

سدهای خاکی پیشرفته

(Advanced Earth Dams)

کد درس: ۲۴۸۲۱۹۳

تعداد واحد: ۳

مقطع و گرایش: کارشناسی ارشد - مهندسی ژئوتکنیک (M.Sc. Candidates in Geotechnical Engineering)

هدف: اهداف اصلی این درس شامل موارد زیر است:

- * آشنائی با انواع سدهای خاکی/سنگریزی و ویژگیهای آنها
- * مطالعات اولیه لازم برای مکان‌یابی و طراحی مقدماتی سدها
- * کاربرد مفاهیم هیدروژئوتکنیکی (شامل تراوش، کنترل تراوش، ارزیابی پایداری شیبها و محاسبات مربوط به فشار آب حفره‌ای) در سدهای خاکی/سنگریزی
- * مسائل مهم مبتلابه در سدهای خاکی/سنگریزی (مثل ترک خوردگی، سرریز شدن و فرسایش داخلی)
- * طراحی مقدماتی و تحلیل سدهای خاکی و تهیه مصالح مناسب

فهرست مطالب

- ۱- مقدمه
- ۱ - کلیاتی در مورد مدیریت منابع آب
- ۱ - نقش آب در تامین انرژی
- ۱ - تعاریف کلی انواع سدها
- ۲- ویژگی سدهای خاکی/سنگریزی
- ۲ - مزایا و فوائد
- ۲ - معایب و مشکلات
- ۲ - بررسی آماری سدهای خاکی/سنگریزی
- ۳- مطالعات اولیه مربوط به سدها
- ۲ - مطالعات هواشناسی، زمین‌شناسی مهندسی و مطالعات ژئوتکنیکی
- ۲ - مطالعات لرزه‌شناسی و تعیین حرکت طراحی ساختگاه
- ۲ - مطالعات منابع قرضه و آزمونهای محلی و آزمایشگاهی لازم

- مطالعات زیست محیطی

۴- انواع سدهای خاکی/سنگریزه‌ای

۱

- سدهای همگن

- سدهای خاکی/سنگریزه‌ای با هسته رسی

- سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) و یا رویه آسفالتی (AFRD)

- سدهای خاکی/سنگریزی با هسته آسفالتی

۵- موارد مهم در مکان‌یابی و طرح اولیه سدهای خاکی/سنگریزی

۲

- موارد مربوط به پی، تکیه‌گاه‌ها و مخزن

- موارد مربوط به بدنه سد

۶- تراوش در سدهای خاکی/سنگریزی

۲

- مرور قوانین تراوش، شبکه جریان، ...

- ملاحظات تکمیلی در مورد قانون تراوش

- ملاحظات در مورد ضرایب نفوذپذیری خاکها

- نحوه ترسیم شبکه جریان برای محیطهای ناهمسان

۷- کنترل تراوش و روشهای آن

۴

- کنترل تراوش در پی و تکیه‌گاهها

- کنترل تراوش در محل تماس پی و تکیه‌گاهها با بدنه (به ویژه هسته)

- کنترل تراوش در بدنه سد

۸- روشهای ارزیابی پایداری شیبها

۵

- اصول روش تحلیل تعادل حدی (LEM)

- مکانیزمهای مختلف لغزش و محاسبه ضرایب اطمینان آنها شامل لغزش بلوکی، لغزش صفحه‌ای، لغزش

دایره‌ای، لغزش گوه‌ای، لغزش با شکل کلی و نامشخص

۹- فشار آب در سدهای خاکی/سنگریزی و ارتباط آن با مباحث پایداری

۴

- فشار آب در زمان ساخت و پیش از آب‌گیری

- فشار آب در زمان اولین آب‌گیری

- فشار آب در زمان تراوش پایدار

- فشار آب در زمان افت سریع در مخزن

۱۰- آب‌شستگی و ترک‌خوردگی در سدهای خاکی/سنگریزی

۲

- انواع ترکها (ترکهای طولی، ترکهای عرضی)

