

سدهای خاکی

ویژگیها، اصول مطالعه، طرح و اجرا

مؤلف: دکتر عباس سرورش

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بسمه تعالی

پیشگفتار

نوشته حاضر، اولین نسخه و جمع‌بندی از مطالبی است که در درس سدهای خاکی در سطوح کارشناسی و کارشناسی ارشد توسط مولف تدریس شده است. مطالب برای دانشجویان و مهندسين طراح، سازنده و بهره‌بردار سد مفید فایده است. این نوشته نباید به عنوان یک کتاب تلقی شود، بلکه جزوه‌ای است که در نهایت و پس از تکمیل و ویرایش به صورت کتاب منتشر خواهد شد.

عباس سروش

دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط ریست

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

1- مقدمه

2- ویژگیهای سدهای خاکی

2-1- ابعاد سازه

2-2- بارگذاری‌های ویژه و متنوع

2-3- لزوم مراقبت در طول عمر سد

3- مزایا و معایب سدهای خاکی/سنگریزه‌ای

3-1- مزایا

3-2- نارسائیه‌ها و معایب

4- روشهای انحراف آب در زمان ساخت سد

5- مطالعات اولیه سدها

5-1- ضرورت مطالعات اولیه سدها

5-2- محورهای مطالعات اولیه

5-2-1- تهیه نقشه با مقیاسهای مختلف

5-2-2- مطالعات هواشناسی

5-2-3- مطالعات هیدرولوژی

5-2-4- مطالعات رژیم رسوب رودخانه

5-2-5- مطالعات مربوط به کیفیت آب

5-2-6- زمین شناسی و لرزه‌خیزی

- 5-2-7- زمین شناسی مهندسی
- 5-2-8- منابع قرضه و مصالح ساخت
- 5-2-9- مطالعات زیست محیطی
- 5-2-10- مطالعات جامع منابع آب
- 5-2-11- مطالعات هیدروژئولوژی
- 5-2-12- مطالعات ژئوتکنیکی

6- عوامل موثر در انتخاب نوع سد

- 7- انواع سدهای خاکی/سنگریزه‌ای
- 8- نکات مهم در تعیین محور و طراحی سدهای خاکی
 - 8-1- نکات مربوط به پی و تکیه گاهها
 - 8-2- نکات مربوط به بدنه سد

9- تراوش در سدهای خاکی

- 10- کنترل تراوش
 - 10-1- دلایل کنترل تراوش
 - 10-2- کنترل تراوش در پی و تکیه گاهها
 - 10-3- کنترل تراوش در بدنه سد
 - 10-4- کنترل تراوش در محل تماس سد با پی و تکیه گاهها

11- پایداری شیبها

11-1- قطعه لغزنده

11-2- لغزش صفحه‌ای

11-3- لغزش دایره ای

11-4- لغزش چند خطی

11-5- لغزش کلی

12- فشار آب در سدهای خاکی و ارتباط آن با پایداری سد

12-1- در زمان ساخت

12-2- در اولین آبیگری

12-3- در زمان افت سریع در مخزن

12-4- در زمان زلزله

13- ترک خوردگی و آب شستگی در سدهای خاکی

13-1- انواع ترکها

13-1-1- ترکهای طولی

13-1-2- ترکهای عرضی

13-2- دلایل ایجاد ترک

13-3- اندرکنش ترک خوردگی و آب شستگی

13-4- روشهای تشخیص آب شستگی

13-5- علل آبشستگی

14- تهیه مصالح ساخت برای سدهای خاکی/سنگریزه‌ای

14-1- هسته

- 14-2- پوسته
- 14-3- فیلتر اول
- 14-4- فیلتر دوم (ناحیه انتقالی)
- 14-5- زه کش
- 14-6- ریپ ریپ
- 14-7- معیارهای طرح فیلتر

15- طراحی هندسه سد خاکی / سنگریزه‌ای

- 15-1- شیبهای بیرونی
- 15-2- شیبهای هسته
- 15-3- عرض هسته
- 15-4- عرض تاج
- 15-5- ارتفاع آزاد

16- اثر زلزله بر سدهای خاکی

- 16-1- آثار زلزله بر روی سد
- 16-2- اصول آنالیز شبه استاتیکی شیبها

1- مقدمه

سد الکفارات در مصر بیش از سه چهار هزار سال قدمت دارد، در گذشته چون اندازه سدها کوچک بوده، عوارض زیست محیطی آنها ناچیز بوده است. ولی امروزه با پیشرفت سدسازی و ساخت سدهای بزرگ، این پارامتر، مهم و چشمگیر شده است.

یکی از مشکلات سوخت‌های فسیلی، عدم استفاده مجدد و بازیافت آنهاست.

علل استفاده زیاد از انرژی برق آبی در کشوری مثل نروژ موارد زیر می‌باشد:

1- عدم دسترسی به سوخت‌های فسیلی ارزان

2- اهمیت محیط زیست

امروزه به علت اهمیت محیط زیست، استفاده از انرژی برق آبی در حال افزایش است.

بعد از چین و ترکیه، بیشترین هزینه برای ساخت پروژه‌های مربوط به انرژی برق آبی (مثل سدها) در ایران صرف می‌شود.

برخی دلایل ساخت سد:

1- انباشته کردن آب و استفاده از آن در جاهای دیگر برای اهداف

گوناگون

2- کنترل سیل

3- اهداف تفریحی و تجاری (مثل فروش آب)

عمده‌ترین دلایل استفاده از سدها:

1- تولید برق

2- ذخیره و استفاده از آب برای شرب

3- کنترل سیل

International Commission On Large Dams

(*ICOLD*) کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ

که در ایران *IRCOLD* نامیده می‌شود. این کمیسیون بیشتر جنبه صنفی دارد و کلاً طرفدار احداث سد می‌باشد.

World Commission On Dams (WCOD) کمیسیون

جهانی در مورد سدها

این کمیسیون بیشتر جنبه محیط زیستی را در نظر می‌گیرد. و معتقد است که بعضی از سدها ضررهای اقتصادی و زیست محیطی زیادی وارد می‌کنند، یا آبادانی قسمت پایین دست رودخانه را به خطر می‌اندازند، یا زندگی آبزیان و حیوانات را مشکل کرده، و آن را به خطر می‌اندازند.

ICOLD قدیمی تر است و در حال حاضر این دو تا کمیسیون با هم

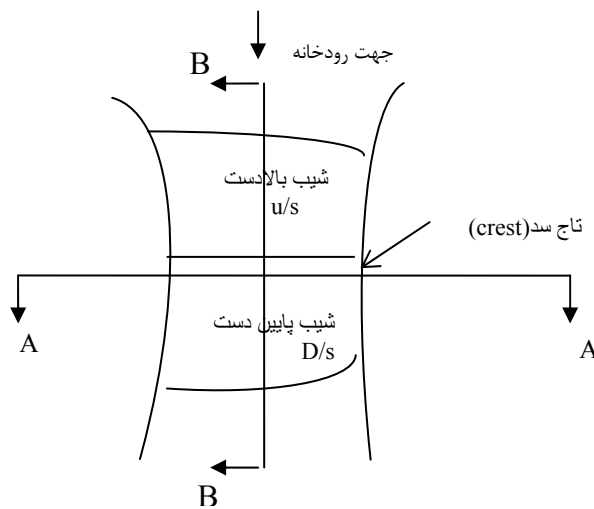
اختلاف نظرهایی دارند.

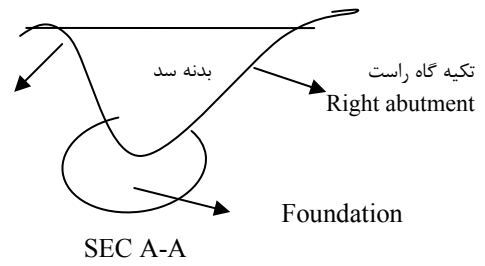
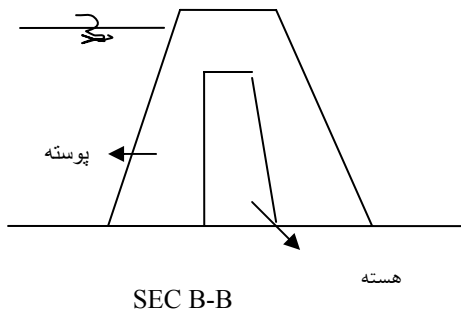
WOCD جدیدتر است و مدعی است که عدم مطالعه کافی برای احداث سدها، بیشتر از سود، ممکن است ضرر داشته باشد.

اجرای سد، به صورت صفر و یک نیست که کلی بگوییم ساخت سد خوب است یا بد است. اگر با مطالعه انجام شود خوب و کمترین ضرر را خواهد داشت.

تعریف سد:

سازه‌ای برای استفاده بهینه از آب





Earth Dams

سدهای خاکی

Embankment Dams

Rockfill Dams (سنگریزه‌ای) سدهای پاره سنگی

Upstream Embankment

شیب بالادست

Upstream

Slope

Downstream Embankment

شیب پایین دست

Downstream slope

Crest

تاج سد

Shell

پوسته

Core

هسته

Abutment

تکیه‌گاه یا کوله

(قسمت بالاتر و کناره‌ای سد - شکل بالا)

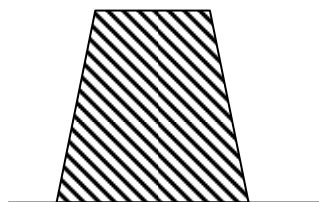
Foundation

پی

(قسمت انتهایی و پایین سد - شکل بالا)

در سد خاکی معمولاً پوسته از جنس خاک است (یعنی رس، لای، ماسه و شن). ولی در سد *Rockfill* ، بدنه از جنس مصالح سنگریزه‌ای است. هر دو از مصالح زمینی تهیه می‌شوند.

در بعضی از سدهای خاکی، هسته و پوسته از یک نوع مصالح تشکیل شده است. به این سدها سدهای همگن می‌گویند.



سد همگن

در سدهای بتنی، پایداری سد و نگهداری آب هر دو بر عهده بتن است. ولی در سدهای خاکی ممکن است این دو کار با هم عملی نباشد. اگر بخواهیم سدی را با خاک رس بسازیم حجم آن خیلی زیاد می‌شود. اگر بتوان با یک نوع خاک سد را ساخت که حجم آن هم زیاد نشود به آن سد همگن یا هموزن می‌گویند مثل سدهای بتنی.

پس اگر خاکی با یک هندسه خاص و معقول پیدا شود که هر دو کار پایداری و نفوذناپذیری (نفوذپذیری کم) را انجام دهد، سد همگن می‌شود. ولی برای سدهای بزرگ معمولاً سد همگن

اقتصادی نیست. بنابراین سدهای خاکی و سنگریزه‌ای را حداقل از دو المان می‌سازند.

المان هسته، مقاومت در مقابل نفوذ آب و کنترل تراوش را به عهده دارد و المان پوسته، نقش پایداری را دارد. نفوذ ناپذیرترین رس در حدود $10^{-10} m/s$ تا $k = 10^{-11}$ می‌باشد (حتی کمتر)، ولی نفوذپذیری بتن در حدود $10^{-8} m/sec$ تا 10^{-5} می‌باشد.

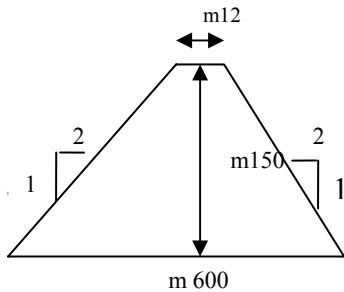
بزرگترین سد بتنی در امریکا 315 متر ارتفاع دارد.

سدهای سنگریزه‌ای و خاکی به ارتفاع 320 و 335 متر در تاجیکستان وجود دارد.

بلندترین سد خاکی سنگریزه‌ای در ایران سد مسجد سلیمان است که ارتفاع آن 176 متر است
ارتفاع سد کرخه $127 m$ و طول تاج سد، در حدود $3000 m$ است.

2- ویژگیهای سدهای خاکی

1- سازه‌ای بزرگ و دست ساز بشر (سازه مهندسی به کوه هم گفته می‌شود. کوهها بزرگترین سازه‌های طبیعی از نظر ابعاد هستند) مثلاً اگر برای یک سد طول تاج 3 km و به صورت ایده‌آل شکل دره U شکل باشد، برای سدی با مشخصات زیر، حجم خاکریزی قابل محاسبه خواهد بود.



$$V = 3000 \left(150 \times \frac{600 + 12}{2} \right) \approx 137.7 \times 10^6$$

حجم خاکریزی

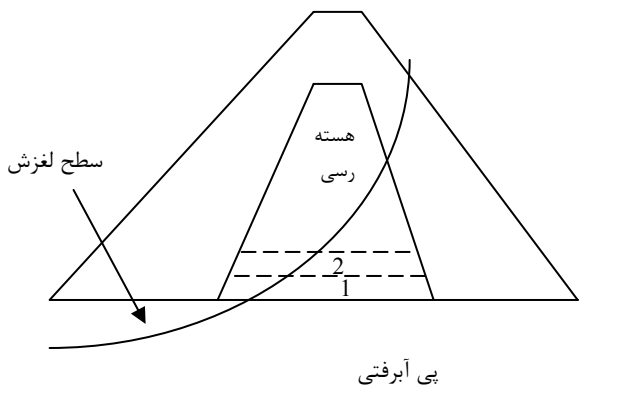
مشخص است که حجم زیادی دارد. بنابراین یک مهندس طراح سد هر چه بتواند این حجم را کمتر کند، طرح او اقتصادی‌تر است. وقتی سد آگیری می‌شود یک بارگذاری سنگین علاوه بر بار خود سد بر بدنه، پی و بستر مخزن وارد می‌شود.

2- بارگذاری‌های ویژه و متنوع، شامل:

- بارگذاری زمان ساخت
- بارگذاری اولین آبگیری
- بارگذاری جریان تراوش پایدار در بدنه سد و پی
- بارگذاری افت سریع در مخزن
- بارگذاری ناشی از زلزله

بارگذاری زمان ساخت

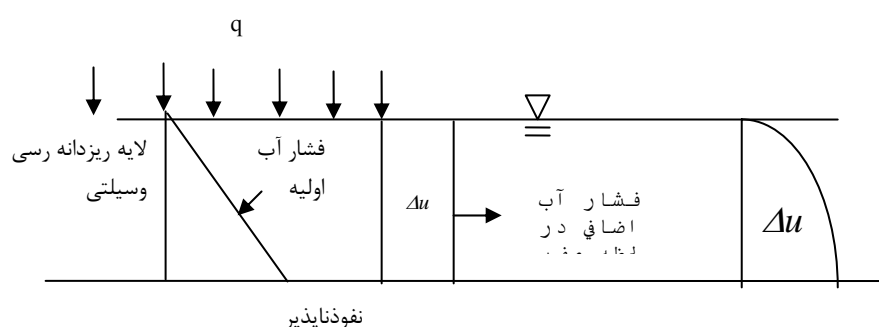
وقتی لایه دوم هسته را می‌کوبند، در نتیجه بارگذاری لایه دوم، درجه اشباع در لایه اول بالا می‌رود. به همین ترتیب، هر چه درجه اشباع بالا می‌رود مقاومت کمتر می‌شود، و ممکن سد ناپایدار شود. همین امر ممکن است در پی آبرفتی هم رخ دهد.



بارگذاری در شرایط زهکشی نشده:

بارگذاری که در آن سرعت بارگذاری از سرعت خروج آب بیشتر است و بار وارده عمدتاً به آب منتقل می‌شود و در نتیجه فشار آب حفره‌ای بالا می‌رود.

چون سطح بالا زهکشی شده است همان اول آب خارج شده، بنابراین Δu کم می‌شود.



با گذشت زمان از Δu کاسته می‌شود تا به صفر برسد (این یعنی تحکیم). دقت شود که u (فشار آب حفره‌ای اولیه) تغییر نمی‌کند.

ملاحظه می‌شود بخاطر وجود آب مجبوریم بارگذاری‌های متعددی را در نظر بگیریم.

بارگذاری اولین آبگیری

بر اثر آبگیری، آب از پوسته رد می‌شود ولی پشت هسته می‌ماند، چون نفوذپذیری آن خیلی کم است. در نتیجه فشاری مرزی بر روی لایه رسی وارد می‌شود.

فشار مرزی دو اثر بر هسته دارد::

1- اعمال نیروی هیدرواستاتیکی بر روی هسته

2- بالارفتن Δu (علاوه بر آن که از زمان ساخت بوده) در هسته.

فشار آبگیری بر روی پی هم هست و در صورتیکه پی نفوذ پذیری کمی داشته باشد، باعث بالا رفتن فشار آب حفره‌ای در پی سد هم می‌شود.

بارگذاری در زمان برقراری تراوش پایدار

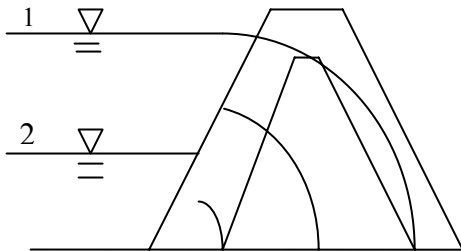
بسته به نفوذپذیری خاک، برابر شدن حجم ورودی آب و حجم خروجی آب به و از هسته رسی ممکن است چند سال بطول انجامد. وقتی که این دو مقدار برابر نیست به آن جریان انتقالی می‌گویند.

جریان پایدار: جریانی که وارد بدنه و پی می‌شود با جریان خروجی از آن‌ها برابر است. در اینصورت، فشار آب در هر نقطه سد با استفاده از شبکه جریان محاسبه می‌شود. در اصطلاح لاتین به آن *Steady State Seepage* گفته می‌شود.

