روش‌های کاهش و کنترل نشت از بدنه و پی سدهای خاکی

همان‌طورکه در فصول گذشته بحث شد، مولکول‌های آب به‌دلیل وجود انرژی پتانسیلی در محیط متخلخل خاک جریان می‌یابند و طی مسیر در این محیط بتدریج انرژی خود را به‌واسطهٔ اصطکاک از دست می‌دهند. این پدیده که نشت آب در محیط متخلخل خاک نام دارد، دارای آثار نامطلوبی به‌شرح زیر است:

- تلف شدن آب ذخیره‌شده در پشت سازهٔ خاکی
- ایجاد فشار منفذی در محیط متخلخل وکاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آن
- اعمال فشار بالابر بر سازه های غیرقابل‌نفوذ (مانند سازه های بتنی، فولادی و ...) در محیط
- به حرکت درآمدن ذرات خاک و ایجاد پدیدهٔ فرسایش درونی در محیط
- اعمال نیروی نشت [1] بر تودهٔ خاک در جهت جریان.

هریک از مسائل فوق می‌توانند بر پایداری سدهای خاکی اثر منفی داشته باشند، ازاین‌رو در تحلیل پایداری باید مورد توجه قرار گیرند. برای کاهش و کنترل آثار منفی پدیدهٔ نشت در محیط خاک، لازم است حتی‌المقدور با به‌کارگیری روش‌های مناسب، انرژی پتانسیلی مولکول‌های آب و در نتیجه مقدار نشت را کاهش داد. از آنجا که عملاً نمی‌توان مقدار نشت در خاک را به صفر کاهش داد، لازم است روش‌هایی برای کنترل آن و جلوگیری از جابه‌جایی ذرات در محیط بکار گرفته شود. در این فصل موضوع اول، یعنی روشهای کنترل و کاهش نشت در بدنه و پی سدهای خاکی مورد بحث قرار گیرد و شیوه‌های جلوگیری از حرکت ذرات خاک در فصل آینده تشریح خواهد گردید.

این فصل در دو مبحث کلی بشرح زیر مورد بحث قرار می‌گیرد:

I- روش‌های کاهش مقدار نشت

II- روش‌های کنترل و جمع‌آوری آب نشت‌یافته با استفاده از سیستم‌های زهکش مناسب

I- روش‌های کاهش نشت

برای جلوگیری از مشکلاتی که بر اثر نشت آب به داخل بدنه و پی سدهای خاکی ایجاد می‌شود، باید کوشش کردتا با ایجاد مانع بر سر جریان نشت و کاهش انرژی، مقدار آن را به حداقل رساند. روش‌هایی که در حال حاضر به‌منظور کاهش مقدار نشت در بدنه و پی سدهای خاکی مورد استفادهٔ مهندسان قرار دارد به‌شرح زیر است:

- استفاده از هسته با نفوذپذیری بسیار کم در بدنهٔ سد
- استفاده از رویهٔ آب‌بند در سطح بالادست سد
- استفاده از ترانشه و پردهٔ آب‌بند در پی
- استفاده از پردهٔ تزریق در پی
- استفاده از رویه با نفوذپذیری بسیار کم در کف مخزن
- استفاده از دیوارهای آب‌بند نازک (دیافراگم) فلزی، بتنی و غیره

۷-۲- استفاده از هسته با نفوذپذیری بسیار کم در بدنه سد

همان‌طورکه در فصل دوم تشریح شد، معمولاً برای جلوگیری از نشت آب در داخل سدهای خاکی یا کاهش مقدار نشت، در صورت وجود مصالح مناسب، عموماً از یک هستهٔ متشکل از مصالح با نفوذپذیری بسیار کم (در حد کمتر از ۵-۱۰ سانتی‌متر در ثانیه) استفاده می‌شود. آب در حین عبور از این بخش از بدنهٔ سد، به‌دلیل نفوذپذیری بسیار کم، مقدار زیادی از انرژی پتانسیلی خود را به‌دلیل اصطکاک از دست می‌دهد و در نتیجه مقدار نشت نیز به تناسب کاهش می‌یابد. در حال حاضر غیر از مواردی که به‌دلیل عدم وجود مصالح مناسب سد به‌صورت همگن ساخته شده و تمام بدنهٔ سد متشکل از یک نوع مصالح ریزدانه یا قطعات سنگی (سدهای سنگریز) است، در سایر موارد ترجیح مهندسان بر طراحی و ساخت سدهای خاکی به‌صورت ناحیه‌بندی‌شده با استفاده از هسته است.

در طراحی قسمت هستهٔ سدهای خاکی لازم است سه موضوع زیر مورد توجه قرار گیرد:

الف) انتخاب مصالح مناسب

ب) تعیین ضخامت هسته

ج) انتخاب شکل هندسی و موقعیت استقرار هسته در مقطع سد

بدیهی است که هر سه مسئلهٔ فوق به یکدیگر مرتبط‌اند و اتخاذ تصمیم در هر مورد باید با توجه به موارد دیگر انجام پذیرد.

۷-۲-۱- انتخاب مصالح هسته

در انتخاب مصالح مناسب برای اجرای هستهٔ سدهای خاکی، لازم است دو عامل کمیت و کیفیت و نیز محل برداشت مصالح (منبع قرضه) مورد توجه قرار گیرد. به‌طور کلی، منابع قرضه برای برداشت مصالح مورد نیاز بخش‌های مختلف سدهای خاکی باید در فاصلهٔ کم نسبت به محل احداث قرار داشته باشد و از این نظر برآوردهای اقتصادی، تعیین‌کننده خواهد بود. در بسیاری از موارد عدم وجود منبع قرضهٔ مناسب در فاصلهٔ نزدیک، ممکن است انتخاب نوع سد یا حتی امکان احداث آن را تحت تأثیر قرار دهد.

همان‌طورکه اشاره شد، در انتخاب منبع قرضه برای برداشت مصالح هسته، علاوه بر فاصلهٔ حمل، لازم است کمیت (مقدار مصالح موجود) و کیفیت مصالح مورد توجه قرار گیرد. از نظر کیفیت مصالح، مشخصات قابل توجه شامل نفوذپذیری، دانسیتهٔ خاک متراکم‌شده، مقاومت برشی، قابلیت فشردگی، انعطاف‌پذیری و مقاومت به فرسایش است. کیفیت مصالح قرضهٔ مناسب برای احداث هستهٔ سدهای خاکی در فصل مربوطه، به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۷-۲-۲- ضخامت هسته

از آنجا که برای تأمین حداقل نفوذپذیری در مصالح هسته، این مصالح عموماً دارای مقدار زیادی ذرات ریزدانهٔ سیلت و رس خواهند بود، ازاین‌رو نسبت به مصالح پوسته از مقاومت برشی کمتری برخوردارند. به‌علاوه وجود فشار منفذی در این نوع مصالح (به‌دلیل قابلیت زهکشی بسیار کم) موجب کاهش بیشتر مقاومت برشی آن می‌گردد. همچنین از نظر اجرایی، مصالح هسته باید در لایه‌های نازکتر و با کنترل دقیق‌تر رطوبت و میزان تراکم، متراکم شود. مجموعهٔ این عوامل اثبات می‌کند که هسته باید دارای حداقل ضخامت ممکن با توجه به ضرایب ایمنی مربوطه باشد. استفاده از هسته‌های ضخیم‌تر فقط در شرایطی ممکن است قابل توجیه باشد که بر اثر عملیات حفاری در محل سد، مقادیر زیادی مصالح نفوذناپذیر حاصل شده باشد یا اینکه مصالح نفوذپذیر درشت دانه در فواصل حمل نزدیک و قابل توجیه از نظر اقتصادی در دسترس نباشد.

بر اساس تحقیقات دیویدنکوف [1]، برای به حرکت درآوردن ذرات خاک با نفوذپذیری بین ۳×۱۰^{-۶} تا ۴×۱۰^{-۸} سانتی متر در ثانیه، حداقل شیب هیدرولیکی مورد نیاز ۳۰۰ الی ۶۰۰ بوده است [۷]. این امر بدان معنی است که تحت شرایط متعارف شیب هیدرولیکی، امکان حرکت ذرات خاک و مهاجرت آنها بسیار اندک است و علاوه بر آن، وجود فیلتر در پایین‌دست، ضریب اطمینان دیگری در این خصوص محسوب می‌گردد و حتی در صورت بروز ترک در هسته، فیلتر می‌تواند به‌عنوان یک سیستم محافظ، حرکت ذرات خاک را کنترل کند. مع‌ذلک از آنجا که مقدار نیروی نشت بنابر رابطهٔ زیر به‌طور مستقیم متناسب با شیب هیدرولیکی است، پس :

$$F_s = i \,.\, V \,.\, \gamma_w \qquad (۱-۷)$$

که در آن :

F_s = نیروی نشت　　V = حجم تودهٔ خاک

i = شیب هیدرولیکی　　γ_w = وزن واحد حجم آب

ازاین‌رو ترجیح طراحان سد آن است که تا حد امکان شیب هیدرولیکی در هستهٔ سد به مقادیر کمتری محدود شود تا ضمن کاهش احتمالی مهاجرت ذرات خاک، از وابستگی بیشتر به عملکرد فیلتر پایین‌دست نیز کاسته شود. از طرف دیگر، کاهش ضخامت هسته، احتمال ایجاد ترک در آن را (بویژه در مناطق زلزله‌خیز) بیشتر می‌سازد، بنابراین از این نظر هستهٔ ضخیم‌تر دارای پتانسیل خطر کمتری محسوب می‌گردد. به‌علاوه حداقل ضخامت مورد نیاز برای متراکم ساختن هسته و نیز کاهش مقدار نشت و رسانیدن آن به حد مجاز نیز باید مد نظر قرار گیرد.

با توجه به بحث فوق، چنانچه مصالح هسته نسبت به فرسایش دارای مقاومت بالا و از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار باشد، می‌توان از ضخامت‌های کمتر استفاده کرد. وجود یک سیستم فیلتر مناسب و خوب طراحی‌شده در قسمت پایین‌دست هسته نیز می‌تواند در کاهش ضخامت آن بسیار مؤثر باشد. در صورت عدم وجود شرایط مذکور و بویژه در مناطق زلزله‌خیز که پتانسیل ترک‌خوردگی هسته بیشتر است، لازم است هسته با ضخامت بیشتر طراحی شود.

شرارد بر اساس نتایج به‌دست آمده از تجربیات اجرایی و تحقیقاتی متعدد در مورد ضخامت هسته نسبت به ارتفاع آب در سد، جمع‌بندی زیر را ارائه کرده است [۱۷]:

۱- درصورتی‌که ضخامت هسته در هر عمق برابر ۳۰ تا ۵۰ درصد ارتفاع آب در آن عمق باشد (شیب هیدرولیکی ۳ تا ۲)، تقریباً در اغلب موارد رضایت‌بخش است و مشکل خاصی به لحاظ فرسایش و مهاجرت ذرات پدید نخواهد آمد و احتمالاً هسته‌ای با این ضخامت برای هرنوع خاک و هر مقدار ارتفاع سد مناسب است.

۲- اگر ضخامت هسته در هر عمق برابر ۱۵ تا ۲۰ درصد ارتفاع آب در آن عمق باشد (شیب هیدرولیکی ۷ تا ۵)، هسته نازک محسوب می‌شود، اما درصورتی‌که بخوبی طراحی و اجرا شده و فیلتر پایین‌دست آن نیز با دقت طراحی و اجرا شده باشد، در بیشتر حالات می‌تواند رضایت‌بخش باشد.

۳- درصورتی‌که ضخامت هسته در هر عمق برابر ۱۰ درصد ارتفاع آب در آن عمق یا کمتر باشد (شیب هیدرولیکی ۱۰ یا بیشتر)، هسته بسیار نازک محسوب می‌شود و دارای پتانسیل خطر بالایی خواهد بود. این شرایط تاکنون در موارد زیادی مورد استفاده قرار نگرفته و تنها در شرایطی ممکن است مطرح گردد که نشت شدید و متمرکز از هسته موجب تخریب سد نشود.

در جدول ۷-۱ حداکثر شیب هیدرولیکی (نسبت ارتفاع آب در هر عمق به ضخامت هسته در آن عمق) برای تعدادی از سدهای خاکی مهم جهان ارائه شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در بیشتر موارد ضخامت هسته بین ۰/۳۳H تا ۰/۵H (شیب هیدرولیکی بین ۳ تا ۲) و در تمام موارد شیب هیدرولیکی به ۰/۱۱H تا ۱H محدود شده است [۱۹].

جدول ۷-۱- شیب هیدرولیکی در تعدادی از سدهای مهم جهان [۱۹]

ردیف	نام سد	نام کشور	نوع هسته	ارتفاع سد H (متر)	ضخامت هسته	شیب هیدرولیکی تقریبی
۱	Boruca	کاستاریکا	شیبدار	۳۰۲	۰/۵H	۲
۲	Nurek	روسیه	قائم	۳۰۰	۰/۵۳H	۱/۹
۳	Chivor	کلمبیا	شیبدار	۲۳۸	۰/۳۳H	۳
۴	Oroville	آمریکا	قائم-شیبدار	۲۳۵	۰/۵H	۲
۵	Mica	کانادا	شیبدار	۲۳۵	۰/۳۳H	۳
۶	Portage Mountain	کانادا	قائم-شیبدار	۱۸۳	۰/۹H	۱/۱
۷	Dartmouth	استرالیا	قائم	۱۸۳	۰/۷۱H	۱/۴

