بنابراین:

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

مثال :

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 پیزومتر $= 50mm^2$

اختلاف بار در زمان $t = 0$ $= 400mm$

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

حل مسئله:

با استفاده از رابطه ۴-۲۰ داریم:

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

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

با قرار دادن مقادیر فوق داریم:

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

مثال :

مطابق شکل ۴-۱۱-الف یک لایه خاک نفوذپذیر در روی لایه نفوذناپذیر قرار دارد. با فرض $k = 0.000158m/\sec$ ، 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.

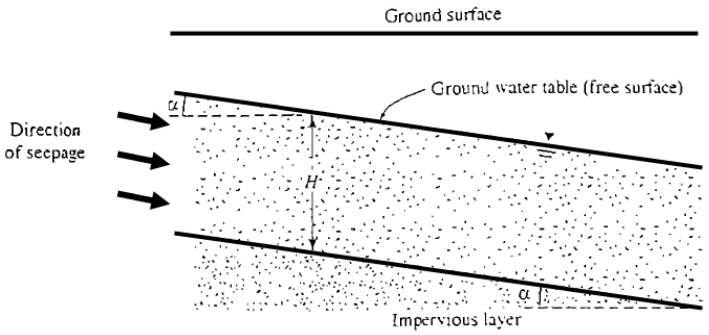
حل مسئله:

با استفاده از شکل ۴-۱۱-ب داریم:

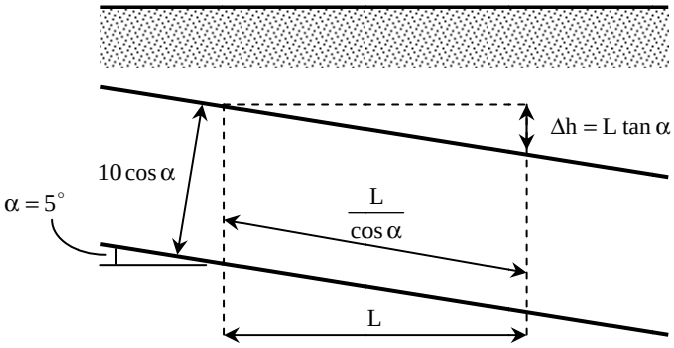
$$i = \frac{\text{افت بار}}{\text{طول}} = \frac{L\tan\alpha}{\left(\frac{L}{\cos\alpha}\right)} = \sin\alpha$$

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

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



(الف)



(ب)

شکل ۴–۱۱

مثال :

یک نمونه خاک برای آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت دارای ارتفاع 25cm و قطر 12.5cm است. در حین آزمایش برای اختلاف بار 75cm، آب جمع آوری شده در ۳ دقیقه مساوی $650cm^3$ اندازه گیری شده است. مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری خاک.

$$k = \frac{QL}{Aht}, A = \pi \cdot \frac{12.5^2}{4} = 122.718cm^2, t = 3 \times 60 = 180\sec$$

$$k = \frac{650 \times 25}{122.718 \times 75 \times 180} = 9.81 \times 10^{-3} cm/\sec$$

مثال :

یک نمونه خاک برای آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت دارای ارتفاع 35cm و مساحت 125cm می باشد. در حین آزمایش برای اختلاف بار 42cm، آب جمع آوری شده در ۳ دقیقه مساوی $580cm^3$ اندازه گیری شده است. اگر نسبت تخلخل خاک 0.61 باشد سرعت واقعی جریان آب عبوری از داخل خاک چقدر است؟

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

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

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

مثال :

در یک آزمایش نفوذپذیری با پتانسیل ثابت برای یک نمونه ماسه ریز، مساحت نمونه $105cm^2$ و نفوذپذیری آن $k = 0.0084 meter/min$ می باشد، در صورتی که طول نمونه $25cm$ و آب جمع آوری شده در زمان ۱ دقیقه برابر $120cm^3$ باشد، اختلاف بار آبی ابتدا و انتهای نمونه و سرعت ظاهری جریان چقدر خواهد بود؟

$$k = \frac{QL}{Aht} = 0.014 = \frac{120\times 25}{105(h)60} \rightarrow h = 34cm$$

$$v = ki = (0.014)\left(\frac{34}{25}\right) = 0.019cm/sec$$

مثال :

شکل ۴-۱۲ یک خاک لایه بندی شده را درون یک لوله آزمایش با مقطع $100\times100mm$ 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 باشند:

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

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

حل مسئله:

با استفاده از رابطه ۴-۴۲ داریم:

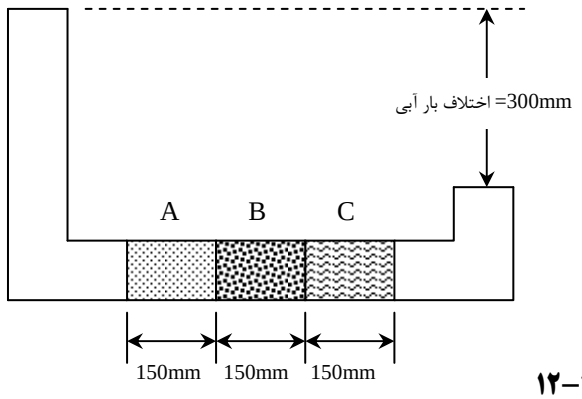
$$k_{eq} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1}+\frac{H_2}{k_2}+\frac{H_3}{k_3}} = \frac{450mm}{\frac{150}{10^{-1}}+\frac{150}{3\times10^{-2}}+\frac{150}{4.9\times10^{-3}}} = 0.01212mm/sec = 0.001212cm/sec$$