افت سریع در مخزن

بعضی وقت‌ها به دلایلی مجبوریم آب را از سطح 1 به سطح 2 پائین بیاوریم. این دلایل عبارتند از:

- در خطر بودن پایداری سد
 - نیاز به تعمیر سد
 - نیاز به آب اضافی در پایین دست
 - در راه بودن سیل پیش بینی نشده
- اگر پایین آوردن آب سریع باشد، به این می‌گویند افت سریع در مخزن. بر اثر افت سریع در مخزن دو پدیده زیر اتفاق می‌افتد.



- 1- در پوسته، تراز آب هم زمان با تراز آب در مخزن پایین می‌آید، یا کمی دیرتر (بسته به نفوذپذیری پوسته).
- 2- در هسته جریان معکوس شروع می‌شود، ولی فشار آب در هسته سریعاً کاهش نمی‌یابد.

بارگذاری زلزله

- زلزله ممکن است فشار آب حفره‌ای در خاک را زیاد کند.
- نیروی زلزله خودش باعث خراب شدن سازه بشود.
- اثر نهائی زلزله اینست که باعث نشست می‌شود.

یکی از آثار زلزله ایجاد روانگرایی در خاکهای سست دانه‌ای است.

• روانگرایی (*Liquefaction*) چیست؟

مثال: اگر در یک کیسه پلاستیکی ارزن داشته باشیم و تا سطح روی آن آب باشد. بعد اگر تکان بدهیم، نشست نمی‌کند چون نفوذپذیری آن کم است. اگر لوبیا داشتیم با یک تکان سطح آب بالا می‌آید و لوبیا نشست پیدا می‌کند. در واقع در ارزن روانگرایی رخ می‌دهد.

• شرایط اصلی وقوع روانگرایی:

- اولاً خاک به اندازه کافی نفوذناپذیر باشد.
- آب در محیط باشد.
- نیرویی که در خاک ایجاد تمایل به نشست کند وجود داشته باشد (مثل زلزله)

وقوع روانگرایی در خاکهای غیرچسبنده نسبتاً ریز (مثل ماسه‌ها) خیلی محتمل است. در رس‌ها احتمال کمتری دارد، چون بخشی از مقاومت رس‌ها ناشی از چسبندگی آنها و در نتیجه مستقل از تنش موثر می‌باشد.

پس روانگرایی چیزی نیست جز واکنش خاک به یک بارگذاری زهکشی نشده سریع به صورت رادیکالی و افراطی. هر بارگذاری سریع که در خاک اشباع بخواد ایجاد نشست کند در خاک ایجاد روانگرایی می‌کند.

$$\sigma' = \sigma - u$$

محیط متخلخل *Porous Media*

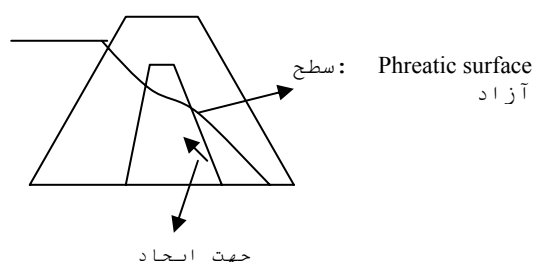
در همه این بارگذاری‌ها بر روی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، آب حضور دارد. در بارگذاری‌های مذکور (بجز حالت تراوش پایدار) شرایط بارگذاری در هسته سد و پی آبرفتی ریزدانه به صورت زه‌کشی نشده می‌باشد.

- ادامه ویژگیهای سدهای خاکی / پاره سنگی
- 1 و 2 را گفتیم (بزرگ بودن سازه و بارگذاری‌های متنوع)

3- لزوم مراقبت در طول عمر سد

پارامترهایی که باید کنترل شوند:

- وضعیت فشار آب حفره ای در پی و هسته
- پتانسیل وقوع فرسایش ریز دانه‌ها (هسته، پی) بر اثر جریان تراوش



به فرسایش داخلی (آبشستگی یا رگاب) *Piping* یا *Internal erosion* می‌گویند.

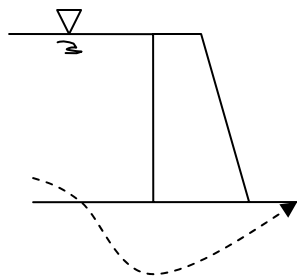
میزان زیاد شدن *seepage* در هسته ممکن است علامت شروع وقوع پدیده رگاب باشد.

روش‌های تشخیص رگاب

- افزایش میزان آب
- رنگ جریان خروجی: رنگ آب در رگاب نمی‌تواند زلال باشد
- از روی فشار داخلی هسته (پیزومترها)

این مشکل را در بدنه سدهای بتنی نداریم، ولی در پی آنها ممکن است بوجود آید. پی سدهای بتنی معمولاً سنگ است ولی بین لایه‌های آن خاک هم ممکن است باشد. معمولاً خاک وجود دارد که ناشی از جریان آب است که رسوبات را در طی زمان می‌آورد.

Piping: یعنی ایجاد لوله؛ با حرکت آب، ریزدانه‌ها شسته شده و به داخل پوسته (درشت دانه) می‌رود. وقتی جایش خالی شد، ریزدانه بعدی حرکت کرده و به همین صورت یک لوله در جهت عقب رونده (*backward*) ایجاد می‌شود.



- جریانهای سطحی ناشی از باران و ... که ممکن است قسمت تاج سد و سطح شیب پایین دست را بشوید و ببرد.

- سرریز شدن: *Over-topping*

سرریز شدن یعنی بالا آمدن آب در مخزن و از روی تاج سد بر روی شیب پائین دست جاری شدن. سرریز شدن برای سدهای خاکی مجاز نمی باشد، چون باعث شسته شدن تاج و شیب و نهایتاً ناپایداری سد می شود. معمولاً برای سد بتنی اگر زمان سرریز شدن طولانی نباشد، خطرناک نیست.

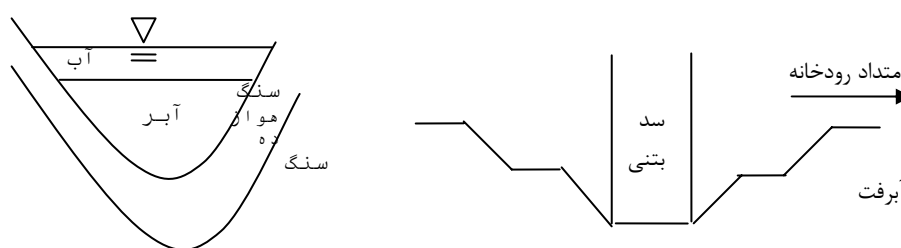
- کنترل میزان نشت از بدنه و پی

- کنترل خطر ایجاد سوراخها در بدنه و پی سد (بوسیله حیواناتی نظیر گورکنها و موشهای صحرائی)

3- مزایا و معایب سدهای خاکی/سنگریزه‌ای

3-1- مزایا

- 1- استفاده از مصالح محلی و در دسترس
- 2- اجرای آن آسانتر و معمولاً سریع‌تر است (نسبت به سد بتنی)
- 3- اجرای آن ارزان‌تر است
- 4- بر روی پی‌های ضعیف هم می‌توان بنا کرد.



ارتفاع آبرفت از 3-4 متر تا 70-80 متر ممکن است باشد. سد بتنی را نمی‌شود بر روی آبرفت گذاشت و باید آن را برداشت که این برداشت مشکل و پرهزینه است.

در حفاری آبرفت، چون خاک شل و سست است شیب‌های طرفین باید خیلی ملایم باشد، بنابراین حجم عملیات حفاری و آبردائی (*dewatering*) هم بالا می‌رود.

هوازدهگی : *weathering*

یعنی سنگ در طی سالیان متمادی تحت تغییر شرایط جوی، فیزیکی و شیمیائی بوده است. این شرایط شامل تغییر درجه حرارت، شیمی آب، تر و خشک شدن و یخبندان و ... می‌باشد. بر روی سنگ هوازده

نمی‌شود سد بتنی تاسیس کرد، ولی سد خاکی را می‌شود بر روی آبرفت هم قرار داد.

چرا؟ چون سطح قاعده سد خاکی خیلی زیاد است، تنش‌های ایجاد شده در پی کمتر خواهد بود. ولی سطح سد بتنی کمتر است، لذا تنش‌های ایجاد شده در پی بیشتر خواهد بود. بنابراین باید پی سد بتنی قویتر باشد. به علاوه، رفتار خاک نسبت به بتن منعطف تر است و تغییر شکل‌های زیادی را می‌تواند تحمل کند بدون اینکه ترک بخورد.

5- انعطاف بیشتر در مقابل بارهای لرزه‌ای مثل زلزله (هم مزیت و هم نقیصه است)

مزیت: جلوی خراب شدن در مقابل زلزله بیشتر استقامت می‌کند چون خاک میرائی بیشتری دارد.

عیب: زلزله در خاک‌های اشباع ریزدانه *por pressure* را بالا می‌برد و از مقاومت می‌کاهد و حالت حدی آن همان مساله روانگرایی است که قبلاً به آن اشاره شد.

2-3- نارسائیه‌ها و معایب سدهای خاکی و سنگریزه‌ای

1- ضعف در مقابل عوامل فرساینده:

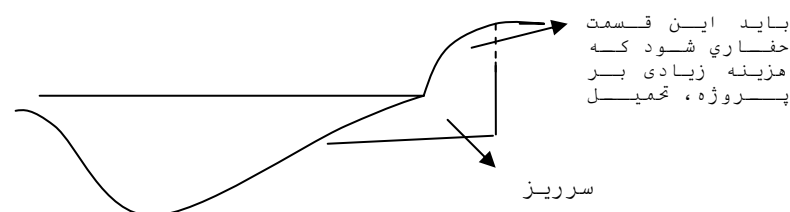
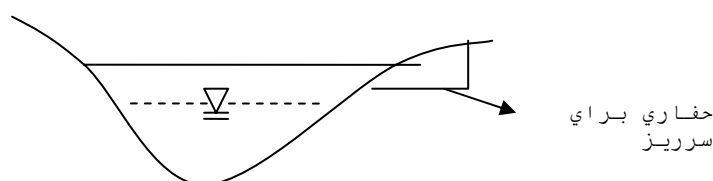
- داخلی ← *piping*

- خارجی ← *over-topping*

2- افزایش شدید فشار آب حفره ای در مصالح ریزدانه پی و هسته در اثر زلزله که منجر به کاهش مقاومت می شود.

3- ساخت سازه های جنبی (اکثراً بتنی) در مجاورت یا درون بدنه سد

در سدهای بتنی، سرریزهای بتنی در یک گوشه یا وسط سد قرار گرفته و چون سرریز و سد هر دو بتنی است لذا ساخت آن ساده تر است. ولی در سدهای خاکی چون باید سرریز بتنی باشد و سرریز بتنی را غالباً نمی شود بر روی خاک گذاشت و باید روی سنگ گذاشته شود، بنابراین نمی توان آن را وسط سد گذاشت و باید در کنار آن باشد.



سرریز شوت باید بر روی زمین محکم واقع شود.

عدم همخوانی رفتار بتن و خاک (وقتی سرریز در دل مجاورت خاک باشد) - چه رفتار مقاومتی چه رفتار هیدرولیکی - یکی از مشکلات این سدها ست که در سد بتنی نیست. در جاهائیکه بتن با هسته در ارتباط است باید خیلی مراقب باشیم (چه به خاطر نفوذپذیری بالا و چه بخاطر ایجاد تنش‌های نامتقارن و تغییر شکل‌های نامساوی و در نتیجه ترک خوردن)

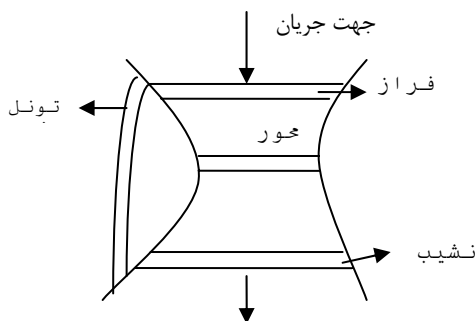
- علت‌های شکست و تخریب سدهای خاکی/پاره سنگی:
 $(H > 15^m)$ در سالهای 1900-1985 (به سدهای با ارتفاع بیش از 15^m *large dam* می‌گویند)

علت	درصد
سرریز شدن <i>over-topping</i>	35 (با بیشتر کردن <i>Freebord</i> در حال کم شدن است)
رگاب <i>piping</i>	38
ضعف و ناپایداری پی	21
متفرقه	6

1.5٪ از کل سدهای خاکی کاملاً تخریب شده‌اند. این درصد زیاد نیست ولی چون عارضه تخریب سد زیاد است لذا باید حساس بود. 0.7 تا 0.8٪ از کل سدهای بتنی تخریب شده‌اند.

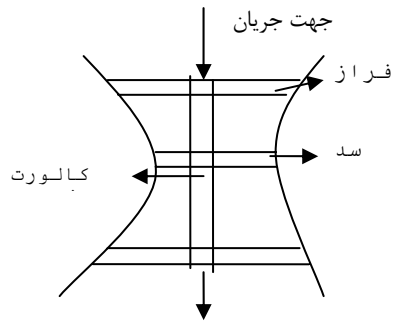
4- مروری بر روشهای انحراف آب در زمان ساخت سد

برای خشک کردن سایت سایت جهت ساخت سد، باید تونل انحراف ایجاد کرد. تا آب از تونل بگذرد و رودخانه در محور سد خشک شود. همچنین باید یک سد به نام فراز بند احداث شود تا آب داخل تونل برود. برای عدم برگشت آب در پایین دست هم از نشیب بند استفاده می شود.



در جاهائیکه تکیه گاهها سنگی است و توپوگرافی اجازه می دهد از تونل انحراف استفاده می شود. ولی در جاهائیکه دشت است، کالورت انحراف ممکن است عملی تر و اقتصادی تر باشد.

سد بر روی کالورت انحراف احداث می شود و از کالورت انحراف بعداً می توان به عنوان یک تخلیه کننده تحتانی استفاده کرد.



5- مطالعات اولیه سدها

1-5- ضرورت مطالعات اولیه

مطالعات اولیه برای طراحی و ساخت یک سد به دو منظور اصلی زیر انجام می‌شود

1- کسب اطمینان از عملی بودن طرح از نقطه نظر فنی
(*Technical*)

2- کسب اطمینان از عملی بودن طرح از نقطه نظر اقتصادی
(*economical*)

بنابراین به این مطالعات، مطالعات امکان‌سنجی می‌گویند
(*Feasibility studies*)

(*Is it feasible*) طرح عملی است؟

بله: مطالعات تکمیلی، طرح، اجرا

خیر: توقف طرح

2-5- محورهای مطالعات اولیه

1- تهیه نقشه با مقیاس‌های مناسب از محور سد و حوضه آبریز
(برای طراحی بدنه $\frac{1}{500}$ تا $\frac{1}{1000}$ و برای کل حوضه $\frac{1}{250000}$ تا $\frac{1}{500000}$)

2- مطالعات هواشناسی (*Meteorology*)

- بارندگی

- تبخیر

- درجه حرارت

- روزهای یخبندان
- رطوبت نسبی
- باد: به دلیل ایجاد موج و خطر *over topping*
- حداکثر بارندگی محتمل (*Possible Maximum Precipitation*) *PMP*

3- مطالعات هیدرولوژی

- دبی رودخانه در فصول مختلف
- مشخصات سیلابها
- سیل طراحی
- *PMF* حداکثر سیلاب محتمل (*Possible Maximum Flood*)

4- رسوب گذاری و رژیم آن در مخزن
توجه شود که لایروبی مخازن سدها کار ساده‌ای نیست.

5- مطالعات مربوط به کیفیت آب

6- زمین شناسی و لرزه خیزی سایت

7- زمین شناسی مهندسی پی و تکیه گاهها جهت تعیین لایه بندی
زمین و خواص آنها

8- منابع قرضه و مصالح ساخت

وقتی می خواهیم یک سد مثلاً با هسته رسی درست کنیم باید در نزدیکی محور سد، منبع قرضه مصالح مورد نیاز موجود باشد. منابع قرضه بعضاً تعیین کننده انتخاب نوع سد می باشد.

9- مطالعات زیست محیطی

10- مطالعات جامع منابع آب

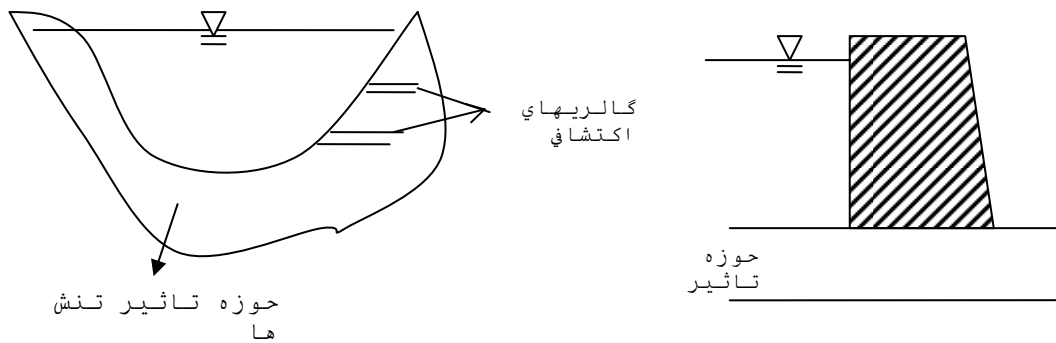
در یک رودخانه باید مطالعه کنیم که در کجا و با چه ارتفاعی و در چه زمانی چه نوع سدی احداث کنیم تا استفاده بهینه از سدها و آب رودخانه داشته باشیم.