۷-۲-۳- شکل و موقعیت استقرار هسته در مقطع سد

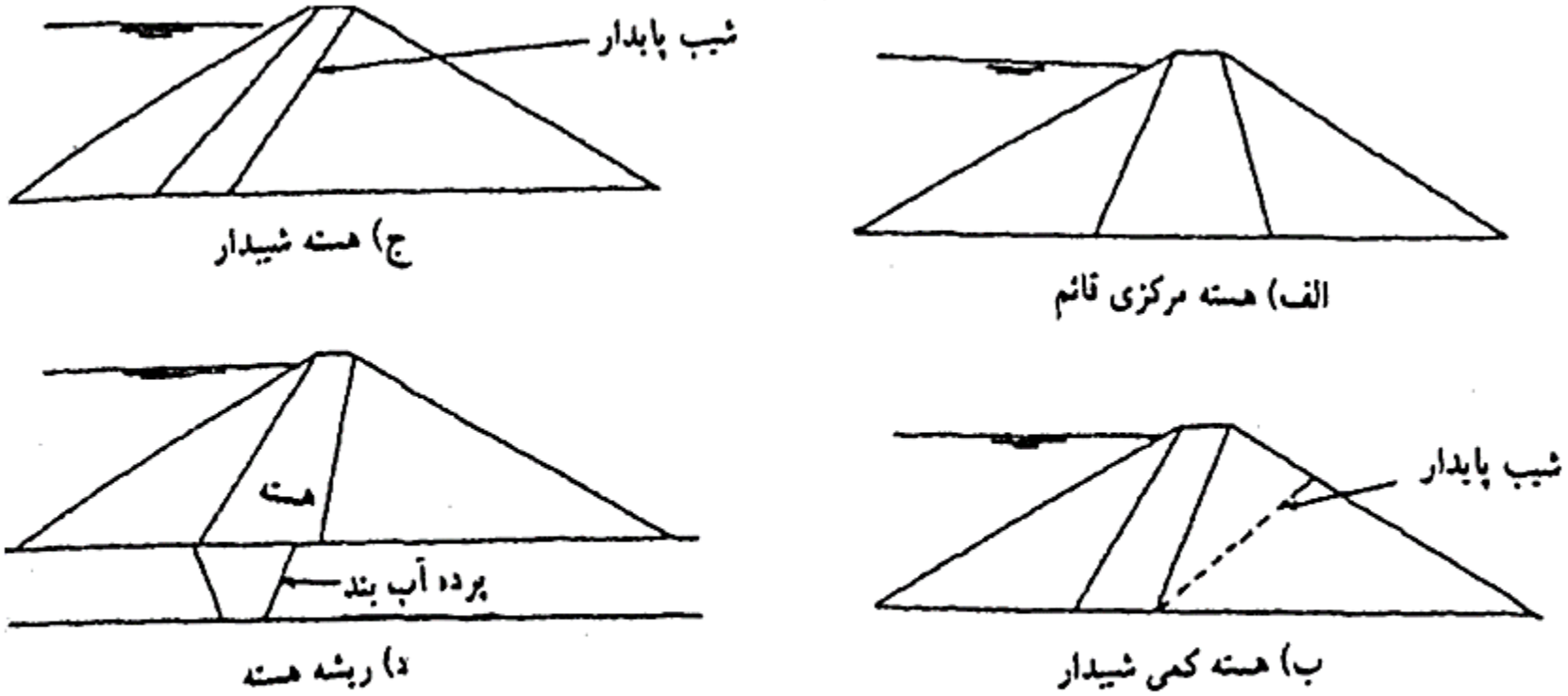
هسته را در مقطع سد خاکی می‌توان در سه شکل و موقعیت به‌شرح زیر احداث کرد:

۱) به شکل قائم در مرکز سد [۱]

۲) کمی شیبدار به سمت بالادست [۲]

۳) کاملاً شیبدار به سمت بالادست [۳]

در شرایطی‌که سطح پایین‌دست هسته دارای شیب ۱V : ۰/۵H یا بیشتر به سمت بالادست باشد، هسته کمی شیبدار تلقی می‌شود. هسته وقتی کاملاً شیبدار تلقی می‌شود که پوستهٔ پایین‌دست و هسته دارای شیب خود - پایدار در حدود ۱V : ۱/۲۵H یا کمتر باشد. معمولاً این مقدار شیب در سدهای سنگریز به‌کار برده می‌شود که در آنها ابتدا پوستهٔ سنگریز پایین‌دست به‌صورت مستقل ساخته شده و پس از مدتی فیلتر و هسته روی شیب بالادست آن اجرا می‌گردد. شکل ۷-۱، انواع روش‌های استقرار هسته در مقطع سدهای خاکی را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱ انواع شکل‌های هسته در مقطع عرضی سدهای خاکی

الف) مزایای هسته های شیبدار [۸ و ۱۵]

I- پوستهٔ سنگریز پایین‌دست را می‌توان نخست و سپس در زمان مناسب دیگری فیلتر، هسته و پوسته بالادست را اجرا کرد. این امر بویژه در شرایطی‌که اجرای عملیات خاک‌کوبی هسته در تمام طول سال (مثلاً به‌دلیل بارندگی‌های شدید) امکان‌پذیر نباشد، احداث قسمت پوستهٔ پایین‌دست را تسریع و در زمان اجرای پروژه صرفه‌جویی می‌کند.

II- همزمان با اجرای پوستهٔ پایین‌دست، انجام عملیات تزریق پی در زیر هسته امکان‌پذیر است.

III- از آنجا که با اجرای هسته به‌صورت شیبدار به سمت بالادست قسمت پوستهٔ پایین‌دست که عملاً خشک و فاقد فشار آب منفذی است، در حجم بسیار بیشتری اجرا می‌شود، ازاین‌رو احتمال تقاطع یا تماس سطح لغزش در شیب پایین‌دست با هسته بسیار کمتر شده و در شرایط نشت دائم، پوستهٔ پایین‌دست از ضریب اطمینان و پایداری بیشتری برخوردار است. در چنین حالتی می‌توان سطح پایین‌دست سد را با شیب بیشتری اجرا کرد که این امر موجب صرفه اقتصادی بیشتری خواهد گردید.

IV- از آنجا که در هسته‌های شیبدار به سمت بالادست، در شرایط افت ناگهانی سطح آب، خطوط جریان تقریباً قائم و خطوط هم‌پتانسیل تقریباً افقی‌اند، بنابراین فشار آب منفذی ناشی از این حالت بشدت کاهی می‌یابد. شایان ذکر است که در این حالت قسمت زیادی از سطح لغزش شیب بالادست سد ممکن است از داخل هسته عبور کند که این امر از معایب این روش در مقابل هستهٔ قائم محسوب می‌شود.

V- در صورت ایجاد ترک در هسته، حجم زیادی از پوستهٔ متشکل از مصالح درشت دانه در پایین‌دست هسته قرار خواهد داشت که از این نظر ضریب اطمینان بیشتری را ارائه خواهد کرد.

VI- در صورت استفاده از هسته‌های شیبدار، می‌توان ضخامت لایه‌های فیلتر را کاهش داد و آنها را با سهولت بیشتری اجرا کرد.

ب) معایب هسته‌های شیبدار

I- عمق حفاری پی در محل تماس با هسته تابع شرایط زمین‌شناسی مصالح است و نمی‌توان آن را از قبل تعیین کرد. بنابراین چنانچه عمق حفاری افزایش یابد، اصلاح پی در محل تماس با هسته مشکل‌ساز بوده و ممکن است موجب انتقال بیشتر سطح تماس به سمت بالادست گردد.

II- علی‌رغم افزایش شیب پایین‌دست در صورت استفاده از هستهٔ شیبدار، به‌علت احتمال بیشتر عبور سطح لغزش از داخل هسته در شرایط پایداری شیب بالادست در مقابل افت ناگهانی سطح آب، نیاز به کاهش شیب در این قسمت است که این امر ممکن است از نظر اقتصادی قابل جبران با افزایش شیب پایین‌دست نباشد. در هر حال، مقایسهٔ بین مزایا و معایب حاصل از شیبدار بودن هسته از نظر اقتصادی بر اساس مقاومت برشی نسبی مصالح هسته و پوسته‌های بالادست و پایین‌دست قابل ارزیابی خواهد بود.

ج) مزایای هسته‌های قائم

I- در محل سطح تماس هسته و پی فشار بیشتری حاصل می‌شود، ازاین‌رو احتمال ایجاد پدیدهٔ شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

II- به‌ازای مصرف مقدار معینی مصالح خاکی، هستهٔ قائم نسبت به هستهٔ شیبدار از ضخامت بیشتری برخوردار است.

III- سطح پی زیر هسته مستقل از عمق است، بنابراین می‌توان از پیش عملیات اصلاحی آن را به‌اجرا درآورد.

IV- در صورت نیاز به عملیات تزریق پی یا محل تماس پی با هسته در مراحل بعد، انجام عملیات با حفر گمانه‌های تزریق قائم با سهولت بیشتری نسبت به گمانه‌های تزریق مورب صورت می‌گیرد.

د) معایب هسته‌های قائم

I- به‌طور کلی، مزایای هسته‌های شیبدار در هسته‌های قائم قابل حصول نیست و در مجموع یک هستهٔ قائم موجب کاهش شیب پایین‌دست و افزایش حجم مصالح مصرفی خواهد شد.

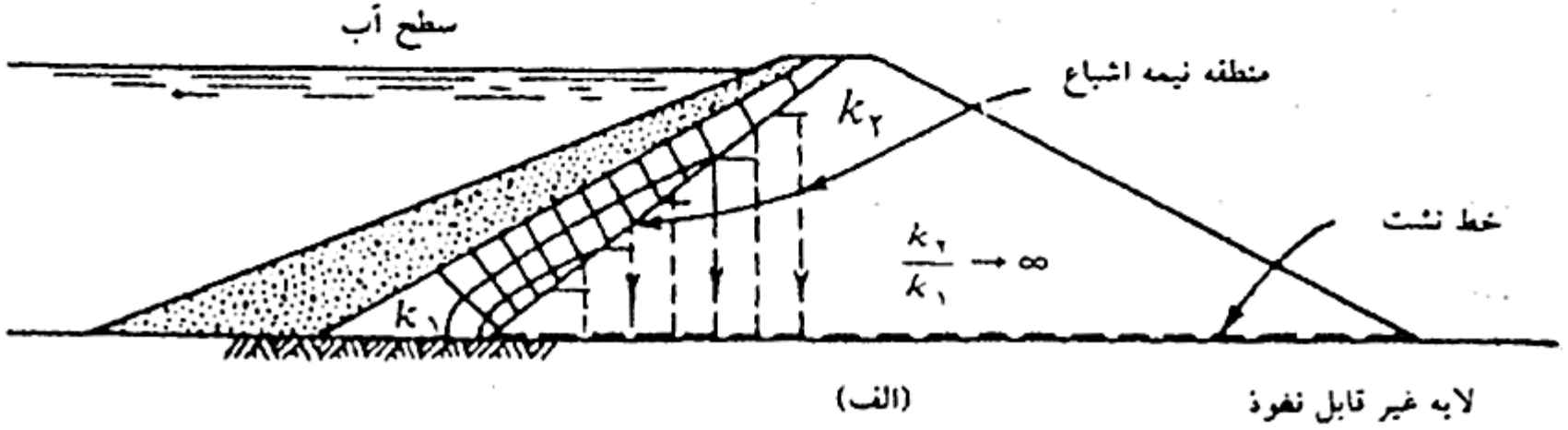
II- اختلاف نشست بین مصالح هسته و پوسته ممکن است موجب ایجاد پدیدهٔ طاق‌زدگی و ترک در امتداد موازی محور سد شود.

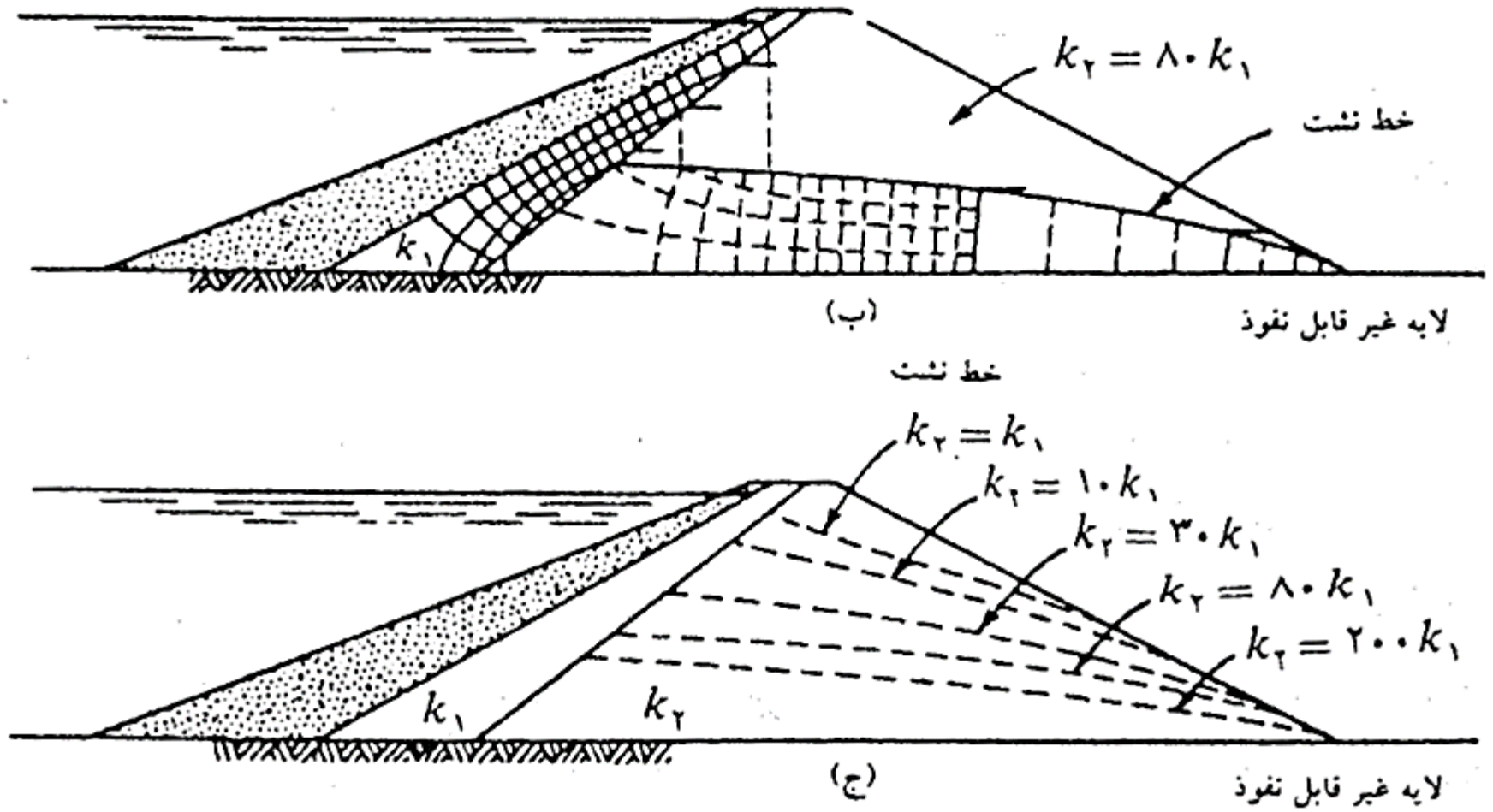
در مجموع، علی‌رغم کلیهٔ مواردی که به‌عنوان معایب و مزایای هسته‌های قائم و شیبدار مطرح شد، هنوز یک نظریهٔ منسجم و هماهنگ در مورد ارجحیت قاطع هیچ‌یک از دو روش ارائه نشده و در این باره بین مهندسان طراح و محققان اختلاف نظر وجود دارد. در واقع، علاوه بر مسائل مطروحه، لازم است در انتخاب موقعیت استقرار و شکل هسته، عوامل مختلفی از جمله شرایط خاص زمین‌شناسی و ژئوتکنیک محل، شرایط اقلیمی، مسائل و امکانات اجرایی موجود، کیفیت و کمیت مصالح قرضه، شرایط توپوگرافی محل احداث و ... مد نظر قرار گیرد.

