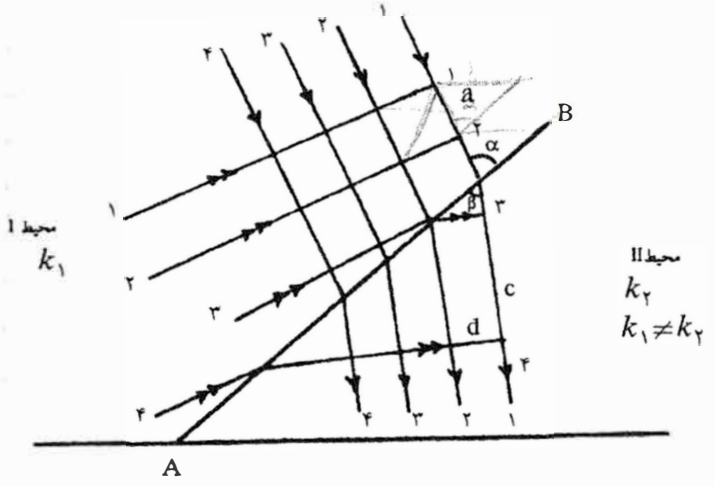
جریان در سدهای خاکی (محیط متخلخل غیر همگن و همروند)

هدف کلی این فصل بررسی قوانین حاکم بر جریان آب از یک محیط متخلخل همگن همروند با نفوذپذیری k_1 به محیط متخلخل همگن وهمروند دوم با نفوذپذیری k_2 می‌باشد که در آن $k_2 \neq k_1$ است. باید توجه داشت که در چنین حالتی در محل اتصال دو لایه، شرایط ویژه‌ای حاکم است و مسیر خطوط جریان و هم‌پتانسیل، به ناگاه تغییر جهت می‌دهند که هدف این بحث بررسی قوانین مربوطه و رسم شبکهٔ جریان در این شرایط است. بررسی حرکت آب در محیط‌های متخلخل ناهمروند در فصل آینده صورت خواهد گرفت.

قوانین انکسار خطوط جریان و هم پتانسیل

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، خطوط جریان به محض ورود از یک محیط متخلخل به محیط متخلخل بعدی که نفوذپذیری آن متفاوت است، تغییر جهت می‌دهند و در حقیقت انکسار می‌یابند. این مسئله عیناً شبیه به مسیر حرکت نور در دو محیط شفاف متفاوت مثل آب و هوا یا هوا و شیشه است که در محل فصل مشترک دو محیط، نور می‌شکند و به هنگام انکسار تابع قوانین خاصی است (این مسئله در مورد خطوط هم‌پتانسیل نیز به‌ناچار صدق خواهد کرد).

هم‌پتانسیل نیز به‌ناچار صدق خواهد کرد). برای بررسی قوانین انکسار شکل ۵-۱ در نظر گرفته می‌شود. جریان از محیط متخلخل I با نفوذپذیری k_1 به سمت محیط متخلخل II با نفوذپذیری k_2 صورت می‌گیرد. خط AB فصل مشترک دو محیط است. فرض می‌شود که زاویهٔ برخورد خطوط جریان به فصل مشترک در محیط I برابر با α و زاویهٔ خروجی خطوط جریان (در محیط II) برابر β باشد ($\alpha, \beta < 90^\circ$).



شکل ۵-۱- شکل عمومی شبکهٔ جریان در محل اتصال دو محیط با نفوذپذیری‌های مختلف

با استفاده از قانون دارسی، مقدار جریان در داخل یک مجرای جریان واقع بین دو خط جریان ۱ و ۲ در محیط I برابر است با :

$$\Delta q = k_1 . \frac{\Delta h}{a} \times a \times 1 = k_1 . \Delta h \qquad (۵-۱)$$

مقدار جریان بین این دو خط جریان در محیط II به‌طور مشابه برابر است با :

$$\Delta q = k_2 \times \frac{\Delta h}{c} \times d = k_2 . \Delta h . \frac{d}{c} \qquad (۵-۲)$$

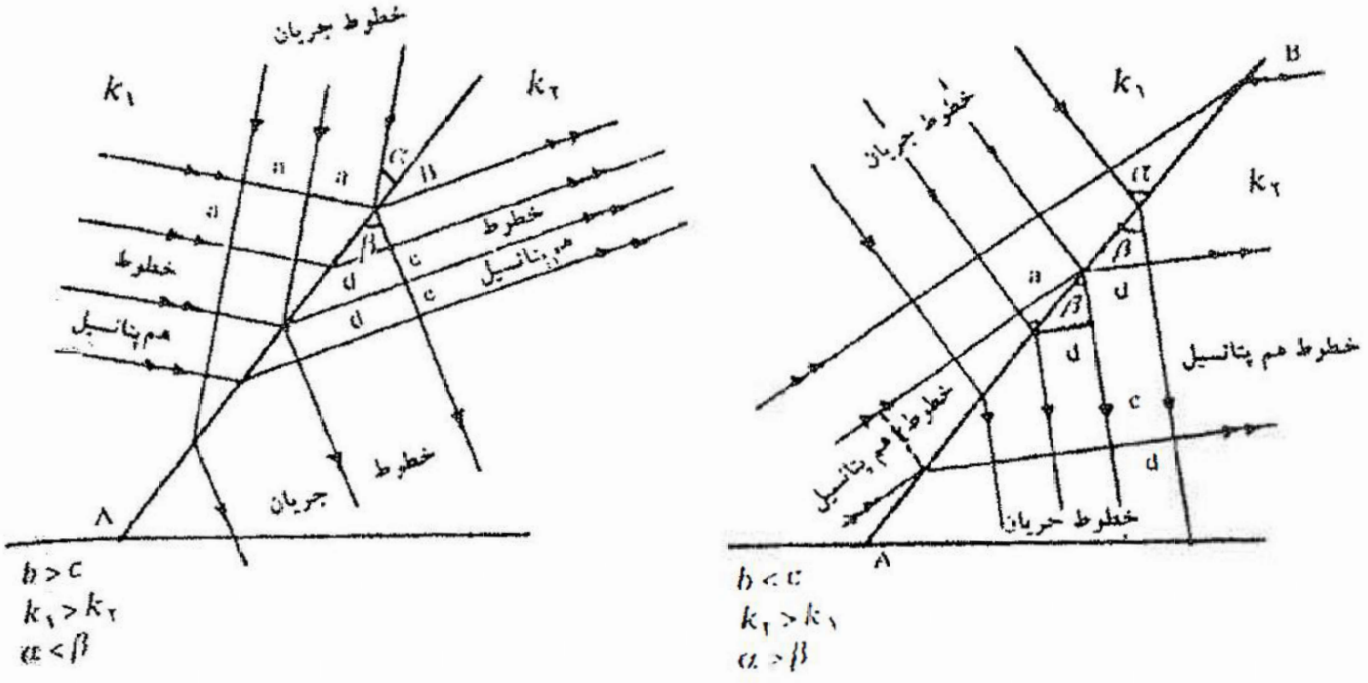
با توجه به قانون پیوستگی جریان، مقدار Δq در حین عبور از محیط I به محیط II ثابت است، بنابراین دو رابطهٔ ۵-۱ و ۵-۲ باید مساوی باشند، پس :