11- مطالعات هیدروژئولوژی

12- مطالعات ژئوتکنیکی

یک سد باید پایداری و آببندی کاملی داشته باشد. این مطالعات شامل مباحث زیر می باشد:

- تعیین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل پذیری زمین در محور سد و مناطق نزدیک به سد در مخزن
- تعیین میزان آبدهی (نفوذپذیری پی، تکیه گاهها، و دیوارهای مخزن) در محور و مناطق نزدیک سد



● تعیین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکلی بوسیله روشهای زیر صورت می‌گیرد.

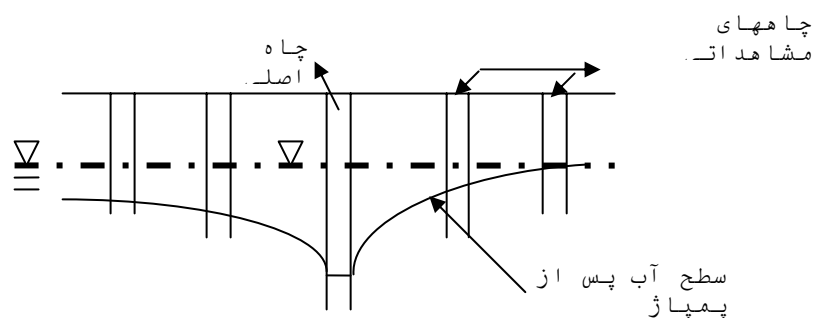
- گمانه رنی
- نمونه گیری
- آزمایشات ژئوفیزیک
- آزمایشات آزمایشگاهی
- حفر گالری‌های اکتشافی
- آزمایشات محلی

تعیین نفوذپذیری (k). ترجیحاً این آزمایشها به صورت در جا و در محل انجام شود.

- آزمایش لوژان *Lugeon* (آزمایش فشار آب *Water Pressur Test*)

- آزمایش لوفران که در خاکها بیشتر کاربرد دارد.

- آزمایش پمپاژ، که عبارتست از محاسبه ضریب نفوذپذیری به وسیله پمپاژ آب از چاه با نرخ ثابت. گاهی در جاهائیکه سطح آب پایین است می توان به جای خارج کردن آب بیاییم آب تزریق کنیم و از روی آن مقدار k را بدست آوریم.



6- عوامل موثر در انتخاب نوع سد

سدها به طور کلی بر حسب مصالح و نوع عملکرد سازه‌های آنها به سدهای زیر تقسیم می‌شوند:

- سد بتنی وزنی
- سدهای بتنی پشت بندار
- سدهای بتنی قوسی
- سدهای با مصالح زمینی *Earth fill Dams*

عوامل موثر در انتخاب نوع سد

- هندسه دره
- موجود بودن مصالح
- مقاومت پی و تکیه گاهها
- لرزه خیزی منطقه و شرایط آب و هوایی
- مدت زمان لازم برای ساخت
- تکنولوژی موجود
- موجود بودن پیمانکار ماهر و کاربلد
- ارزیابی اقتصادی

اگر عرض دره وسیع باشد ممکن است سد قوسی اقتصادی نباشد و اگر دره تنگ باشد، ممکن است بهترین گزینه سد قوسی باشد؛ البته با فرض اینکه تکیه گاهها و پی مقاوم باشند. در جاهائیکه پی ضعیف باشد (آبرفتی) یا باید از سدهای خاکی استفاده کنیم و یا

باید با برداشت آبرفت و سنگ هوازده، سد را روی سنگ بکر قرار
دهیم.

7- انواع سدهای خاکی / سنگریزه‌ای

1- سدهای همگن *Homogenous Earth Dams*

2- سدهای غیر همگن *Zoned Earth Dams*

- سدهای خاکی با هسته رسی

• هسته قائم

• هسته مایل

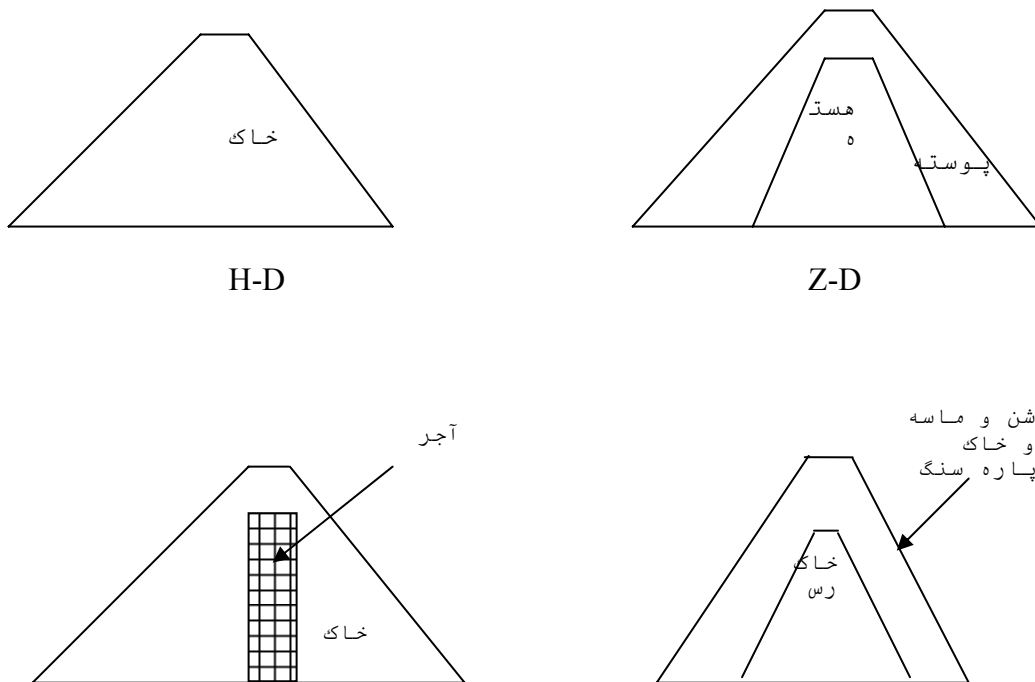
- سدهای سنگریزه‌ای

• هسته خاکی

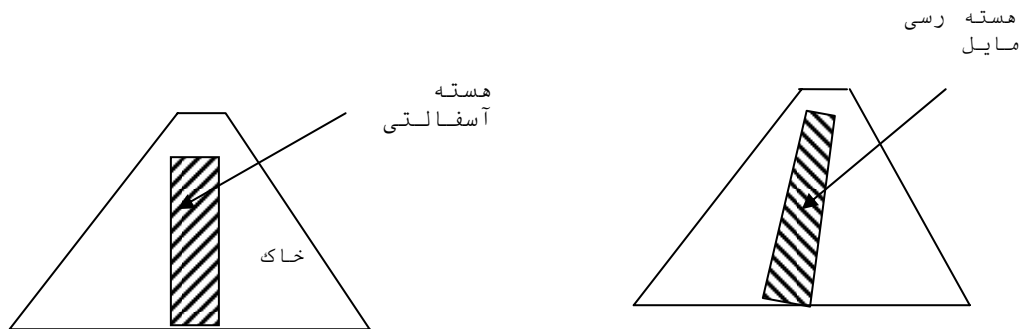
• رویه بتنی (*CFRD*)

- سدهای خاکی / سنگریزه‌ای با هسته آسفالتی

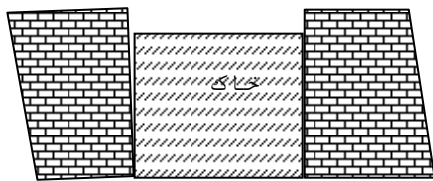
- سدهای خاکی / سنگریزه‌ای با رویه آسفالتی



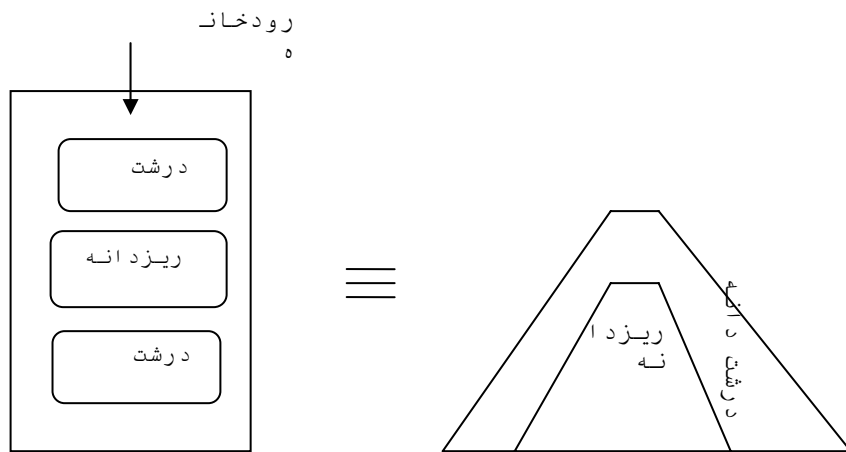
نمونه‌هایی از سدهای خاکی



سد الکفاره قدیمیترین سد دنیا در 2000 سال قبل از میلاد مسیح احداث شده است.



بعد از اینکه فهمیدند که سدهای همگن مناسب نیست، سدهائی ساختند که شبیه به همان سدهای غیر همگن می‌باشد ولی روش اجرای متفاوتی دارند. به این نوع سد، *Hydraulic Fill Dam* می‌گویند.

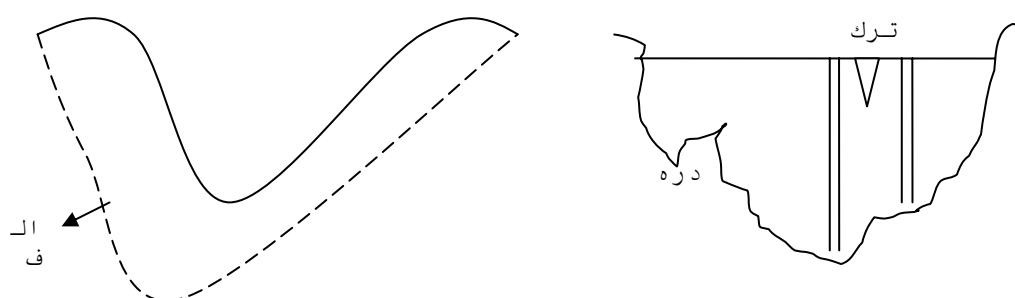


شکل شماتیک سد *Hydraulic Fill Dam*

8- نکات مهمی که در تعیین محل و طراحی سدهای خاکی باید در نظر گرفت:

الف- نکات مربوط به غیر از بدنه سد (تکیه گاهها و پی)

- شکل دره: معمولاً قبل از خاکریزی بدنه، قسمت‌های هوازده را بررسی می‌دارند.



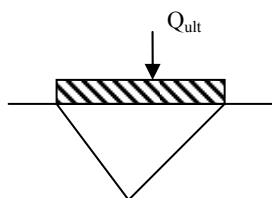
در دره‌های با توپوگرافی ناهموار یا در دره‌های تنگ، مشکل دیگر نشست‌های غیرمتقارن است چون ارتفاع خاک متغییر است و این باعث ایجاد ترک بین مقاطع مختلف می‌شود.

- میزان آبدهی و تراوش از پی

اگر پی زمین آبرفتی باشد (مصالحی که با جریان آب آمده و ته نشین شده است) غالباً نفوذپذیری بالائی دارند. آبرفت‌ها نوعاً مخلوطی از شن و ماسه و سیلت و رس بوده و نفوذپذیری بالایی دارند. البته لایه‌های رسی با نفوذپذیری خیلی کم هم در بین آنها وجود دارد.

- میزان آبدهی و تراوش از تکیه گاهها: باید مواظب زمین‌های کارستی و آهکی باشیم. کارست نوعی زمین است که میزان آهک آن زیاد است. اینها در مجاورت آب فرسوده می‌شوند و آبدهی بالایی دارند. بعضی از غارها کارستی هستند.

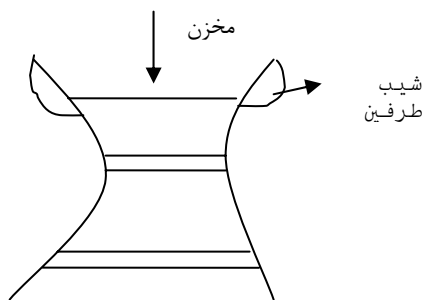
- ظرفیت باربری پی، بیشتر وزن سدهای خاکی و سدهای بتنی وزنی بر روی پی است. برعکس در سدهای بتنی قوسی که نیرو بیشتر بر تکیه‌گاه‌ها وارد می‌شود.



- بررسی پتانسیل روان گرائی (*Liquefaction*)
 اگر تحت بارگذاری ای فشار آب حفره‌ای به علت تمایل به نشست خاک و عدم وقوع نشست به حدی بالا رود که تنش موثر صفر یا خیلی کم، شود حالت روانگرایی پیش می‌آید.
 حالت روانگرایی بیشتر در ماسه‌های ریزدانه پیش می‌آید چون در رس‌ها چسبندگی وجود دارد ولی در ماسه نیست. باید ماسه متراکم نباشد و شل باشد پس روانگرایی ناشی از یک بارگذاری سریع است و در خاک‌های ماسه‌ای و سست تحت بارگذاری زه‌کشی نشده بر اثر کاهش شدید σ' رخ می‌دهد.

ممکن است که در خاکهای آبرفتی که پی سد روی آن است خاک ماسه‌ای باشد و تحت بار زلزله روان‌گرا شود.

- بررسی پایداری شیب‌های مشرف به مخزن در اثر بالا و پایین رفتن آب یا افت سریع در مخزن یا نیروی زلزله و ... ممکن است شیب‌های طرفین مخزن بر اثر ناپایداری به درون مخزن بغلطد و این باعث *overtop* شدن سد شود. و این *overtop* شدن جریان ممکن است به تخریب شیب پایین دست و حتی به تخریب کل سد بیانجامد.



ب- نکات مربوط به بدنه سد

- ارزیابی پایداری سد در مقابل نیروهای استاتیکی و دینامیکی (مثل زلزله) در همه مقاطع عمر سد

- روانگرایی مصالح بدنه

در سدهای مدرن به دلیل کنترل بر روی انتخاب نوع مصالح و تراکم آنها روانگرایی کمتر اتفاق می‌افتد. یکی از شروط ایجاد روانگرایی در ماسه این است که ماسه متراکم نباشد و ماسه شل

باشد. چون ماسه متراکم تمایل به نشست ندارد لذا روانگرا نمی‌شود.

- کنترل تراوش در بدنه و کنترل فرسایش ریزدانه‌های هسته به داخل پوسته یا به داخل پی

- کنترل تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در بدنه با نصب ابزار دقیق در بدنه و پی تنش‌ها و تغییر شکل‌ها اندازه‌گیری و پایش می‌شود.

ج- اقتصادی بودن پروژه: مقایسه هزینه با فایده

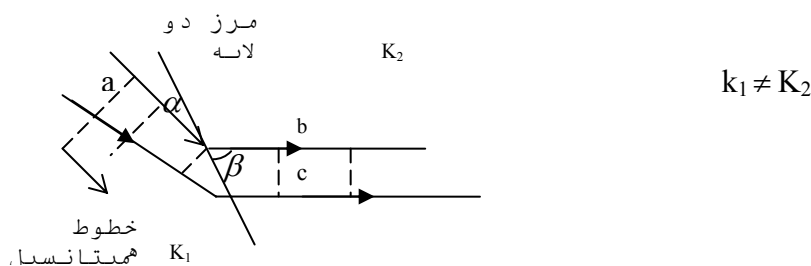
$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Benefit}}{\text{cost}} = ?$$

یا

$$B - C = ?$$

9- تراوش در سدهای خاکی

- موارد زیر را باید از مکانیک خاک بدانیم و حتماً یادداشته باشیم
- معادله دارسی، معادله لاپلاس دو بعدی، معادله لاپلاس سه بعدی و ...
 - قانون دارسی
 - معادله جریان آب در خاک در حالت $2D$ و $3D$
 - ترسیم خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل
 - نیروی زه *Seepage force*
 - گرادیان بحرانی *Critical Gradient*
 - نفوذپذیری k در یک جهت کلی با استفاده از k_x و k_y
 - نفوذپذیری k در خاکهای چند لایه با فرض جریان عمود بر لایه‌ها و جریان موازی با لایه‌ها
 - تغییر مسیر جریان آب در فصل مشترک دو خاک با نفوذپذیری متفاوت:



اگر جریان آب از یک خاک به خاک دیگر وارد شود دیگر شبکه جریان مربعی نخواهد بود و همچنین جهت جریان هم فرق می‌کند.

فرض: $k_1 \neq k_2$

حکم: $b \neq c$, $\alpha \neq \beta$

یک فرض داریم و آن پیوستگی جریان است. یعنی هر چه جریان می‌آید از آنطرف بیرون می‌رود. در جهت عمود بر صفحه ضخامت را واحد در نظر می‌گیریم.

$$\Delta q = V \times A$$

$$\Delta q_1 = (k_1) \left(\frac{\Delta h}{a} \times a \times 1 \right)$$

$$\Delta q_2 = (k_2) \left(\frac{\Delta h}{b} \times c \times 1 \right)$$

$$\Rightarrow \Delta q_1 = \Delta q_2$$

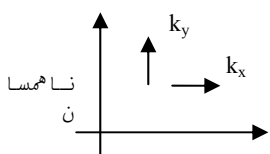
$$\Rightarrow (k_1) \left(\frac{\Delta h}{a} \times a \times 1 \right) = (k_2) \left(\frac{\Delta h}{b} \times c \times 1 \right)$$

$$\Rightarrow \frac{k_1}{k_2} = \frac{c}{b} \xrightarrow{k_1 \neq k_2} c \neq b$$

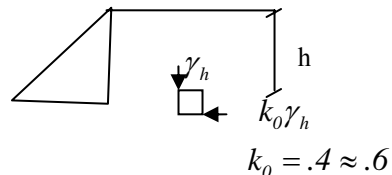
- تمرین: ثابت کنید که در جریان در فصل مشترک لایه‌ها با نفوذپذیری متفاوت، رابطه زیر برقرار است.