$$q = k_{eq}iA = (0.01212cm/sec)\left(\frac{300mm}{450mm}\right)\times100^2 = 80.8mm^3/sec = 0.0808cm^3/sec = 290.58cm^3/hr$$

$$80.8 = 10^{-1}\times\frac{\Delta h_1}{150}\times100^2 \rightarrow \Delta h_1 = 12.12mm$$

$$80.8 = 3\times10^{-2}\times\frac{\Delta h_2}{150}\times100^2 \rightarrow \Delta h_2 = 40.4mm$$

$$80.8 = 4.9\times10^{-3}\times\frac{\Delta h_3}{150}\times100^2 \rightarrow \Delta h_3 = 247mm$$



شکل ۴-۱۲

راه حل دوم:

$$q_1 = q_2 = q_3 \rightarrow k_1 \cdot i_1 \cdot A_1 = k_2 \cdot i_2 \cdot A_2 = k_3 \cdot i_3 \cdot A_3$$

$$A_1 = A_2 = A_3 \rightarrow k_1 \cdot i_1 = k_2 \cdot i_2 = k_3 \cdot i_3 \rightarrow k_1 \frac{\Delta h_1}{L_1} = k_2 \frac{\Delta h_2}{L_2} = k_3 \frac{\Delta h_3}{L_3}$$

$$L_1 = L_2 = L_3 \rightarrow k_1 \Delta h_1 = k_2 \Delta h_2 = k_3 \Delta h_3$$

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 = 300\text{mm} \rightarrow \Delta h_1 + \frac{k_1}{k_2}\Delta h_1 + \frac{k_1}{k_3}\Delta h_1 = 300$$

$$\rightarrow \Delta h_1 = \frac{300}{1 + \frac{k_1}{k_2} + \frac{k_1}{k_3}} = \frac{300}{1 + \frac{10^{-1}}{3\times10^{-2}} + \frac{10^{-1}}{4.9\times10^{-3}}} = 12.125\text{mm}$$

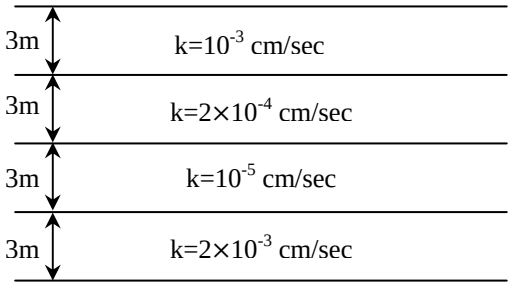
$$\Delta h_2 = \frac{k_1}{k_2}\Delta h_1 = \frac{10^{-2}}{3\times10^{-3}} \times 12.125 = 40.42$$

$$\Delta h_3 = 300 - 12.125 - 40.42 = 247.49\text{mm}$$

$$q = k_1 \cdot i_1 \cdot A = 10^{-1} \times \frac{12.125}{150} \times 100^2 = 80.8\,\text{mm}^3/\text{sec}$$

مثال :

در شکل یک خاک لایه لایه نشان داده شده است. برای جریان در امتداد قائم، مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری معادل بر حسب سانتیمتر بر ثانیه.



$$k_{eq} = \frac{\Sigma H_i}{\Sigma \frac{H_i}{k_i}} = \frac{4\times3\times100}{300\left(\frac{1}{2\times10^{-3}} + \frac{1}{10^{-5}} + \frac{1}{2\times10^{-4}} + \frac{1}{10^{-3}}\right)} = 3.755\times10^{-5}\,\text{cm/sec}$$

مثال :

با مراجعه به شکل مسئله قبل، مطلوب است تعیین ضریب نفوذپذیری معادل برای جریان در امتداد افق بر حسب سانتی متر بر ثانیه. همچنین مطلوب است محاسبه $k_{V(eq)} / k_{H(eq)}$.

$$k_{eq} = \frac{\Sigma H_i k_i}{\Sigma H_i} = \frac{3(2\times10^{-3} + 10^{-5} + 2\times10^{-4} + 10^{-3})}{3\times4} = 8.025\times10^{-4}\,\text{cm/sec}$$

$$\rightarrow \frac{k_{V(eq)}}{k_{H(eq)}} = \frac{3.755\times10^{-5}}{8.025\times10^{-4}} = 0.0468$$

۴-۷ رابطه پیوستگی و شبکه جریان

در قسمت های قبلی، حالت های ساده ای از جریان مورد توجه قرار گرفت که برای محاسبه دبی جریان در آن ها، کاربرد مستقیم قانون دارسی کفایت می کرد اما در خیلی از حالات، جریان آب در خاک نه تنها در یک امتداد نیست، بلکه در تمام سطح عمود بر جریان نیز یکنواخت نمی باشد. بنابراین در چنین شرایطی از رویکردی متفاوت برای محاسبه دبی و فشار جریان استفاده می نماییم.