$$k_1 . \Delta h = k_2 . \Delta h . \frac{d}{c}$$

و:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{d}{c} \qquad (۵-۳)$$

از رابطهٔ فوق نتیجه می‌شود که هرگاه $k_2 > k_1$ باشد، در این صورت $d < c$ است، یعنی اگر آب از یک محیط با نفوذپذیری کمتر وارد یک محیط با نفوذپذیری بیشتر شود، c بزرگتر از d خواهد بود، به عبارت دیگر، بلوک‌های شبکهٔ جریان در محیط II (با نفوذپذیری بیشتر) در جهت طولی، یعنی در جهت جریان کشیده می‌شوند و بالعکس وقتی $k_1 > k_2$ باشد، $d > c$ است، یعنی در عبور جریان از یک محیط با نفوذپذیری بیشتر به محیط کم‌نفوذتر بلوک‌های شبکهٔ جریان در محیط II (محیط کم‌نفوذتر) فشرده می‌شوند، به‌طوری‌که به شکل مستطیلی در جهت عرضی در می‌آیند. به‌طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که مربعات شبکهٔ جریان در محیطی با نفوذپذیری بیشتر در جهت طولی کشیده شده و در محیطی با نفوذپذیری کمتر در جهت طولی فشرده می‌شوند. به عبارت دیگر، برای ایجاد یک مقدار مساوی افت پتانسیل Δh و تحت یک مقدار معین شیب آبی، i، در محیطی که نفوذپذیری آن بیشتر است، آب مسیر طولانی‌تری را طی می‌کند و در محیطی که نفوذپذیری آن کمتر است، مسیر کوتاهتری را می‌پیماید.



شکل ۵-۲- بلوک‌های شبکهٔ جریان در محیطی با نفوذپذیری کمتر یا بیشتر از محیط اول

در شکل‌های فوق چنانچه فصل مشترک بین دو خط جریان در نظر گرفته شود، می‌توان رابطهٔ زیر را برقرار کرد:

$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{d}{\sin\beta} \qquad (۴-۵)$$

به‌طور مشابه بین دو خط هم‌پتانسیل نیز می توان رابطهٔ زیر را برقرار کرد :

$$\frac{a}{\cos\alpha} = \frac{c}{\cos\beta} \qquad (۵-۵)$$

چنانچه دو رابطهٔ ۵-۴ و ۵-۵ بر هم تقسیم شوند، می‌توان نوشت :

$$\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{\sin\beta}{\cos\beta}\cdot\frac{c}{d}$$

یا :

$$\tan\alpha = \frac{c}{d}\tan\beta \qquad (۶-۵)$$

بنابراین:

$$\frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = \frac{c}{d} = \frac{k_۲}{k_۱} \qquad (۵-۷)$$

رابطهٔ فوق نشان می‌دهد که تغییرات زاویهٔ برخورد خطوط جریان به فصل مشترک دو محیط با نفوذپذیری‌های متفاوت در جهت عکس تغییرات نفوذپذیری است. بدین معنی که چنانچه جریان از یک محیط متخلخل با نفوذپذیری کمتر وارد یک محیط متخلخل با نفوذپذیری بیشتر گردد ($k_۲ > k_۱$)، در این صورت بنابر رابطهٔ ۵-۷ زاویهٔ برخورد خط جریان در محیط با نفوذپذیری کمتر (زاویهٔ α) بزرگتر از زاویهٔ برخورد خط جریان در محیط دوم با نفوذپذیری بیشتر (زاویه β) خواهد بود، زیرا $\tan\alpha > \tan\beta$ بالعکس.

۵-۳- زاویهٔ برخورد اولین خط جریان به سطح مشترک دو محیط متخلخل با نفوذ پذیری‌های متفاوت [۱]

