طرح فیلتر و کنترل آب شستگی

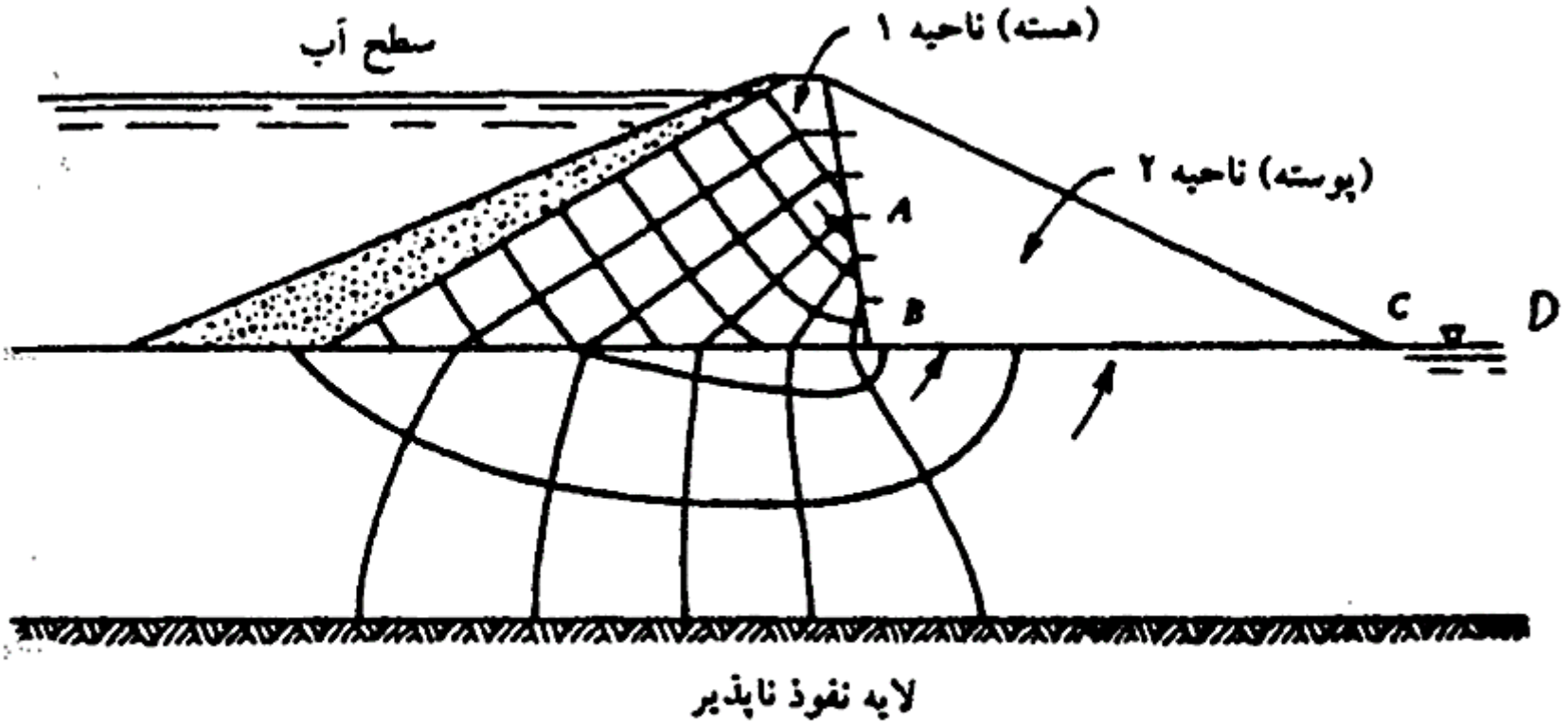
یکی از اثرهای منفی نشت آب در بدنه و پی سدهای خاکی، احتمال جابه‌جایی ذرات خاک و ایجاد پدیدهٔ آب‌شستگی که ممکن است در نهایت منجر به تخریب سد شود، می‌باشد. علت این پدیده نیز وجود انرژی پتانسیلی در آب نشتی است.