با فرض غیرقابل تراکم بودن آب و عدم تغییر حجم در توده خاک و با مساوی قرار دادن دبی جریان ورودی و دبی جریان خروجی در شکل ۴-۱۳، معادله پیوستگی جریان به صورت زیر به دست می آید:

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

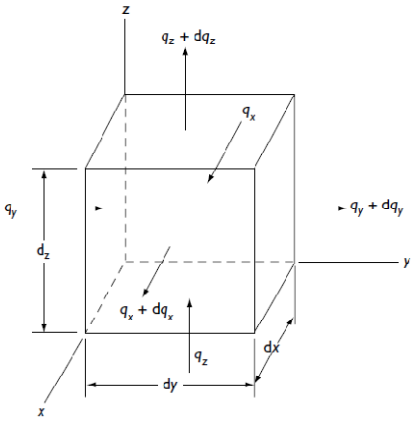
با استفاده از قانون دارسی، سرعت جریان را می توان به صورت زیر نوشت:

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

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

که در روابط فوق k_x و k_z به ترتیب ضرایب نفوذپذیری در امتدادهای افقی و قائم می باشند. با ترکیب روابط فوق می توان نوشت:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0 \qquad (۱۹-۴)$$



شکل ۴-۱۳

اگر خاک از نقطه نظر نفوذپذیری ایزوتروپیک (همسانگرد) باشد (یعنی $k_x = k_z$)، رابطه پیوستگی برای جریان های دوبعدی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0 \qquad (۲۰-۴)$$

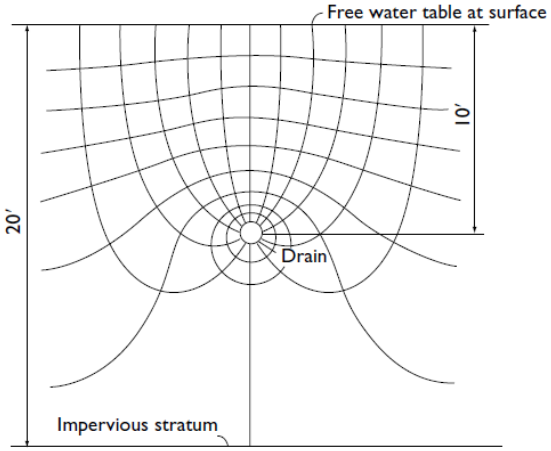
مهم !

رابطه فوق که رابطه پیوستگی برای یک محیط ایزوتروپیک است، نشان دهنده دو دسته منحنی متعامد می باشد که نام یکی **خطوط جریان** و نام دیگری **خطوط هم پتانسیل** است. **خطر 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 یک انرژی پتانسیل می باشد**. 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.

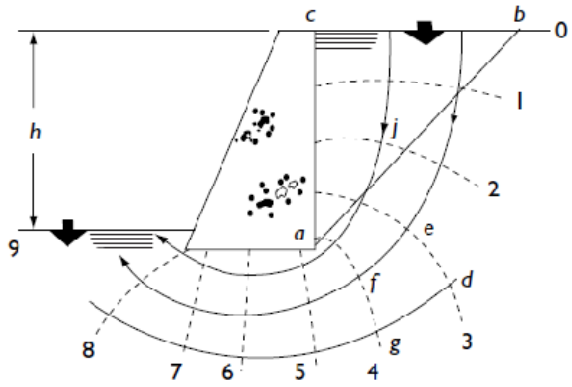
ترکیبی از تعداد خطوط جریان و تعدادی خطوط هم پتانسیل، شبکه جریان نامیده می شوند. در ترسیم شبکه جریان دو قاعده زیر را باید مراعات نمود:

۱. خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل بر هم عمودند.
۲. هر یک از چشمه های شبکه جریان تقریباً باید مربع باشند.

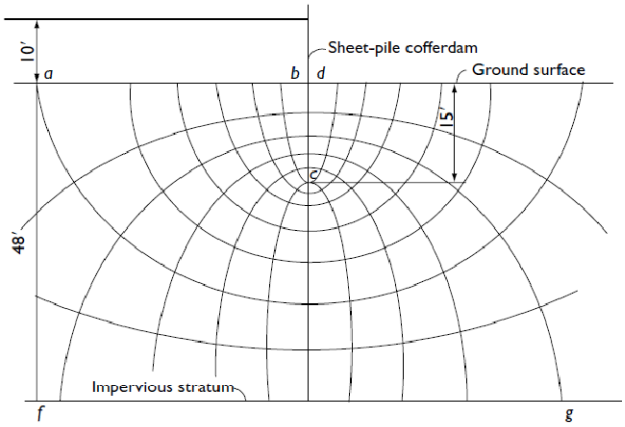
مثال هایی از شبکه جریان در شکل های زیر نشان داده شده اند.