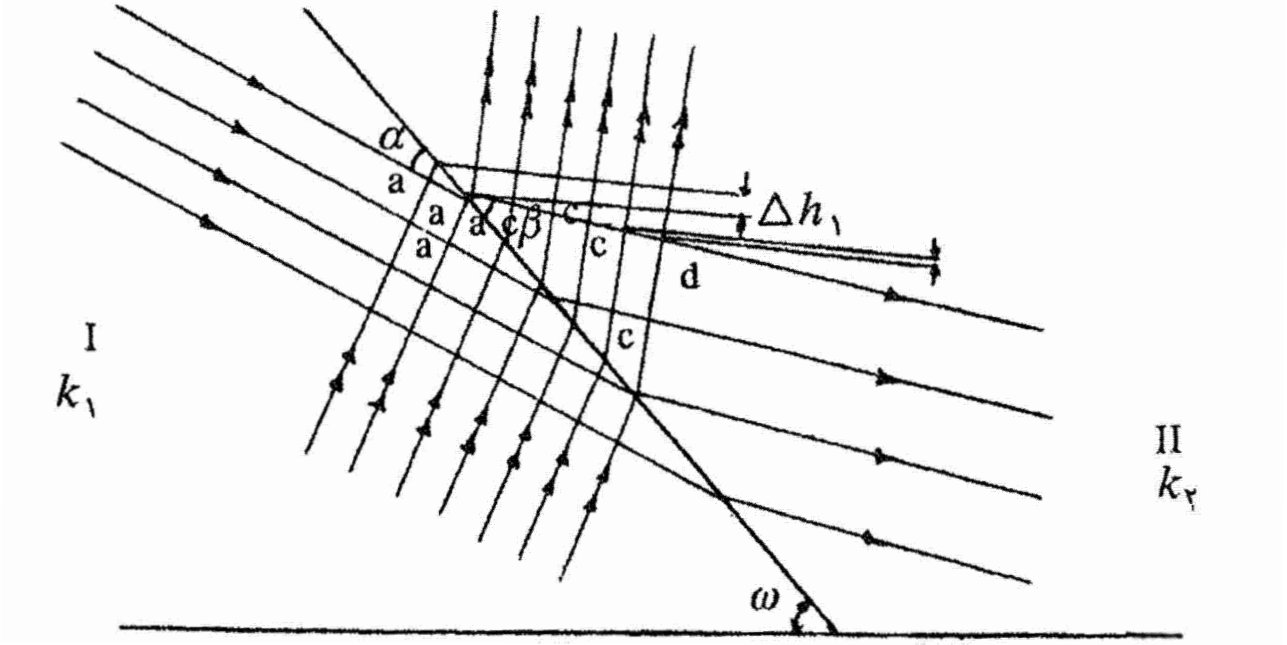
برای تعیین زاویهٔ برخورد اولین خط جریان (خط نشت) به سطح مشترک دو محیط متخلخل بر حسب زاویهٔ (ω)، یعنی زاویهٔ فصل مشترک دو محیط با خط افق، دوحالت مختلف در نظر گرفته می‌شود.

۵-۳-۱- زاویهٔ فصل مشترک با خط افق کوچکتر از ۹۰ درجه است ($\omega < 90^\circ$)

در این قسمت نیز برحسب مقدار نفوذپذیری دو محیط نسبت به یکدیگر دو حالت را می‌توان در نظر گرفت :

حالت اول : $k_2 < k_1$

در این صورت بنابر آنچه در قسمت ۵-۲ بحث شد، باید $\alpha < \beta$ باشد، بنابراین شکل ۵-۳ برقرار خواهد بود.

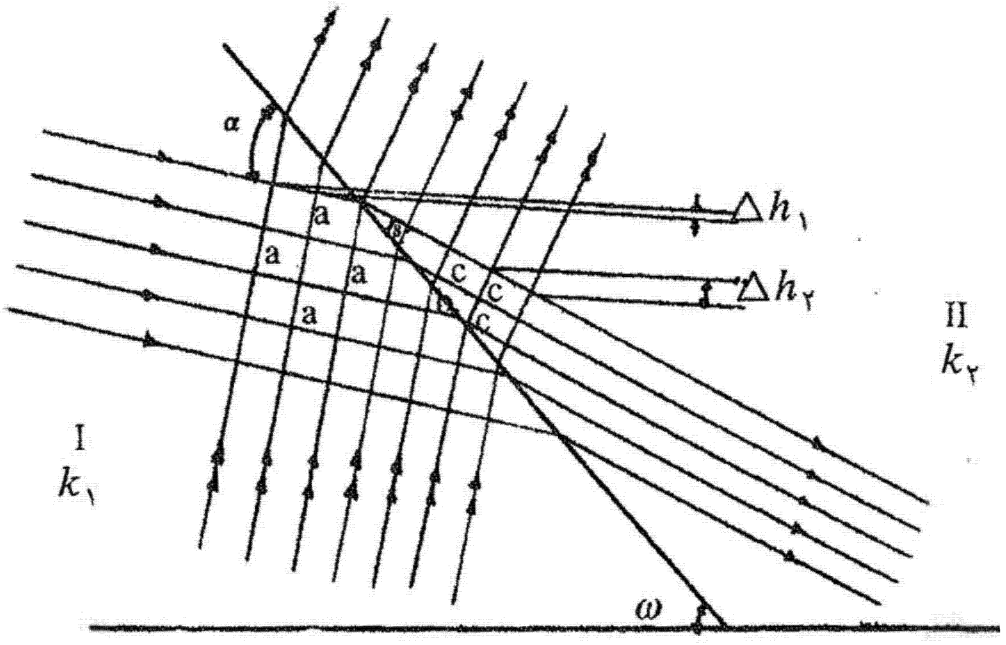


شکل ۵-۳- تعیین زاویهٔ برخورد خط نشت (حالت $k_2 < k_1$ و $\omega < 90^\circ$)

همان‌طورکه در فصل‌های قبل دیده شد، در مورد اولین خط جریان یا خط نشت باید مقدار افت پتانسیل بین هر دو خط هم‌پتانسیل مجاور روی این خط، یعنی Δh، مقدار ثابتی باشد. بنابر شکل ۵-۳، در محیط متخلخل I به‌علت نفوذپذیری بیشتر خطوط جریان شیب بیشتری دارد و فاصلهٔ بین دو خط هم‌پتانسیل a است و در محیط II به‌دلیل نفوذپذیری کمتر خطوط جریان دارای شیب کمتر و فاصلهٔ بین دو خط هم‌پتانسیل، یعنی c کوچکتر از a خواهد بود. بنابراین مقدار Δh_1 (افت بین دو خط هم‌پتانسیل مجاور در محیط I) بسیار بزرگتر از Δh_2 (افت بین دو خط هم‌پتانسیل مجاور در محیط II) است و بالطبع این دو مقدار هیچ‌گاه نمی‌توانند مساوی باشند. بنابراین وضعیت اخیر نمی‌تواند برقرار شود.