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{c}{b} = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}$$

- ترسیم شبکه جریان در محیط‌های ناهمسان (یعنی در جهات مختلف نفوذپذیری متفاوت است)



$$k_x \neq k_y$$



معمولاً نفوذپذیری افقی بیشتر از نفوذپذیری قائم است و این در خاک‌های دانه‌ای کمتر و در خاک‌های چسبنده بیشتر است. نسبت $\frac{k_x}{k_y}$ در خاک‌های چسبنده تا 20 برابر و در خاک‌های دانه‌ای 2 تا 3 برابر است.

فرض اساسی جریان:

میزان جریان ورودی = میزان جریان خروجی
این فرض اساسی است
اگر معادله فوق را بنویسیم به رابطه زیر می‌رسیم.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

u : سرعت در امتداد x

v : سرعت در امتداد y

و حالا اگر از قانون داریسی استفاده کنیم

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

فرمول خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل

معادله لاپلاس برای شبکه جریان با فرض $(k_x = k_y)$

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

فرض می‌کنیم در جهت افقی (x) یک مقیاس جدید داریم:

$$x' = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \cdot x$$

در نتیجه خواهیم داشت:

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

این معادله لاپلاس است و می‌توان شبکه جریان آن را رسم کرد با این تفاوت که اولاً تمام x ها را به x' ها تبدیل کنیم. شبکه جریان در مختصات جدید (x', y) مربعی خواهد بود.

راه حل دیگر این است که y' را تعریف کنیم.

$$y' = \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \cdot y$$

دقت شود که در این صورت هد آب نیز تغییر می‌کند.

- پس از ترسیم شبکه جریان در مقطع جدید، شبکه جریان را در مقطع اصلی پیاده می‌کنیم در این صورت شکل شبکه جریان به صورت متوازی الاضلاع خواهد بود که در آن خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل بر یکدیگر عمود نیستند. در این صورت، نفوذپذیری معادل (\bar{k}) برابر است با:

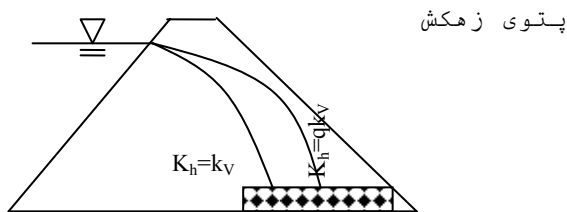
$$\bar{k} = \sqrt{k_x \cdot k_y}$$

$$q = \bar{k} H \frac{n_f}{n_d}$$

● تبصره: توجه داشته باشید که گرادیان هیدرولیکی و نیروی زه در هر نقطه از شبکه جریان، تنها با استفاده از مقطع اصلی قابل

محاسبه هستند. ($j = \frac{\Delta h}{\ell}$)

نکات عملی:



کار پتوی زهکش این است که آب را به سمت خود می کشد و از شیب پایین دست دور می کند.

$$I = \frac{CAE}{L} \quad \Rightarrow Q = \frac{KAh}{L}$$

I : شدت جریان

C : ضریب رسانایی الکتریکی

A : سطح مقطع

E : اختلاف پتانسیل

L : طول مسیر

وب سایت *Geoslope International* را ببینید، نرم افزارهای زیر موجود است.

آنالیز تنش - تغییر شکل: Sigma/w

آنالیز پایداری شیروانی ها: Slope/w

آنالیز تراوش: *Seep/w*
بارگذاری زلزله: *Quake/w*

10- کنترل تراوش (Seepage Control)

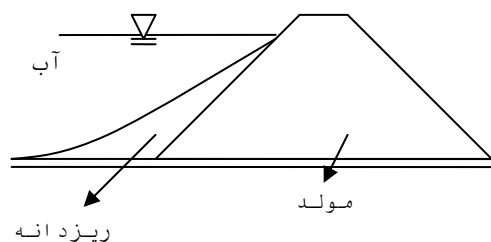
کنترل تراوش یعنی اینکه در محیط‌های متخلخل که آب می‌تواند جریان پیدا کند آن را کنترل کنیم و از آثار مخرب (اقتصادی و فنی) آن بکاهیم.

• دلایل کنترل تراوش

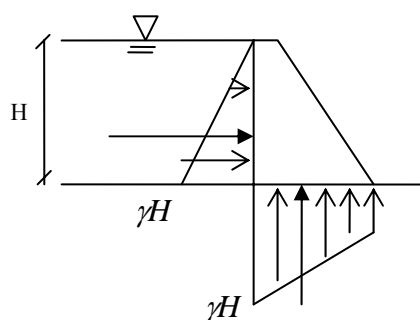
1- حفظ آب (آب تمیز) در سدهای معمولی

2- مهار آبهای آلوده در سدهای باطله (Tailings Dams)

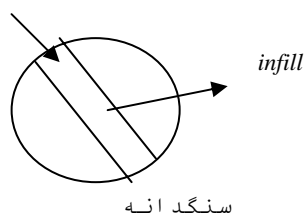
در معادن که پروسه استخراج آنها همراه با اضافه کردن افزودنیها است، وقتی عیار واقعی آن را می‌گیرند، مخلوطی از خاک درشت دانه و ریزدانه، آب و مواد شیمیایی باقی می‌ماند. شرایط زیست محیطی اجازه نمی‌دهد که این مواد آبکی را وارد محیط زیست کنیم. برای حفظ این آبها، از سدهای باطله استفاده می‌شود. از مصالح درشت دانه زواید به عنوان مصالح برای درست کردن بدنه سد استفاده می‌شود و مصالح ریز دانه و آب پشت سد انباشته می‌شود. در این جا، منظور از کنترل تراوش، مهار و کنترل نشت این آب خطرناک و سمی به محیط است.



3- کنترل پایداری سد و پی در مقابل لغزش و واژگونی.
 ر دو این نیروها کمک به چرخش *overturning* سد می کند
 هم کنترل پایداری واژگونی و هم کنترل پایداری لغزش مهم است.



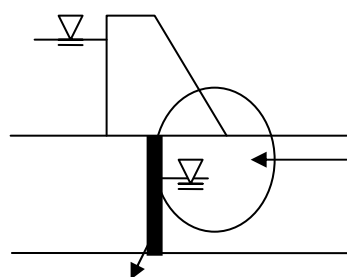
4- کنترل پایداری داخلی خاک در پی و تکیه گاهها و در بدنه سد
 در سدهائی که بر روی پی های سنگی بنا شده اند، در بین لایه های
 سنگ، *infill* هایی وجود دارد (ریزدانه) که اگر گرازیانی که سد
 تولید می کند از گرازیان ماکزیمم رودخانه بیشتر باشد، باعث
 می شود که این *infill* ها را بشوید و با خود ببرد و این باعث
 می شود که شدیداً نفوذپذیری زیاد شود. و اگر سد بر روی پی
 خاکی بنا شده باشد، ریزدانه ها را از داخل و مابین درشت دانه
 می برد و پایداری داخلی پی را مشکل می کند. به این پدیده اخیر،
 ریزشویی (*Suffusion*) می گویند.



برای کنترل تراوش در پی در سدها معمولاً از سپری‌های فلزی استفاده نمی‌شود، چون هم گران است و هم کوبیدن آنها مشکل است و در عمق زیاد نمی‌توان اجرا کرد. حسن آنها اینست که کاملاً نفوذناپذیر است.

برای آب‌بندی پی معمولاً از دیوارهای بتنی یا تزریق سیمان استفاده می‌شود.

در سمت پائین دست سیستم آب‌بند پی، فشار آب خیلی کمتر از فشار آب در بالادست آن است.



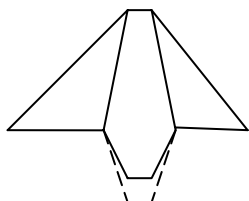
این منطقه خیلی حساس است و باید گرادیان‌ها را کاهش داد و غلیان و جوش را

دیوار آب‌بند
بتنی (بعضی
وقت‌ها تا باسند)

الف- کنترل تراوش در پی و تکیه‌گاهها

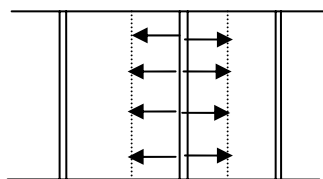
- تقسیم بندی کلی روش‌های کنترل تراوش در پی و تکیه‌گاهها:
 - آب‌بند کردن کامل ضخامت لایه نفوذپذیر
 - آب‌بند کردن بخشی از ضخامت لایه نفوذپذیر
 - طولانی کردن مسیر تراوش در پی
 - کاهش فشار آب با حفر گمانه‌های زه‌کش و گالری

- روشهای آببندی پی و تکیه گاهها:
1- ادامه هسته به صورت دوزنقه معکوس

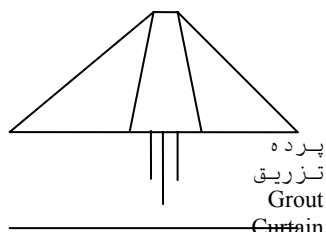


2- تزریق (Grouting)

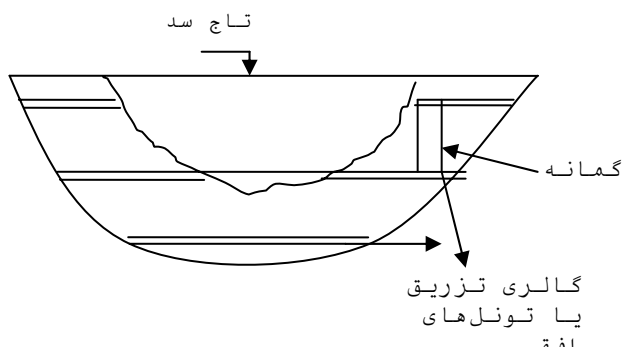
به صورت تزریق ملات آب و سیمان در پی. اصول تزریق بدین صورت است که چال‌هایی می‌کنند و ملات سیمان را با فشار وارد می‌کنند. تعداد این چال‌ها و محل‌های آنها را با توجه به شعاع تاثیر آنها تعیین می‌کنند.



در پی سد از یک ردیف پرده تزریق یا دو یا سه ردیف استفاده می‌شود. در پی‌های زمین‌های سنگی اولین گزینه آب‌بند کردن، تزریق است.



و در section



تزریق در پی سدهای بتنی بیشتر استفاده می‌شود، چون سد بتنی روی سنگ ساخته می‌شود.

برای تزریق از داخل تونل‌های افقی یا گالری‌های تزریق که ساخته شده، گمانه‌هایی می‌زنند و بعد از داخل آنها تزریق صورت می‌گیرد.

در قسمت‌های بالایی تر و نزدیک به سطح زمین، فشار پمپاژ باید به حدی باشد که باعث *hydraulic fracturing* نشود. یعنی زمین سست نشود و نفوذپذیری آن بیشتر نشود.

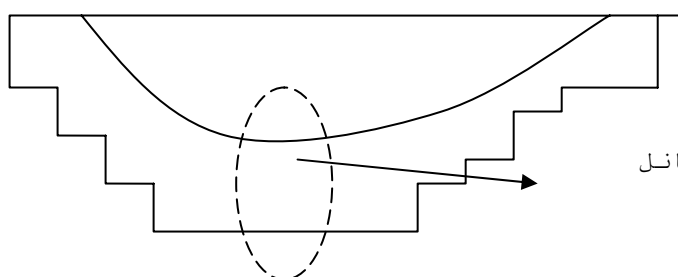
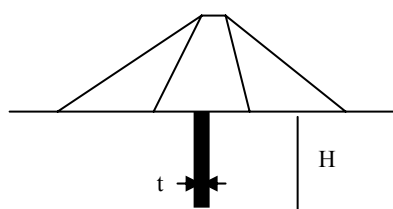
- آزمایش لوژان

یعنی تزریق آب جهت تخمین نفوذپذیری خاک قبل از تزریق. میزان آبی که در هر متر در یک دقیقه و فشار $1MPa$ طول

ترزریق می‌شود (خورند دارد) را عدد لوژان گویند. عدد لوژان 5 یعنی خیلی کم و 100 یعنی نفوذپذیری خیلی زیاد.

3- دیوار آب‌بند (COW) Cut-off Wall

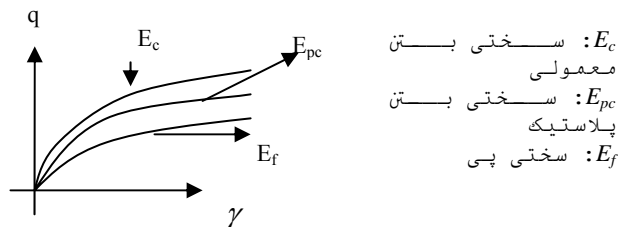
- ممکن است از بتن معمولی باشد
- یا از بتن پلاستیک *plastic concrete*
- و یا از مخلوط خاک و آب و رس بنتونیت *Bentonite*



نحوه اجرای این پانل
را در صفحات بعد
می‌خوانیم

روش اجرای بتن معمولی و بتن پلاستیک یکسان است فقط مصالح آن فرق می‌کند.
بتن معمولی: بتن غیر مسلح
بتن پلاستیک: بتن + کمی بنتونیت. همچنین حداکثر اندازه دانه‌ها محدود باشد.

بنتونیت چسبندگی زیادی دارد و از آن در گل حفاری استفاده می‌شود.



بتن پلاستیک در مقایسه با بتن معمولی سختی کمتری دارد و در نتیجه شکل پذیرتر خواهد بود. این شکل پذیری مفید است چون تحت بارهای وارده ناشی از ایجاد سد یا تحت بارهای زلزله، اگر شکل پذیر نباشد، نمی‌تواند تغییر شکل بدهد و در نتیجه ترک می‌خورد. اگر ترک بخورد دیگر آب‌بند نخواهد بود.

به عبارت دیگر می‌دانیم نیروهای وارد به اجسام کنار هم، به نسبت سختی‌های آنها تقسیم می‌شود. پس هر چه سختی دیوار آب‌بند کمتر باشد نیروی کمتری جذب می‌کند و احتمال ترک خوردن آن کاهش یافته و باعث عدم خرابی می‌شود.

طبق توصیه *ICOLD*:

$$E_{COW} \leq (4 \text{ تا } 5) E_f$$

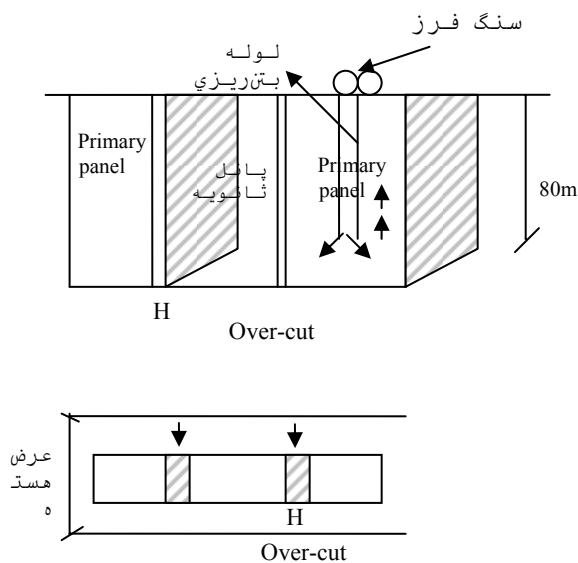
$$E_f = \text{مدول الاستیک مصالح پی}$$

روش اجرای دیوار بتنی یا بتن پلاستیک به صورت پانل به پانل است.

اول دو پانل اولیه را اجرا می‌کنند. تا عمق مورد نظر حفاری می‌شود توسط هیدورفرز و همراه آن از گل حفاری استفاده می‌شود. این گل حفاری چند کار می‌کند:

- خنک کردن سر مته
- محیط ویسکوز بهتر حفاری می‌شود (آسان کردن حفاری و خارج کردن مصالح حفاری شده)
- مانع ریختن خاک اطراف می‌شود.

پانل با عمق 80 متر و 100 متر در ایران اجرا شده است.



بعد لوله بتن ریزی وارد می‌شود و بتن می‌ریزند و چون بتن سنگین تر از گل حفاری است، گل حفاری می‌آید رو و بتن جای آن را می‌گیرد.

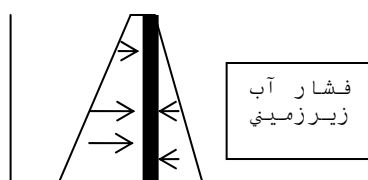
هر دو تای این پانل‌ها را پانل اولیه می‌گویند و شبیه هم حفاری و اجرا می‌شوند. برای پانل ثانویه (پانل وسطی) به همین طریق عمل می‌شود، ولی با این تفاوت که مقداری از دو پانل اولیه مجاور را *over-cut* می‌کنند. یعنی بتن ریخته شده را حفاری و مجدداً بتن‌ریزی می‌کنند.

اجرای این *over-cut* به دو دلیل است:

1- اتصال بتن به بتن بهتر است

2- اگر *over-cut* نباشد، ممکن است به علت انحرافات دستگاه (مخصوصاً در عمق که اثر آن زیادتر می‌شود) پانل‌های مجاور به هم متصل نباشند و در نتیجه سیستم یکپارچه نشده و نفوذپذیری دیوار دچار مشکل شود.