بر اساس قوانین جریان آب در محیط‌های متخلخل، مولکول‌های آب تحت انرژی پتانسیلی شروع به حرکت در لابه‌لای ذرات خاک می‌کنند و به‌علت دارا بودن انرژی و اعمال نیروی نشت، می‌توانند در مسیر خود ذراتی از خاک را که آزادند، جابه‌جا یا حمل کنند. برای مثال هنگامی‌که آب در بدنهٔ یک سد خاکی ناحیه‌بندی‌شده از یک ناحیه به ناحیهٔ دیگر وارد می‌شود، چنانچه دارای شیب هیدرولیکی کافی باشد و در مسیر خود به ذرات قابل‌فرسایش و سست برخورد کند و نیز اگر فضای خالی بین ذرات در ناحیهٔ دوم به اندازهٔ کافی بزرگ باشد، حرکت آب نشتی قادر است ذرات خاک را از ناحیهٔ اول به ناحیهٔ دوم منتقل نموده و بتدریج در ناحیهٔ اول ایجاد آب‌شستگی یا فرسایش درونی کند.

۸-۲- نواحی حساس به آب‌شستگی در سدهای خاکی

همان‌طورکه در گفتیم، اصولاً پتانسیل حرکت ذرات خاک و وقوع پدیدهٔ آب‌شستگی در جایی وجود دارد که اولاً آب دارای انرژی پتانسیلی کافی باشد و ثانیاً امکان مهاجرت ذرات از یک ناحیه به ناحیهٔ دیگر وجود داشته باشد. به‌طورکلی چنانچه انرژی پتانسیلی آب برای به حرکت درآوردن ذرات خاکی کافی باشد، آب‌شستگی در تمام قسمت‌های بدنهٔ سد و پی که در آن تغییر ناگهانی بافت خاک رخ می‌دهد و نیز در کلیهٔ سطوح خروج آب از محیط متخلخل وجود خواهد داشت [۴ و ۱۱]. برای مثال چنانچه مقطع عرضی یک سد خاکی ناحیه‌بندی‌شده و پی نفوذپذیر آن مطابق شکل ۸-۱ در نظر گرفته شود، سطوح دارای پتانسیل آب‌شستگی به‌شرح زیراند:

- سطح AB، محل خروج آب از هسته (ناحیهٔ ۱) و ورود به پوسته (ناحیهٔ ۲)
- سطح BC، محل خروج آب از پی و نفوذ آن به پوستهٔ پایین‌دست
- سطح CD، محل خروج آب نشتی پی از پنجهٔ پایین‌دست



شکل ۸-۱- سطوح دارای پتانسیل آب‌شستگی در مقطع سد خاکی

۸-۳- معیارهای طرح فیلتر [۴]

برای آنکه یک سیستم فیلتر بتواند وظیفهٔ خود را به خوبی انجام دهد، باید دارای دو شرط اساسی زیر باشد:

I- شرط مربوط به فرسایش [۱]

از نظر کنترل آب‌شستگی، فضاهای خالی موجود در فیلتر تعبیه شده در مجاورت خاک یا سنگ قابل‌فرسایش باید آنقدر کوچک باشند که از حرکت ذرات به داخل سیستم یا از سیستم به خارج جلوگیری کنند.

II- شرط مربوط به نفوذ پذیری [۲]

برای سهولت خروج آب از محیط و کاهش فشار منفذی، فضاهای خالی موجود در فیلتر باید آنقدر بزرگ باشند که مقاومتی در مقابل جریان آب ایجاد نکنند و مولکول‌های آب آزادانه از خاک مورد حفاظت به داخل فیلتر تخلیه شوند. این امر موجب می‌شود که فشار منفذی و نیروی نشت آب به میزان زیادی کاسته شود.

با توجه به مبانی فوق، سازمان‌های تحقیقاتی و مؤسسات اجرایی معیارهای مختلفی را برای طرح فیلتر ارائه داده‌اند. اولین معیارها در این خصوص توسط ترزاقی در سال‌های ۱۹۳۰ مطرح شد. این معیارهای تجربی بعداً توسط برترام [۳] (۱۹۴۹)، با کمک آزمایش‌های تجربی که در دانشگاه هاروارد به‌عمل آمد نیز مورد تأیید قرار گرفت. معیارهای اولیهٔ پیشنهادی ترزاقی و تأیید شده توسط برترام به‌شرح زیر است [۱]:

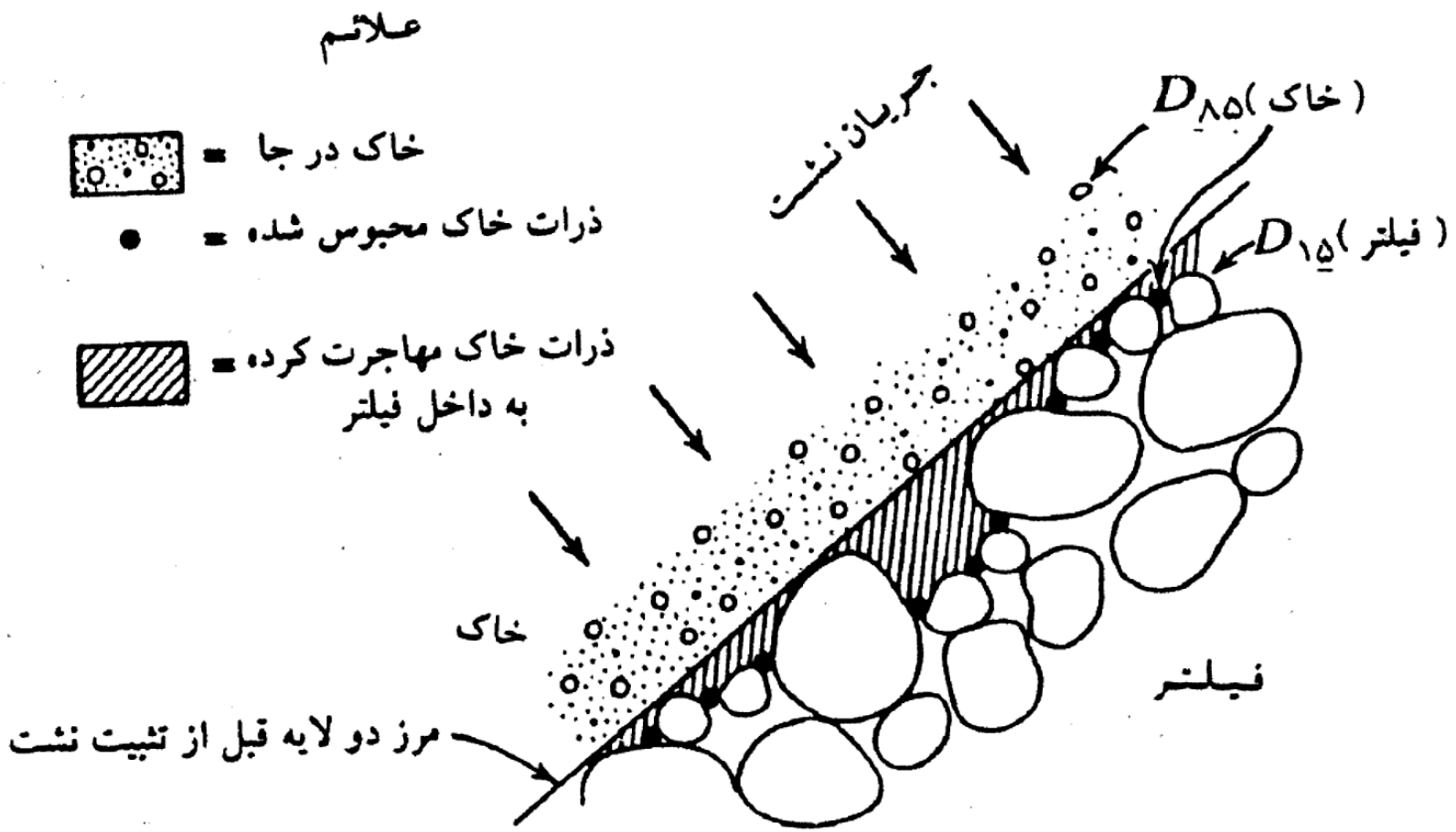
الف) معیار کنترل آب شستگی

ب) معیار نفوذپذیری

الف) معیار کنترل آب شستگی

بر اساس این معیار، برای جلوگیری از جابه‌جایی و مهاجرت ذرات خاک به داخل مصالح فیلتر، فضاهای خالی موجود در فیلتر باید آنقدر کوچک باشند که بتوانند ذرات با اندازهٔ D_{85} خاک مجاور را در محل خود نگه‌دارند و به آنها اجازهٔ عبور ندهند. بر اساس معیار کمی تعریف‌شده برای کنترل آب‌شستگی، قطر D_{15} مصالح فیلتر (قطری که ۱۵ درصد وزنی ذرات از آن کوچکترند)، نباید بیش از چهار یا پنج برابر D_{85} خاک مورد حفاظت (قطری که ۸۵ درصد وزنی ذرات خاک از آن کوچکترند) باشد. نسبت D_{15} فیلتر به D_{85} خاک، نسبت آب‌شستگی [۱] نامیده می‌شود.