حالت دوم: $k_1 < k_2$

در این حالت بنابر آنچه در قسمت ۵-۲ بیان شد، $\beta > \alpha$ خواهد بود و شکل ۵-۴ برقرار است.

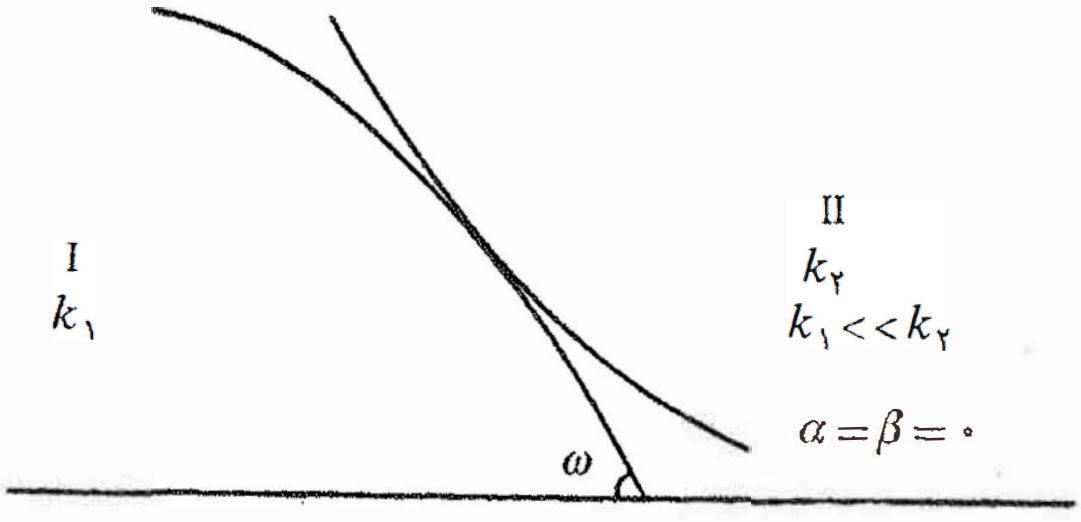


شکل ۵-۴- تعیین زاویهٔ برخورد خط نشت ($k_2 > k_1$ و $\omega < 90^\circ$)

همان‌طورکه در شکل مذکور دیده می‌شود، به‌علت نفوذپذیری کمتر، در محیط I شیب خطوط جریان کمتر از محیط II است و فواصل خطوط هم‌پتانسیل در این محیط (a) نیز کوچکتر از فواصل بین خطوط هم‌پتانسیل در محیط II (c) می‌باشد، بنابراین مقدار افت بین دو خط هم‌پتانسیل در محیط I (Δh_1) نمی‌تواند با مقدار مشابه در محیط II (Δh_2) مساوی باشد، در نتیجه برقراری رابطهٔ $\frac{k_2}{k_1} = \frac{tan\,\alpha}{tan\,\beta}$ چنانچه α و β دو زاویهٔ حقیقی و غیرمساوی باشند، موجب می‌شود که مقدار Δh در دو محیط هیچ‌گاه مساوی نباشد. تنها راه برقراری رابطهٔ فوق و مساوی بودن مقدار افت Δh بین خطوط هم‌پتانسیل در طرفین، دو حالت مخصوص زیر خواهد بود:

تجربه نشان می‌دهد که حالت اول ($\alpha = \beta = 0$) تنها وقتی برقرار است که $k_1 << k_2$ باشد، در این صورت شکل ۵-۵ نحوهٔ ورود و خروج خط نشت را از یک محیط متخلخل به محیط دیگر نشان می‌دهد.

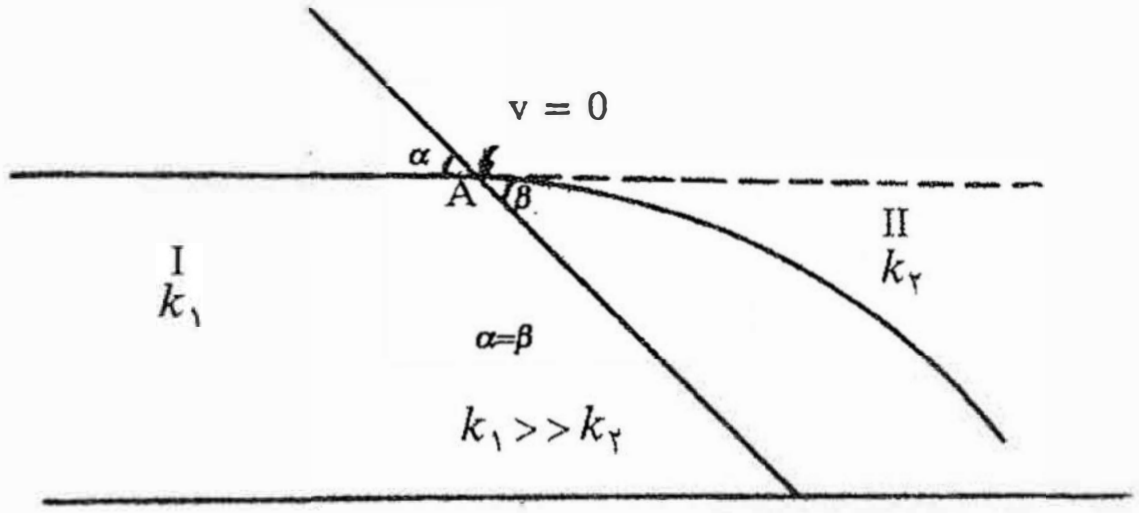
الف) $\alpha = \beta = 0$ ب) $\alpha = \beta$



شکل ۵-۵- زاویهٔ برخورد خط نشت در حالت $\alpha = \beta = 0$

باید توجه داشت که قانون فوق فقط در مورد اولین خط جریان (خط نشت) صادق است و در مورد سایر خطوط جریان، صدق نمی کند بنابراین بقیهٔ خطوط جریان می‌توانند تحت هر زاویه‌ای فصل مشترک دو محیط را قطع کنند و فقط لازم است قانون عمومی $\frac{tan\alpha}{tan\beta} = \frac{k_2}{k_1}$ در مورد آنها صدق کند.