در هنگام حفاری به همراه گل حفاری، در کنارهای حفاری مقداری کیک یا ژل بنتونیت باقی می‌ماند. این کیک در زمان حفاری ترانشه و اجرای پانل نقش آب‌بند دارد و جلوی نفوذ آب خارج به داخل ترانشه را می‌گیرد. این نقش اصلی آن است.



گفتیم که با ریختن بتن، گل حفاری رو می‌آید. آیا این بتن‌ریزی قدرت زدودن کامل ژل بنتونیت را هم دارد؟ چون باقی ماندن کیک

مانع اتصال خوب بتن به بتن می‌شود. از طرفی این کیک شامل مقداری سیمان از پانل‌های اولیه هم است. باقی ماندن کیک ممکن است مشکلات دیگری را هم ایجاد کند:

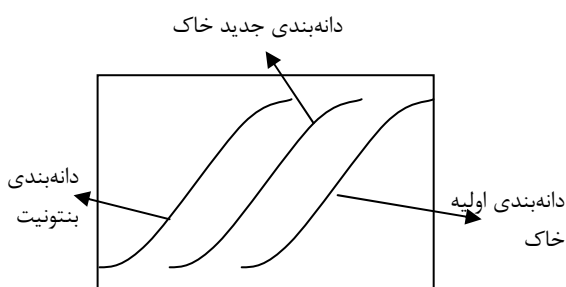
کیک بنتونیت در مقابل تغییرات رطوبت حساس است و اگر کمی خشک شود، ترک می‌خورد. از طرف دیگر ممکن است کیک بنتونیت در مقابل جریان آب شسته شود. آیا خاک جلوی آن می‌تواند نقش فیلتر بازی کند یا نه؟

این مشکل در پانل‌های ثانویه ایجاد می‌شود و در پانل اولیه نیست. از طرف دیگر این پانل‌ها بصورت مجزا عمل می‌کنند و در بارگذاری هائی نظیر زلزله می‌تواند مشکل زا باشد.

4- مخلوط آب و خاک و بنتونیت (Slurry Walls)

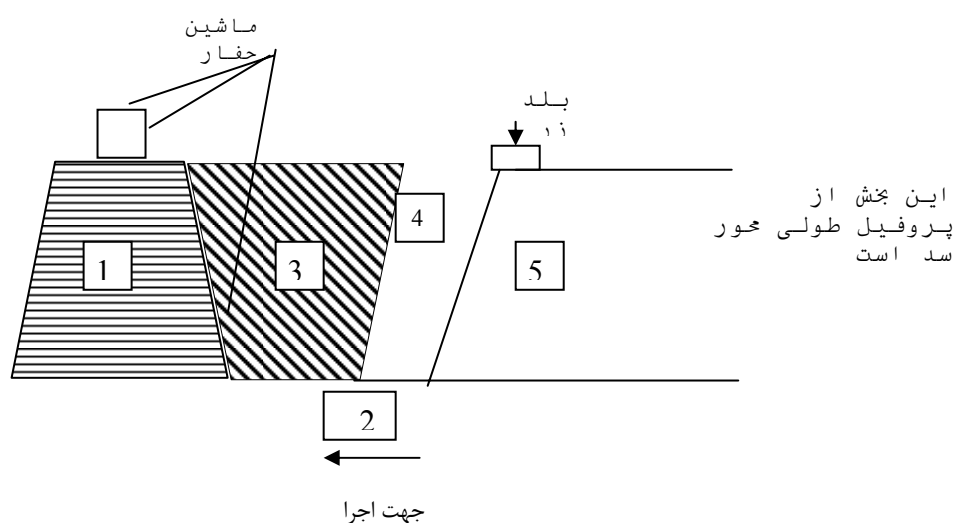
خاک را حفاری کرده خارج می‌کنیم. سپس با آب و بنتونیت خوب مخلوط می‌کنیم و مجدداً وارد ترانشه می‌کنیم. این باعث می‌شود که دانه بندی خاک ریزتر شود.

تفاوت این دیوار با دیوار آب‌بند بتن پلاستیک این است که این دیوار به صورت پانل - پانل نیست و به صورت یکپارچه اجرا می‌شود.



حسن: نیازی به مصالح جدید نیست و از همان مصالح پی استفاده می‌شود. از لحاظ اقتصادی خیلی به صرفه است. ضمناً پیوسته اجرا می‌شود و درز ندارد.

عیب: نفوذپذیری آن خیلی کم نمی‌شود (نفوذپذیری آن نسبت به روش قبل بیشتر است) و در مقابل گرادیان‌های بالا ممکن است فرسایش پیدا کند.



1- زمین اصلی پی (هنوز حفاری نشده است)

2- سنگ بستر

3- ترانشه پر شده با گل بنتونیت

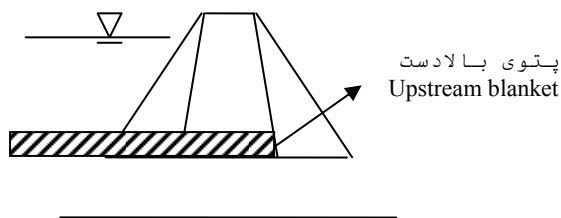
4- بخشی از ترانشه که با مخلوط گل و مصالح حفاری شده پر شده است.

5- قسمت اجرا شده دیوار

همراه با حفاری، گل بنتونیت وارد می‌کنند تا دیواره‌ها نریزد و پایدار بماند. مصالح حفاری شده را با طرح اختلاط از پیش تعیین شده با آب و بنتونیت مخلوط کرده و سپس توسط بلدوزر داخل ترانشه می‌ریزند. این خاک چون از قسمت (3) که قبلاً کنده شده و با گل بنتونیت پر شده سنگین‌تر می‌باشد در زیر قرار می‌گیرد و قسمت (3) رو آمده و خارج می‌شود و قسمت (4) جای آن را می‌گیرد.

4- یتوی رسی در مخزن (Upstream blanket)

پتوها را از جنس خاک نسبتاً ریزدانه و در کف مخزن اجرا می‌کنند. عملکرد این پتو بدین صورت است که طول تراوش در داخل پی را زیاد می‌کند و در نتیجه فشار آب در زیر سد و در پائین دست آن کم می‌شود.



- این روش در سدهایی که پی آنها نفوذپذیری‌های افقی و قائم (k_v , k_h) نسبتاً مساوی با هم دارند مورد استفاده

بیشتری دارد. چون در غیر اینصورت، زمانی که k_h خیلی بیشتر از k_v باشد زیاد تاثیری ندارد.

- از خوبی‌های این روش این است که در طول زمان و انباشته شدن رسوبات روی پتو، ضخامت آن افزایش پیدا می‌کند، و در نتیجه کارآئی آن بیشتر می‌شود.

- ضخامت و طول مورد نیاز برای پتو بستگی دارد به:

- نفوذپذیری مصالح پتو
- لایه بندی مصالح و عمق پی
- ارتفاع آب در مخزن

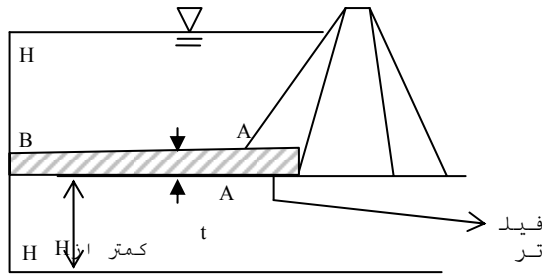
(ضخامت‌های بین 60cm تا 5m در عمل مورد استفاده قرار گرفته است و طول پتو بین 8 تا 15 برابر حداکثر ارتفاع مخزن توصیه شده است.

• ابعاد دقیق این پتو با تحلیل کامپیوتری تراوش (*Seepage*) توسط نرم افزارهایی از قبیل:

SEEP/W -

MSEEP - باید تدقیق شود.

اقتصادی‌تر آن است که ضخامت پتو را متغییر طرح کنند. معمولاً با دورتر شدن از سد نازک‌تر اجرا می‌شود. چرا؟



به عنوان تخمین اولیه تا:

$$t=6l+0.02x$$

بسته به مصالح پی (کف مخزن) و جنس مصالح پتو، ابعاد آن طراحی می شود.

در نقطه A گرادیان از همه بیشتر است. چرا؟

در نقطه B، هد بالا H و هد پایین هم H است. هر چه به سمت سد پیش می رویم، هد بالای پتو همان H است ولی هد پایین پتو کمتر و کمتر از H می شود و در نقطه A هد پایین خیلی کمتر از H است. لذا گرادیان بیشتر می شود و این یکی از دلایل بیشتر گرفتن ضخامت پتو هست.

در سدی در پاکستان به نام تاربلا از این روش استفاده شد و بعد از اولین آگیری، (sink hole) گول چاله در کف مخزن ایجاد شد. این به دلیل این است که فیلتر نگذاشته بودند و ریز دانه ها شسته شده بودند.

• مورد سد تاربلا (*Tarbela Dam*)

- پی متشکل بود از آبرفت دریاچه‌ای و رودخانه‌ای با عمق حداکثر 230 متر، مصالح پی متشکل بود از قلوه‌سنگ (*Cobbles*)، شن و ماسه ریز، که در بعضی از جاها شن و ماسه ریز کاملاً از هم جدا بودند. در نتیجه مناطقی با نفوذپذیری خیلی زیاد (ترکیب قلوه‌سنگ و شن خالص) تشکیل شده بود. مصالح درشت دانه پی برای مصالح ریزدانه آن، معیار فیلتر را ارضاء نمی‌کردند.

- برای آب‌بندی پی بجای اجرای المان آب بند قائم در زیر هسته، از پتوی بالادست استفاده کردند. مشخصات این پتو عبارت بود از (متر $L=2000$ طول) که برای حداکثر گرادیان $i=0/07$ طراحی شده است.

- مصالح پتو متشکل از مخلوطی از لای، ماسه و شن (حاصل از سنگ شکن) خوب دانه‌بندی شده بود.

- در زمان اولین آبگیری وقتی که آب به تراز نرمال رسید، دبی عبوری و خروجی از پی تا $6/4 \text{ m}^3/\text{s}$ اندازه‌گیری شد، در حالیکه طبق پیش‌بینی های زمان طراحی می‌بایست $0/15 \text{ m}^3/\text{s}$ باشد.

- پس از اینکه مخزن را تخلیه کردند، 400 چاله *sinkhole* با حداکثر قطر $4/5$ متر در کف مخزن در پتو مشاهده شد. جالب بود که در کف *sinkhole* ها در پی، شن بدون ماسه کاملاً آشکار بود.

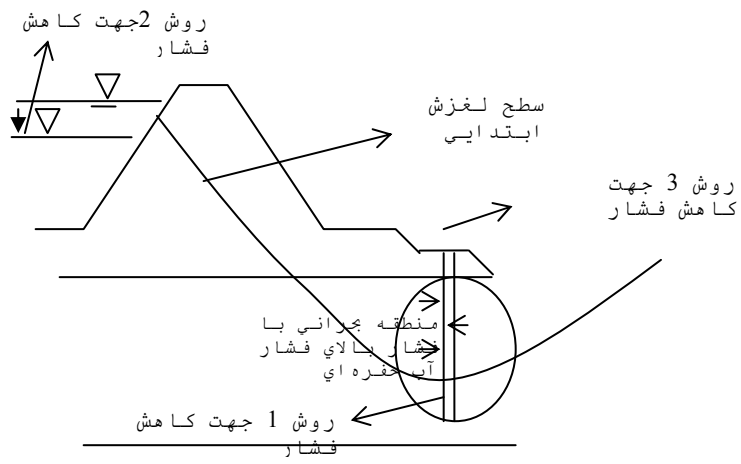
- *sinkhole* ها با مصالح فیلتر پر کرده شدند و ضخامت پتو تا حداکثر 5 متر افزایش داده شد، که گرادیان در پتو را به $0/03$ کاهش داد.

- اقدامات تعمیری موثر واقع شد و در طول سالهای 1977 تا 1985 میلادی میزان تراوش با نرخ بالائی کاهش یافت بخشی از

این کاهش تراوش در طول این سالها بر اثر رسوب شدن ذرات فرسایش یافته معلق در آب مخزن، و در نتیجه افزایش ضخامت پتو بوده است.

5- زهکشی و کاهش فشار

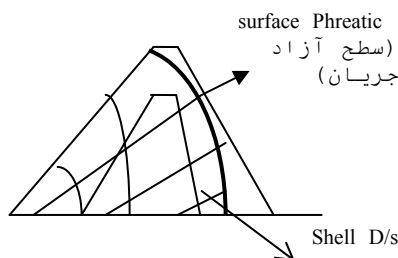
این روش از لحاظ اقتصادی و نشت آب به صرفه نیست ولی به پایداری سد کمک می کند. در ناحیه زیر پنجه سد، فشار آب حفره ای شدید وجود دارد که ممکن است باعث لغزش شود (پایداری شیروانی به خطر می افتد). برای کاهش فشار آب حفره ای در مناطق بحرانی در مقاطعی از سد چاهک هایی در پی حفر می کنند تا فشار آب حفره ای کاهش یابد. با این روش دبی خروجی از سد را افزایش داده ایم و این ممکن است اقتصادی نباشد ولی به پایداری کمک کرده ایم. به این چاهک ها، چاههای زهکش یا چاههای کاهش فشار (*Relief Wells*) می گویند. روش جایگزین این است که قدری خاک روی پنجه بریزیم.



ب- کنترل تراوش در بدنه سدهای خاکی /پاره سنگی

چرا کنترل تراوش؟

چون پوسته نفوذپذیر است آب به سرعت داخل رفته و بالاخره پس از مدتی وارد هسته هم خواهد شد و پس از مدتی در بدنه سد سطح آزاد آب تشکیل می شود.



اولین قدم در کنترل تراوش این است که هسته را در وسط بدنه و پوسته را در طرفین هسته قرار می دهیم. اگر سطح آزاد جریان به صورت نشان داده شده (خط چین) در پوسته پایین دست باشد، خطر ناپایداری و خطر شسته شدن پوسته وجود دارد. علت اینکه این خطر در بالادست نیست این است که پوسته بالادست از طرف آب *support* می شود. تا جایی که امکان دارد باید سطح آزاد جریان را از سطح پوسته پایین دست دور کنیم.

پس هدف از کنترل تراوش در بدنه سد:

- دور کردن خط آزاد جریان از سطح شیروانی پایین دست
- کنترل میزان دبی خروجی از بدنه سد
- کنترل آب شستگی و رگاب *piping*

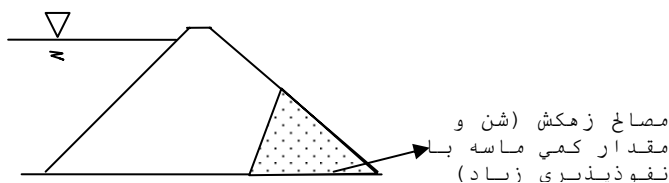
Piping: شسته شدن ذرات ریز در اثر نیروی زه به داخل خاک درشت دانه. این خطر در مرز پایین دست هسته و پوسته احتمال بیشتری دارد که رخ بدهد.

- کاهش فشار آب حفره ای در شیب پایین دست D/s
Embankment

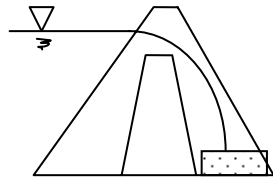
● روش های کنترل تراوش در بدنه

- 1- قرار دادن مصالح زه کش در پنجه
- 2- قرار دادن مصالح زهکش به صورت پتو در کف خاکریز پائین دست سد
- 3- استفاده از فیلتر و زهکش های مناسب در مجاورت هسته (به ویژه در شیب پایین دست)
- 4- "منطقه ای" طرح و اجرا کردن بدنه سد به لحاظ نوع مصالح

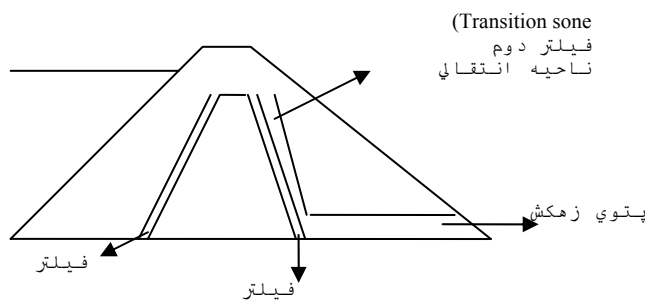
روش (1) قدیمیترین روش است و در سدهای همگن کاربرد دارد. نفوذپذیری این مصالح زه کش بحدی زیاد است که می تواند خط آزاد جریان را پائین بیاورد و از سطح پوسته دور کند. این روش بیشتر در سدهای همگن کاربرد دارد.



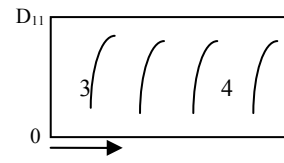
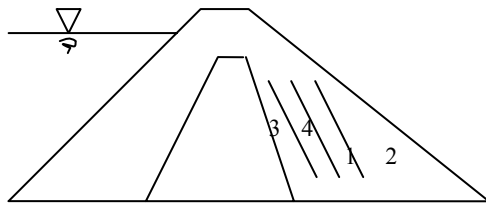
روش (2) در سدهای همگن و غیر همگن کاربرد دارد.



روش (3) روش مدرن و بسیار متداولی است. حساسیت فیلترهای پائین دست زیاد و نقش آنها حیاتی است. علت استفاده از فیلتر در بالادست: به علت افت سریع آب در مخزن است. آب سریع در پوسته پایین می‌آید ولی در هسته سریع پایین نمی‌آید، در نتیجه یک جریان معکوس ایجاد می‌شود.



روش (4) "منطقه‌ای" اجرا کردن بدنه سد بهترین روش است. ولی مشکل آن اینست که ممکن است مصالح مناسب با حجم کافی در فاصله نزدیک سد موجود نباشد.