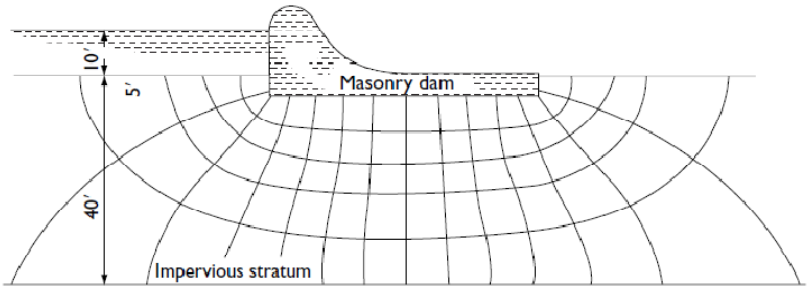
شکل ۴–۱۴ شبکه جریان در اطراف لوله زهکش



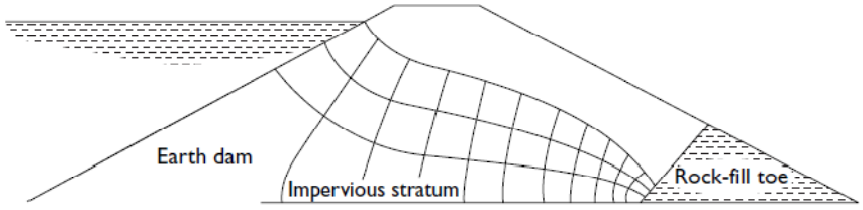
شکل ۴–۱۵ شبکه جریان پشت دیوار حائل



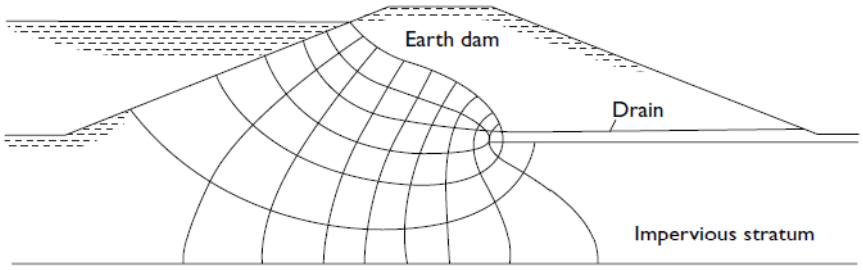
شکل ۴–۱۶ شبکه جریان اطراف سپری



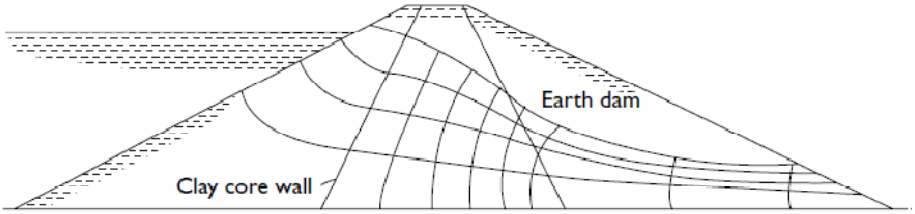
شکل ۴–۱۷ شبکه جریان زیر آب بند بتنی



شکل ۴–۱۸ شبکه جریان داخل سد خاکی با بستر نفوذناپذیر



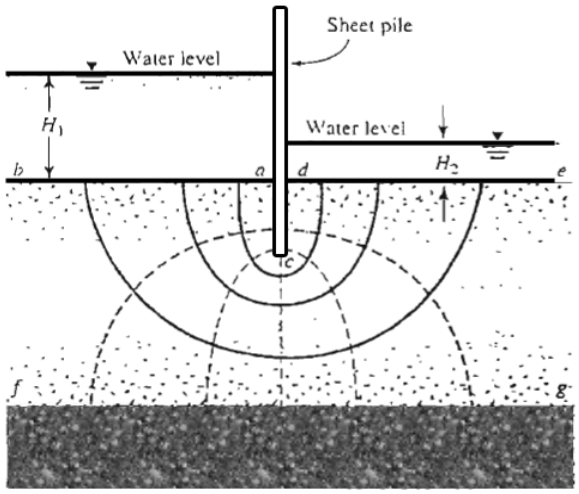
شکل ۴–۱۹ شبکه جریان در داخل سد و فونداسیون سد خاکی



شکل ۴–۲۰ شبکه جریان داخل سد ناحیه بندی شده با هسته رسی

برای شبکه جریان نشان داده شده در شکل ۴-۲۱ شرایط مرزی زیر اعمال شده است:

۱. سطح لایه نفوذپذیر در بالادست و پایین دست (خطوط ab و de)، خطوط هم پتانسیل هستند.
۲. چون ab و de خطوط هم پتانسیل هستند، تمام خطوط جریان این دو خط را با زاویه قائمه قطع می کنند.
۳. مرزهای لایه نفوذناپذیر یعنی خط fg یک خط جریان است و به همین ترتیب سطوح پرده نفوذناپذیر (سطح سپر) یعنی خط acd، نیز یک خط جریان است.
۴. خطوط هم پتانسیل، خطوط جریان acd و fg را به زاویه قائمه قطع می کنند.



شکل ۴–۲۱

- با توجه به شکل فوق می توان گفت:

۱. در شکل فوق تعداد خطوط جریان برابر ۵ می باشد بنابراین ۴ مجرای جریان خواهیم داشت یعنی $N_f = 4$
۲. تعداد خطوط پتانسیل برابر ۷ می باشد بنابراین ۶ افت پتانسیل خواهیم داشت، یعنی $N_d = 4$

۸-۴ | محاسبه تراوش به وسیله شبکه جریان (تعیین دبی زهاب)

در هر شبکه جریان، نوار بین دو خط جریان، مجرای جریان یا کانال جریان نامیده می شود. شکل ۴-۲۲ یک مجرای جریان همراه با خطوط هم پتانسیل را که تشکیل چشمه های مربع می دهد را نشان می دهد. دبی نشست از میان مجرای جریان برای عرض واحد (عمود بر مقطع قائم بر لایه نفوذپذیر) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta q = k\frac{H}{N_d} \qquad (۲۱-۴)$$

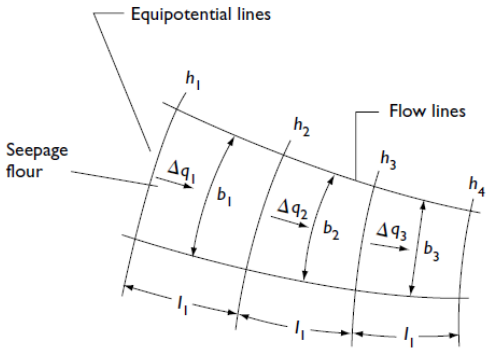
که در آن:

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

N_d = تعداد افت های پتانسیل

اگر تعداد مجاری جریان در یک شبکه جریان مساوی N_f باشد، دبی کل جریان از تمام مجاری جریان برای عرض واحد برابر خواهد شد با:

$$\Delta q = k\frac{HN_f}{N_d} \qquad (۲۲-۴)$$



شکل ۴-۲۲

نکته :

اگر لایه نفوذپذیر که آب در آن جریان می یابد، غیرهمسانگرد باشد، در این صورت ضریب نفوذپذیری در دو امتداد عمود بر هم x و z یکسان نخواهد بود. در این حالت دبی گذرنده از تمام مجاری جریان برای عرض واحد به صورت زیر بدست می آید:

$$q = \sqrt{k_x \cdot k_z} \times \left(\frac{HN_f}{N_d}\right)$$

که در این رابطه N_f و N_d بر اساس شبکه جریان مربعی خاک همسانگرد تعیین می شوند.

مثال :

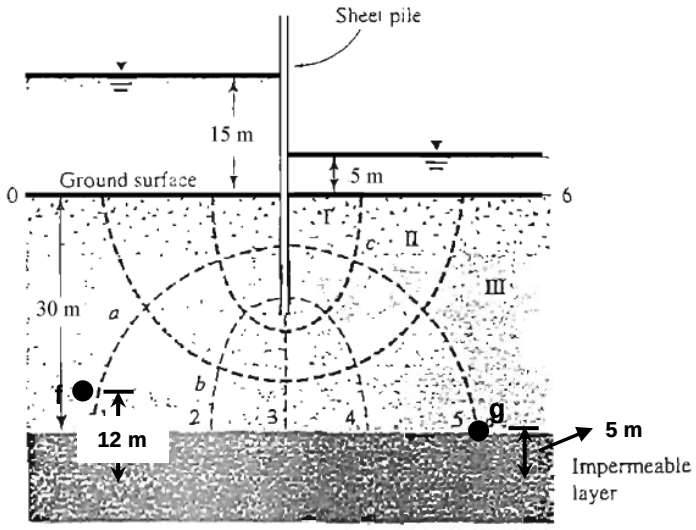
در شکل زیر شبکه جریان در اطراف یک ردیف سپرکوبی در یک لایه نفوذپذیر نشان داده شده است. با توجه به اینکه $k_x = k_z = k = 5\times10^{-3}$، مطلوب است تعیین:

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

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

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

(ت) فشار منفذی در نقاط f و g



حل مسئله:

(الف)

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:

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

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

$b = (15 - 2\times1.667) = 11.67\,\text{m}$ بالای سطح زمین

$c = (15 - 5\times1.667) = 6.67\,\text{m}$ بالای سطح زمین

$d = (15 - 5\times1.667) = 6.67\,\text{m}$ بالای سطح زمین

(ب)

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

$$k = 5\times10^{-3}\,\text{cm/sec} = 5\times10^{-5}\,\text{m/sec}$$

$$\Delta q = 5\times10^{-5}\times1.667 = 8.34\times10^{-5}\,\text{m}^3/\text{sec/m}$$

(پ)

$$q = k\frac{HN_f}{N_d} = (5\times10^{-5})\times1.667\times3 = 25\times10^{-5}\,\text{m}^3/\text{sec/m}$$

(ت) مبنا لایه نفوذناپذیر

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z = 15 + 30 = 45\text{m}$$

$$h - h_f = 1.67 \rightarrow h_2 = 45 - 16.7 = 43.33\text{m}$$

$$h_f = \frac{p_f}{\gamma_w} + z \rightarrow 43.33 = \frac{p_f}{\gamma_w} + 12 \rightarrow \frac{p_f}{\gamma_w} = 31.33\text{m} \rightarrow p_f = u_f = 31.33\times\gamma_w = 313.3\text{kN/m}^2$$

$$p_g = u_g = (6.67 + 25)\times\gamma_w = 31.67\times10 = 316.67\text{kN/m}^2$$

نکته :

فشار آب حفره ای و فشار بالابرنده در زیر سازه هیدرولیکی هر دو به یک مفهوم هستند و منظور فشار آب p در نقطه ای مانند A است که در مکانیک خاک آن را با u_A نشان می دهند و از رابطه زیر بدست می آید:

$$U_A = (h_A - z_A) \times \gamma_w$$

که در آن:

γ_w = وزن مخصوص آب

h_A = بار آبی در نقطه مورد نظر که همان فاصله سطح تراز آب در آن نقطه تا سطح مبنا می باشد.

z_A = فاصله نقطه مورد نظر تا سطح مبنا

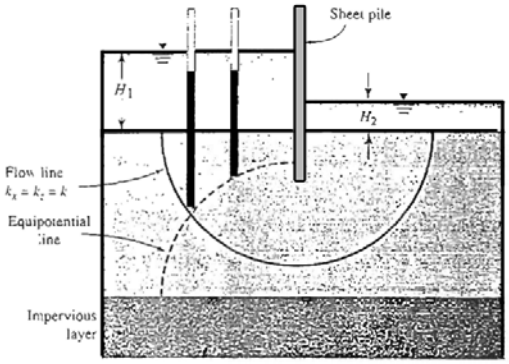
نکته مهم :

Δh یا اختلاف هد برابر اختلاف تراز آب داخل پیزومتر ها نسبت به یکدیگر است در حالی که اختلاف صعود آب در پیزومترها با استفاده از رابطه $\frac{p}{\gamma_w}$ یا همان $\frac{u}{\gamma_w}$ بدست می آید.

$$\Delta h = \left[\frac{u}{\gamma_w} + z\right]_A - \left[\frac{u}{\gamma_w} + z\right]_B$$

$$S = \frac{u_A}{\gamma_w} - \frac{u_B}{\gamma_w}$$

به طور مثال در شکل ۴-۲۳ اختلاف هد Δh برابر صفر بوده ولی دو پیزومتر دارای اختلاف صعود آب یا همان فشار منفذی متفاوت می باشند.