بر اساس این نظر و با رعایت ضابطهٔ فوق، در ابتدا ذرات خیلی کوچک تا عمق کمی از لایهٔ فیلتر نفوذ می‌کنند، ولی سرانجام ذرات بزرگتر بین دانه‌های فیلتر محبوس می‌شوند و نهایت از مهاجرت بیشتر ذرات به داخل فیلتر جلوگیری به‌عمل می‌آورند. شکل ۸-۱ چگونگی مهاجرت ذرات اولیه و جلوگیری از مهاجرت بقیهٔ ذرات بر اساس این معیار را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲- چگونگی مهاجرت ذرات مجاور فیلتر

بنابراین معیار کنترل آب‌شستگی با رابطهٔ ۸-۱ به‌شرح زیر بیان می‌شود:

$$\frac{D_{15(f)}}{D_{85(s)}} < \text{۴ یا ۵} \qquad (۸-۱)$$

در رابطهٔ فوق:

$D_{15(f)}$ = قطری که ۱۵ درصد مصالح فیلتر از آن کوچکترند.

$D_{85(s)}$ = قطری که ۸۵ درصد ذرات خاک حفاظت‌شده از آن کوچکترند.

ب) معیار نفوذپذیری

این معیار به‌منظور ایجاد امکان و سهولت تخلیهٔ آب و زهکشی از طریق فیلتر در نظر گرفته شده است. از آنجا که نفوذپذیری خاک‌ها متناسب با مجذور D_{15} آن است، ازاین‌رو معیار نفوذپذیری به گونه‌ای مطرح شده که نفوذپذیری مصالح فیلتر حداقل ۱۶ تا ۲۵ برابر خاک حفاظت‌شده باشد تا بدین‌وسیله ضمن تأمین سهولت تخلیهٔ آب، شیب هیدرولیکی نیز به مقدار کافی کاهش یابد. بنابراین معیار نفوذپذیری بنابر رابطهٔ ۸-۲ توصیه شده است :

$$\frac{D_{15\,(f)}}{D_{15\,(s)}} > \text{۴ یا ۵} \qquad (۸-۲)$$

بر اساس معیار فوق، D_{15} فیلتر باید بزرگتر از ۴ تا ۵ برابر D_{15} خاک حفاظت‌شده باشد. این نسبت را نیز می‌توان مشابه واژهٔ به‌کار برده شده در قسمت (الف)، نسبت نفوذپذیری [1] نامید.

برای اینکه یک سیستم فیلتر عملکرد مطلوبی داشته باشد، علاوه بر معیارهای اساسی فوق، باید دارای شرایط زیر نیز باشد [۱، ۳و ۴]:

I- منحنی دانه‌بندی مصالح فیلتر تقریباً موازی منحنی دانه‌بندی خاک حفاظت‌شده باشد. این موضوع بویژه برای قسمت ریز دانهٔ خاک بیشتر اهمیت دارد.

II- مصالح فیلتر نباید حاوی بیشتر از ۵ درصد مصالح زیر الک شمارهٔ ۲۰۰ (ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون) باشد، همچنین قسمت ریز دانه فیلتر باید غیرچسبنده باشد. این شرط به‌منظور حفظ قابلیت نفوذ فیلتر و جلوگیری از ترک‌خوردگی آن در نظر گرفته شده است.

III- مصالح فیلتر به‌منظور جلوگیری از ایجاد پدیدهٔ جداشدگی نباید حاوی قطعات بزرگتر از ۳ اینچ (۷۵ میلی‌متر) باشد (توصیهٔ سازمان عمران آمریکا).

IV- چنانچه خاک مورد حفاظت حاوی بیشتر از ۱۰ درصد شن (مصالح درشت‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر) و بیشتر از ۱۰ درصد مصالح ریز دانه (مصالح کوچکتر از ۷۵ میکرون) باشد، طرح فیلتر باید بر اساس دانه‌بندی آن بخش از خاک که کوچکتر از ۴/۷۵ میلی متر است، صورت گیرد.

علی‌رغم اینکه معیارهای طرح فیلتر برای حفاظت خاک‌های غیرچسبندهٔ فرسایش‌پذیر ارائه شده‌اند، اما این معیار با موفقیت برای خاک‌های چسبنده و رس‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفته است. به‌طور کلی، رس‌ها به‌علت دارا بودن چسبندگی ذاتی، کمتر از خاک‌های غیرچسبنده نسبت به آب‌شستگی حساسیت دارند، ازاین‌رو معمولاً طرح فیلتر برای حفاظت این نوع خاک‌ها با محدودیت کمتری همراه است. برای مثال در بعضی موارد نسبت آب‌شستگی (رابطهٔ ۸-۱) در مورد این نوع خاک‌ها به میزان خیلی بیشتر از رقم توصیه‌شده در رابطهٔ مربوطه (تا حدود رقم ۱۰ یا حتی بیشتر) نیز در نظر گرفته شده و پروژه با موفقیت همراه بوده است.