ج) کنترل تراوش در محل تماس سد (به ویژه هسته) با پی و تکیه گاهها

ممکن است زیر هسته، در پی سنگها با درز باز و یا آبرفت درشتدانه باشد. در اینصورت امکان دارد که مصالح هسته شسته شده و وارد درزهای سنگها یا آبرفت شده و فرسایش داخلی رخ دهد.

• روشهای کنترل تراوش

- 1- حفاری قسمت‌های هوازده
- 2- اجرای پتوی بتنی در زیر هسته
- 3- تزریق تحکیمی در زیر هسته
- 4- اجرای فیلتر در زیر هسته (در موردی که پی از جنس خاک است)

برخی از روش‌های فوق را می‌شود با هم انجام داد. مثلاً اول حفاری قسمت‌های هوازده زیر هسته و بعد اجرای تزریق تحکیمی. این تزریق با گمانه‌های نسبتاً سطحی و غیر عمیق صورت می‌گیرد. حفاری قسمت‌های هوازده پی ضروری است. بر حسب اهمیت سد، تزریق تحکیمی و / یا اجرای پتوی بتنی نیز انجام می‌شود.

پتوی بتنی دارای خصوصیات زیر است:

ضخامت حدود 50cm ، مسلح در حد آرماتورهای حرارتی، با سطح زبر و زبری آن باید در جهت عمود بر جریان باشد. چرا؟

اصطلاحات لاتین مربوطه:

Consolidation Grouting: تزریق تحکیمی

Concrete Plinth: پتوی بتنی

Weathered zone: ناحیه هوازده

11- پایداری شیروانیها

یکی از پنج بلایای بزرگ طبیعی جهان، زمین لغزه است. لغزش زمین (*Land Slide*) به علت ناپایداری شیروانیهای طبیعی رخ می‌دهد. لغزش زمین (سنگی یا خاکی) در اقصا نقاط دنیا- به ویژه مناطق بارانی - به کرات رخ می‌دهد و اخبار آن به وسیله رسانه‌ها منتشر می‌شود.

بزرگترین *Landslide* دنیا در ایران در لرستان رخ داده است (زمین لغزه سیمره).

پایداری: *Stability*

در پایداری شیروانی‌ها آنالیز تنش کرنش نمی‌کنند، بلکه فقط کنترل می‌کنند که آیا شیب حرکت (حرکت زیاد) می‌کند یا نه. به این آنالیز، آنالیز روش تعادل حدی *(LEM) Limit Equilibrium Method* می‌گویند، که حاصل آن محاسبه یک ضریب اطمینان برای پایداری شیب است.

اصول روش تعادل حدی *(LEM)*

1- یک مکانیزم لغزش (دایره ای، چند خطی، بلوکی، کلی) فرض می‌شود.

2- توده خاک به صورت صلب فرض می‌شود و تغییر مکان صرفاً در امتداد سطح لغزش روی می‌دهد.

3- به وسیله روابط استاتیکی، مقاومت برشی مورد نیاز، برای اینکه توده خاک در امتداد سطح لغزش فرض شده در حالت تعادل حدی باشد، تخمین زده می شود.

4- این مقاومت برشی با مقاومت برشی موجود در سطح لغزش مقایسه می شود.

5- ضریب اطمینان (SF) به صورت زیر تعریف می شود: مقاومت برشی موجود

$$F.S = \frac{\text{مقاومت برشی موجود}}{\text{مقاومت برشی لازم برای تعادل حدی}}$$

6- سطح و مکانیزم لغزش که حداقل ضریب اطمینان را بدست می دهد به عنوان سطح لغزش بحرانی انتخاب می شود.

ضریب اطمینان ($Safety Factor$)

ضریب اطمینان در اصل ضریب جهل است و هر چه نادانسته ها بیشتر باشد، این ضریب بیشتر می شود. نادانسته ها در مورد هندسه و پارامترهای مقاومتی می باشد. البته بیشتر برای پارامترهای مقاومتی تعریف می شود، چون هندسه تقریباً معین است. بنابراین:

ضریب اطمینان ضریبی است که بوسیله آن پارامترهای مقاومتی خاک (ϕ, c یا ϕ', c') کاهش داده می شود تا مقاومت خاک به حالت تعادل حدی کاهش یابد.

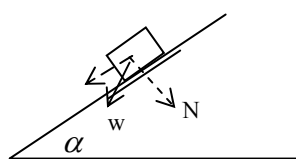
شکل‌های مختلف لغزش و روش تحلیل آنها

- 1-قطعه لغزنده (*Sliding Block*)
- 2-لغزش صفحه‌ای (*Planer Slip Surface*)
- 3-لغزش دایره‌ای (*Circular Sliding*)
- 4-لغزش چند خطی (*Wedge Method*)
- 5-لغزش با شکل کلی (*General Slip Surface*)

لغزشی که در عمل اتفاق می‌افتد سه بعدی است. معمولاً فرض می‌شود که عرض لغزش بینهایت است. به این فرض، فرض کرنش مستوی (*Plane Strain*) می‌گویند و بنابراین دو بعدی آنالیز می‌شود.

چون در آنالیز دو بعدی از مقاومت‌های جانبی صرف‌نظر می‌شود، ضریب اطمینان به صورت محافظه کارانه محاسبه می‌شود.

1- قطعه لغزنده *Sliding Block*



فرضیات $c' = 0$

فشار آب حفره ای در صفحه لغزش $u = 0$

$$R = N \cdot \tan \phi$$

$$= (w \cdot \cos \alpha) (\tan \phi)$$

$$T = w \cdot \sin \alpha$$

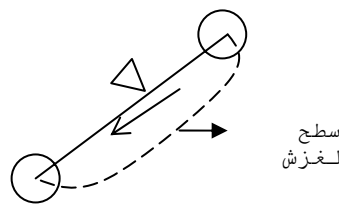
$$SF = R/T = \frac{(w \cos \alpha)(\tan \phi)}{(w \sin \alpha)} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

این بدین معناست که اگر خاکی که چسبندگی ندارد و کاملاً خشک هم است، از کامیون با ارتفاع خیلی کم و به صورت آرام ریخته شود، تحت زاویه ϕ قرار می‌گیرد.

چرا گفته شد کاملاً خشک؟ پاسخ چیست؟

2- لغزش صفحه‌ای

اگر طول آن زیاد باشد فرض می‌کنیم که



فرضیات:

1- طول لغزش نسبتاً زیاد است و بنابراین از اثر ابتدا و انتهای

شیب می‌توان صرف‌نظر کرد.

2- جریان آب موازی سطح زمین است

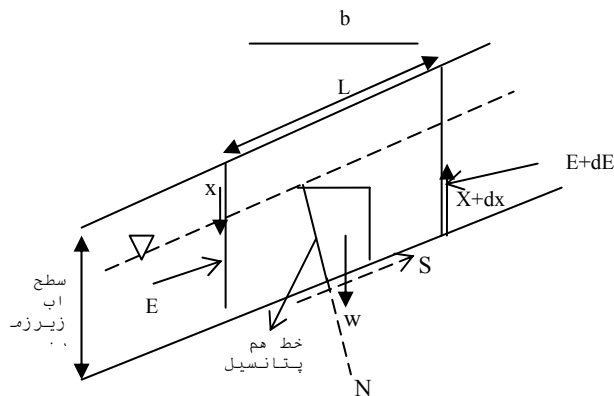
$$\gamma_{sat} = \gamma_t \quad -3$$

4- از نیروهای وارد به هر قطعه از جانب قطعات مجاور صرف‌نظر می‌کنیم

$$dx=0$$

$$dE=0$$

به این شیب، شیب با طول بینهایت هم می گویند (Slope of Infinite extent)



u = فشار آب حفره ای در امتداد سطح لغزش

$$w = \gamma b d$$

$$N = N' + u l$$

$$u l = \gamma_w h b \sec \alpha$$

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi'$$

$$\tau = \frac{c'}{SF} + \sigma'_n \cdot \frac{\tan \phi'}{SF}$$

$$\vec{s} = \tau \cdot l = \frac{c'}{SF} (b \cdot \sec \alpha) + (N - u) \frac{\tan \phi'}{SF}$$

$$N = w \cdot \cos \alpha$$

\vec{s} : مقاومتی است که کاهش داده ایم تا توده خاک به تعادل حدی برسد.

با مساوی قراردادن نیروهای محرک با نیروهای مقاوم:

$$\vec{s} = \vec{T} = \vec{W} \cdot \sin \alpha$$

$$w \cdot \sin \alpha = \frac{c'}{SF} (b \cdot \sec \alpha) + (w \cos \alpha - ul) \tan \phi' / SF$$

$$w = \gamma b d$$

$$SF = \frac{c'}{\gamma d} \cdot \sec \alpha (\cos c \cdot \alpha) + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} \cdot (1 - \frac{\gamma_w h}{\gamma d} \cdot \sec^2 \alpha)$$

نسبت فشار آب حفره‌ای (r_u)

$r_u = \text{Pore Water Pressure Ratio}$

$$r_u = \frac{\gamma_w h}{\gamma d}$$

اگر تنش موثر صفر باشد، $r_u = 1$

اگر سطح آب هم سطح زمین باشد و آب جریان نداشته باشد، با فرض

$r_u = 0/5$ در تمام نقاط شیب $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ و $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

خواهد شد.

$$SF = \frac{c'}{\gamma d} (\sec \alpha) (\cos c \alpha) + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} (1 - r_u \sec^2 \alpha)$$

اگر $c' = 0$ باشد

$$SF = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} (1 - r_u \sec^2 \alpha) \Rightarrow$$

اگر فشار آب حفره‌ای هم صفر باشد ($r_u = 0$).

$$SF = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$$

یعنی همان ضریب اطمینان روش بلوک لغزنده

در سنگ‌ها که لایه لایه اند و یا جاهایی که لایه‌ها موازی سطح

زمین‌اند از این آنالیز می‌توان استفاده کرد.

3- لغزش دایره‌ای

لغزش دایره‌ای در اصل در شرایط سه بعدی، لغزش استوانه‌ای است.

$$\underline{\phi = 0} \text{ - روش}$$

فرضیات:

$$\phi = 0 -$$

- شرایط خاک به نحوی است که درجه اشباع مساوی 100 و بارگذاری در شرایط زه کشی نشده است (بارگذاری سریع).

با محاسبه لنگر نیروهای مقاوم با لنگر نیروهای محرک (که حول مرکز دوران ایجاد می‌شود) ضریب اطمینان به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$SF = \frac{\text{لنگر نیروهای مقاوم}}{\text{لنگر نیروهای محرک}}$$

$$SF = \frac{R \int_A^B C_u \cdot ds}{w \cdot x}$$

C_u = مقاومت برشی یا چسبندگی خاک در شرایط زه کشی نشده است، C_u ممکن است در امتداد سطح لغزش ثابت نباشد.

توده لغزنده را به n قطعه تقسیم می‌کنیم و برای هر قطعه داریم:

x : فاصله افقی بین مرکز ثقل قطعه و مرکز دوران

$$x_n = R \cdot \sin \alpha_n$$

از مرکز سطح لغزش به α وصل می‌کنیم

$$\ell_n = ds_n$$

α زاویه بین امتداد مماس بر وسط سطح لغزش با امتداد افق می باشد.

$$\Rightarrow SF = \frac{R \sum (c_u)_n \ell_n}{R \sum w_n \sin \alpha_n}$$

$$\Rightarrow SF = \frac{\sum (c_u)_n \ell_n}{\sum w_n \sin \alpha_n}$$

ملاحظه می شود که ضریب اطمینان مستقل از شعاع می شود.

این روش در خاکهای رسی که در آن سریع لغزش رخ می دهد کاربرد دارد. چون در این خاکها $\phi_u = 0$ است.

2- روش تیلور (Taylor Solution)

فرض: چسبندگی خاک در عمق ثابت است و سطح لغزش دایره ای است

$$N_s = \frac{c}{SF \gamma H}$$

c : چسبندگی کل

γ : وزن مخصوص کل

H : ارتفاع شیب

SF : ضریب اطمینان

n_d : وقتی در یک عمق مشخص H' یک لایه سخت وجود دارد، برای حالتی که $\phi=0$ است، ضریب اطمینان به پارامتر n_d هم بستگی دارد. n_d به صورت زیر تعریف می شود.

$$n_d = \frac{H'}{H}$$

3- حالت کلی: اگر علاوه بر c ، ϕ هم باشد

برای شرایط $\phi=0$ داشتیم که:

$$SF = \frac{\sum c_u \ell_n}{\sum w \sin \alpha}$$

$$SF = \frac{R \left[\int_A^B c \cdot dS + \tan \phi \int_A^B \sigma_n \cdot ds \right]}{w \cdot x}$$

در حالت کلی

دقت شود که در این جا $\sigma_n \neq w \cos \alpha$ است و نمی دانیم σ_n دقیقاً چقدر است. بنابراین نمی شود SF را به سادگی حساب کرد.

• روش دایره ϕ : براساس ریاضی و هندسه، ضریب اطمینان را محاسبه می کند. این روش در گذشته، کاربرد بیشتری داشته ولی امروزه با پیشرفت کامپیوتر و به بازار آمدن برنامه های کامپیوتری چندان مورد استفاده قرار نمی گیرد.

• روش کلی قطعات

با فرض داشتن فشار آب حفره ای و تبدیل قطعه لغزنده به تعدادی قطعه، فرمول بالا را به شکل زیر خواهیم داشت:

(1)

$$F = \frac{\sum [c'l + (p-ul) \tan \phi']}{\sum (w \cdot \sin \alpha)}$$

که در آن:

P : نیروی عمود (نرمال) بر کف هر قطعه (*Slice*)

U : فشار آب حفره ای

(2)

$$S = \tau \cdot \ell$$

$$\tau = \frac{c'}{F} + \left(\frac{P}{\ell} - u \right) \frac{\tan \phi'}{F}$$

$$P = (w + X_n - X_{n+1}) \cos \alpha - (E_n - E_{n+1}) \sin \alpha$$

S : نیروی موازی با کف و قطعه

روش معمولی قطعات (روش فلینوس)

- فرض: برآیند نیروهای بین قطعه ای (برای هر قطعه) در امتداد عمود بر کف قطعه برابر صفر است یعنی برآیند E و X در امتداد کف قطعه صفر است.

در نتیجه:

(3)

$$(X_n - X_{n+1}) \cos \alpha - (E_n - E_{n+1}) \sin \alpha = 0$$
$$\Rightarrow P = w \cdot \cos \alpha$$

در نتیجه رابطه فلینوس تبدیل می شود به

$$SF = \frac{1}{\sum (w \cdot \sin \alpha)} \sum [c' \ell + (w \cdot \cos \alpha - u \ell) \tan \phi']$$

این روش یک روش دقیق نیست، و در حدود 10 تا 20٪ خطا (*error*) دارد. خطای آن را با مقایسه با روش های دقیق تر مشخص کرده اند

بهترین راه برای ارزیابی میزان صحت یک روش، مقایسه ضریب اطمینان حاصل از آن با ضریب اطمینان یک شیب لغزیده شده ($SF=1$) می باشد.

روش پیشاپ

اساس رابطه پیشاپ؛ همان رابطه (1) است، ولی با یک فرض دیگر فرض: رابطه تعادل در امتداد قائم برای هر قطعه ارضاء می شود. ، یعنی:

داریم:

$$P \cdot \cos \alpha + \tau \sin \alpha = w + X_n - X_{n+1}$$

بیشاب یک فرض دیگر هم در نظر گرفت:

فرض:

$$X_n - X_{n+1} = dX = 0$$

طی یک پروسه محاسباتی، رابطه زیر بدست می‌آید:

فرمول بیشاب:

$$SF = \frac{1}{\sum w \cdot \sin \alpha} \sum [\{ c' b + w (1 - r_u) \tan \phi' \} m_\alpha]$$

$$m_\alpha = \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{SF}}$$

ملاحظه می‌شود که SF در هر دو طرف رابطه هست. پس

این روش، برای محاسبه SF سعی و خطا لازم دارد.

این روش در عمل به عنوان یک روش نسبتاً دقیق و با خطای حدود 3٪ شناخته شده است.

دقت شود بسته به قطعه مورد نظر، α متفاوت است، و باید دقت کرد که در بعضی از جاها منفی است و باید علامت آن لحاظ شود.

برنامه‌های بنام $Slope/w$, $PCSTABL$, $SLIDE$ برای تحلیل پایداری شیبها هستند و روشهای متعددی از جمله روش بیشاب را هم دارند.

(برنامه $Slope/w$ در سایت $Geoslope International$ می‌باشد، $SIGMA/W$, $SEEP/w$ و ... هم در این سایت است).

$$SF = m - nr_u$$

را هم حساب می کنیم $\frac{c'}{\gamma H}$

هر کدام از گرافها مربوط به یک $\frac{c'}{\gamma H}$ و D_f خاص است

خطوط پر، مقادیر مختلف ϕ است. محور قائم m یا n و محور افقی $\cot g\beta$ است.

D_f عمقی که انتخاب می کنیم و فرض می کنیم دایره لغزش بر آن مماس می شود

r_{ue} : یعنی r_u ی معادل است (در محاسبه n کاربرد دارد).

r_{ue} : را با r_u مساله مقایسه می کنیم، اگر

$$\text{if } r_{ue} < r_u \Rightarrow$$

در این صورت دایره لغزش بحرانی در عمق بیشتری نسبت به D_f فرض شده عبور می کند. در مواردی که خط چین های r_u در منحنی وجود ندارد، بدان معناست که برای کلیه مقادیر r_u ، دایره لغزش بحرانی همیشه از اعماقی بالاتر از D_f مربوطه عبور خواهد کرد.