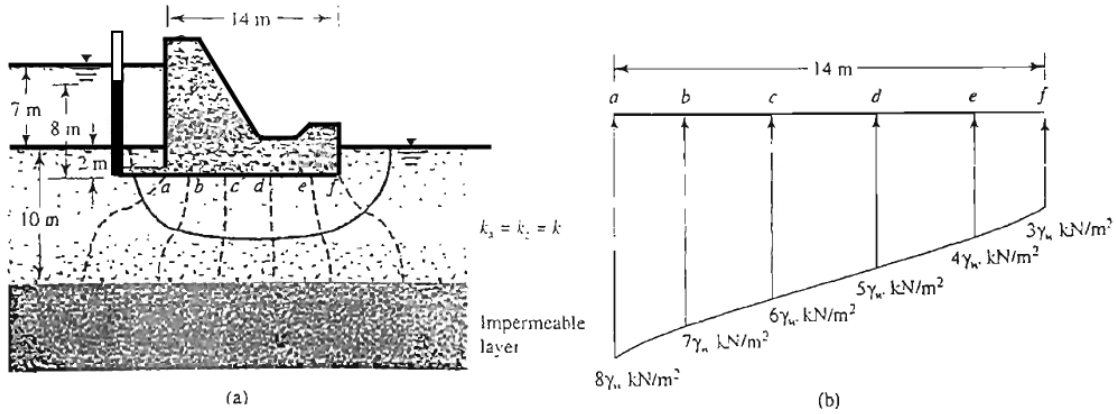


شکل ۴-۲۳

۴-۹ | فشار بر کنش در زیر سازه های هیدرولیکی

از شبکه جریان می توان برای تعیین فشار برکنش در زیر سازه های هیدرولیکی استفاده کرد. این مفهوم را می توان با استفاده از یک مثال ساده نشان داد.

شکل ۴-۲۴ مقطع عرضی سرریز یک بند انحرافی را نشان می دهد که پایه آن در ۲ متری زیر سطح زمین قرار دارد. با فرض $k_x = k_z = k$، شبکه جریان در زیر این سرریز رسم شده است. حال با استفاده از خطوط هم پتانسیل می توان نمودار توزیع فشار در زیر پایه این بند را به صورت زیر بدست آورد:



شکل ۴-۲۴ فشار برکنش در زیر یک سازه هیدرولیکی

۷ افت پتانسیل در شبکه جریان وجود دارد و اختلاف سطح آب در بالادست و پایین دست برابر ۷ متر است. در نتیجه هر افت پتانسیل $H/7 = 7/7 = 1\text{m}$ متر می باشد. فشار برکنش برابر است با:

(گوشه چپ پایین) نقطه a = فشار منفذی در نقطه a ضرب در وزن مخصوص آب $= [(7+2)-1]\times\gamma_w = 8\gamma_w$

به طور مشابه در نقطه b داریم:

$$b = [7+2-2\times1]\times\gamma_w = 7\gamma_w$$

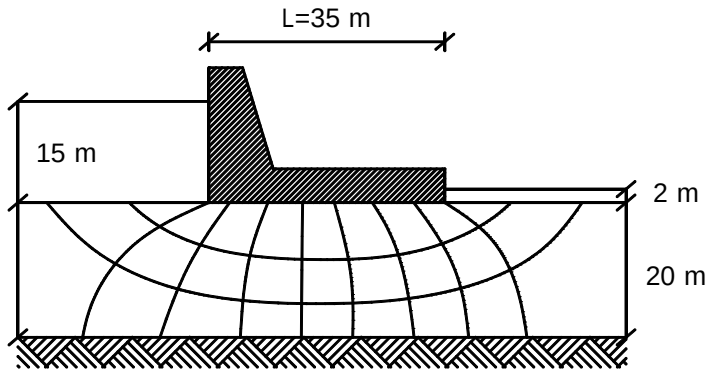
در شکل فوق نمودار تغییرات فشار برکنش رسم شده است. با محاسبه مساحت زیر نمودار فشار، نیروی برکنش بدست می آید که به آن نیروی نشت گفته می شود.