۸-۴- معیارهای طرح فیلتر برای لوله‌های زهکش [۴]

هنگامی‌که لوله‌های مشبک زهکش در داخل خاک یا در مجاورت سنگ‌های فرسایش‌پذیر نصب می‌شوند، لازم است تدابیر لازم برای جلوگیری از ورود ذرات فرسایش‌یافته به داخل سوراخ‌های لولهٔ زهکش اتخاذ شود. این تدبیر عموماً به‌صورت طرح و نصب یک لایه فیلتر مناسب در اطراف لولهٔ زهکش عملی می‌شود. بنابراین از این نظر مصالح فیلتر باید به گونه‌ای انتخاب شوند که نتوانند به درون سوراخ‌های لولهٔ زهکش مهاجرت کنند. همچنین برای عملکرد بهتر لوله‌های زهکش، معمولاً توصیه می‌شود که اولاً دو انتهای لوله همیشه مسدود باشد و ثانیاً قسمت مشبک لوله به ۴۰ درصد محیط تحتانی لوله محدود شود.

به‌طور کلی معیارهای طرح فیلتر برای لوله‌های مشبک زهکش به‌شرح زیر است:

الف) برای لوله‌های زهکش با سوراخ‌های مستطیلی (شکاف) :

$$\frac{D_{۸۵(f)}}{\text{عرض شکاف}} > ۱/۲ \qquad (۳-۸)$$

ب) برای لوله‌های زهکش با سوراخ‌های مدور:

$$\frac{D_{۸۵(f)}}{\text{قطر سوراخ}} > ۱/۰ \qquad (۴-۸)$$

سازمان عمران آمریکا رابطهٔ ۸-۴ را به‌صورت زیر توصیه کرده است :

$$\frac{D_{۸۵(f)}}{\text{حداکثر قطر سوراخ}} \geq ۲/۰ \qquad (۵-۸)$$

۸-۵- ضخامت لایهٔ فیلتر

بر اساس پیشنهاد محققان، حداقل ضخامت لایهٔ فیلتر باید بیشتر از ۵۰ برابر $D_{۱۵}$، یعنی قطری از ذرات لایه که ۱۵ درصد مصالح از آن کوچکترند، بوده و از حداقل ۳۰ سانتی‌متر کمتر نباشد. این شرایط با رابطهٔ ۸-۶ نمایش داده می‌شود [۴]:

$$۳۰^{cm} < t_f > ۵۰ D_{۱۵(f)} \qquad (۶-۸)$$

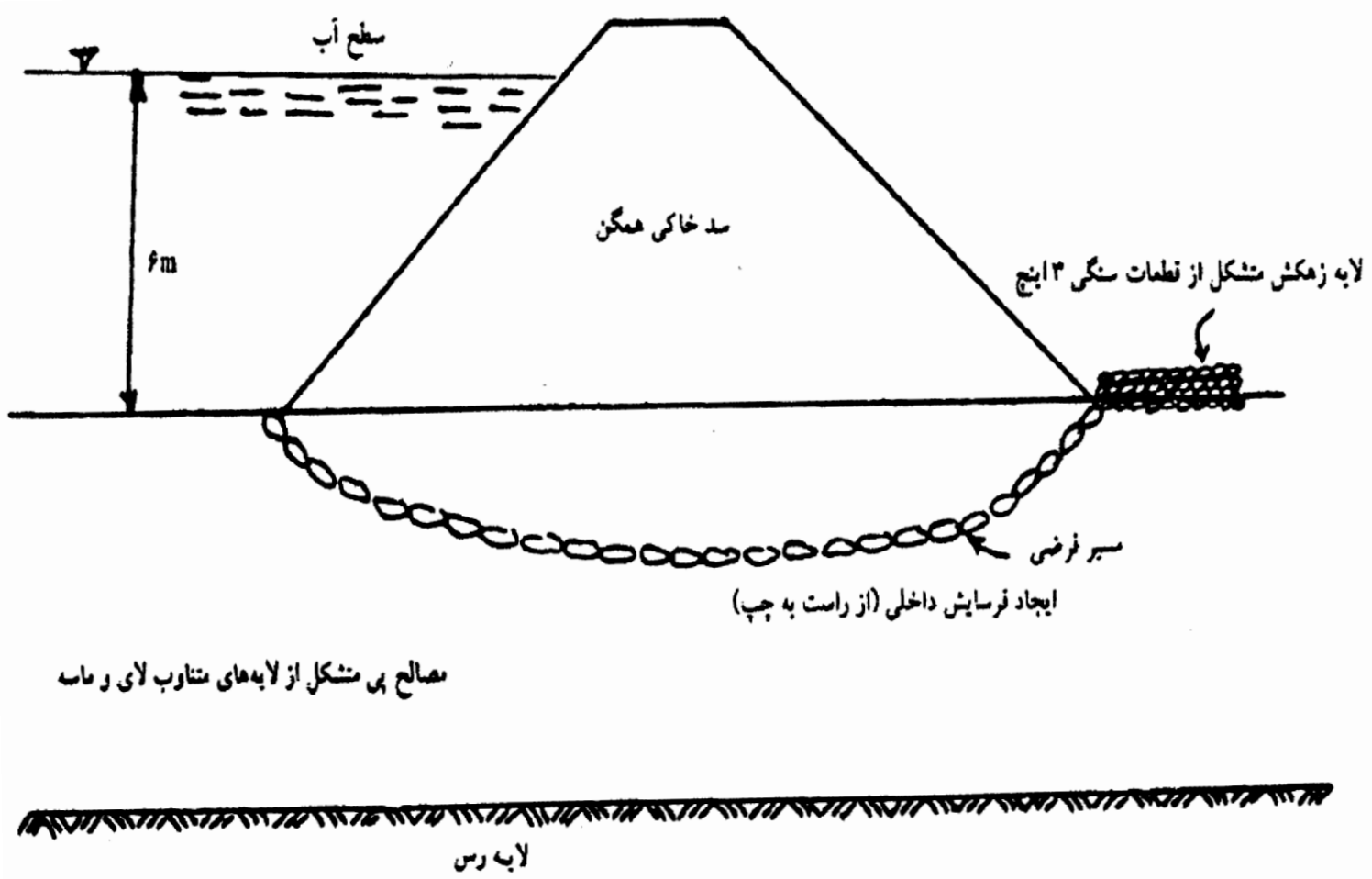
در رابطهٔ فوق، t_f ضخامت لایهٔ فیلتر است. شایان ذکر است که رابطهٔ مذکور حداقل ضخامت فیلتر را به‌دست می‌دهد و صرفاً نیازهای عملیات اجرایی فیلتر را برآورده می‌سازد و در تعیین نهایی ضخامت باید مشخصات هندسی و هیدرولیکی تأسیسات خاکی مورد نظر و نیز ظرفیت تخلیهٔ آب نشتی به‌شرحی که در فصل هفتم مورد بحث قرار گرفت، ملحوظ شود.

۸-۶- محل‌های نصب فیلتر در سدهای خاکی

۸-۶-۱- تعبیهٔ فیلتر برای جلوگیری از آب شستگی مصالح طبیعی (پی سد)

در اینجا منظور از مصالح طبیعی، قسمتی از زمین یا ارتفاعات اطراف سد است که به‌عنوان پی تحتانی یا تکیه‌گاه جانبی در تماس با بدنهٔ سد قرار می‌گیرند. معمولاً در طبیعت، حرکت آب‌های زیرزمینی به مرور با ذرات خاک به حالت تعادل رسیده و هیچ‌گونه تغییری از نظر جابه‌جایی ذرات در بستر ایجاد نمی‌شود، اما وقتی‌که بر اثر ساخته شدن سد، آب در مخزن آن تجمع یافته و انرژی پتانسیلی آن به میزان زیادی افزایش می‌یابد، رژیم طبیعی جریان آب زیرزمینی بشدت تغییر می‌یابد و ممکن است موجب آب‌شستگی و ایجاد فرسایش داخلی در مصالح طبیعی پی گردد. وقوع پدیدهٔ آب‌شستگی ممکن است به‌طور کامل در داخل مصالح پی یا در محل تماس سازه‌های صلب (مانند سرریز بتنی) و مصالح مجاور صورت گیرد.