کلاً یعنی اینکه اگر $r_u > r_{ue}$ باشد، باید برویم به D_f بیشتر.

مثال: در شیب شکل زیر ضریب

اطمینان را محاسبه نمایید.

مرحله 1 : تعیین کنیم که از کدام گراف استفاده کنیم:

$$\frac{c'}{\gamma H} = \frac{20}{19 \times 21} = 0.05$$

مرحله 2 $D_f=1$ فرض می شود

$$\left. \begin{array}{l} D_f = 1 \\ \beta = \frac{3.5}{1} = 3.5 \\ \frac{c'}{\gamma H} = 0.5 \end{array} \right\} \Rightarrow r_{ue} \approx 0.0 \Rightarrow r_{ue} < r_u$$

پس باید $D_f=1.25$ را انتخاب کنیم.

$$R_{ue} = 0.7$$

$$r_{ue} = 0.7 > r_u$$

پس دایره لغزش حدوداً از همین عمق می گذرد. از روی گرافهای مربوطه:

$$\left. \begin{array}{l} n = 2.1 \\ m = 2.45 \end{array} \right\} \Rightarrow SF = m - r_u n \Rightarrow SF = (2.45) - (2.1)(0.15) \Rightarrow SF = 2.13$$

تمرین: در همین مساله، c' را مساوی 14 kpa فرض کنید: توضیح: این مسئله را با درون یابی باید حل کرد.

سطح لغزش چند خطی: سطح لغزش دایره‌ای نیست بلکه به صورت چند خط است. به روش تحلیل این نوع سطح لغزش، روش گوه‌ای می‌گویند (*wedge method*).

طبیعت خاک ایجاب می‌کند که بخش عمده‌ای از سطح لغزش از داخل لایه سست بگذرد.

روش حل: توده لغزنده به تعدادی گوه (معمولاً برابر بر تعداد خطوط) تقسیم می‌شود و نمودار آزاد جسم رسم می‌شود. سپس با فرض امتداد مشخصی برای نیروهای بین قطعه‌ای، و نوشتن رابطه تعادل برای آنها، ضریب اطمینان بدست می‌آید.

در مرز بین توده خاک و لایه نفوذناپذیر آب جمع می‌شود و باعث صابونی شدن و سست شدن این قسمت از خاک می‌شود.

این نوع مکانیزم لغزش در شیب‌های مصنوعی هم ممکن است اتفاق افتد.

مثلاً در سدهای خاکی، هسته که ضعیف‌تر است، ممکن است بخشی از سطح لغزش باشد.

در سدهایی که هسته مایل است این خطر بیشتر است چون طول بیشتری از سطح لغزش می‌تواند از داخل هسته عبور کند.

در تحلیل پایداری شیبها، در شرایط زهکشی نشده اگر از پارامترهای موثر استفاده کنیم، باید حتماً فشار آب حفره‌ای را هم به فرمول محاسبه ضریب اطمینان معرفی کنیم. کلاً استفاده از پارامترهای موثر نتایج دقیق‌تری می‌دهد.

مکانیزم سطح لغزش نامشخص (لغزش کلی)

روش حل این نوع سطح لغزشها روش مورگان استرن - پرایس
(*Morgenstern & Price*)

- روشهای دیگری نیز برای تحلیل و ارزیابی پایداری شیبها وجود دارد، مثل اسپنسر (*spencer*) و روش یانبو (*Jannbu*). برای رعایت اختصار از معرفی آنها پرهیز می‌شود.

12- فشار آب در سدهای خاکی و ارتباط آن با پایداری سد

- در زمان جریان پایدار مداوم آب در خاک (*Steady State Seepage*)، فشار آب از شبکه جریان بدست می‌آید.

- در زمان ساخت سد و پیش از اولین آبگیری

فرمول اسکمپتون (*Skempton*): این فرمول برای محاسبه فشار آب حفره‌ای در شرایط بارگذاری سه محوری ($\Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_2$)

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

Δu - اضافه فشار آب حفره‌ای بر اثر بارگذاری سریع برای خاک اشباع، $B=1$ است.

$$\Delta u = B\Delta\sigma_3 + BA(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

$$\text{if } B = 1$$

$$\Rightarrow \Delta u = \Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

$$\Delta u = \Delta u_1 + \Delta u_2$$

$$\Delta u_1 = B\Delta\sigma_3$$

$$\Delta u_2 = BA(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

A: برای خاک‌های مختلف فرق می‌کند و بستگی به نوع و مسیر بارگذاری، سطح تنش و درجه بیش تحکیمی و تراکم خاک دارد.

$\Delta\sigma_1$: عبارتست از تفاوت σ_1 پس از بارگذاری یا باربرداری سریع با

σ_1 قبل از بارگذاری ($\Delta\sigma_3$ به همین ترتیب). $\Delta\sigma_1$ و $\Delta\sigma_3$ ، اضافه یا

کاهش تنش‌های اصلی کل می‌باشند.

اگر $\Delta\sigma_1$ را داشته باشیم، ابتدا باید $\Delta\sigma'_1$ را بدست بیاوریم (Δu را کم کنیم) بعد در k_0 ضرب کنیم $\Delta\sigma'_3$ بدست می‌آید. بعد از روی آن $\Delta\sigma_3$ را بدست می‌آوریم.

- برای محاسبه فشار آب حفره ای در زمان ساخت:
- در پی فرض می‌کنیم $B=1$ که معمولاً هست.
 - پوسته درشت دانه است و در آن فشار آب حفره‌ای ایجاد نمی‌شود.
 - در جهت محافظه کارانه، در هسته فرض می‌کنیم $B=1$ که معمولاً نیست و کمتر از آن است.

محاسبه فشار آب حفره ای در زمان اولین آبیگری

بعد از آبیگری چون پوسته درشت دانه است، همزمان با افزایش تراز آب در مخزن یا با یک تاخیر نسبتاً کوتاه، آب در آن نفوذ می‌کند و بر روی مرز بالادست هسته یک فشار هیدرواستاتیک ایجاد می‌کند.

افزایش فشار آب حفره‌ای در هسته با استفاده از فرمول فوق (فرمول *Skempton*) ولی تحت بارگذاری جدید یعنی $\Delta\sigma_1$ و

$\Delta\sigma_3$ های ناشی از بار هیدرواستاتیکی (مثل شکل) جدید بدست می‌آید. با گذشت زمان از فشار مثلثی روی هسته کاسته می‌شود. اگر پی هم نفوذناپذیر باشد (یعنی ریزدانه باشد) یک تنش قائم وارد می‌شود که آن هم فشار آب اضافی در پی ایجاد می‌کند. حداکثر فشار آب حفره‌ای در زمان ساخت و پس از اولین آبیگری معمولاً از حداکثر فشار آب حفره‌ای در زمان تراوش دائم بیشتر است.

ارزیابی Δu در زمان افت سریع در مخزن (*Rapid Draw*) *Down*

چرا افت سریع؟ قبلاً در فصول اولیه در این مورد توضیح کلی داده شد.

ارزیابی Δu در هسته مشکل است ولی در پوسته به علت درشت دانه بودن مشکلی ندارد. با پایین آمدن سطح آب در مخزن، سطح آب در پوسته بلافاصله یا با فاصله اندکی پایین می‌آید. هر چه پوسته درشت دانه‌تر باشد، سرعت پائین آمدن آب در آن (همراه با کاهش سطح آب در مخزن) بیشتر است.

سطح آب در مخزن قبل و بعد از افت سریع $w.L(1)$,

$w.L(2)=$

نقطه فرضی در هسته A :

به ترتیب ارتفاع در "آب آزاد"، "پوسته" و "هسته" در بالای نقطه A

$h_w, h_2, h_1 =$

افت پتانسیل بر اثر تراوش (مربوط به نقطه A) $h' =$

ارزیابی Δu در هسته:

فرض اساسی: قبل از افت سریع (RDD) جریان تراوش دائم SSS برقرار است.

قبل از افت سریع: $u_0 = \gamma_w(h_1 + h_2 + h_w - h')$

بعد از افت سریع $u = u_0 + \Delta u$

$$\Delta u = \bar{B} \Delta \sigma_1$$

برای خاکهای نرم رسی اشباع:

$$\bar{B} \cong 1.0$$

در رابطه اسکمپتون اگر $\Delta\sigma_1$ را جدا کرده، بقیه را با \bar{B} می توان معادل کرد.

$$\Delta\sigma_1 = -\gamma_w h_w - \gamma_w n h_2$$

$$n = \text{ضریب پوکی پوسته} = \frac{V_v}{V_t}$$

$$\Rightarrow \Delta\sigma_1 = -\gamma_w (h_w + n h_2)$$

$$\Rightarrow u = \gamma_w (h_1 + h_2 + h_w - h' - h_w - n h_2)$$

$$\Rightarrow u = \gamma_w (h_1 + h_2 (1-n) - h')$$

حالت‌های خاص:

1- سد همگن باشد (خاک رسی)

$$u = \gamma_w (h_1 - h')$$

2- اگر از اثر استهلاک انرژی بر اثر تراوش صرف نظر شود ($h' = 0$)

$$u = \gamma_w h_1$$

ارزیابی Δu در زمان زلزله

ارزیابی و محاسبه افزایش فشار آب حفره‌ای در هسته و پی خاکی اشباع با استفاده از تئوریها و روابط نسبتاً پیچیده انجام می شود. فرض اساسی این تئوریها اینست که تمایل به افزایش حجم (بر اثر نیروی رفت و برگشتی زلزله) در خاک اشباع را به افزایش فشار آب حفره‌ای ارتباط می دهند.

$$\Delta u = f(\Delta v)$$

افزایش فشار آب حفره‌ای در بارگذاری زه کشی نشده (زلزله) $\Delta u =$

کاهش حجم، در صورتیکه شرایط زه کشی شده باشد $\Delta v =$

برنامه‌های کامپیوتری نسبتاً پیچیده‌ای موجود است که براساس پارامترهای تنش موثر تحلیل می‌کنند و Δu را محاسبه می‌کنند.

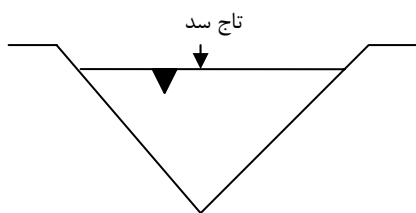
13- ترک خوردگی (Cracking) در سدهای خاکی /سنگریزه‌ای

انواع ترک‌ها

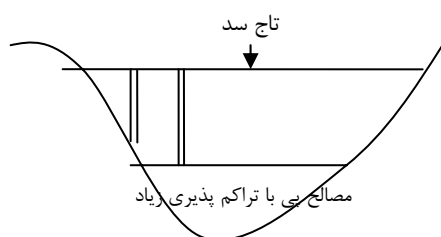
- 1- ترک‌های طولی : امتداد این ترکها در امتداد محور طولی سد (عرض دره) می‌باشد. ترک‌های طولی خیلی بحرانی نیستند
 - 2- ترک‌های عرضی: امتداد این ترکها در امتداد مقطع عرضی سد (امتداد جریان رودخانه) می‌باشد.
- ترک‌های عرضی چون در مسیر جریان آب ایجاد می‌شوند ممکن است بحرانی شده و خطرناک شوند و برای مشکلاتی پایداری سد ایجاد کنند.

دلایل ایجاد ترک

- 1- صفر شدن تنش‌های کششی
- 2- بیشتر شدن تنشهای برشی از مقاومت برشی (در منطقه‌ای محدود)
- 3- شکست هیدرولیکی: شکستی است که عامل آن آب است و به دلایل فوق ایجاد می‌شود (تنش کششی صفر شود یا تنش برشی زیاد شود).
- 4- نشستهای نامساوی در سد بر اثر:
- شکل کف دره یا تکیه گاهها؛ یک ستون خاک به نسبت ارتفاع آن، نشست پیدا می‌کند



- وجود خاک پی با تراکم پذیری زیاد در بخشی از کف رودخانه



- احداث سد با مصالح سخت بر روی پی نرم

- پدیده قوس زدگی (*Arching*)

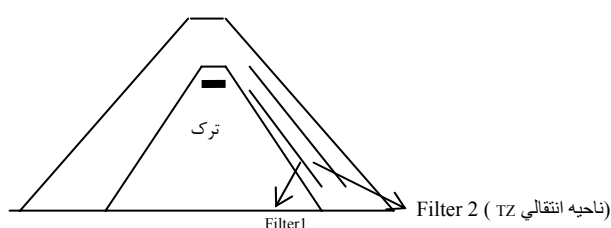
• ترک خوردگی و آب شستگی در بدنه سدهای

خاکی / سنگریزه ای (*Cracking and piping*)

ترک خوردگی صرفاً یک عیب سازه‌ای نیست؛ وقتی که ترک خوردگی منجر به شکل‌گیری یک مسیر جریان متمرکز شود خطرناک است. یعنی اگر ترک باعث شود که یک مسیر ترجیحی کوتاه و مشخص تشکیل شود (*piping*) و نتواند این لوله خودش را ترمیم کند این خطرناک است. آب شستگی شسته شدن

ریزدانه‌ها از میان حفرات بین درشت دانه‌هاست. در طراحی سدهای خاکی فرض بر این است که سد ترک می‌خورد. لذا با فیلترگذاری (یک یا دو لایه) (که دومی نقش زهکش هم دارد و شیب پایین دست را حفاظت می‌کند) می‌توان جلوی آب شستگی را گرفت.

یعنی با فرض ترک خوردگی با فیلتر گذاری جلوی آب شستگی را می‌گیرند.



آب شستگی صرفاً حرکت ریزدانه‌های هسته به پوسته نیست، بلکه حرکت و شسته شدن ریزدانه‌ها به داخل پی را هم شامل می‌شود. آب شستگی ممکن است در داخل پی نیز ایجاد شود و ذرات ریز خاک پی از درون ذرات درشت‌تر آن شسته شوند.

روشهای تشخیص آب شستگی

- گل آب شدن جریان خروجی (یا رسوب کردن ریزدانه‌ها در آب خروجی؛ هر چند آب خروجی زلال باشد)
- رفتار غیر نرمال پیزومترها
- زیاد شدن دبی خروجی
- وجود حفره (*sink hole*) در سطح سد (تاج یا شیبها)

سد *WAC Bennet Dam* در ایالت *British Columbia* در کانادا یک چنین مشکلی داشت. وجود حفره روی تاج سد، یا در شیب، نشانه آب شستگی است. رشد غیر معمول گیاهان در یک نقطه سد این نشانه ای از وجود رطوبت است که می تواند ناشی از *piping* باشد.

علل آب شستگی (*Causes of piping*)

- 1- ترک در بدنه سد به ویژه ترک های عرضی در هسته
- 2- جداشدگی دانه ها (فیلتر و /یا هسته / و یا پوسته)

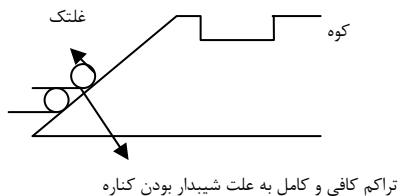
Segregation

- 3- عدم ارضا شدن دانه بندی فیلتر $\frac{D_{15}}{D_{85}}$ با کنترل کیفیت مخصوصاً برای فیلتر باید از هموزن بودن فیلتر اطمینان حاصل کرد.

- 4- عدم تراکم کافی در فصل مشترک هسته با پی و تکیه گاهها مربوط است به بحث کنترل تراوش در فصل مشترک هسته و

پی

- 5- عدم تراکم کامل و کافی در فصل مشترک هسته با کانالها، لوله های بتنی، با سرریز و ... در مناطقی که لوله های بتنی یا دیوارهای بتنی داریم، مخصوصاً در هسته که ریزدانه است و اصطکاک کافی ندارد، احتمال آب شستگی زیادتر خواهد بود.



- 6- وجود ترک در سنگ بستر و دیواره‌های سد
- 7- عدم حفاری و برداشتن خاک‌ها و سنگ‌های هوازده از کف بستر و یا دیواره سد
- 8- وجود حفره‌ها در کف رودخانه‌ها ناشی از ریشه گیاهان و فعالیت جانوران
- 9- حضور خاک‌های واگرا در سد یا پی (*dispersive soils*)
- 10- پر کردن سریع مخزن بدون اینکه وقت کافی برای خود ترمیمی به ترک‌ها داده شود.

خاک واگرا (*Dispersive Soil*)

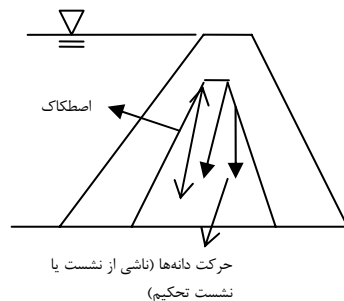
خاک رسی‌ای است که با مواجه شدن با آب (بدون نیاز به جریان آب) کم کم ریزدانه‌ها از آن جدا می‌شوند. این خاصیت بیشتر شیمی - فیزیکی است. اگر آب جریان داشته باشد، واگرایی شدیدتر می‌شود.

خود ترمیمی ترک‌ها: (*Crack Self-Healing*)

رس‌ها به‌طور طبیعی با مواجهه با رطوبت افزایش حجم داده و متورم می‌شوند. این باعث می‌شود که ترک‌ها ترمیم یابند. این فشار تورمی غالباً زیاد است و مخرب و مضر ولی در اینجا مفید است، چون منجر به بسته شدن ترک می‌شود.