در مورد حالت دوم ($\alpha = \beta$) نیز تجربه نشان می‌دهد این رابطه وقتی صادق است که $k_1 >> k_2$ باشد. در این حالت مخصوص، خط نشت به‌طور افقی وارد محیط دوم شده و مماس بر افق نیز خارج می‌شود، به‌طوری‌که $\alpha = \beta$ است (شکل ۵-۶).



شکل ۵-۶- زاویهٔ برخورد خط نشت در حالت $\alpha = \beta$

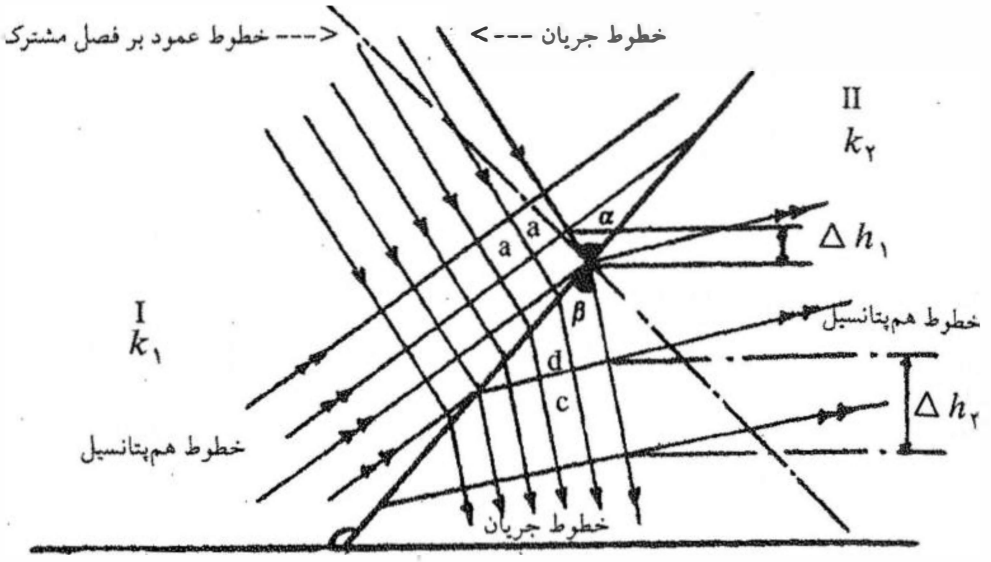
همان‌طورکه در شکل مذکور دیده می‌شود، در نقطهٔ ورودی A چون مؤلفهٔ قائم سرعت صفر است، پس سرعت نشت نیز صفر خواهد بود.

۵-۳-۲- زاویهٔ فصل مشترک با خط افق بزرگتر از ۹۰ درجه است ($\omega > 90^\circ$)

در این حالت برحسب قرارگرفتن خط نشت در ربع بالایی یا پایینی خط عمود بر فصل مشترک، دو حالت وجود دارد و مانند قسمت قبل برحسب مقدار نسبی نفوذپذیری دو محیط نیز دو حالت را می‌توان در نظر گرفت. بنابراین در مورد اخیر، چهار حالت مختلف را می‌توان مد نظر قرار داد:

حالت اول: خط نشت در ربع بالایی خط عمود بر فصل مشترک دو محیط قرار دارد که این حالت خود شامل دو قسمت است:

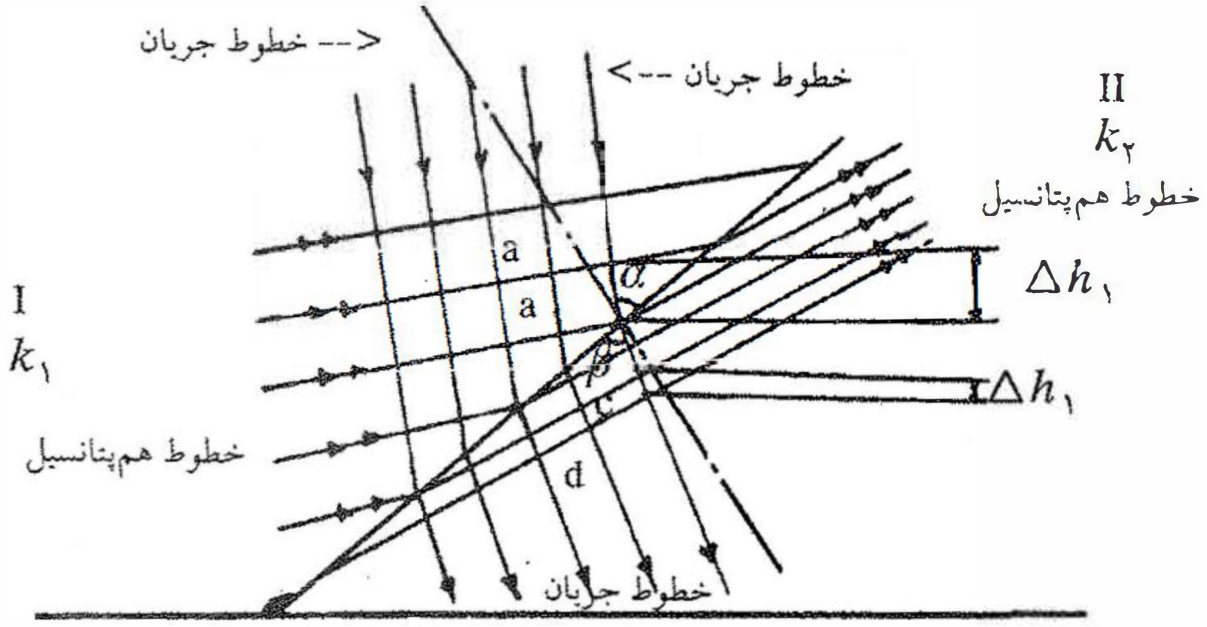
الف) وقتی‌که $k_1 < k_2$ باشد: در این صورت $\alpha > \beta$ است (همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، برای کلیهٔ حالات مورد بحث α و β کوچکتر از ۹۰ درجه در نظر گرفته می‌شوند)، شکل ۵-۷ این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۷- تعیین زاویهٔ برخورد خط نشت ($k_1 < k_2$ و $\omega > 90^\circ$)