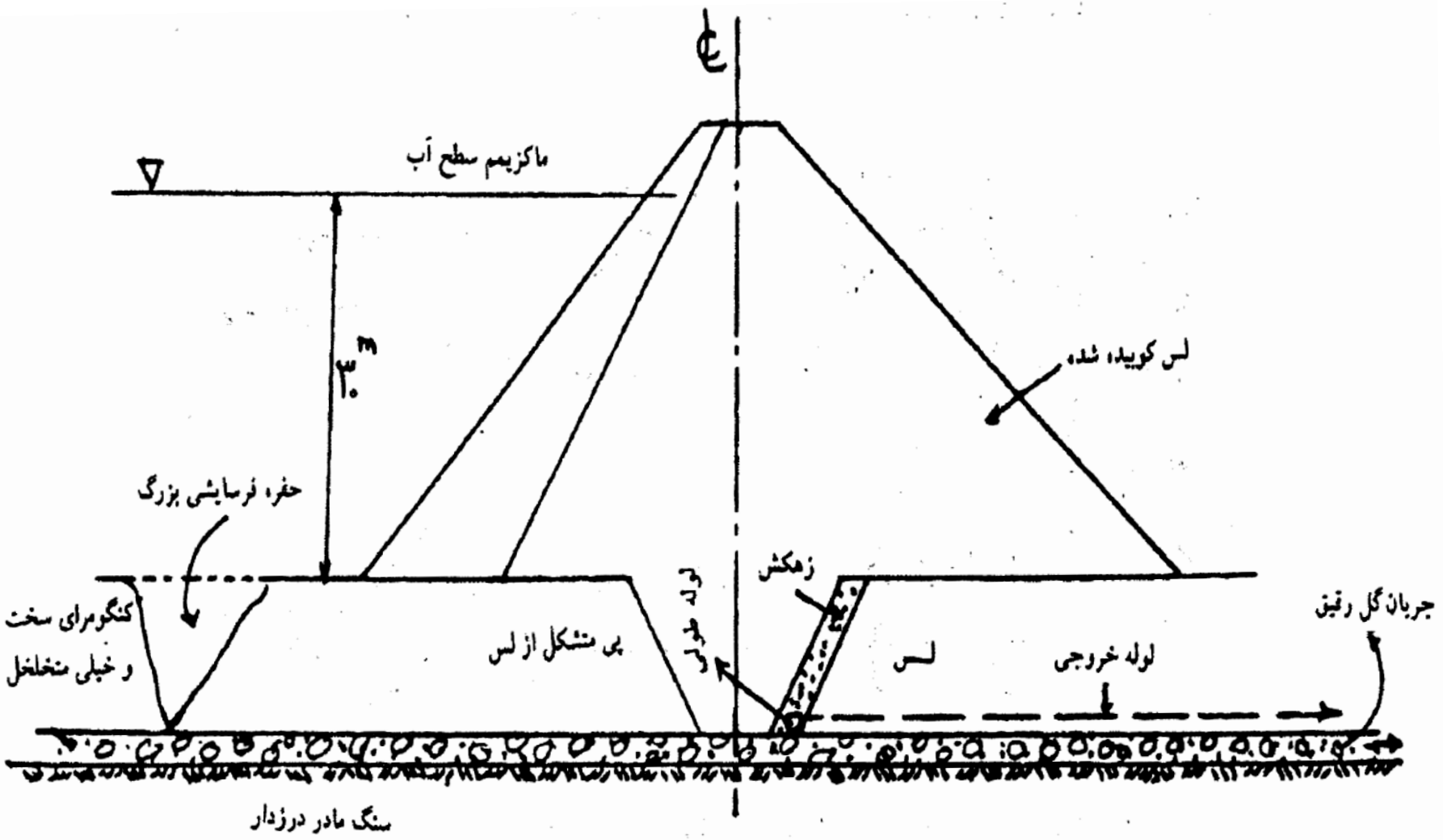
از جمله نقاط ضعف در پی سدها می‌توان وجود درز و ترک در سنگ‌ها، وجود لایه‌های درشت بافت شنی یا قلوه‌سنگی یا وجود سوراخ‌های حاصل از ریشهٔ گیاهان یا فعالیت حیوانات حفار را نام برد. تمرکز جریان نشت به سمت این نقاط ضعف، می‌تواند امکان وقوع آب‌شستگی را بشدت افزایش دهد. در این مورد می‌توان به تخریب ناشی از آب‌شستگی در پی یک سد خاکی کوتاه در غرب آمریکا اشاره کرد که در سال ۱۹۶۵ به‌وقوع پیوسته است. مقطع عرضی این سد در شکل ۸-۳ نشان داده شده است. علت تخریب این سد کوتاه، شروع آب‌شستگی و فرسایش داخلی در زیر سد و در داخل پی به‌دلیل بیش از حد درشت دانه بودن مصالح فیلتر ریخته‌شده در پایین‌دست سد بوده است.