مثال امتحانی :

در شبکه جریان نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است: $k = 10^{-5}\,\text{cm/s}$

(الف) مقدار آب عبوری از زیر سد در طی ۴ روز (۱/۵ نمره)

(ب) محاسبه نیروی برکنش ناشی از تراوش آب از زیر سد (۱/۵ نمره)



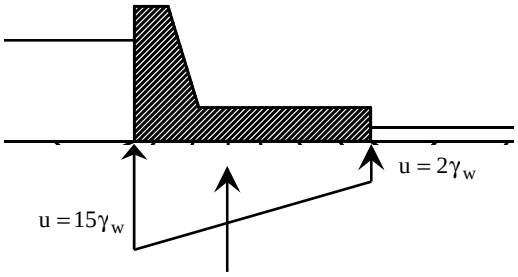
حل (الف)

$$k = 10^{-5}\,\text{cm/s} = 10^{-5}\times10^{-2}\,\text{m/s} = 10^{-7}\,\text{m/s}$$

$$q = kH\frac{N_f}{N_d} = 10^{-7}\times13\times\frac{3}{9}\times1\text{m} = 4.33\times10^{-7}\,\text{m}^3/\text{s}$$

$$Q = q\times t = 4.33\times10^{-7}\times4\times24\times60\times60 = 0.14976\,\text{m}^3$$

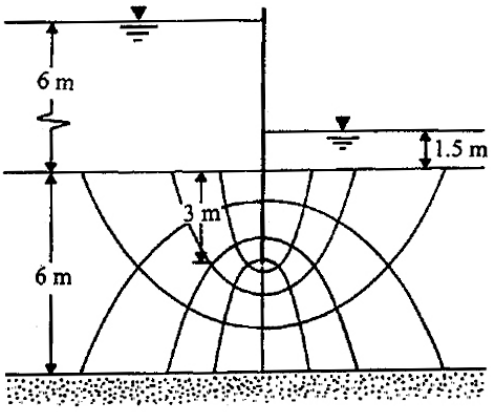
حل (ب)



$$F = P \times A = \left(\frac{15\gamma_w + 2\gamma_w}{2}\right) \times 35 \times 1 = 2975\ \text{kN}$$

مثال :

شبکه جریان در اطراف یک ردیف سپرکوبی در یک لایه نفوذناپذیر در شکل زیر نشان داده شده است. داریم:
$k_x = k_y = 4\times10^{-4}\,\text{cm/sec}$. کلی دبی نشت از میان لایه نفوذپذیر برای عرض واحد را محاسبه نمایید.



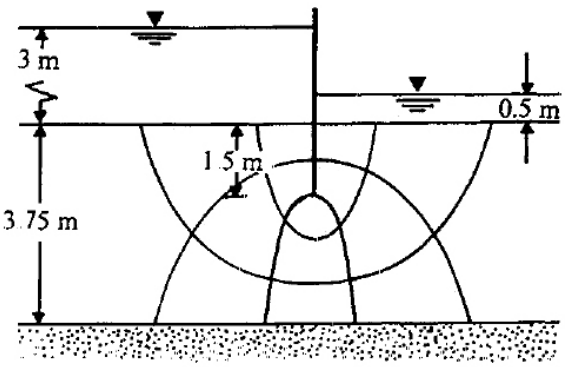
$k = 4\times10^{-4}\,\text{cm/sec}$
$H = H_1 - H_2 = 6 - 1.5 = 4.5\text{m}$
$N_f = 4$
$N_d = 8$

بنابراین:

$$q = kH\left(\frac{N_f}{N_d}\right) = \left(\frac{4\times10^{-4}}{10^2}\right)\left(\frac{4.5\times4}{8}\right)$$
$$= 9\times10^{-6}\,\text{m}^3/\text{m/sec}$$
$$= 77.76\times10^{-2}\,\text{m}^3/\text{m/day}$$

مثال :

شبکه جریان در اطراف یک ردیف سپرکوبی در یک لایه نفوذناپذیر در شکل زیر نشان داده شده است. داریم:
$k = 4\times10^{-4}\,\text{cm/sec}$. کلی دبی نشت از میان لایه نفوذپذیر برای عرض واحد را محاسبه نمایید.



$k = 4\times10^{-4}\,\text{cm/sec}$
$H = H_1 - H_2 = 3 - 0.5 = 2.5\text{m}$
$N_f = 3$
$N_d = 5$

بنابراین:

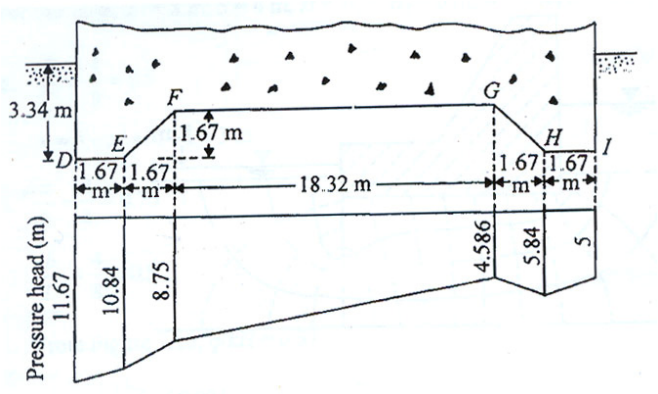
$$q = kH\left(\frac{N_f}{N_d}\right) = \left(\frac{4\times10^{-4}}{10^2}\right)\left(\frac{2.5\times3}{5}\right)$$
$$= 6\times10^{-6}\,\text{m}^3/\text{m/sec}$$
$$= 0.518\text{m}^3/\text{m/day}$$

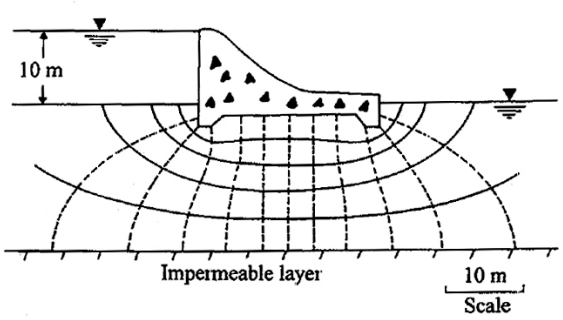
مثال :

برای شبکه جریان زیر سد بتنی نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است: $(k = 2\times10^{-3}\,cm/sec)$

(الف) دبی عبوری از میان لایه نفوذپذیر زیر سد برای واحد عرض سد.