در این حالت ملاحظه می‌شود که به‌علت کمتر بودن نفوذپذیری در محیط I، شیب خطوط جریان و همچنین فاصلهٔ خطوط هم‌پتانسیل (a) خیلی کوچکتر از محیط II (c) است، پس Δh_1 بمراتب کوچکتر از Δh_2 است و هیچ‌گاه نمی‌تواند با آن مساوی باشد.

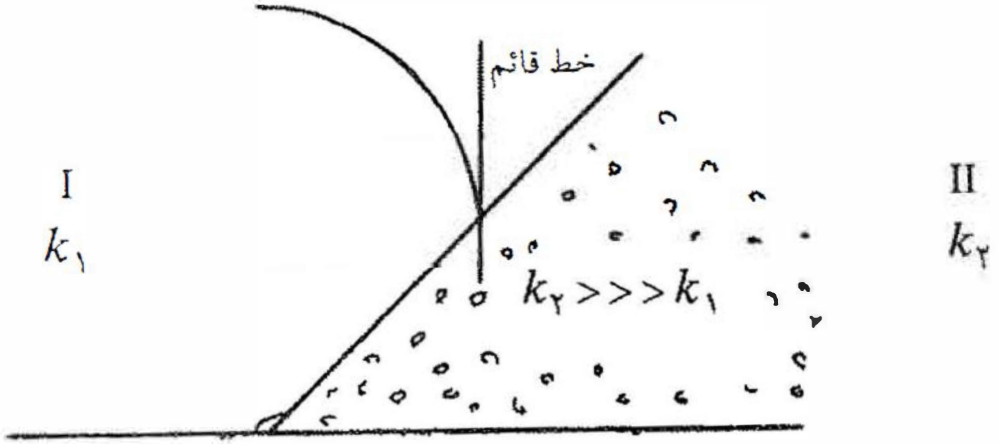
ب) وقتی $k_2 < k_1$ و دراین صورت $\alpha < \beta$ است،در چنین حالتی شکل ۵-۸ برقرار است.



شکل ۵-۸- تعیین زاویهٔ برخورد خط نشت ($k_1 > k_2$ و $\omega > 90$)

در حالت اخیر نیز همان‌طورکه در شکل ۵-۸ ملاحظه می‌شود، در محیط I به‌علت نفوذپذیری بیشتر شیب خطوط جریان و نیز فاصلهٔ خطوط هم‌پتانسیل (a) بمراتب بیشتر از محیط II است و هیچ‌گاه Δh_1 و Δh_2 با یکدیگر مساوی نخواهند بود، ازاین‌رو همواره $\Delta h_2 << \Delta h_1$ است.

تجربه نشان می‌دهد که بین دو حالت فوق، حالت دوم هیچ‌گاه امکان‌پذیر نیست و حالت اول نیز تنها در شرایطی که k_2 بسیار بزرگتر از k_1 باشد، یعنی محیط دوم نسبت به محیط اول کاملاً نفوذپذیر باشد، مطابق شکل ۵-۹ امکان‌پذیر است [۵].

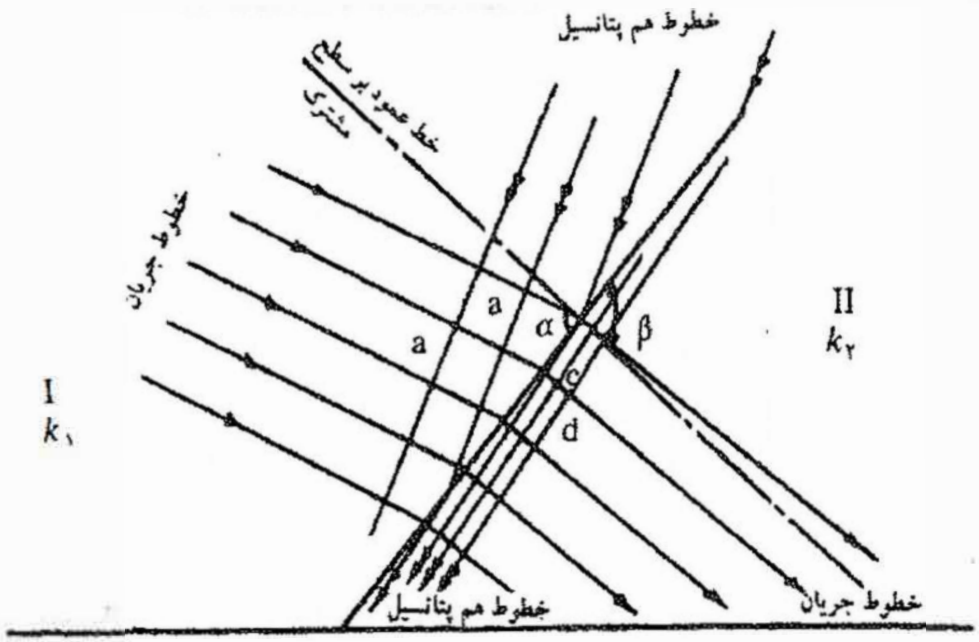


شکل ۵-۹- حالت خاص برخورد خط نشت وقتی $k_2 >>> k_1$

در این حالت خط نشت مماس بر قائم خواهد بود.