شکل ۸-۳- تخریب یک سد خاکی به‌دلیل آب‌شستگی در پی

نمونهٔ دیگری از تخریب سدهای خاکی بر اثر آب‌شستگی مصالح پی، یک سد خاکی به ارتفاع ۳۰ متر در ایالت واشنگتن آمریکاست. مقطع عرضی این سد خاکی در شکل ۸-۵ نشان داده شده و همان‌طورکه مشاهده می‌شود، بدنهٔ سد متشکل از سیلت یا لای ریز (لس [۱]) متراکم‌شده است. پی سد متشکل از یک لایه لس مستقر بر روی یک لایهٔ مقاوم، اما بسیار متخلخل سنگ جوش (کنگلو مرا [۱]) است. این لایه سنگ جوش نیز روی یک لایه سنگ مادر درز و ترک‌دار قرار گرفته است.

پس‌از پر شدن مخزن سد واشباع لایهٔ لس در پی، ذرات‌سیلت مخلوط بآب ازطریق خلل‌وفرج بزرگ موجود در لایهٔ سنگ‌جوش شسته شده و به‌صورت گل رقیق از پایین‌دست سد خارج شده است. ادامهٔ این روند موجب ایجاد حفرات فرسایشی خیلی بزرگ در لایهٔ لس و در واقع در مصالح پی گردیده و سرانجام به تخریب کامل سد منجر شده است. بدیهی‌است که چنانچه بین لایهٔ لس که مصالحی‌است بشدت فرسایش‌پذیر، و لایهٔ سنگ‌جوش که دارای حفرات نسبتاً بزرگی است، یک لایه‌فیلتر مناسب‌قرار داده می‌شد، امکان جلوگیری از وقوع تخریب سد وجود داشت.

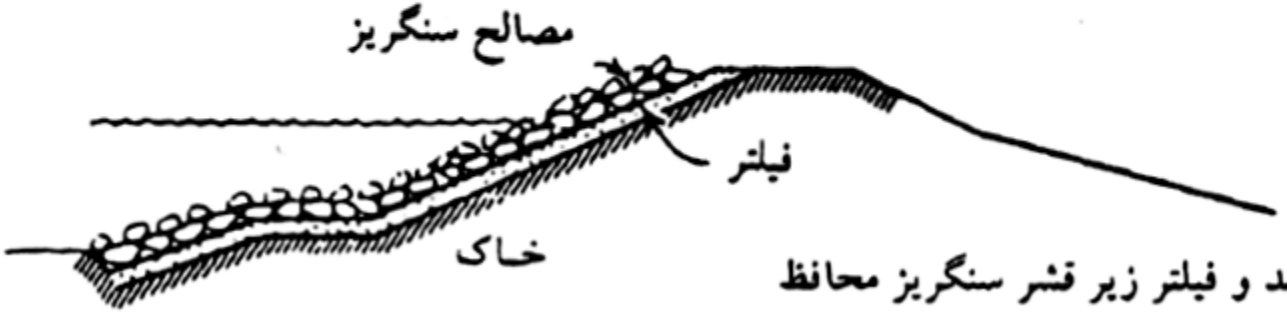


شکل ۸-۵- مقطع عرضی سد خاکی مستقر بر روی پی فرسایش پذیر

۸-۶-۲- تعبیهٔ فیلتر در بدنهٔ سدهای خاکی

در بدنهٔ سدهای خاکی نیز متناسب با موقعیت، در محل‌های تغییر بافت یا سطوح خروجی آب نیاز به تعبیهٔ فیلتر است. این موقعیت‌ها شامل محل اتصال قشر محافظ و پوستهٔ بالادست، پوستهٔ بالادست و هسته، هسته و پوستهٔ پایین‌دست، پوستهٔ پایین‌دست و قشر محافظ آن، ریشهٔ هسته با مصالح بالادست و پایین‌دست پی و سطوح خروج آب از شیب پایین‌دست یا خروج آب از بستر رودخانه در پایین‌دست است.

برای جلوگیری از فرسایش شیب در چنین حالتی، لازم است یک لایه فیلتر مناسب بین پوستهٔ بالادست و لایهٔ سنگریز محافظ آن قرارگیرد. شکل ۸-۶ الف نمونه‌ای از این نوع فیلتر را برای محافظت شیب بدنهٔ سدهای خاکی نشان می‌دهد.



الف) مقطع عرضی سد و فیلتر زیر قشر سنگریز محافظ