۷-۲-۴- نفوذ پذیری نسبی هسته

بر اساس تحقیقات انجام‌شده، موقعیت نسبی خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست، تابع نسبت نفوذپذیری هسته و پوستهٔ مذکور است، به گونه‌ای که هرچه نفوذپذیری هسته نسبت به نفوذپذیری پوستهٔ پایین‌دست کمتر باشد، خط نشت در این پوسته در موقعیت پایین‌تری قرار می‌گیرد و بر عکس با افزایش نفوذپذیری نسبی هسته و پوسته، خط نشت در موقعیت بالاتری استقرار خواهد یافت. شکل ۷-۲ موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست یک سد خاکی ناحیه‌بندی‌شده را متناسب با نسبت نفوذپذیری هسته و پوسته (k_1 و k_2) نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت نفوذپذیری $\frac{k_2}{k_1}$ از ۱ به ۲۰۰، موقعیت خط نشت در پوسته پایین‌دست به میزان زیادی پایین آمده است.

در شکل ۷-۲ الف، نسبت دو نفوذپذیری تقریباً معادل بی‌نهایت و در قسمت (ب) این نسبت معادل ۸۰ فرض شده است و همان‌طورکه مشاهده می‌شود، خط نشت در حالت (الف) کاملاً پایین افتاده و در سطح پی قرار دارد، درحالی‌که در قسمت (ب) خط نشت در سطح بالاتری قرارگرفته است. در شکل ۷-۲ ج، موقعیت خط نشت برای نسبت‌های مختلف نفوذپذیری ترسیم گردیده است. بدین ترتیب مشاهده می‌شود برای آنکه موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست به‌نحو کاملاً مؤثری پایین کشیده شود، لازم است نفوذپذیری آن حداقل چندصد برابر نفوذپذیری هسته باشد [۶].





شکل ۷-۲- موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست بر حسب نسبت نفوذپذیری هسته و پوسته [۶]

۷-۲-۵- کاربرد مصالح غیرخاکی برای هسته

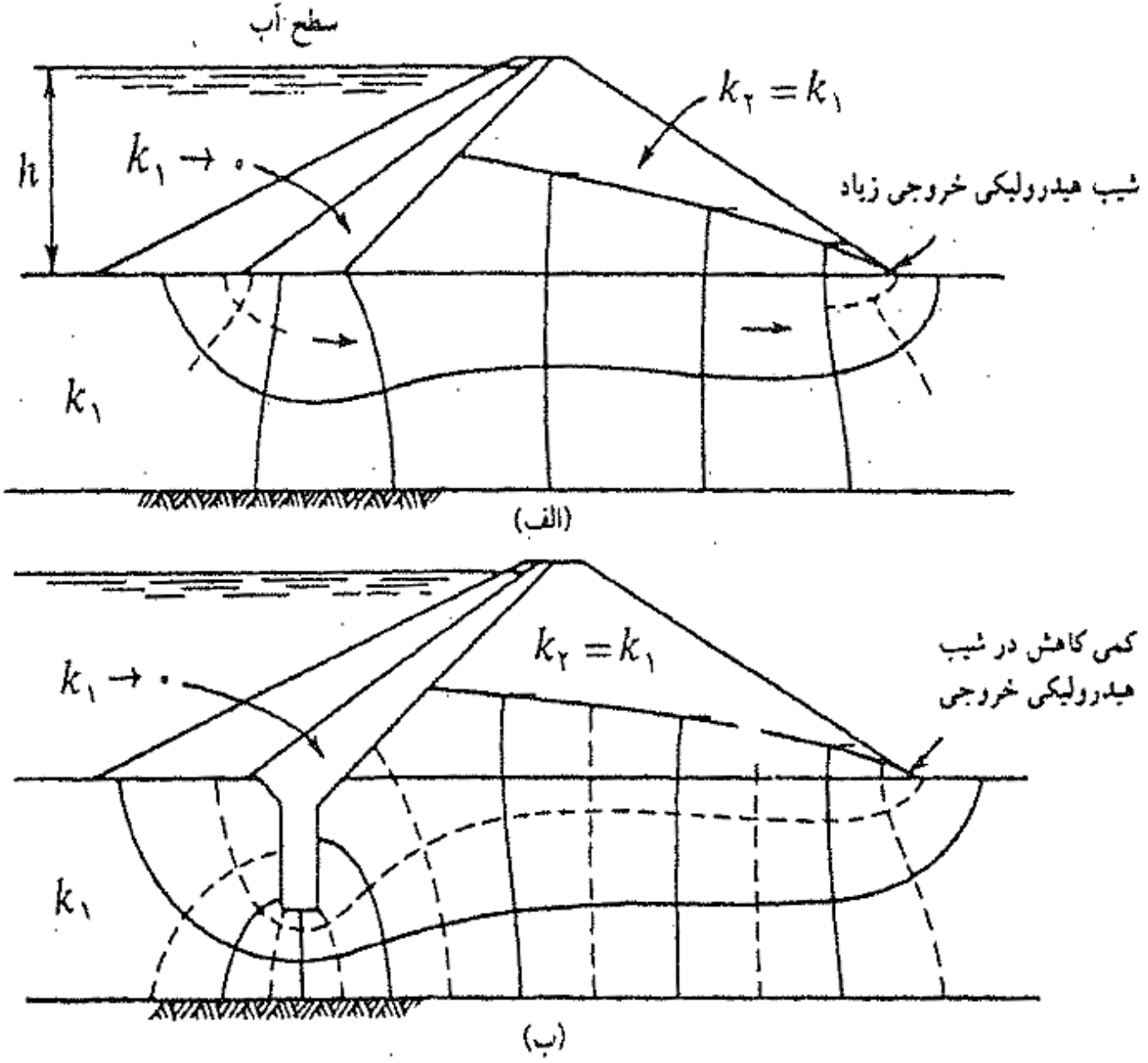
در گذشته استفاده از مصالح غیرخاکی نظیر بتن و فولاد به‌عنوان هستهٔ سدهای خاکی مورد توجه بود که امروزه هریک به‌دلایل فنی و اقتصادی خاص، منسوخ شده و تقریباً در تمام موارد استفاده از مصالح خاکی ارجحیت یافته است. در این خصوص بویژه استفاده از مصالح بتنی به‌علت انعطاف‌ناپذیری و عدم هماهنگی با تغییر شکل‌پذیری سایر قسمت‌های سد خاکی منسوخ گردیده است. در زمینهٔ استفاده از صفحات آب‌بند فلزی نیز علاوه بر هزینهٔ بالا و دوام مصالح، عدم امکان آب‌بندی کامل بین قطعات مجاور، به‌عنوان مشکل اصلی، موجب شده تا این مصالح نیز دیگر مورد توجه طراحان سد قرار نگیرد. مع‌هذا در سال‌های اخیر با پیشرفت صنعت پتروشیمی، امکان ساخت صفحات آب‌بند از نوع ژئوممبران [1] با دوام کافی و قدرت اتصال مؤثر بین قطعات مجاور فراهم گردیده و بتدریج استفاده از آن در صنعت سدسازی مورد توجه قرار می‌گیرد. البته در کاربرد این مواد نیز در حال حاضر هنوز مشکلاتی نظیر حساسیت مواد ژئوسنتتیک نسبت به اشعهٔ ماورای بنفش (موجود در نور خورشید) و نیز ضعف آن نسبت به پاره‌شدگی و سوراخ شدن مطرح است که باید به مرور برطرف شود. البته قیمت این مصالح نیز قابل رقابت با مصالح ارزان قیمت طبیعی نیست.

۷-۳- استفاده از ترانشهٔ آب‌بند Cut-off Trench

ترانشه و دیوارهٔ آب‌بند در سدسازی موقعی مطرح می‌شود که به‌دلیل ضخامت قابل توجه مصالح آبرفتی نفوذپذیر در پی، بدنهٔ سد به‌اجبار روی مصالح مذکور استقرار یافته و لازم است برای جلوگیری از نشت آب از طریق پی شیوهٔ آب‌بند مناسبی به‌کار گرفته شود. به‌طور کلی، از آنجا که آبرفت بستر رودخانه‌ها عموماً متشکل از مصالح درشت دانهٔ ماسه، شن، قلوه‌سنگ و حتی گاهی قطعات خیلی بزرگتر است، ازاین‌رو مقدار زیادی آب از طریق جریان نشت از پی آبرفتی تلف خواهد شد که این امر علاوه بر آثار منفی اقتصادی، ممکن است از نظر پایداری نیز سد را با مشکل مواجه سازد. در چنین شرایطی، در صورت محدود بودن ضخامت آبرفت، استفاده از ترانشهٔ آب‌بند قابل طرح است.

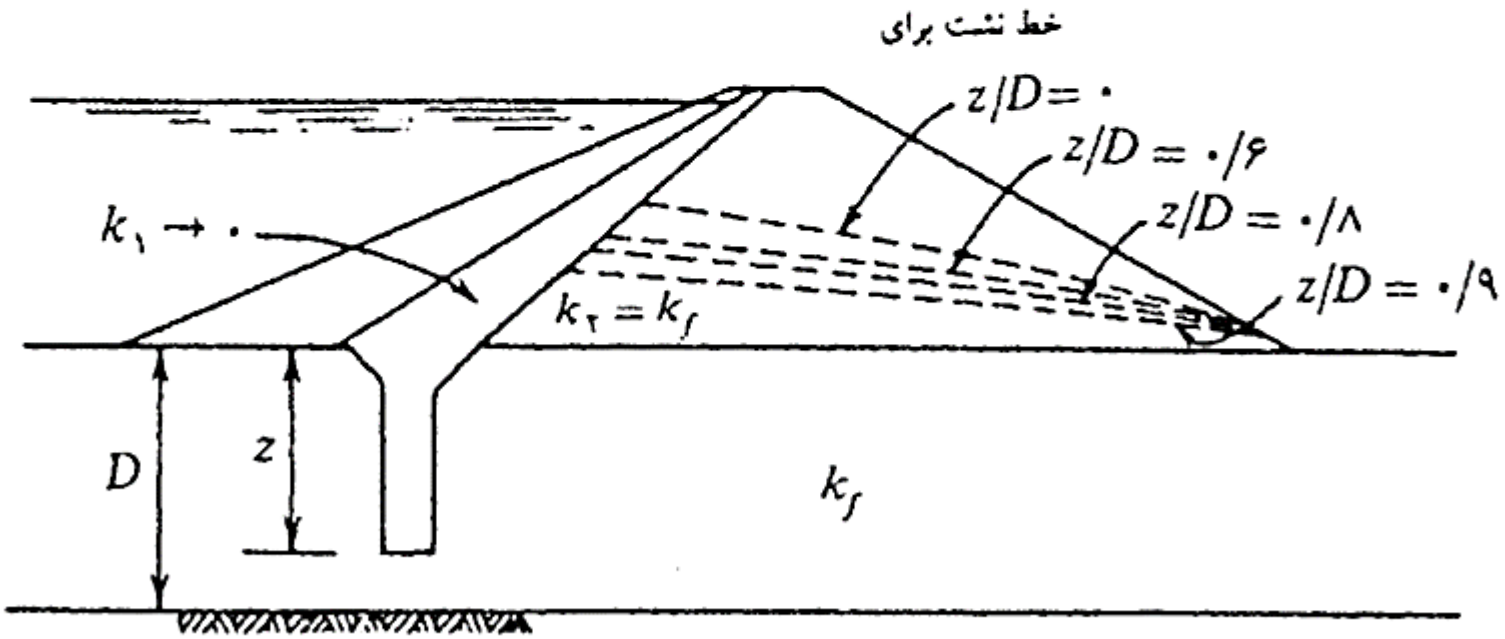
ترانشهٔ آب‌بند، گودالی است که در زیر هستهٔ سد در داخل لایهٔ آبرفتی نفوذپذیر در سرتاسر عرض رودخانه تا رسیدن به سنگ بستر یا لایهٔ غیرقابل‌نفوذ حفر می‌شود و پس از رسیدن به عمق مطلوب، با مصالح نفوذناپذیری که ممکن است همجنس با مصالح هستهٔ سد یا مرغوب‌تر از آن باشد، پر می‌گردد و در واقع مثل آن است که هسته به‌صورت ریشه در داخل پی امتداد یافته است.

شکل ۷-۳ شبکهٔ جریان یک سد خاکی را که بر روی بستر آبرفتی نفوذپذیر ساخته شده، برای دو حالت وجود و عدم وجود ترانشهٔ آب‌بند نشان می‌دهد. در قسمت (الف) شکل، شبکهٔ جریان در حالتی‌که پی فاقد ترانشهٔ آب‌بند است، ترسیم شده و در قسمت (ب)، برای حالتی که ترانشهٔ آب‌بند تا ۶۰ درصد عمق لایهٔ آبرفت پی امتداد یافته، ترسیم گردیده است [۶].



شکل ۷-۳- شبکهٔ جریان سد خاکی و پی در حالت وجود و عدم وجود ترانشهٔ آب‌بند

هرچه نسبت عمق ترانشهٔ آب‌بند در پی به ضخامت لایهٔ نفوذپذیر، یعنی $\frac{z}{D}$ بیشتر باشد، مقدار نشت از پی کمتر است و در نتیجه به‌دلیل افت انرژی بیشتر، خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست هسته در موقعیت پایین‌تری قرار خواهد گرفت. در شکل ۷-۴ موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست برای نسبت‌های مختلف عمق نفوذ ترانشه به عمق قسمت قابل نفوذ پی (z/D) ترسیم شده است [۶].