(ب) نیروی برکنش وارد بر زیر سد. مختصات هندسه زیر سد در شکل نشان داده شده است.





(الف)

$$q = kH\left(\frac{N_f}{N_d}\right) = \left(\frac{0.002}{10^2}\times60\times60\times24 m/day\right)\times10\left(\frac{5}{12}\right) = 7.2 m^3/day/m$$

(ب)

با توجه به شکل، برای شبکه جریان فوق ۱۲ افت پتانسیل ترسیم شده است همچنین $H = 10m$. بنابراین افت هد در هر خط افت برابر خواهد بود با $(10/12)m$. بدین ترتیب داریم:

- **هد فشار در D:** $D = (10+3.4) - 2(10/12) = 11.67m$
- **هد فشار در E:** $E = (10+3.4) - 3(10/12) = 10.84m$
- **هد فشار در F:** $F = (10+1.67) - 3.5(10/12) = 8.75m$
- **هد فشار در G:** $G = (10+1.67) - 8.5(10/12) = 4.586m$
- **هد فشار در H:** $H = (10+3.34) - 9(10/12) = 5.84m$
- **هد فشار در I:** $H = (10+3.34) - 10(10/12) = 5m$

توزیع بار آبی محاسبه شده در فوق در شکل زیر نشان داده شده است. اکنون فشار برکنش هیدرولیکی در واحد طول سد را به صورت زیر می توان محاسبه نمود:

نیرو در واحد طول سد $= \gamma_w \times$ مساحت دیاگرام توزیع بار آبی $\times 1$

$$= 9.81\left[\left(\frac{11.67+10.84}{2}\right)1.67 + \left(\frac{10.84+8.57}{2}\right)1.67 + \left(\frac{8.57+4.586}{2}\right)18.32 + \left(\frac{4.586+5.84}{2}\right)1.67 + \left(\frac{5.84+5}{2}\right)1.67\right]$$

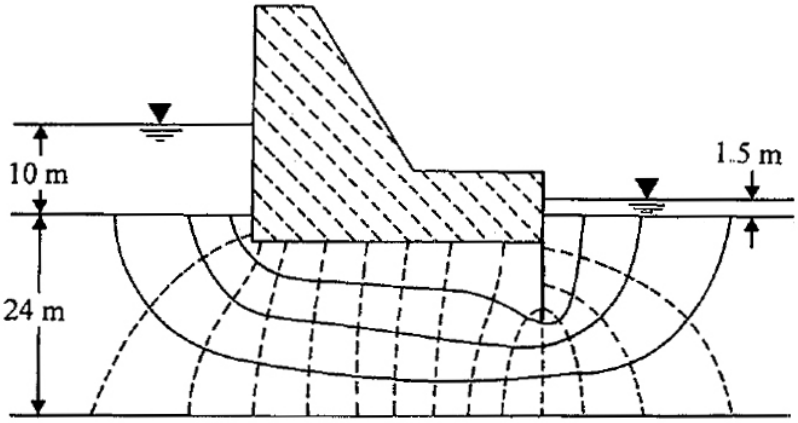
$$= 9.81[18.8+16.36+122.16+8.71+9.05 = 1717.5 kN/m]$$

مثال :

برای شبکه جریان زیر سد بتنی نشان داده شده در شکل زیر مطلوب است: $(k = 10^{-3}\,cm/sec)$

(الف) دبی عبوری از میان لایه نفوذپذیر زیر سد برای واحد عرض سد.

(ب) نیروی برکنش وارد بر زیر سد. عمق استقرار سد در داخل خاک نفوذپذیر برابر ۳ متر است.



$N_f = 4, N_d = 14$

(الف)

$$q = kH\left(\frac{N_f}{N_d}\right) = \left(\frac{10^{-3}}{10^2}\right)(10-1.5)\left(\frac{4}{14}\right) = 10^{-5}\times 8.5\left(\frac{4}{14}\right) = 2.429\times 10^{-5}\,m^3/m/sec \approx 2.1 m^3/m/day$$

(ب)

$$\Delta h = \frac{H_1 - H_2}{N_d} = \frac{10-1.5}{14} = 0.607 m/\text{به ازای هر خط افت}$$

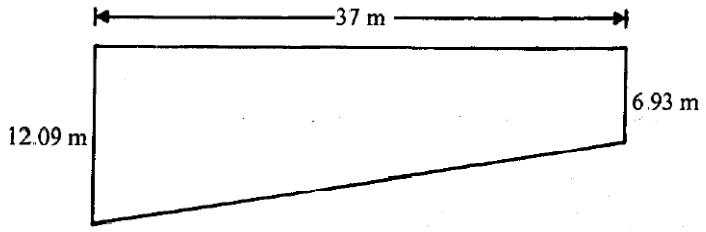
بنابراین در در گوشه پایین سمت چپ سد فشار بلند کننده برابر است با:

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

در گوشه پایین سمت راست فشار بلند کننده برابر است با:

$$(10+3) - 10\Delta h = 13 - 0.607\times 10 = 6.93 m$$

بنابراین نیروی بلند کننده برابر است با:



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

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