قوس زدگی (*Arching*)

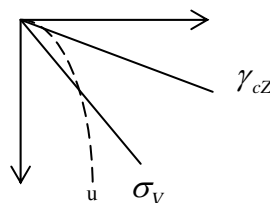
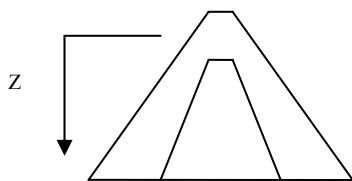
پدیده قوس زدگی اختصاصی به سدها ندارد؛ اولین آزمایش برای تبیین این پدیده را ترزاقی انجام داد. بین هسته و پوسته، نیروی اصطکاک زمانی پیش می‌آید که پوسته ثابت بوده و هسته نشست می‌کند (این بعد از زمان t است که پوسته نشست خود را انجام داده است). این باعث می‌شود بخشی از وزن هسته به فصل مشترک هسته و پوسته اثر کند. به این پدیده *Arching* می‌گویند. یعنی مولفه وزن سه قسمت می‌شود. قسمت مرکزی و قسمت‌های طرفین. قسمت‌های طرفین عمدتاً به پوسته‌ها وارد می‌شود.



γ_c = وزن مخصوص هسته

U : فشار آب حفره ای در هسته

U_{cr} : فشار آب حفره ای بحرانی



$$u_{critical} = \gamma_w Z$$

U : فشار آب در هسته سالم

تنش کل قائم $\sigma_v =$

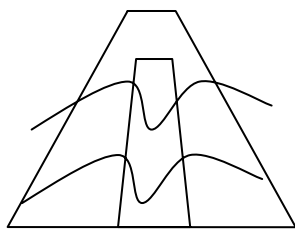
U_{cr} زمانی پیش می‌آید که یک ترک یا لوله در هسته تشکیل شده باشد.

مشاهده می‌شود که بعضی جاها u بیشتر از σ_v شده است. این نشان می‌دهد که $\sigma' < 0$ یعنی آن نقطه در خطر ناپایداری است. اگر این وضعیت در ناحیه وسیعی ایجاد شود، باعث خطر تخریب هسته و سد می‌شود.

$$\sigma_v \leq u$$

$$\Rightarrow \sigma'_v \leq 0$$

اگر خطوط هم تراز تنش قائم را رسم کنیم به صورت کلی زیر خواهد بود:



روش‌های کاهش قوس زدگی

1- زیاد کردن زمان ساخت (به علت اینکه بخشی از نشست‌ها در همان زمان ساخت واقع شود) تا میزان نشست بعد از ساخت کمتر شود.

2- استفاده از مصالح هسته با نفوذپذیری بیشتر: خاکهای رسی مخلوط (*Mixed Clayey Soils*)

اگر از مصالح مخلوط در هسته استفاده کنیم، نشست‌های تحکیمی را تسریع کرده‌ایم.

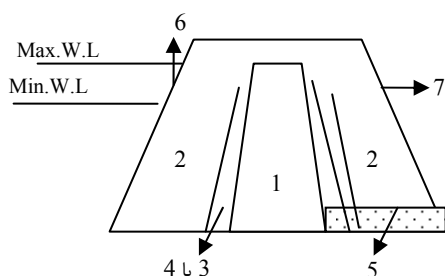
3- تراکم حداکثر هسته در زمان ساخت که باعث کاهش نشست‌های آتی می‌شود.

4- افزایش ضخامت فیلتر

در صورتیکه سختی فیلتر بینابین سختی هسته و پوسته باشد، یکی نوع تعدیل است برای *Arching*.

فیلتر نباید زیاد متراکم شود چون ممکن است به حدی متراکم آن زیاد شود که سختی آن از پوسته هم بیشتر شده و قوس زدگی را افزایش دهد.

14- تهیه مصالح مناسب جهت ساخت سدهای خاکی و سنگریزه‌ای



1- هسته رسی (70-80٪ و یا حتی 50٪ خاک رسی، نه اینکه تمام آن خاک رسی باشد)

2- پوسته

3- فیلتر

4- فیلتر دوم (ناحیه انتقالی) یا زهکش قائم

5- زهکشی افقی

6- سنگ چین بالادست *RipRap*

7- پوشش پایین دست

1- هسته

مصالح هسته باید به گونه‌ای باشد که پس از تراکم، نفوذپذیری آن حدود $10^{-7} m/s$ تا $k_{max}=10^{-6}$ بشود.

- خاک رسی

- خاک رسی و لای

- خاک رسی ولای و ماسه و شن برای پوسته مناسب هستند.

خاک رسی	+	شن و ماسه
%60		40%
%80	+	20%

البته باید در نظر داشت که مقاومت هم شرط است و تنها نمی توان به نفوذپذیری توجه کرد.

موجود بودن مصالح:

این یک عامل تعیین کننده است و درمورد تمام مصالح اهمیت دارد. بعضاً می شود که بدون در نظرگرفتن این عامل مشکلات عدیده ای پیش می آید و اقتصاد طرح تحت تاثیر قرار می گیرد.

ویژگیهای هسته:

- نکته: توصیه می شود بیش از 15٪ عبوری از الک 200 (0/075) داشته باشد.

- تراکم: تراکم در حدود 95 تا 98٪ تراکم پروکتور استاندارد

- رطوبت: رطوبت در حدود ± 1 تا 2٪ رطوبت بهینه

$$w_{opt} \pm 1\% \text{ to } 2\%$$

2-پوسته

تقریباً هرگونه مصالحی می‌تواند باشد؛ در دشت، شن و خاک و در کوهستانها، سنگ‌های ناشی از حفاری. لذا با توجه به موجود بودن مصالح نزدیک به کارگاه، نوع مصالح تعیین می‌شود، چون حجم مصالح زیاد است.

5-زه کش

مصالح شنی با دوام و مقاومت خوب که تحت بارهای وارده شکسته نشوند.

6- RipRap، ریپ ریپ

در محدوده‌ای از مخزن سطح آب نوسان می‌کند و در این محدوده تراز آب هر جا که باشد ایجاد موج می‌کند. برای جلوگیری از شسته شدن پوسته بر اثر موج، از قطعات بزرگ سنگ استفاده می‌شود. گاهی از مخلوط خاک و سیمان استفاده می‌شود (ولی گزینه اول نیست) و گاهی هم از ترکیب این دو روش. *RipRap* ها دانه‌های بزرگ سنگ هستند. و با چنگک‌هایی برداشته شده با نظم خاصی آنها را روی سطح پوسته می‌چینند. هر از چند گاهی باید از این *RipRap* ها بازدید شود.

7- پوشش پایین دست

برای جلوگیری از تخریب پوسته توسط آب باران و کشتن انرژی آب باران برای عدم آبراهه بازکردن و ... ممکن است از قطعات سنگ یا

از پوشش مناسب گیاهی استفاده شود. ابعاد *RipRap* برای شیب پائین دست، از ریپرپ شیب بالادست کوچکتر می باشد.

3 و 4- فیلتر

وظیفه اصلی فیلتر، جلوگیری از آب شستگی است. طبق تجربه و آزمایشات به این نتیجه رسیده اند که d_{15} فیلتر و d_{85} خاک مبنا باید با هم رابطه داشته باشند. مثلاً

$$\text{رابطه ترزاقی: } \frac{d_{15}}{d_{85}} < 4$$

- رابطه ترزاقی براساس آزمایش‌هایی است که روی خاک‌های دانه‌ای (ماسه‌ای) انجام شده است ($c=0$). آقای شرارد و همکارانش با انجام آزمایش‌هایی به این نتیجه رسیدند که رابطه ترزاقی یک رابطه محافظه کارانه است و دانه‌های فیلتر بسیار ریز در می‌آید.

تامین رابطه فوق در سایت معمولاً بسیار مشکل است. شرارد آزمایش‌هایی انجام داد و خاک‌ها را به چهار گروه تقسیم کرد.

D_{15} : مربوط به فیلتر

D_{85} : مربوط به خاک مبنا

D_{15b} : یعنی مرز یعنی از این بیشتر نباشد.

معیارهای طرح فیلتر

USBR: مثلاً برای خاک گروه 1 (میزان ریزدانه بیشتر از 85%)

$$-\frac{D_{15F}}{D_{85B}} < 9$$

برای بقیه گروهها طبق جدول شرارد در عمل می‌شود.

- برای جلوگیری از جداسدگی (*Segregation*) دانه‌ها اندازه دانه‌ها بیش از 75^{mm} نشود. چون با بزرگتر شدن دانه‌ها احتمال جداسدگی بیشتر می‌شود.

- بیش از 5% ریزدانه (عبوری از الک #200) نداشته باشد. چون در غیر این صورت تمایل پیدا می‌کند به خاکهای چسبنده. خاکهای چسبنده هم وقتی ترک می‌خورند، ترک در کوتاه مدت ترمیم نشده و وجود ترک هم نقض غرض استفاده از فیلتر است. اگر خاک دانه‌ای باشد، تغییر مکان ناپیوسته نداشته و سریعاً ترمیم می‌یابد.

• آزمایش قلعه ماسه‌ای روش مناسبی برای ارزیابی چسبندگی مصالح فیلتر است.

حداقل ضخامت‌های فیلترهای قائم و مایل:

حداقل ضخامت معمولاً بین 2 تا 3 متر است

- هر چه ضخامت فیلتر کمتر باشد، احتمال جداسدگی دانه‌ها در اجرا بیشتر است

- هر چه ضخامت فیلتر کمتر باشد، تراکم آنها مشکل‌تر خواهد بود.

حداکثر ضخامت فیلتر معمولاً 5 تا 7 متر است.

● هر چه سد بلندتر باشد:

- تغییر شکل‌های جانبی بیشتری شود.
- نیروی *Seepage* بیشتر می‌شود.
- اهمیت سد بیشتر است
- پس باید ضخامت فیلتر بیشتر باشد.

● در مناطق زلزله خیز:

تغییر شکل‌های ناشی از زلزله باعث می‌شود ضخامت فیلتر به صورت موضعی کاهش یابد.

فیلتر بحرانی

اولین فیلتر در پایین دست در مجاورت هسته را فیلتر بحرانی می‌گویند؛ و معیارهای فیلتر را باید دقیقاً در مورد آن رعایت کرد. برای فیلترهای غیر بحرانی زیاد معیارهای فوق را رعایت نمی‌کنند (فیلتر غیر بحرانی مثل فیلتر در بالادست) فیلترها را با غلتک‌های لایه لایه سبک متراکم می‌کنند و باید از تراکم زیاد آن خودداری شود.

طراحی هندسه کلی سد خاکی / سنگریزه‌ای

- شیب‌های بیرونی (بالادست و پایین دست)

- شیب‌های داخلی (شیب هسته)

نکات زیر را در طراحی شیب‌های بالادست و پایین دست بدنه سدهای خاکی و سنگریزه‌ای باید مدنظر داشت:

- سد سنگریزه‌ای می‌تواند شیب‌های تند داشته باشد و سد خاکی باید شیب‌های ملایمتری داشته باشد.

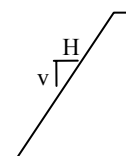
- سد همگن باید دارای شیب‌های ملایمتری باشد (چون مصالح کل بدنه از خاک ریزدانه است)

- هر چه پی ضعیفتر باشد، شیب‌ها باید ملایم‌تر باشد.

- هر چه دره بسته‌تر و تنگ‌تر باشد، شیب‌ها می‌تواند تندتر باشد و ضریب اطمینان حداکثر تا 15٪ بیشتر می‌شود.

- هر چه هسته عریض‌تر باشد، شیب باید ملایم‌تر باشد.

- هر چه ساخت سد سریع‌تر باشد، شیب‌ها باید ملایم‌تر باشد. ساخت سریع سد باعث افزایش فشار آب حفره‌ای در زمان ساخت می‌شود که ممکن است منجر به ناپایداری یا تغییر شکل‌های زیاد شود.



دست	پایین	بالادست U/S
	D/S	

سد خاکی		سد سنگی	
		پاره	
H	V	H	V
1.8	1	0.7	1
2.5	1		
6	1	1.5	1
8	1	1.8	1

مقادیر H در جدول فوق بستگی به مصالح هسته و پوسته سد، پی سد و اهمیت سد و تنگی دره و ... دارد.

طراحی نهائی شیبها

طراحی شیبهای بالادست و پایین دست سد، با توجه به نتایج آنالیز شبه استاتیکی پایداری شیبها (با در نظر گرفتن همه سطوح لغزش ممکن که از سد و پی می گذرد) تدقیق می شود.

شیب داخلی برای هسته مرکزی

H	V
0.2-0.4	1

عرض هسته در پائین سد: $W=(0.5-0.7)H$

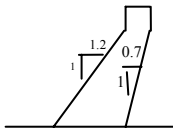
مزایای هسته عریض: نفوذپذیری بیشتر

- دبی خروجی کمتر

معایب هسته عریض

- تحکیم دیرتر
- پایداری کمتر
- مقاومت کمتر

برای هسته مایل: اعداد شکل مقابل به عنوان اعداد نمونه قابل توصیه می باشد.



16- اثر زلزله بر سدهای خاکی + آنالیز

اثر زلزله بر روی خاکهای اشباع به گونه‌ای است که مقاومت و سختی را تغییر می‌دهد (کاهش می‌دهد).
اگر تخلخل خاک از تخلخل بحرانی بیشتر باشد، یا نشست می‌کند اگر شرایط زه‌کشی شده باشد، و یا تحت یک بار مشخص، فشار آب حفره‌ای بالا می‌رود (شرایط زه‌کشی نشده).

16-1- اثرات زلزله بر روی سدهای خاکی

- بهنگام وقوع زلزله، علاوه بر نیروهای استاتیکی وارده بر سدها (از قبیل وزن خود سد و نیروی آب) نیروی اضافی ناشی از زلزله نیز وارد می‌شود.
 - نیروی ناشی از زلزله ← کوتاه مدت، بصورت رفت و برگشتی (Cyclic) و در جهات قائم و افقی می‌باشد.
 - زلزله می‌تواند اثرات زیر را بر روی سدهای خاکی داشته باشد.
 - 1- ایجاد نشست (تغییر شکل قائم) و ترک در سد، خصوصاً در نواحی نزدیک به تاج سد
 - 2- کم کردن اندازه (Free board) در نتیجه نشست. این کم شدن ارتفاع Free board در بدترین حالت منجر به سرریز شدن سد می‌شود.
 - 3- نشستهای ناهمگون - در قسمت‌های مختلف سد.
- بین سد و تکیه‌گاهها و سازه‌های مربوط به سرریز که می‌تواند منجر به نشست آب و خراب شدن سد بر اثر آب شستگی (Piping) بشود.

- 4- ناپایداری شیبهای بالادست و پایین دست سد. این ناپایداری می‌تواند مستقیماً بخاطر نیروهای زلزله (خصوصاً نیروی افقی) و یا غیر مستقیم بوسیله بالا رفتن فشار آب در قسمت‌هایی از سد و یا پی باشد.
- 5- سرریز شدن سد بر اثر حرکت‌های تکتونیک در بستر مخزن سد و ایجاد موج در مخزن
- 6- سرریز شدن سد بر اثر موجهای ایجاد شده بوسیله لغزشهای دیواره‌های مخزن
- 7- حرکت‌های نامتقارن و نامساوی گسل که از زیر سد عبور کند.
- 8- ایجاد خسارت به تونلها و گالریهای داخل سد که می‌تواند منجر به نشت آب و فرسایش بالقوه سد بشود.
- 9- روانگرایی (liquefaction) و یا کاهش مقاومت مصالح سد و پی سد در اثر افزایش فشار آب حفره‌ای ایجاد شده بوسیله زلزله

* امکان وقوع هر یک از موارد فوق و میزان خسارات ناشیه بستگی به عوامل زیر دارد:

- 1- میزان لرزه‌خیزی منطقه‌ای که سد در آن درست شده
- 2- وضعیت پی سد و شرایط پستی و بلندی زمین (Topographic Conditions): توپوگرافی بیشتر، خسارات بیشتر
- 3- نوع سد و پی (جنس مصالح سد و مصالح پی)
- 4- اندازه و بزرگی سد

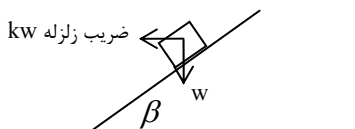
5- مقطع عمر سد (آبگیری یا پایان ساخت یا تراوش دائم)

2-16- آنالیز و طراحی

- آنالیز تعادل حدی: SF را بدست می دهد.
- آنالیز نیومارک، که تغییر مکانها را محاسبه می کند.
- آنالیز تنش- تغییر شکل که به کمک روش های المان محدود (FE) یا تفاوت های محدود (FD) انجام می شود.

اگر اثر زلزله را به صورت نیروی شبه استاتیکی در آنالیز تعادل حدی وارد کنیم به آن آنالیز شبه استاتیکی می گویند. *Pseudo-Static Analysis*

از تنش در راستای قائم صرف نظر می شود و به موجب روش بلوکی داریم:



یک نیروی افقی به جرم وارد می کنند
از شتاب نگاشت a_{max}

$$a_{avg} \cong 0.65 a_{max}$$

بدست می آید

$$k = \frac{a_{avg}}{g}$$

K یک ضریب بدون بعد است. ضریب اطمینان با نوشتن نیروهای فعال و مقاوم برشی به صورت زیر خواهد شد.

(خودتان اثبات کنید)

$$SF = \frac{1 - k \tan \beta}{\tan \beta + k} \cdot \tan \phi$$

هم نیروی محرک را زیاد می‌کند و هم از نیروهای مقاوم کم میکند.

ضریب اطمینان برای تعادل شبه استاتیکی بین 1/1 تا 1/15 است و برای بارگذاریهای استاتیکی (قبلاً گفته شد) بقیه در حدود 1/3 - 1/4 تا 1/6

در فرمول فوق، اگر $k=0$ باشد:

$$SF = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

یعنی همان SF که در روش بلوک لغزنده در حالت بدون زلزله بدست آمد.