شکل ۷-۴- موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست بر حسب نسبت $\frac{z}{D}$ [۶]

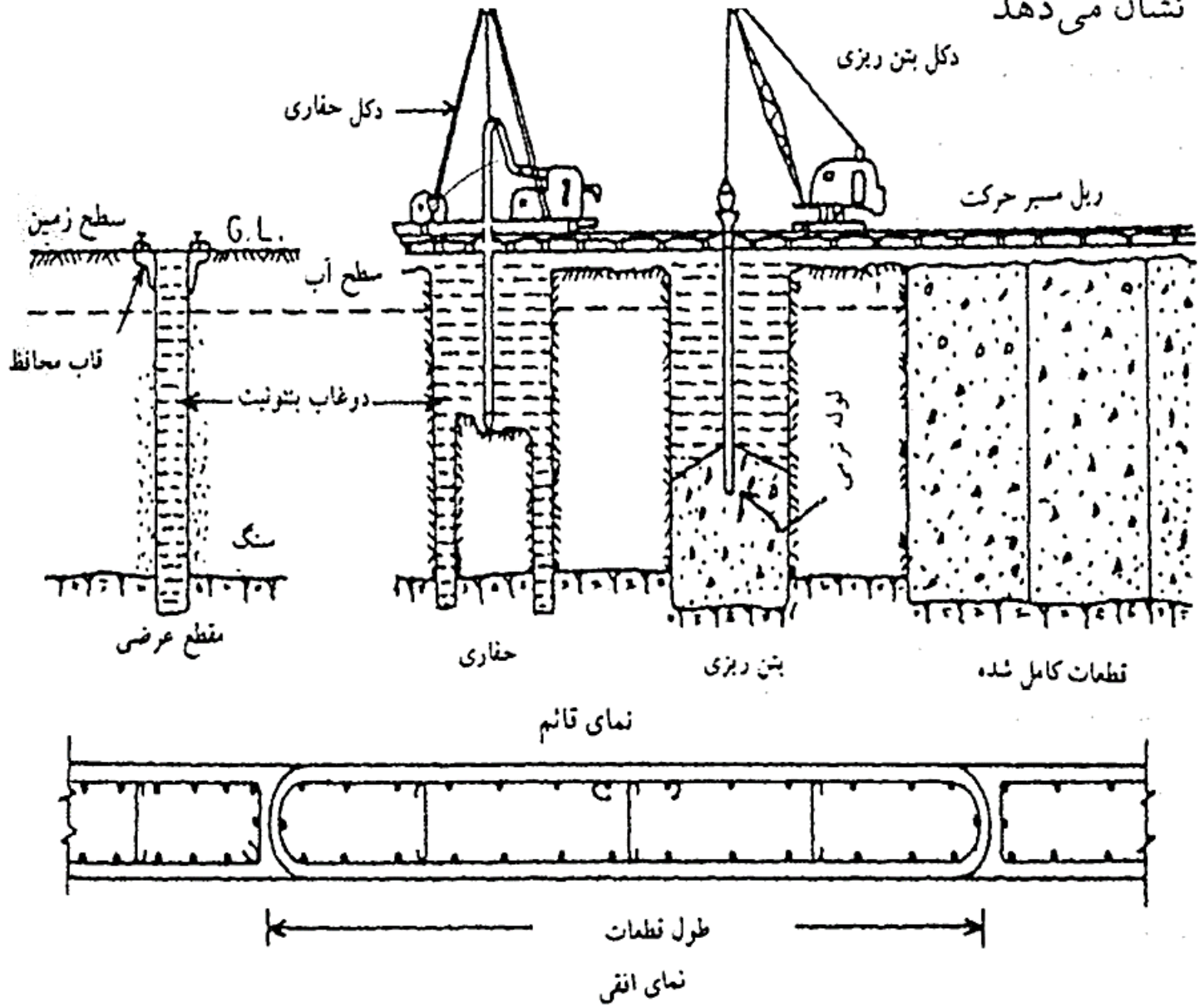
همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، برای پایدار بودن ترانشه‌های روباز، لازم‌است جدار آن دارای شیب مناسبی‌با توجه به کیفیت مصالح مورد برخورد باشد. به‌طور معمول شیب ۱:۱ تا ۱/۵:۱ (۱/۵ افقی‌و ۱ قائم) در اغلب موارد پاسخگو خواهد بود. عرض ترانشه نیز در هر مقطع باید برای انجام عملیات خاکی‌و مانور ماشین‌آلات حفاری و خاک‌کوبی مناسب باشد و به‌علاوه با توجه به مشابهت نقش ترانشهٔ آب‌بند و هسته در سدهای خاکی، باید از معیارهای انتخاب ضخامت هسته نیزتبعیت کند. درمواردی که مصالح آبرفتی اطراف ترانشه بسیار درشت بافت است و اختلاف زیادی بین دانه‌بندی مصالح پر شده در ترانشه و مصالح طبیعی پی وجود دارد، لازم است حداقل در شیب پایین‌دست ترانشه از فیلتر مناسب به‌منظور جلوگیری از مهاجرت ذرات و ایجاد پدیدهٔ فرسایش درونی استفاده شود.

ترانشه‌های باز تاکنون برای عمق‌های حداکثر ۲۰ تا ۲۵ متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و برای عمق‌های بیشتر استفاده از سایر روش‌ها توصیه می‌شود.

۷-۴- استفاده از دیوارهٔ (دیافراگم) آب بند Diaphragm Wall Cut-off

دیواره‌های آب‌بند نازک یا دیافراگم‌ها، صفحات نازک متشکل از نوعی بتن انعطاف‌پذیراند (بتن پلاستیک) که در ترانشه‌های حفرشده با روش حفاری بسته در بسترهای آبرفتی رودخانه تا اعماق نسبتاً زیاد اجرا می‌شوند. ضخامت این نوع دیواره بین حدود ۰/۶ تا ۱/۵ متر متغیر است و عمق آن متناسب با نیاز و مشخصات فنی دستگاه‌های حفاری و بتن‌ریزی می‌تواند تا حدود ۱۵۰ متر یا بیشتر باشد. هدف این نوع دیواره‌ها مسدود کردن مسیر جریان تراوش آب از بالادست به پایین‌دست است و احتمال دارد برای خشک ساختن محل حفاری روباز (مانند سد ۱۵ خرداد) یا آب‌بندی آبرفت‌های عمیق در زیر هسته مورد استفاده قرار گیرند.

شکل ۷-۵ چگونگی روش اجرای این نوع دیواره‌های آب‌بندی و مراحل کار مربوطه را نشان می‌دهد



شکل ۷-۵- روش اجرای دیوارهٔ نازک (دیافراگم) آب بند

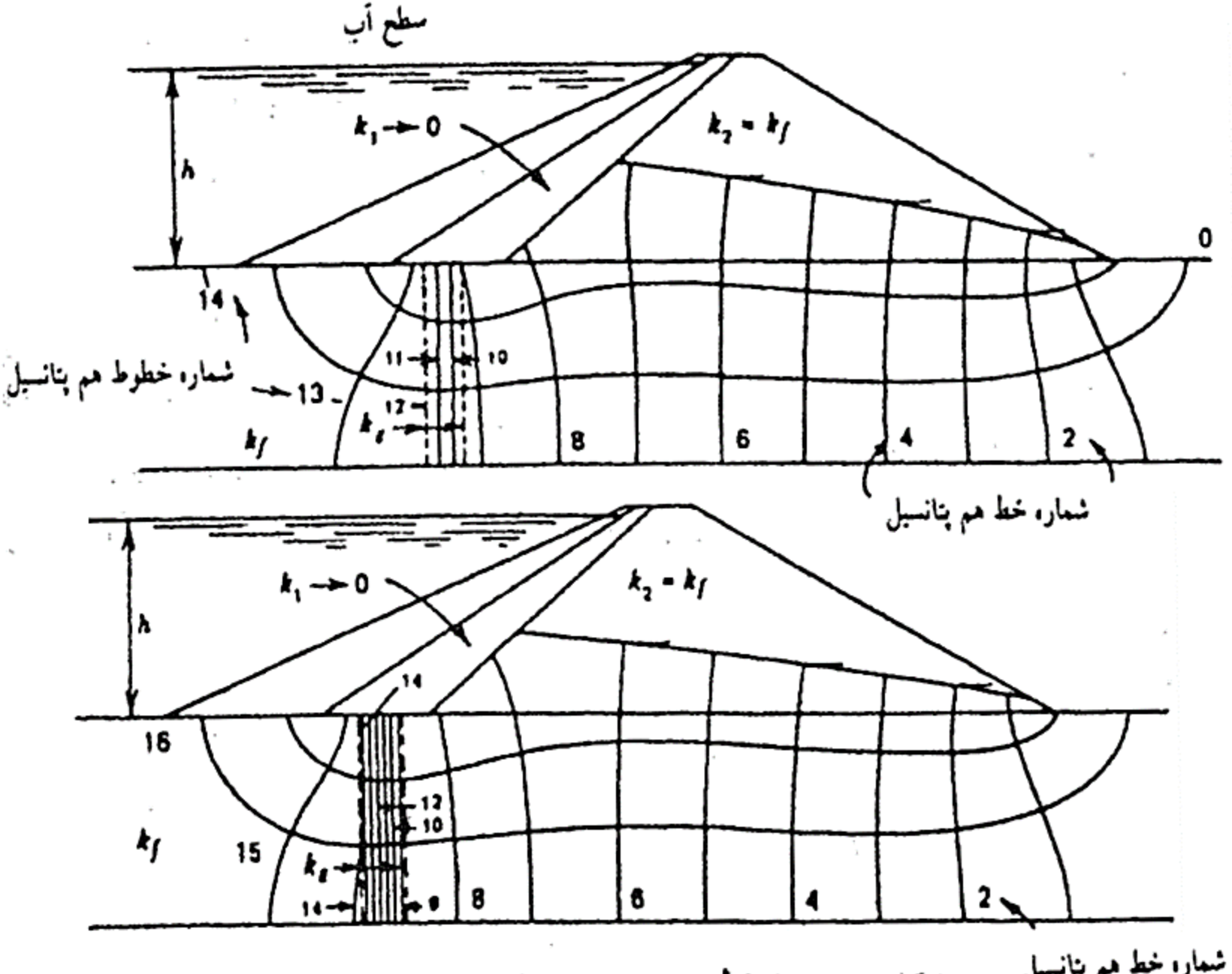
۷-۵- استفاده از رویهٔ آب بند در سطح بالادست

چنانچه مصالح مناسب برای احداث سد خاکی همگن (متشکل از مصالح ریزدانه) یا سد خاکی ناحیه‌بندی‌شده (با هستهٔ خاکی) در محل موجود نباشد و در مقابل مصالح سنگی مرغوب به میزان زیاد و با قیمت مناسب قابل دسترس باشد، استفاده از سدهای سنگریز مطرح می‌شود. در این نوع سد تمام بدنهٔ اصلی سد از قطعات سنگی ریز و درشت ساخته شده و برای آب‌بندی آن لازم است از یک لایهٔ غیرقابل‌نفوذ در روی سطح بالادست استفاده شود. به‌طور معمول این لایه عموماً از نوع بتنی و بعضاً ممکن است از مصالح آسفالتی یا ژئوممبران باشد. نظر به اینکه در سال‌های اخیر این روش احداث سد در بسیاری از نقاط جهان از اهمیت خاصی برخوردار شده است، مشخصات طراحی و اجرایی آن به تفصیل در فصل هفدهم مورد بحث قرار می‌گیرد.

۷-۶- استفاده از پردهٔ تزریق Grout Curtain

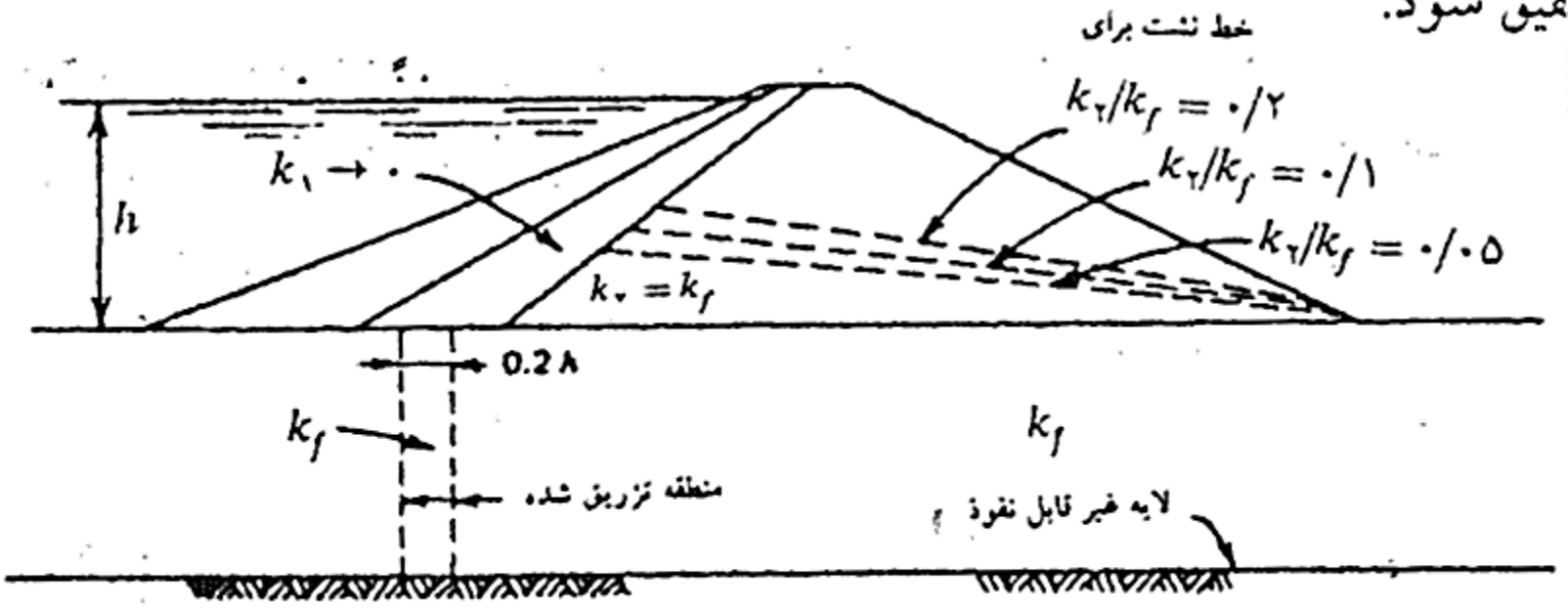
ایجاد پردهٔ تزریق یکی از روش‌های مقابله با نشت آب در پی سدهای خاکی است. این نوع پرده با تزریق دوغاب سیمان، رس یا مواد شیمیایی مناسب در زیر سدها و به‌منظور کاهش نشت ایجاد می‌شود. این روش کنترل نشت تاکنون در احداث اغلب سدهای بتنی به‌منظور کاهش نشت از پی‌های سنگی مورد استفاده قرار گرفته و امروزه در ساخت سدهای خاکی نیز برای ایجاد پردهٔ نفوذناپذیر در زیر هستهٔ سد مورد استفاده است.

استفاده کرد. برای مثال شبکهٔ جریان زیر یک سد خاکی دارای پردهٔ تزریق در دو حالت در شکل ۷-۷ رسم شده است. در حالت (الف) نفوذپذیری پرده k_g برابر $\frac{۲}{۱۰}$ نفوذپذیری پی، k_f و در حالت (ب) نفوذپذیری پرده معادل $\frac{۱}{۱۰}$ نفوذپذیری پی فرض گردیده است.



شکل ۷-۷- شبکهٔ جریان در پی یک سد خاکی دارای پردهٔ تزریق

می‌گیرد. در شکل ۷-۸ موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست یک سد خاکی بر حسب نسبت‌های مختلف $\frac{k_x}{k_f}$ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، حتی موقعی‌که نفوذپذیری به میزان ۵ درصد نفوذپذیری مصالح پی کاهش یافته ($\frac{k_s}{k_f} = ۰/۰۵$)، موقعیت خط نشت تغییر زیادی نکرده است. این امر نشان می‌دهد که اصولاً ایجاد پردهٔ تزریق به‌تنهایی تأثیر چندانی بر کنترل و کاهش نشت ندارد و لازم است با روش‌های دیگر تلفیق شود.