حالت دوم: خط نشت در ربع پایینی خط عمود بر فصل مشترک دو محیط قرار دارد. در این شرایط نیز دو حالت مختلف در نظر گرفته می‌شود:

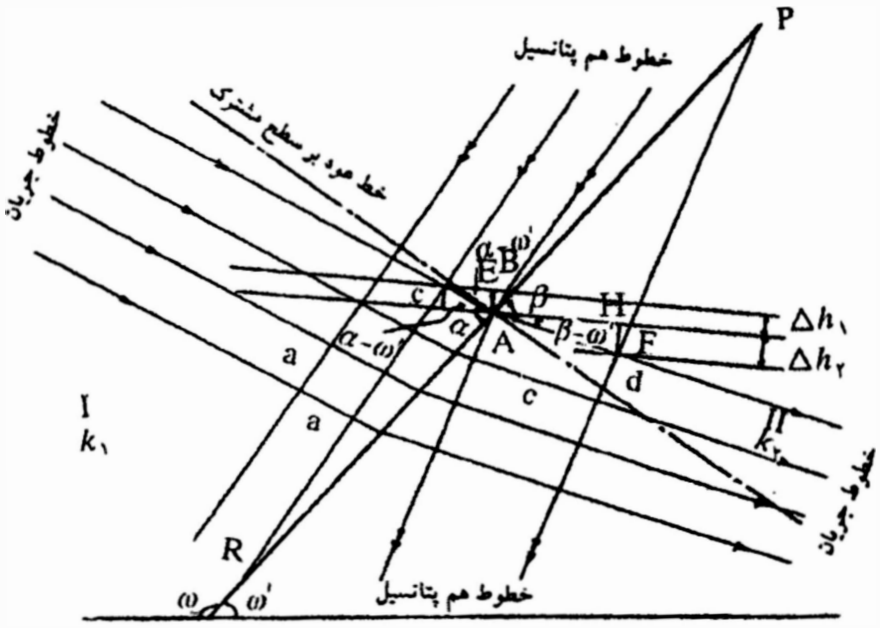
الف) $k_1 > k_2$ و $\alpha < \beta$ در این صورت شکل ۵-۱۰ برقرار خواهد بود.



شکل ۵-۱۰- تعیین زاویه برخورد خط نشت در ربع دوم ($k_1 > k_2$ و $\omega > 90^\circ$)

در این حالت شیب خطوط جریان در محیط I کمتر از محیط II و در عوض فواصل خطوط هم‌پتانسیل در محیط I بیشتر از محیط II است ($\alpha > c$)، بنابراین امکان برابری Δh در دو محیط وجود دارد.

ب) $k_1 < k_2$ و $\alpha > \beta$ در این صورت شکل ۵-۱۱ نحوهٔ جریان را نشان می‌دهد. چون در نظر است روی این شکل استدلال ریاضی صورت گیرد، ازاین‌رو با تفصیل بیشتری ترسیم می‌شود تا روابط هندسی و مثلثاتی با وضوح بیشتری مشخص شود.



شکل ۵-۱۱- تعیین زاویهٔ برخورد خط نشت در ربع دوم ($k_1 < k_2$ و $\omega > 90^\circ$)

در این حالت شیب خطوط جریان در محیط I بیشتر از محیط II و در عوض فاصلهٔ خطوط هم‌پتانسیل در محیط I کمتر از محیط II است ($a < c$). ازاین‌رو امکان برابری Δh در دو محیط وجود دارد. با استفاده از شکل ۵-۱۱ و روابط هندسی و مثلثاتی موجود بین اجزای آن، می‌توان نوشت :

در مثلث AEC $\quad \Delta h_1 = AE = a \sin(\alpha - \omega') \quad (۵-۸)$

در مثلث AHF $\quad \Delta h_2 = FH = c \sin(\beta - \omega') \quad (۵-۹)$

در مثلث RCA $\quad RA = \dfrac{a}{\cos\alpha} \quad (۵-۱۰)$

در مثلث FAP $\quad AP = RA = \dfrac{c}{\cos\beta} \quad (۵-۱۱)$

با استفاده از روابط ۵-۱۰ و ۵-۱۱ رابطهٔ زیر حاصل می‌شود :

$$\frac{a}{\cos\alpha} = \frac{c}{\cos\beta} \qquad (۱۲-۵)$$

از طرفی :

$$\Delta h_۱ = \Delta h_۲$$

پس :

$$a\sin(\alpha - \omega') = c\sin(\beta - \omega') \qquad (۱۳-۵)$$

چنانچه رابطهٔ ۵-۱۳ بر رابطهٔ ۵-۱۲ تقسیم شود، رابطهٔ زیر حاصل خواهد شد :

$$\cos\alpha \,.\, \sin(\alpha - \omega') = \cos\beta \,.\, \sin(\beta - \omega')$$

یا :

$$\frac{\sin(\alpha - \omega')}{\cos\beta} = \frac{\sin(\beta - \omega')}{\cos\alpha} \qquad (۱۴-۵)$$

رابطهٔ اخیر را می‌توان به‌صورت زیر تبدیل کرد :

$$\frac{\sin(\alpha - \omega')}{\sin(۹۰ - \beta)} = \frac{\sin(\beta - \omega')}{\sin(۹۰ - \alpha)} \qquad (۱۵-۵)$$