شکل ۷-۸- موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست سد بر حسب نسبت $\frac{k_x}{k_f}$

برای افزایش کارایی روش تزریق در شرایط متفاوت، تاکنون از مواد مختلفی استفاده شده است. این مواد عموماً شامل سیمان پرتلند، رس یا بنتونیت، سیمان - بنتونیت یا سیمان - رس، رس یا بنتونیت همراه با مواد شیمیایی و مواد شیمیایی خالص است. مواد شیمیایی مورد استفاده نیز عموماً مواد قابل گیرش مانند سیلیکات سدیم و ترکیبات مشابه است که تحت نام‌های تجارتی مختلف در بازار عرضه می‌شود.

به‌طور کلی مشخصات دوغاب تزریق بر اساس عوامل زیر تعیین می‌شود:

الف) نفوذپذیری	Groutability
ب) سیالیت	Fluidity
ج) پایداری	Stability
د) مقاومت	Resistance

الف) تزریق پذیری [۱۴][1]

این عامل قابلیت نفوذ دوغاب را در مصالح دارای ابعاد خلل وفرج خاص و نفوذپذیری معین نشان می‌دهد. عامل‌مذکور برحسب نسبت قطرذرات جامدموجود در دوغاب به قطراندازهٔ خلل‌و فرج‌محیط مورد تزریق‌تعریف می‌شود.براساس این معیار،برای ایجاد امکان نفوذ دوغاب به داخل‌محیط مورد تزریق لازم است رابطهٔ زیر برقرار باشد:

$$\frac{d_{۱۵}\ \text{مصالح مورد تزریق}}{d_{۱۵}\ \text{مواد جامد دوغاب تزریق}} \geq ۱۵ \qquad (۲-۷)$$

در عمل نسبت فوق بین ۵-۲۰ توصیه شده و بسیاری از محققان اعتقاد دارند که لازم است حد بالای این نسبت به ارقام قابل‌قبولی متناسب‌با کیفیت محیط مورد تزریق محدود شود و چنانچه ابعاد خلل‌و فرج محیط خیلی بزرگ باشد (مانند تزریق در شن یا قلوه‌سنگ)، لازم است از دوغاب درشت‌تر مانند مخلوط ماسه و سیمان استفاده شود. در برخی موارد که محیط مورد تزریق دارای فضاهای خیلی بزرگ باشد، احتمالاً باید از روش‌های خاص برای افزایش کارایی تزریق استفاده کرد. برای مثال در عملیات تزریق در پی سدخاکی لار، به‌علت برخورد با فضاهای بسیار بزرگ (غارهای آهکی)،از تزریق قطعات اسفنج فشرده همراه با دوغاب سیمان استفاده شده است.

ب) سیالیت [۲]

این معیار سهولت جریان وقابلیت پمپ شدن دوغاب تزریق را نشان می‌دهد و معمولاً بر حسب لزجت بیان می‌شود. هرچه لزجت دوغاب کمتر باشد، سیالیت آن بیشتر است.

ج) پایداری [۱]

منظور از پایداری، قدرت دوغاب در جلوگیری از پدیدهٔ جداشدگی [۲] و گیرش پیش از هنگام است. دوغاب تزریق باید همگنی خود را تا نفوذ به دورترین فواصل مورد تزریق حفظ کند و قبل‌از نفوذ به مناطق مورد نظر، وارد مرحلهٔ گیرش نشود. برای ایجاد این خاصیت ممکن است مواد پراکنده‌ساز [۳] یا پایدارساز به دوغاب اضافه شود.

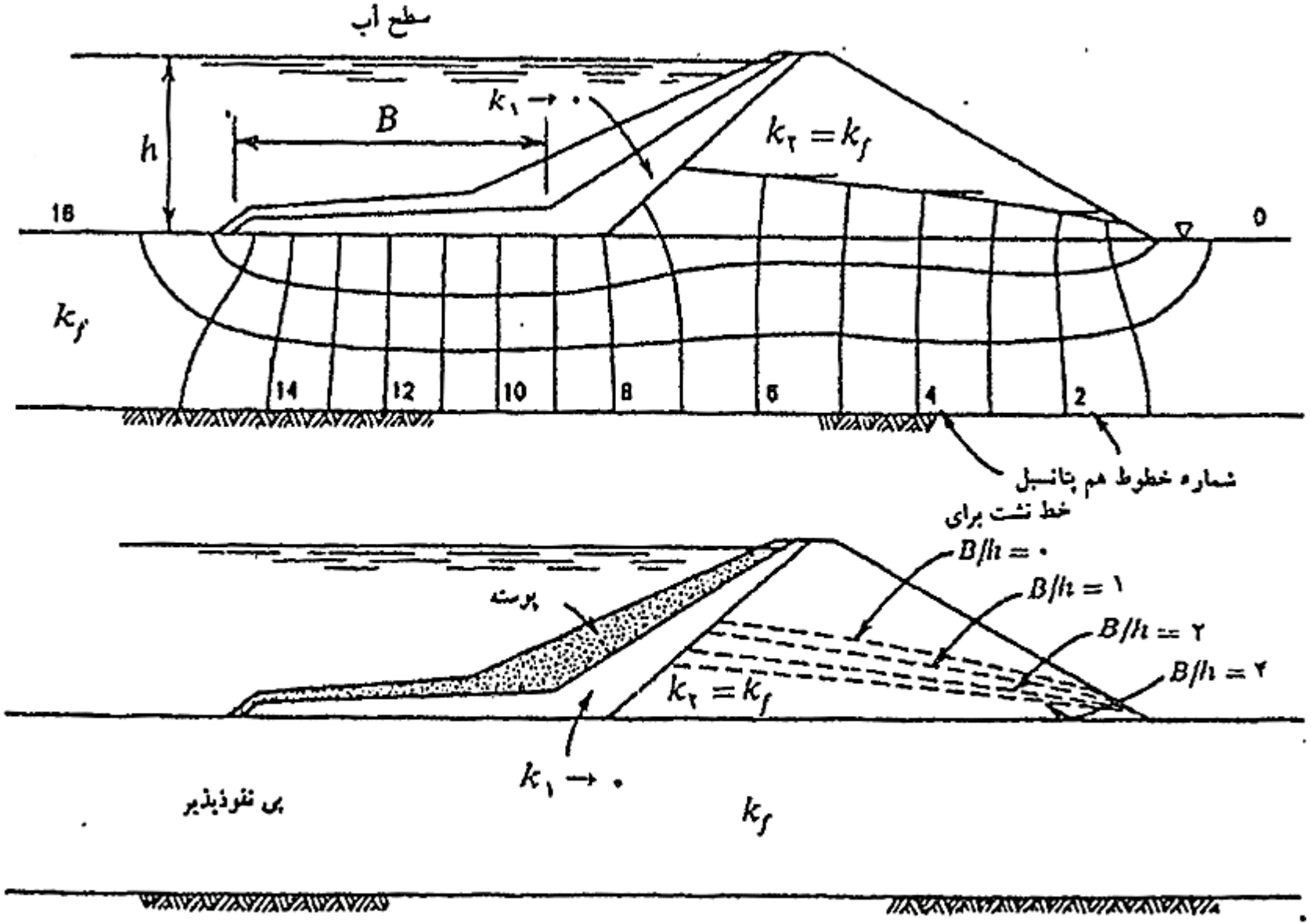
د) مقاومت

مواد تزریق باید پس از نفوذ به ناحیهٔ مورد نظر و گیرش، دارای مقاومت کافی برای مقابله با فشار آب و نیروی نشت باشد و این مقاومت به مرور زمان کاهش نیابد و بر اثر واکنش‌های شیمیایی تضعیف نشود. به‌طور معمول مقاومت دوغاب‌های حاوی سیمان پرتلند بر اثر پیشرفت فرایند هیدراتاسیون سیمان افزایش می‌یابد، ازاین‌رو از این نظر مشکلی ندارند، اما دوغاب‌های رسی یا بنتونیتی ممکن است در معرض کاهش مقاومت قرار گیرند و ضروری است که با افزایش سیمان یا مواد شیمیایی مناسب از این نظر، تقویت گردند.

۷-۷- استفاده از رویه با نفوذپذیری بسیار کم در کف مخزن

یکی از روش‌های کاهش نشت از زیر سدهای خاکی ساخته‌شده بر روی پی‌های آبرفتی با نفوذپذیری زیاد، استفاده از یک لایهٔ پوششی با نفوذپذیری خیلی کم در سطح بستر رودخانه و کف مخزن در بالادست محور سد و اتصال آن به هستهٔ میانی است. نقش این نوع پوشش افزایش طول خطوط جریان و در نتیجه افزایش افت پتانسیل و کاهش انرژی آب است که در نهایت موجب کاهش تلفات و کاهش فشار آب منفذی و خطرهای مرتبط با آن می‌گردد. این نوع پوشش که گاهی پتوی رسی [۱] نامیده می‌شود، موقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که اولاً بدنهٔ سد مستقیماً روی یک لایهٔ آبرفتی نفوذپذیر با ضخامت زیاد قرار گیرد و ثانیاً استفاده از سایر روش‌های آب‌بندی و کنترل نشت (مانند ترانشهٔ آب‌بند) به دلایل فنی یا اقتصادی میسر نباشد. در بعضی موارد نیز ممکن است این روش به‌عنوان مکمل همراه با ترانشهٔ آب‌بند ناقص [۲] مورد استفاده قرار گیرد.

درجهٔ تأثیر این روش در کنترل نشت بستگی به طول لایهٔ پوششی و نفوذپذیری آن دارد. هرچه نفوذپذیری این لایه نسبت به مصالح زیرین کمتر و طول قسمت پوشش شده بیشتر باشد، اثر آن در کاهش نشت و فشار منفذی بیشتر خواهد بود. شکل ۷-۹ اثر طول لایهٔ پوششی کم‌نفوذ را در افزایش طول خطوط جریان و کاهش نشت نشان می‌دهد. در قسمت(الف)، شبکهٔ جریان در زیر یک سد خاکی که مجهز به رویهٔ نفوذناپذیر در کف مخزن می‌باشد، نشان داده شده است. این رویهٔ نفوذناپذیر به‌طور مستقیم به هستهٔ سد اتصال یافته و همجنس آن است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، وجود رویهٔ نفوذناپذیر موجب افزایش طول خطوط جریان و در نتیجه افزایش تعداد خطوط هم پتانسیل گردیده است. در قسمت (ب)، اثر تغییرات طول رویهٔ نفوذناپذیر (B) نسبت به ارتفاع آب (h) بر موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست سد نشان داده شده و همان‌طورکه مشاهده می‌شود، با افزایش این نسبت، خط نشت در موقعیت پایین‌تری قرار می‌گیرد [۶].

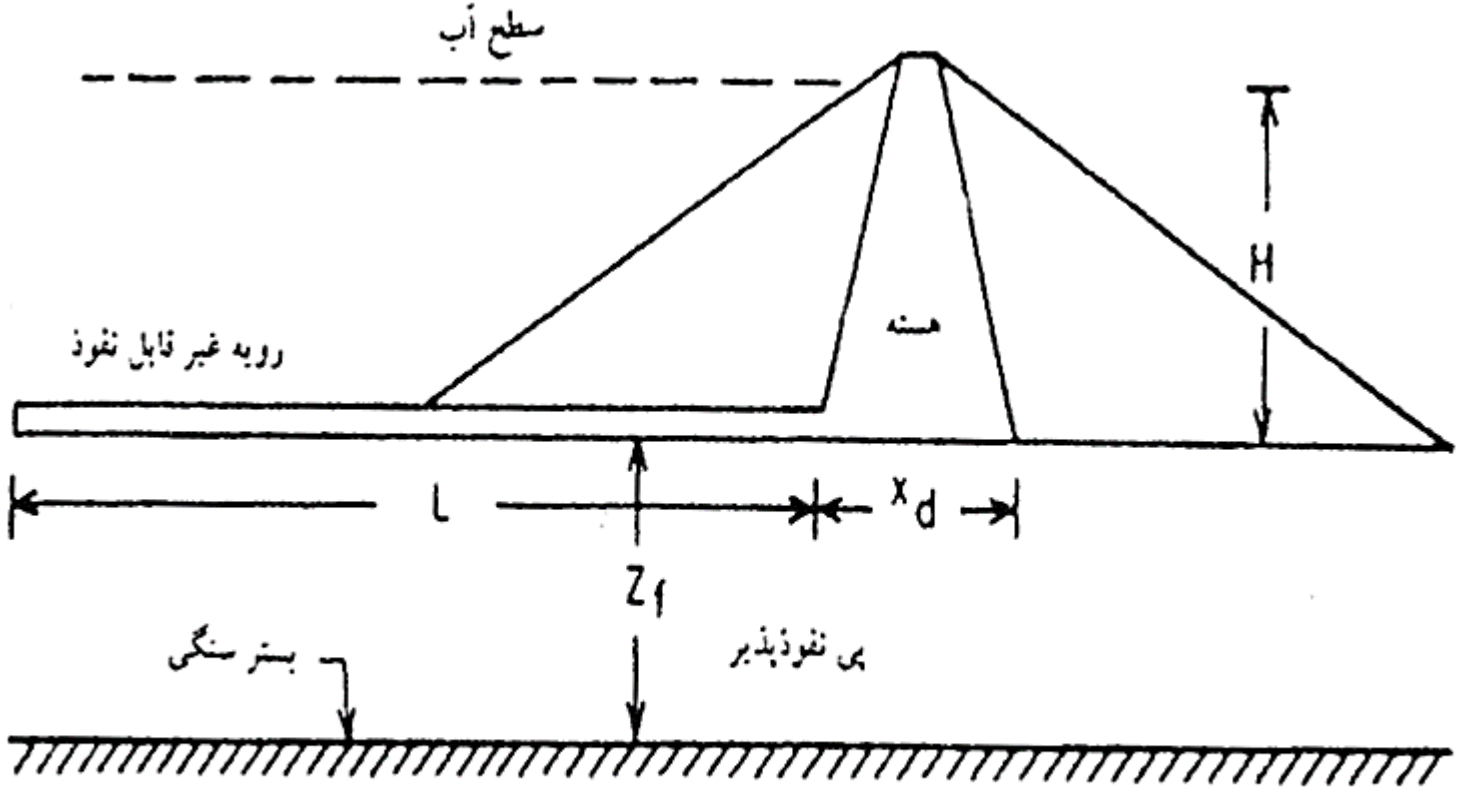


شکل ۷-۹- اثر طول رویهٔ نفوذ ناپذیر بر موقعیت خط نشت در پوستهٔ پایین‌دست [۶]

ضخامت و طول رویهٔ نفوذناپذیر، به ارتفاع آب در پشت سد بستگی دارد. بر اساس پیشنهاد سازمان عمران آمریکا، ضخامت رویهٔ نفوذناپذیر بهتر است در حدود ۱۰ درصد ارتفاع آب باشد و از حداقل یک متر نیز کمتر نباشد (درصورتی‌که رویهٔ مذکور از همان مصالح هستهٔ سد ساخته شود). طول رویه نیز برای ایجاد کاهش مؤثر در مقدار نشت و فشار منفذی معادل حدود ده برابر ارتفاع آب در پشت سد توصیه شده است.

اثر طول و ضخامت رویهٔ نفوذناپذیر بر کاهش نشت را می‌توان با محاسبات ساده نیز ارزیابی کرد. ساده‌ترین روش برای حل مسئله آن است که رویه، کاملاً غیرقابل‌نفوذ و افت انرژی آب از طریق پی خطی فرض شود. در این صورت مطابق شکل ۷-۱۰، چنانچه ضخامت مصالح آبرفتی پی برابر Z_f و ضخامت هستهٔ سد در کف معادل x_d باشد، بنابر قانون دارسی مقدار جریان نشت عبوری از زیر سد برابر است با :

$$q = k_f \cdot \frac{H}{x_d} \cdot Z_f \qquad (۳-۷)$$



شکل ۷-۱۰- رویهٔ نفوذ ناپذیر در بستر بالادست

در رابطهٔ فوق، q مقدار کل دبی نشت، H ارتفاع آب در پشت سد و k_f نفوذپذیری مصالح پی است. حال چنانچه یک رویهٔ نفوذناپذیر به‌طول L در سطح بستر بالادست ایجاد شود، مقدار نشت بنابر رابطه زیر به pq کاهش می‌یابد که در آن p درصد کاهش را نشان می‌دهد:

$$pq = k_f \frac{H}{L + X_d} . Z_f \qquad (۴-۷)$$

از تلفیق دو رابطهٔ ۷-۳ و ۷-۴ می‌توان نوشت :

$$p . q = \frac{X_d}{L + X_d} . q$$

یا :

$$p = \frac{X_d}{L + X_d} \qquad (۵-۷)$$

و :

$$L = \frac{۱ - p}{p} . X_d \qquad (۶-۷)$$

بر اساس رابطهٔ ۷-۵، میزان کاهش در مقدار نشت با طول مسیر نشت، رابطهٔ معکوس دارد و برای مثال چنانچه در نظر باشد تا مقدار نشت به حدود ۱۰ درصد کل دبی نشت کاهش یابد، لازم است کل طول مسیر نشت ۱۰ برابر افزایش یابد و طول رویهٔ نفوذناپذیر ۹ برابر ضخامت هسته باشد.

II- روش‌های کنترل و جمع‌آوری آب نشتی

علی‌رغم‌کلیهٔ تمهیداتی‌که در قسمت I تشریح شد، به‌علت قابل نفوذ بودن مصالح، همواره مقداری آب از طریق بدنه و پی سد، به بخش‌های پایین‌دست هسته نفوذ می‌کند. دراین‌بخش روش‌های‌کنترل‌و جمع‌آوری‌این‌آب‌ها با هدف خشک‌سازی قسمت‌های پایین‌دست سد و کاهش‌فشار منفذی درنواحی مذکور و افزایش پایداری تشریح می‌شود.

۷-۸- کنترل آب نشتی با استفاده از زهکش‌ها

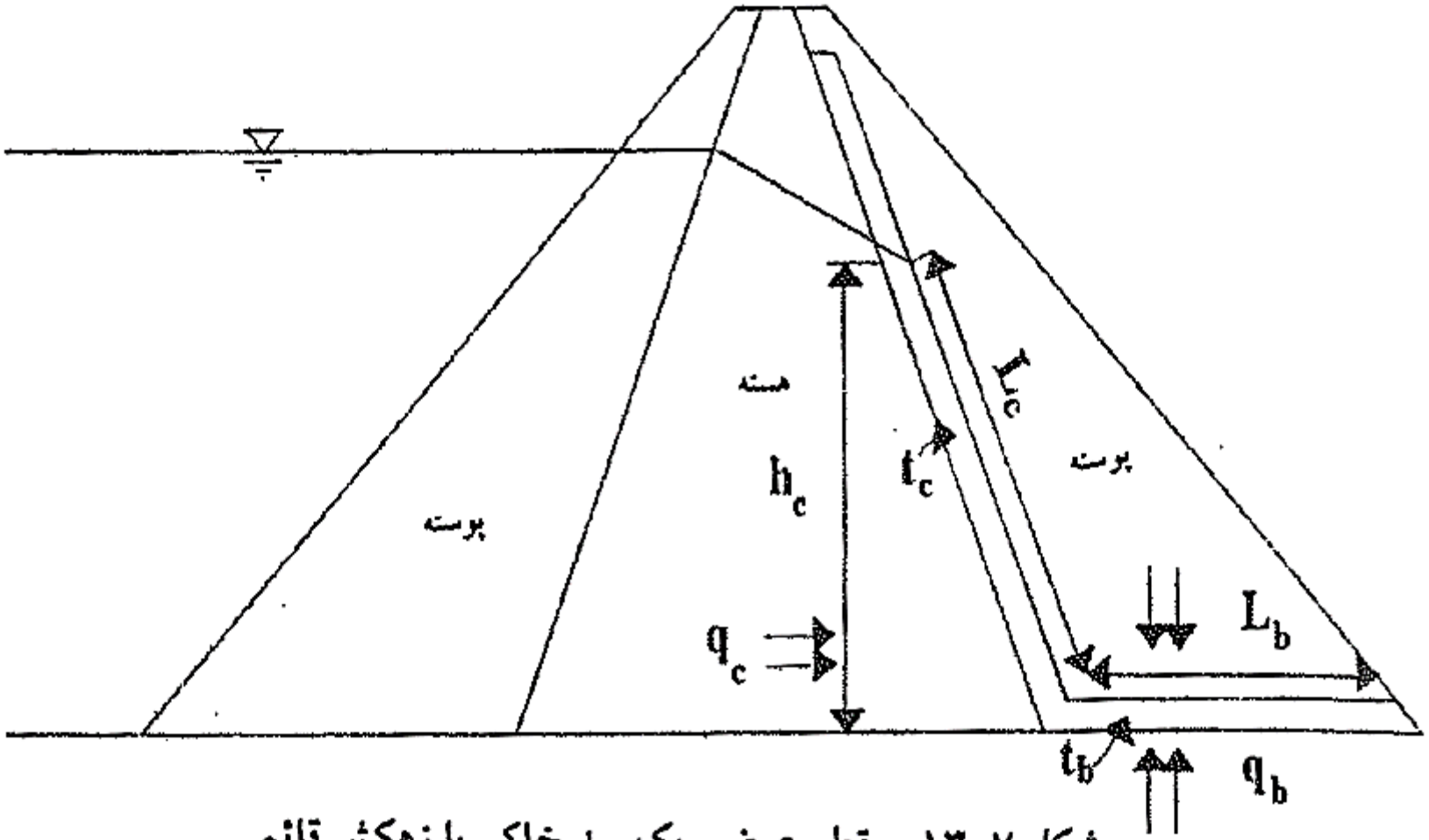
سیستم‌های زهکشی در بدنه و پی سدهای خاکی، تمهیداتی هستند که برای جمع‌آوری و هدایت آب‌های نشت‌یافته به نواحی پایین‌دست طراحی و به‌اجرا درمی‌آیند. این سیستم‌ها اصولاً شامل قرار دادن یک لایه مصالح درشت دانه با نفوذپذیری خیلی زیاد و ابعاد معین در قسمت خاصی از بدنهٔ سد و پی است، به‌گونه‌ای که لایهٔ مذکور در مقابل جریان آب نشتی مقاومت ننموده و بتواند کل دبی نشت را جمع آوری و به خارج هدایت کند. بدیهی است که سیستم‌های زهکشی لازم است علاوه بر قدرت جمع‌آوری و تخلیهٔ آب نشتی، در مقابل جریان پایدار بوده و دچار فرسایش یا آب‌شستگی درونی نشوند.

از نظر شکل و موقعیت سیستم زهکش در بدنهٔ سدهای خاکی، تاکنون روش‌های مختلفی مانند زهکش افقی[1]، پنجهٔ زهکش[2] و زهکش قائم[3] یا دودکشی[4] مورد استفاده قرار گرفته است. در زهکش‌های افقی که عموماً در گذشته در سدهای خاکی همگن و کم ارتفاع به‌کار می‌رفت، یک لایه زهکش افقی در زیر ناحیهٔ پایین‌دست سد قرار می‌گرفت و هدف آن جمع‌آوری آب نشتی و هدایت آن به خارج از بدنهٔ سد بود. در سیستم پنجه زهکش، بخش پنجهٔ سد، متشکل از مصالح درشت دانه (لاشه‌سنگ و قلوه‌سنگ) به همراه فیلتر است و هدف آن نیز پایین کشیده شدن خط نشت در قسمت پایین‌دست سد و هدایت و تخلیهٔ آب‌های نشتی می‌باشد. این دو سیستم به‌دلیل ضعف‌های ذاتی و عدم کارایی مطلوب و قطعی، تقریباً در سدهای خاکی مدرن منسوخ شده و در حال حاضر عموماً از سیستم‌های زهکش قائم یا دودکشی استفاده می‌شود.

یک سیستم زهکش قائم مرکب از دو بخش قائم و افقی است که در قسمت پایین‌دست هستهٔ سدهای خاکی ناحیه‌بندی‌شده یا در بخش میانی سدهای خاکی همگن استقرار می‌یابد. طراحی این سیستم زهکش شامل تعیین ضخامت لایهٔ زهکش و نفوذپذیری مصالح است، به گونه‌ای که به‌سهولت قادر به جمع‌آوری کلیهٔ آب‌های نفوذیافته به بدنه و پی سد باشد و بتواند آنها را به‌خوبی به خارج بدنه سد هدایت کند. این سیستم باید به‌نحوی طراحی شود که خط نشت در بخش پایین‌دست سد کاملاً کنترل شود و بخش مذکور همواره در شرایط خشک قرار داشته باشد و بدین‌وسیله با حذف نیروی نشت و فشار آب منفذی از قسمت پایین‌دست بدنه، پایداری شیب آن تأمین گردد. بدیهی است که برای تعیین ظرفیت تخلیهٔ یک سیستم زهکش، لازم است قبلاً مقدار دبی آب نشت‌یافته به بدنه و پی سد به کمک یکی از روش‌های مشروح در فصول گذشته، مانند رسم شبکهٔ جریان یا کاربرد قانون دارسی، تعیین شود. به‌علاوه ظرفیت زهکش‌ها باید به طریقی محاسبه شود که خط نشت با داشتن یک حاشیهٔ ایمنی در داخل لایهٔ زهکش محصور گردیده و به پوستهٔ پایین‌دست نفوذ نکند.

همان‌طورکه اشاره شد، طراحی سیستم زهکش قائم شامل تعیین ابعاد و مشخصات مصالح دو لایهٔ زهکش است که قسمت اول آن به‌صورت قائم یا شیبدار بلافاصله در پایین‌دست هستهٔ سد (در سدهای ناحیه‌بندی‌شده) یا در قسمت میانی سد (در سدهای همگن) قرار گرفته و نقش آن جمع‌آوری آب‌های نشتی بدنه از بالادست است. این لایه در قسمت تحتانی به یک لایهٔ زهکش افقی که نقش آن جمع‌آوری و هدایت آب نشتی قسمت اول به اضافهٔ آب‌های نشتی قسمت پایین‌دست سد و پی است، اتصال می‌یابد. شکل ۷-۱۳، یک سیستم زهکش قائم را در یک سد خاکی ناحیه‌بندی‌شده نشان می‌دهد.

طراحی زهکش دودکشی برای دو قسمت قائم و افقی آن به‌طور مستقل صورت می‌پذیرد. در طراحی قسمت قائم یا شیبدار که شیب آن از شیب پایین‌دست هسته تبعیت می‌کند، ابتدا مقدار دبی آب نشت‌یافته به داخل هسته با استفاده از شبکهٔ جریان یا یکی دیگر از روش‌های مندرج در فصول قبلی، محاسبه و سپس انتخاب ضخامت لایه (t_c) متناسب با نیاز عملیات اجرایی و نفوذپذیری مصالح بر اساس قانون دارسی صورت



شکل ۷-۱۳- مقطع عرضی یک سد خاکی با زهکش قائم

در شکل ۷-۱۳ مفروضات زیر به‌عمل می‌آید :

q_c = دبی نشتی عبوری از هسته در واحد طول سد

q_b = دبی نشتی ورودی از پی و پوستهٔ پایین‌دست در واحد طول سد

t_c = ضخامت لایهٔ زهکش قائم یا شیبدار در جهت عمود بر جریان

t_b = ضخامت لایهٔ زهکش افقی

L_c = طول لایهٔ زهکش قائم یا شیبدار در جهت جریان

L_b = طول لایهٔ زهکش افقی

k_c = نفوذپذیری مصالح زهکش قائم یا شیبدار

k_b = نفوذ پذیری مصالح زهکش افقی

بر اساس قانون دارسی برای جریان ورودی از هسته به زهکش قائم یا شیبدار می‌توان رابطهٔ زیر را نوشت :

$$q_c = k_c \,.\, i_c \,.A_c = k_c \,.\, \frac{h_c}{L_c} \,.t_c \times ۱ \qquad (۲۰-۷)$$

که در آن A_c سطح مقطع عرضی زهکش در جهت عمود بر جریان و h_c ماکزیمم بار هیدرولیکی در سطح خروجی شیب پایین‌دست هسته است.