تنها جواب برای معادلهٔ فوق، روابط زیر است :

$$\alpha - \omega' = ۹۰ - \beta \qquad (۱۶-۵)$$

$$\beta - \omega' = ۹۰ - \alpha$$

ازاین‌رو نتیجه می‌شود :

$$\alpha + \beta = ۹۰ + \omega' \qquad (۱۷-۵)$$

از طرف دیگر، بین α و β رابطهٔ زیر نیز برقرار است :

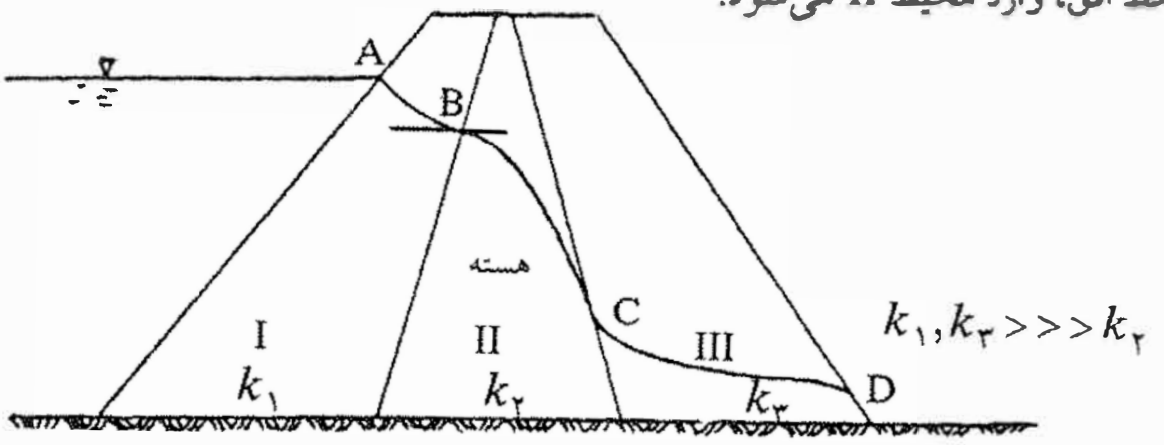
$$\frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = \frac{k_۲}{k_۱} \qquad (۷-۵)$$

در دو معادلهٔ ۵-۱۷ و ۵-۷ مقادیر $k_۱, k_۲$ و ω' معلوم و α و β مجهول می‌باشند، بنابراین با حل دو معادلهٔ دومجهولی فوق مقادیر α و β را می‌توان به‌آسانی محاسبه کرد.

نشت آب در سدهای خاکی غیر همگن و همروند

در سدهای خاکی معمولاً برای کاهش دادن نفوذپذیری بدنهٔ سد، یک لایه با نفوذپذیری بسیار کم در قسمت میانی یا سطح بالادست سد قرار داده می‌شود. درصورتی‌که این لایه در قسمت میانی سد قرار گیرد، هسته و اگر در سطح بالادست آن قرار گیرد، پتو یا پوشش نفوذناپذیر [1] نامیده می‌شود. هسته عموماً از خاک رس خالص با نفوذپذیری کم ساخته شده و در دو طرف توسط لایه‌هایی با نفوذپذیری بیشتر محافظت می‌شود. بندرت ممکن است لایهٔ هسته از بتن ساخته شود که در این حالت در صورت نشست غیریکنواخت، خاک ممکن است به‌علت عدم قابلیت انعطاف بشکند یا ترک بردارد. لایهٔ سطحی پوشش نفوذناپذیر نیز ممکن است از بتن یا خاک رس ساخته شود که در صورت استفاده از خاک رس، باید آن را توسط لایه‌ای سنگریز یا لاشه‌سنگ محافظت کرد.

شکل ۵-۱۳ کاربرد چنین لایه‌ای را در داخل سد خاکی نشان می‌دهد. در این شکل خط نشت یا اولین خط جریان نمایش داده شده است. همان‌طورکه دیده می‌شود، این خط در قسمت بالادست سد از نقطهٔ A (سطح آب در بالادست) و عمود بر سطح شیبدار سد داخل شده و پس از تحمل مقدار نسبتاً کمی افت در منطقهٔ I به نقطهٔ B فصل مشترک مناطق I و II می‌رسد. چون در نقطهٔ B جریان از محیط I با نفوذپذیری بیشتر (k_1) وارد محیط II با نفوذپذیری بسیار کمتر (k_2) می‌شود، ازاین‌رو بنابر قوانینی که در قسمت‌های قبل بحث شد، خط نشت در نقطهٔ B مماس بر خط افق، وارد محیط II می‌شود.



شکل ۵-۱۳- مسیر خط نشت در یک سد خاکی غیر همگن

در قسمت هسته به‌علت پایین بودن نفوذپذیری، افت زیادی حاصل می‌شود و خط نشت تا نقطه‌ای مانند C در محل فصل مشترک مناطق II و III نزول می‌کند و بنابر قوانین بحث شده، چون جریان از محیط II با نفوذپذیری خیلی کم وارد محیط II با نفوذپذیری خیلی بیشتر می‌شود، به فصل مشترک این دو لایه مماس گشته و در نقطهٔ C مماس بر این فصل مشترک وارد محیط III می‌گردد. در محیط اخیر نیز پس از ایجاد مقدار کمی افت، از نقطه‌ای مانند D در سطح پایین‌دست سد خارج می‌شود.

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، مهمترین مسئله در بررسی نشت آب در داخل سدهای خاکی (اعم از همگن یا غیرهمگن)، تعیین موقعیت اولین خط جریان یا خط نشت است، زیرا با در دست داشتن این خط با کمی ممارست می‌توان به‌آسانی شبکهٔ جریان را رسم و مقدار جریان را نیز محاسبه کرد. همچنین با استفاده از شبکهٔ جریان رسم شده، می‌توان محل نقاطی را که از نظر فرسایش در وضعیت بحرانی قرار دارند، تعیین کرد.