به‌طور متعارف و به‌منظور سهولت عملیات اجرایی قسمت قائم زهکش، ضخامت آن با توجه به عرض ماشین‌آلات عملیات خاکی تعیین می‌شود. این ضخامت عموماً حدود ۲ تا ۳ متر متغیر است. بنابراین چنانچه مقدار q_c نیز قبلاً تعیین شده باشد، نفوذپذیری مصالح مورد نیاز قسمت قائم زهکش، از رابطهٔ زیر تعیین می‌گردد :

$$k_c = \frac{q_c \,.L_c}{h_c \,.t_c} \qquad (۲۱-۷)$$

مقادیر L_c و h_c نیز با توجه به شبکهٔ جریان رسم‌شده در قسمت هسته سد قابل تعیین است. مشخصات فنی قسمت افقی زهکش دودکشی نیز به همین طریق و به کمک قانون دارسی تعیین می‌شود. بر این اساس، زهکش افقی باید قادر به تخلیهٔ مجموع دبی نشت‌یافته از هسته، پی و پوستهٔ پایین‌دست یعنی ($q_c + q_b$) باشد. چنانچه ضخامت این بخش از زهکش برابر t_b فرض شود، می‌توان نوشت:

$$q_c + q_b = k_b . \frac{h_b}{L_b} . A_b = k_b . \frac{h_b}{L_b} . t_b \times 1 \qquad (۲۲-۷)$$

در رابطهٔ فوق، h_b حداکثر ارتفاع مجاز آب در زهکش افقی است که معمولاً برای جلوگیری از نفوذ به قسمت‌های فوقانی باید کمتر از ضخامت زهکش مذکور t_b باشد، یعنی $h_b \leq t_b$. بنابراین حداقل ضخامت زهکش افقی از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$t_b \geq \sqrt{\frac{(q_c + q_b) L_b}{k_b}} \qquad (۲۳-۷)$$

مثال عددی ۷-۳

در نظر است در یک سد خاکی ناحیه‌بندی‌شده از یک سیستم زهکش دودکشی استفاده شود. چنانچه مقدار دبی نشت از هسته و پی به ترتیب ۱۸۰ و ۹۰۰ لیتر در روز در یک متر از طول سد باشد، حداقل ضخامت و نفوذپذیری بال‌های قائم و افقی زهکش را به گونه‌ای محاسبه کنید که از نظر تخلیهٔ آب نشتی، سیستم زهکش دارای ضریب اطمینان کافی باشد. بر اساس شبکهٔ جریان رسم‌شده $h_c = ۱۰۰\,m$، $L_c = ۱۰۳\,m$ و طول زهکش افقی نیز برابر ۱۶۵ متر است.

حل

فرض می‌شود برای سهولت عملیات خاک‌کوبی با ماشین‌آلات متعارف، ضخامت زهکش قائم در جهت افقی معادل ۳/۵ متر باشد که در این صورت ضخامت در جهت عمود بر جریان برابر ۳/۲ متر خواهد بود. با استفاده از رابطهٔ ۷-۲۱، نفوذپذیری مصالح این بخش از زهکش، به‌شرح زیر است:

$$k_c = \frac{۱۸۰ \times \frac{۱}{۱۰۰۰} \times ۱۰۳}{۱۰۰ \times ۳/۲} = ۰/۰۵۸\ m/day$$

$$k_c = ۵/۸\ cm/day$$

بنابراین چنانچه مصالحی با نفوذپذیری بیشتر از رقم فوق (مثلاً ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در روز) به‌عنوان زهکش مورد استفاده قرار گیرد، می‌توان اطمینان حاصل کرد که این سیستم قادر به جمع‌آوری و تخلیهٔ آب نشتی به داخل بدنهٔ سد است. این رقم معادل نفوذپذیری ماسه نسبتاً تمیز است. به همین ترتیب قسمت افقی زهکش نیز باید قادر به تخلیه مجموع دبی نشت‌یافته به بدنهٔ سد و پی یعنی (۱۸۰+۹۰۰) لیتر در هر روز در متر از طول سد باشد. بدین ترتیب با استفاده از رابطهٔ ۷-۲۳ حداقل ضخامت زهکش افقی برابر است با:

$$t_b \geq \sqrt{\frac{(۹۰۰ + ۱۸۰) \times ۱۶۵ \times \frac{۱}{۱۰۰۰}}{k_b}} = \sqrt{\frac{۱۷۸/۲}{k_b}}$$

همان‌طورکه از رابطهٔ فوق دیده می‌شود، چنانچه نفوذپذیری مصالح موجود (k_b) در این رابطه قرار گیرد، حداقل ضخامت زهکش افقی محاسبه خواهد شد، ازاین‌رو مسئله یک پاسخ ندارد و متناسب با نفوذپذیری مصالح، ضخامت‌های مختلف به‌دست خواهد آمد. برای مثال چنانچه سه نوع مصالح با مشخصات زیر موجود باشد:

- ماسهٔ نرم با نفوذ پذیری $۳/۵\times۱۰^{-۴}$ سانتی‌متر در ثانیه
- شن نخودی ($\frac{۱}{۴}$ اینچ) با نفوذپذیری یک سانتی‌متر در ثانیه
- شن درشت تمیز ($\frac{۳}{۸}$ تا $\frac{۳}{۴}$ اینچ) با نفوذپذیری ۱۴ سانتی‌متر در ثانیه

ضخامت زهکش افقی در هریک از حالات به‌شرح زیر خواهد بود:

برای ماسهٔ نرم

$$t_b=\sqrt{\frac{۱۷۸/۲}{۳/۵\times۱۰^{-۶}\times۸۶۴۰۰}}=۲۴/۲ \quad \text{متر}$$

برای شن نخودی

$$t_b=\sqrt{\frac{۱۷۸/۲}{۱\times۱۰^{-۲}\times۸۶۴۰۰}}=۰/۴۵ \quad \text{متر}$$

برای شن درشت

$$t_b=\sqrt{\frac{۱۷۸/۲}{۰/۱۴\times۸۶۴۰۰}}=۰/۱۲ \quad \text{متر}$$

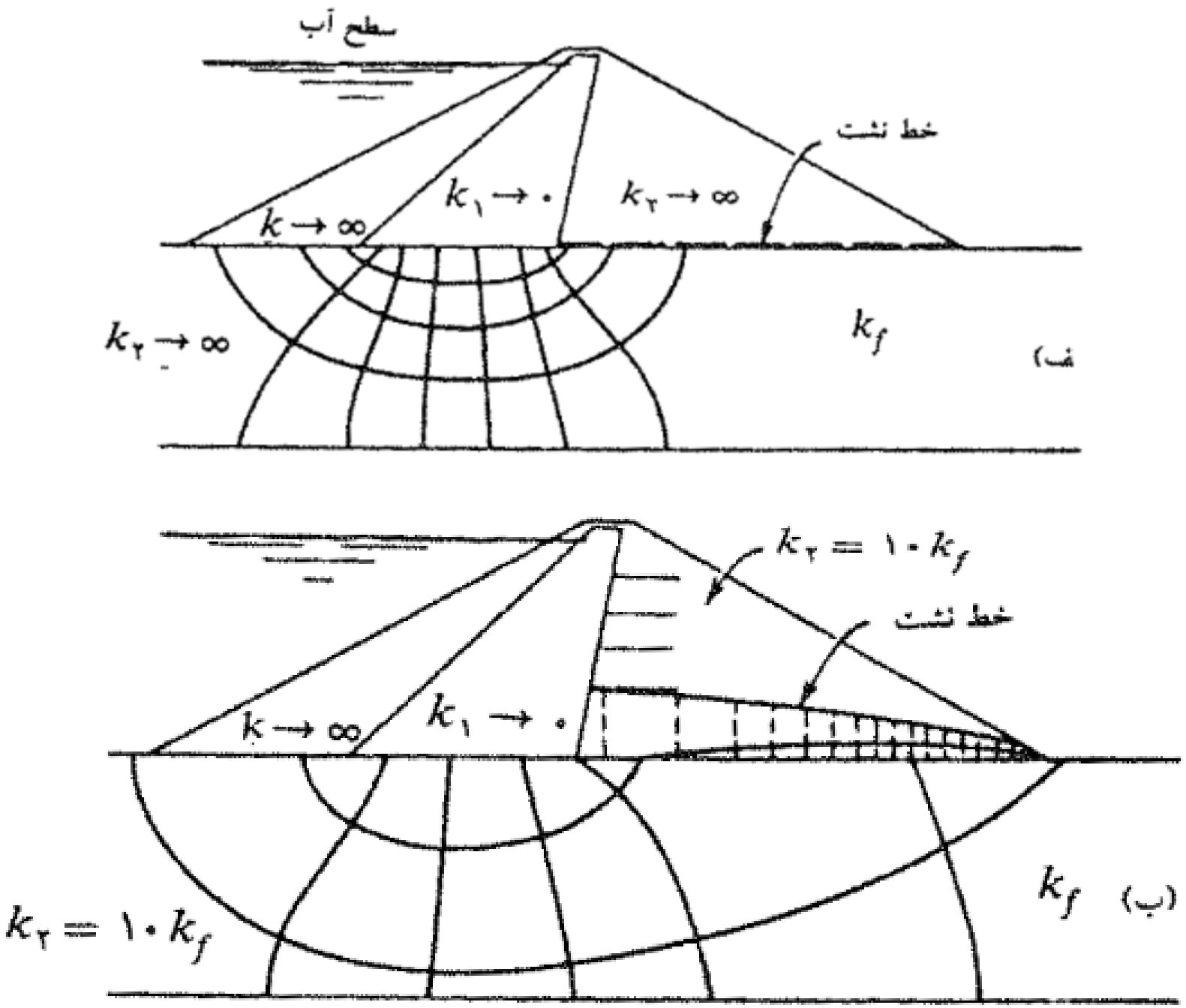
البته بدیهی است که استفاده از مصالح نوع اول (ماسهٔ نرم) به‌علت ضخامت خیلی زیاد (حداقل ۲۵ متر) غیرعملی و غیراقتصادی است، اما کاربرد هریک از مصالح نوع دوم و سوم (شن نخودی یا شن درشت) مناسب بوده و لایهٔ زهکش از ضخامت معقولی برخوردار است.

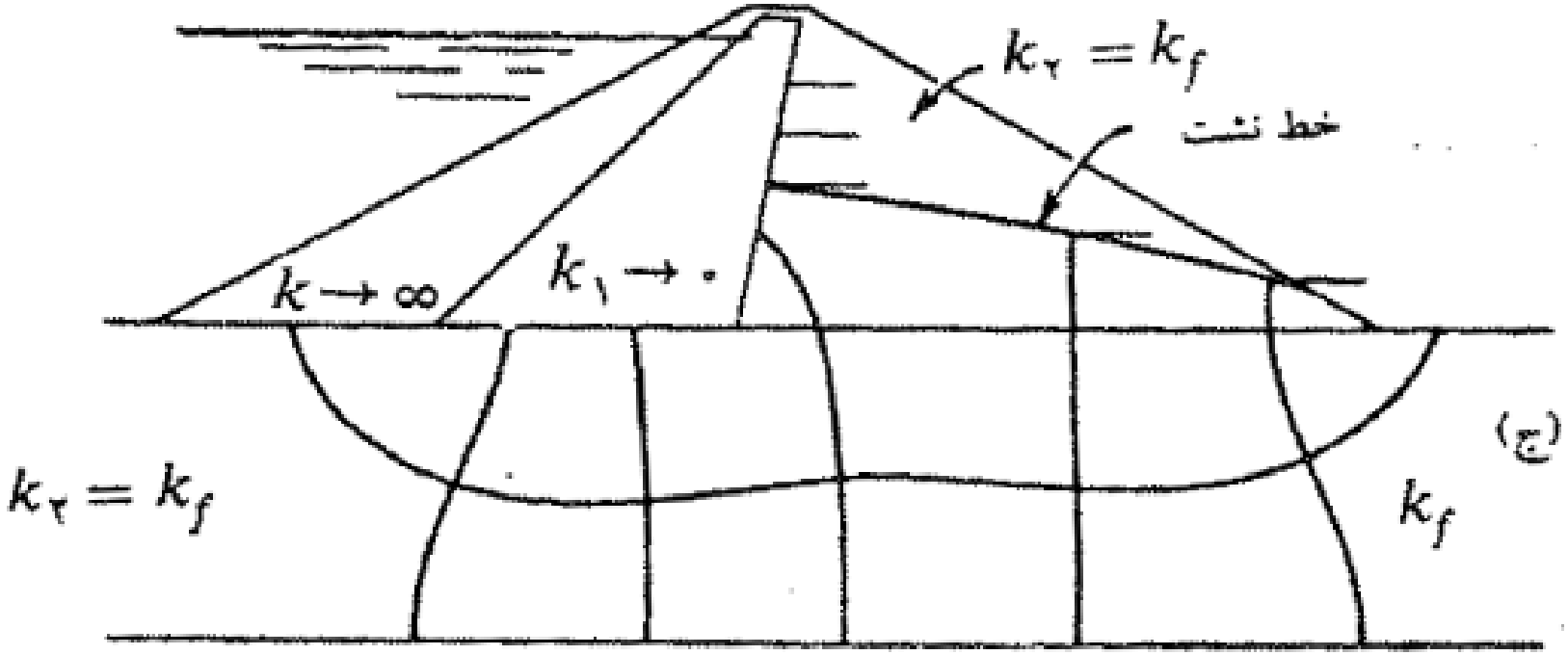
با توجه به اینکه در اغلب موارد، استفاده از یک سیستم فیلتر یا زهکش چند لایه ارزانتر از یک سیستم تک‌لایه است، بنابراین این امر همیشه باید در طرح زهکش‌ها و فیلترها مورد توجه قرار گیرد. برای نمونه، در مثال اخیر به‌جای استفاده از یک لایهٔ زهکش منفرد می‌توان از یک سیستم زهکش سه‌لایی که در آن یک لایه شن درشت به ضخامت ۰/۳ تا ۰/۵ متر بین دو لایه شن نخودی با همین ضخامت قرار گرفته است، استفاده کرد. البته انتخاب ضخامت بیشتر برای لایه‌های زهکش، در درجهٔ اول به‌منظور وجود ضریب اطمینان کافی برای جمع‌آوری مطمئن کل آب‌های نشتی و در درجهٔ دوم برای حفظ پیوستگی لایه در حین عملیات اجرایی می‌باشد. بدیهی است که در طرح زهکش‌ها علاوه بر معیار ظرفیت تخلیه، لازم است معیار پایداری و کنترل فرسایش درونی که در فصل هشتم مورد بحث قرار گرفته نیز مد نظر قرار گیرد.

۷-۹- زهکشی توسط پوستهٔ پایین‌دست سد

این روش زهکشی اصولاً مختص سدهای خاکی ناحیه‌بندی‌شده (سدهایی که دارای پوسته‌های بالادست و پایین‌دست و هستهٔ مستقل‌اند)، است. در این‌گونه سدها معمولاً پوستهٔ خارجی (پایین‌دست هسته) سد از مصالح بسیار قابل‌نفوذ ساخته می‌شود، بطوری‌که نفوذپذیری این قسمت در مقایسه با هسته بسیار بیشتر است. وجود این قسمت درشت دانه با نفوذپذیری بسیار زیاد در پایین‌دست سد سبب می‌شود که قسمت مذکور خود مانند یک سیستم زهکش عمل کند و خط نشت پس از خروج از هسته به میزان زیادی در آن پایین بیفتد. هرچه نفوذپذیری این قسمت نسبت به هسته بیشتر باشد، خط نشت در آن در موقعیت پایین‌تری قرار خواهد گرفت. از طرف دیگر، مصالح درشت‌دانه مانند لاشه‌سنگ، قلوه‌سنگ و شن دارای پایداری بیشتری نسبت به مصالح ریزدانه‌ترند. بنابراین وجود مصالح مذکور در پایین‌دست سد، چنانچه با رعایت نکات فنی ریخته و متراکم شده باشند، پایداری سازهٔ سد را نیز افزایش خواهد داد.

تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که هرچه نسبت نفوذپذیری پوستهٔ پایین‌دست به هسته ($\frac{k_2}{k_1}$) بزرگتر باشد، خط نشت در پوستهٔ مذکور در موقعیت پایین‌تری قرار می‌گیرد. مسئلهٔ مهمی که باید در این مورد بدان توجه شود، وجود پی نفوذپذیر یا نیمه‌نفوذپذیر در زیر سد است. وجود این نوع پی سبب می‌شود که مقدار زیادی آب از طریق پی نشت کند و سطح اشباع را پس از هسته به میزان زیادی بالا آورد. پر واضح است که هرچه این سطح بالاتر باشد، درجهٔ پایداری سد نیز کاهش و مشکلات حاصل از نشت افزایش می‌یابد. این پدیده در شکل ۷-۱۵ نشان می‌دهد.


سطح آب
خط نشت
$k_1 \to 0$
$k_2 \to \infty$
$k \to \infty$
$k_2 \to \infty$
k_f
(ف
$k_2 = 10\, k_f$
خط نشت
$k \to \infty$
$k_1 \to 0$
k_f (ب)
$k_2 = 10\, k_f$



شکل ۷-۱۵- اثر نسبت نفوذپذیری پوستهٔ پایین‌دست و پی بر موقعیت خط نشت [۶]

بر اساس نتایج بررسی‌های به‌عمل آمده، پوستهٔ پایین‌دست سد خاکی وقتی می‌تواند به‌عنوان یک سیستم زهکش به‌طور کامل عمل کند که اولاً نفوذپذیری قسمت پایین‌دست حداقل ۱۰۰ برابر بیش از نفوذپذیری هسته، پی تحتانی و پی جانبی سد باشد (البته هرچه هسته نازکتر باشد، این نسبت باید بزرگتر شود)؛ ثانیاً در قسمت هسته و پوستهٔ پایین‌دست، درجهٔ لایه‌بندی به حداقل برسد (منظور از لایه‌بندی ناهمروند بودن خاک از نظر نفوذپذیری است. در صورت وجود لایه‌بندی معمولاً نفوذپذیری در جهت افقی خیلی بیشتر از نفوذپذیری در جهت قائم خواهد بود). البته باید توجه داشت که در عمل بدنهٔ سدهای خاکی عموماً به‌صورت لایه لایه کوبیده می‌شود، بنابراین وجود لایه‌بندی اجتناب‌ناپذیر است، ازاین‌رو قسمت‌های کوبیده‌شدهٔ بدنهٔ سد معمولاً تا حدودی ناهمروند می‌باشند.

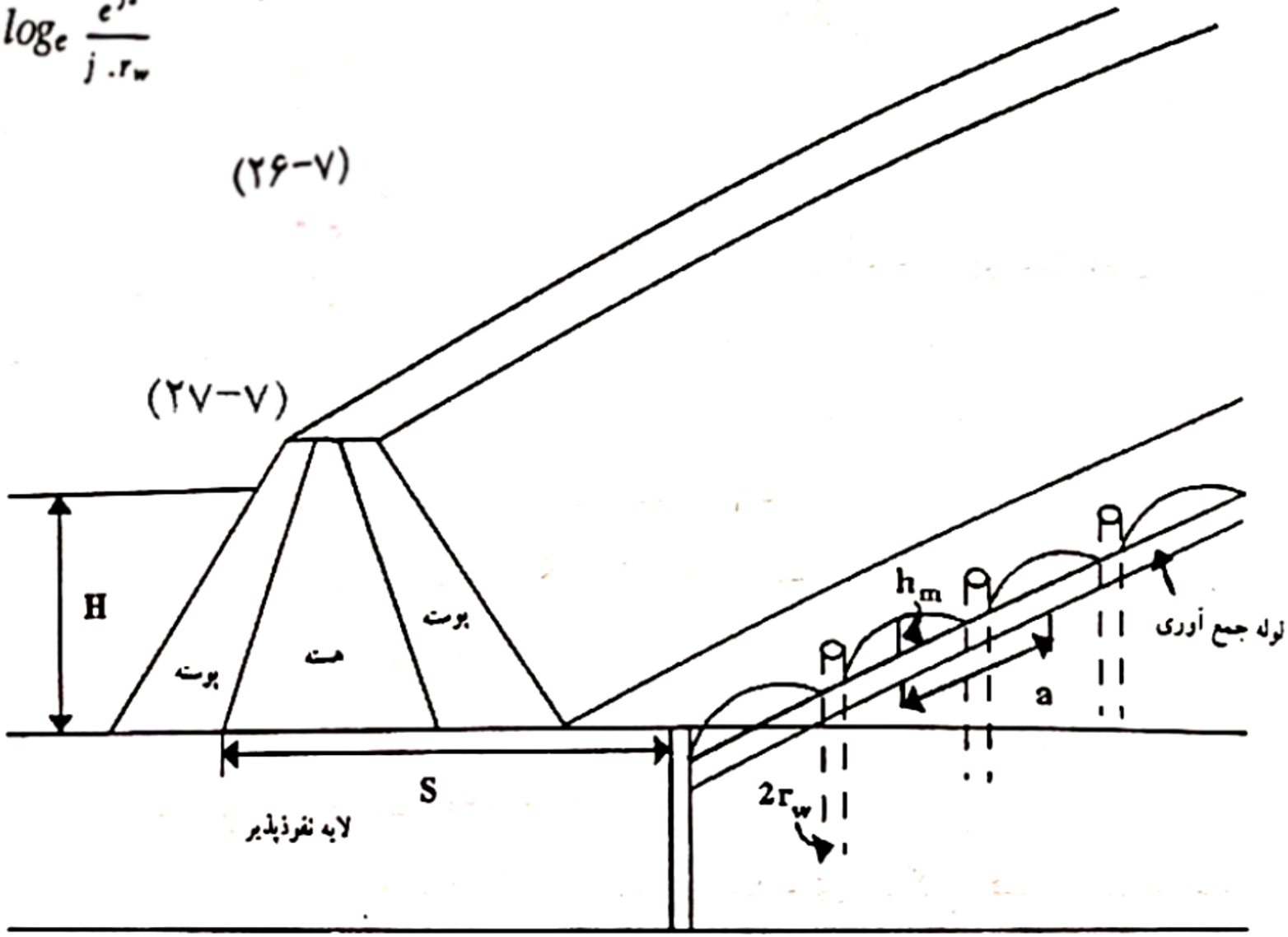
۷-۱۰- چاه‌های زهکش یا فشار شکن

چاه‌های زهکش به‌صورت یک‌سری، در یک و گاهی چند ردیف، و در سرتاسر طول سد در امتداد پنجه (در جهت عمود بر محور رودخانه) تعبیه می‌شوند. این چاه‌ها برای عملکرد مؤثر باید در تمام عمق لایهٔ نفوذپذیر ادامه یابند و لولهٔ جدار آنها باید به گونه‌ای باشد که هیچ‌گونه مقاومتی در مقابل جریان آب به داخل چاه ایجاد نکند. به همین دلیل معمولاً جدار این چاه‌ها از لوله‌های مشبک همراه با فیلتر مناسب است. جنس این لوله ممکن است از فولاد، آهن گالوانیزه، پی وی سی یا سایر مواد مناسب انتخاب شود. قطر این چاه‌ها باید حداقل ۱۵ سانتی‌متر باشد و ممکن است در صورت نیاز تا ۲۵ سانتی‌متر نیز باشد. ضخامت لایهٔ فیلتر که معمولاً از مصالح درشت دانهٔ تمیز (شن و ماسه) با دانه‌بندی مناسب انتخاب می‌شود، بین ۷/۵ تا ۲۰ سانتی‌متر متغیر است. لولهٔ جدار معمولاً تا سطح زمین ادامه یافته و برای کنترل فشار پیزومتریک، در وسط فاصلهٔ دو چاه مجاور یک پیزومتر نصب می‌شود. چاه‌ها در نزدیکی سطح زمین به یک لولهٔ جمع‌آوری‌کننده متصل می‌شوند و آب نشت‌یافته از طریق این لوله به گودترین نقطهٔ دره یا مسیر رودخانه در پایین‌دست سد تخلیه می‌شود.

$$\frac{h_m}{H} = ۱ + \frac{\log_e \frac{۲}{۱ + \cos h ۲ j s}}{۲ \log_e \frac{e^{js}}{j . r_w}} \qquad (۲۵-۷)$$

$$q = \frac{۲\pi k H}{\log_e \frac{e^{js}}{j . r_w}} \qquad (۲۶-۷)$$

$$j = \frac{۲\pi}{a} \qquad (۲۷-۷)$$



شکل ۷-۱۸- اجزای سیستم چاه‌های زهکش یک ردیفه

که در این روابط :

h_m = فشار پیزومتریک بین چاه‌های مجاور

H = کل ارتفاع آب مخزن نسبت به خروجی چاه‌های زهکش

a = فاصلهٔ مرکز تا مرکز چاه‌ها

r_w = شعاع مؤثر چاه‌های زهکش

S = فاصلهٔ مستقیم ردیف چاه‌های زهکش تا ورودی جریان به زیر سد (طول مؤثر بخش غیرقابل‌نفوذ)

k = نفوذپذیری متوسط لایهٔ نفوذپذیر پی

q = دبی چاه زهکش در واحد طول قسمت مشبک جدار

شایان ذکر است که قسمت مشبک جدار چاه باید به لایهٔ آبدار نفوذپذیر محدود شود و در قسمت‌های نفوذناپذیر نباید مشبک باشد.

۷-۱۱- تخلیهٔ پوستهٔ بالادست

یکی از موارد بسیار مهم در کنترل پایداری سدهای خاکی، فشار آب منفذی و نیروی نشت ایجادشده در شرایط وقوع افت ناگهانی سطح آب در مخزن است. چنانچه در طول دوران بهره‌برداری از سد مخزنی خاکی، به‌هر دلیل سطح آب مخزن به‌طور ناگهانی افت کند، جریان نشت به سمت بالادست به وقوع پیوسته و در صورت عدم کفایت نفوذپذیری مصالح پوسته، افت سطح آب مخزن و زهکش شدن پوسته دارای اختلاف زمانی خواهند بود و در این فاصلهٔ زمانی، نیروی نشت به‌طور کامل به سمت بالادست و در جهت ناپایدارسازی شیب عمل خواهد کرد.

بر اساس تحقیقات انجام‌شده، چنانچه نفوذپذیری مصالح پوسته از مقدار به‌دست آمده از رابطهٔ ۷-۲۸ بیشتر باشد، پوسته دارای خاصیت زهکشی آزاد باشد و خطر ناپایداری در صورت وقوع افت ناگهانی سطح آب مرتفع خواهد شد.

$$k_{min} = \frac{V_{dd} \cdot L \cdot n_e}{\sin\alpha \cdot h} \qquad (۷-۲۸)$$

که در این رابطه :

V_{dd} = سرعت افت سطح آب در مخزن

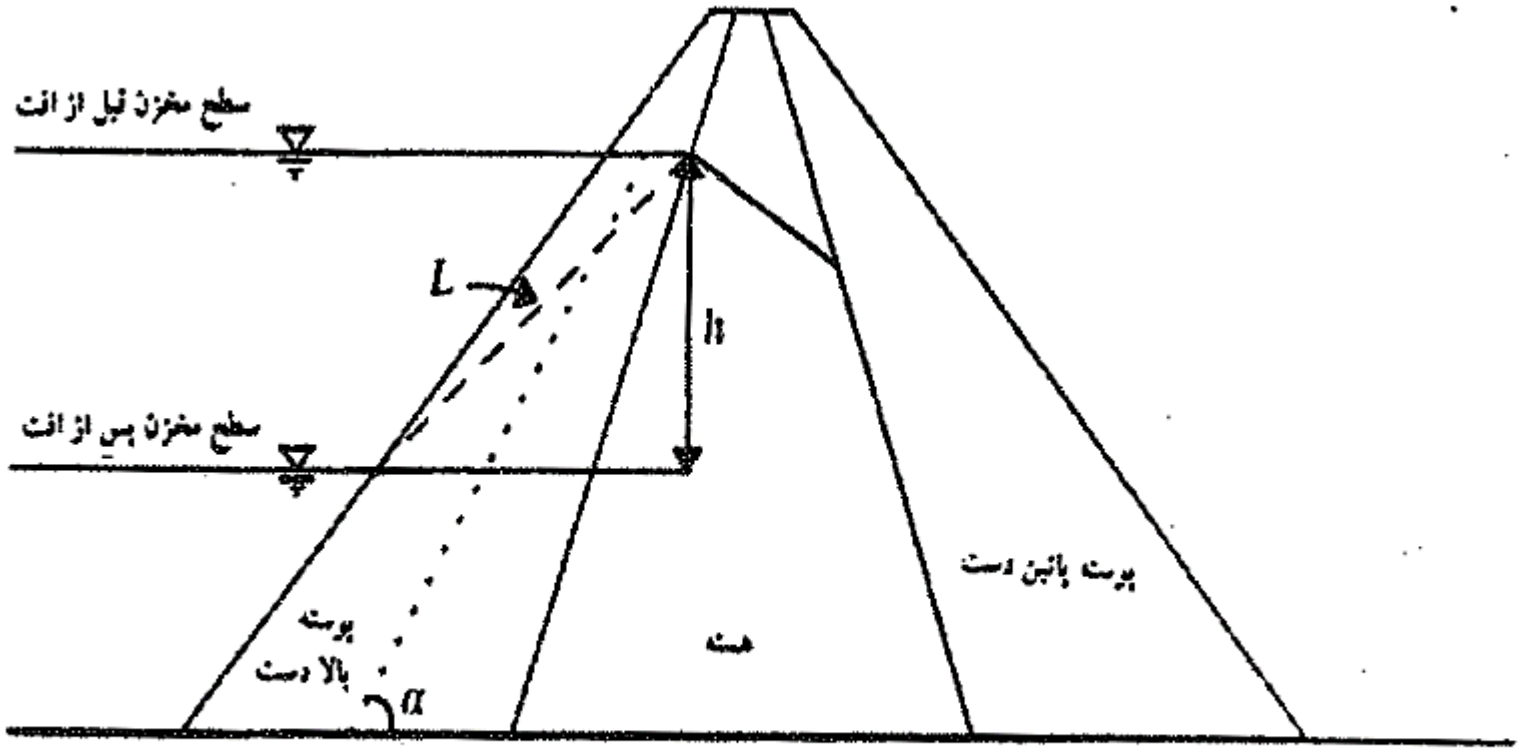
L = طول خط نشت در پوستهٔ بالادست

n_e = درجهٔ پوکی مؤثر مصالح پوسته

α = زاویهٔ شیب خط میانه پوسته بالادست نسبت به افق

h = اختلاف ارتفاع بین سطح آب در مخزن و بالاترین موقعیت خط نشت در پوسته

عوامل فوق در شکل ۷-۱۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷-۱۹- تخلیهٔ پوستهٔ بالادست در شرایط ناگهانی سطح آب