- ارتباط ترک‌خوردگی و آب‌شستگی

- علل آب‌شستگی

- روشهای مقابله با آبشستگی

۱۱- مشخصات فنی مصالح مناسب برای سدهای خاکی/سنگریزی

۲

- مصالح هسته

- مصالح پوسته

- مصالح فیلتر و زهکش

- مصالح ریپرپ

۱

۱۲- کنترل در زمان ساخت

- تعریف کنترل کیفیت

- پارامترهای لازم برای انجام کنترل کیفیت

- فرکانس کنترل کیفیت هر پارامتر

۲

۱۳- اثر زلزله بر روی سدهای خاکی/سنگریزی

- اثرات زلزله

- روشهای مقابله با این اثرات

- تحلیل شبه-استاتیکی برای طراحی مقدماتی

- تحلیل دینامیکی و مقتضیات آن در سدهای خاکی/سنگریزه‌ای

۲

۱۴- مراقبت از سدهای خاکی/سنگریزی

- ابزاربندی (انواع ابزارها)

- پایش (monitoring) و لزوم آن

- فرکانس پایش برای پارامترهای مختلف

فهرست منابع اصلی:

۱- وفائیان، سدهای خاکی

۲- حائری، س.م. اصول طراحی سدهای خاکی

3. Kuzner, C., 1997. "Earth and Rockfill dams: Principles, of design & construction", Balkema.

4. Sherard, J. and co-workers, 1963. "Earth and earth-rock dams", John Wiley & Sons.

5. Casagrande, 1973, "Embankment and dam engineering".

6. Kkaernsli, B. and co-workers, 1992. "Rockfill dams", No. 10 of Series of Hydropower Development.

7. Fell, R. and co-workers, 1992. "Geotechnical Engineering of embankment dams", Balkema.

8. Lamb, T.W. and Whitman, R.V., 1969, "Soil mechanics", John Wiley & Sons.

9. Cedegren, Seepage, drainage and flow nets.

سایر منابع: تعداد قابل توجهی مقاله در طول ترم ارائه می‌شود که دانشجویان باید با مطالعه آنها خلاصه-نویسی و تحویل نمایند.

ارزیابی: امتیاز نهائی بر اساس ترکیب زیر خواهد بود:

- تمرینها ۱۰٪
- خلاصه مقالات ۱۰٪
- پروژه ۵-۱۰٪
- امتحان پایان ترم ۷۰-۷۵٪

سدهای خاکی

ویژگیها، اصول مطالعه، طرح و اجرا

مؤلف: دکتر عباس سروش

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

@civilengaut

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 زیست

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

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

6- عوامل موثر در انتخاب نوع سد

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

9- تراوش در سدهای خاکی

- 10- کنترل تراوش
 - 1-10- دلائل کنترل تراوش
 - 2-10- کنترل تراوش در پی و تکیه گاهها
 - 3-10- کنترل تراوش در بدنه سد
 - 4-10- 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 آبگیری

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)

عمده ترین 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 بین المللی سدهای بزرگ

که در ایران *IRCOLD* نامیده می شود. این کمیسیون بیشتر جنبه صنفی دارد و کلاً طرفدار احداث سد می باشد.

World Commission On Dams (WCOD) کمیسیون

جهانی در مورد سدها

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

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

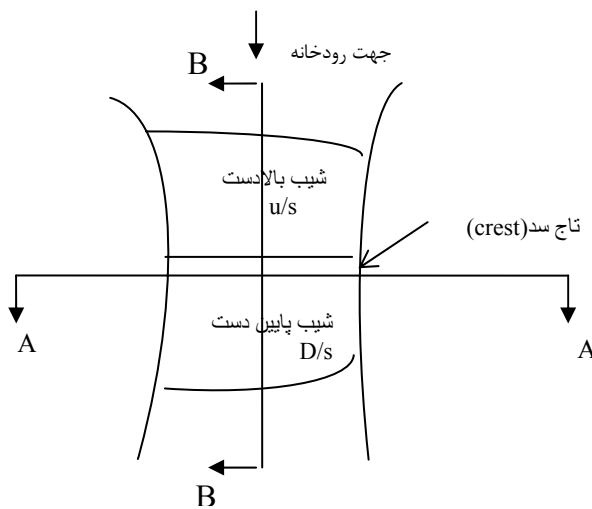
اختلاف نظرهایی دارند.

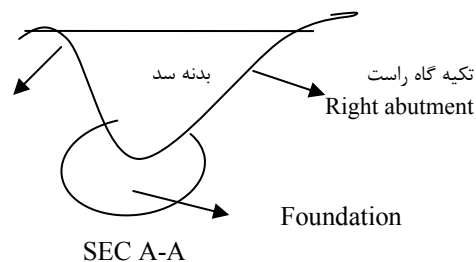
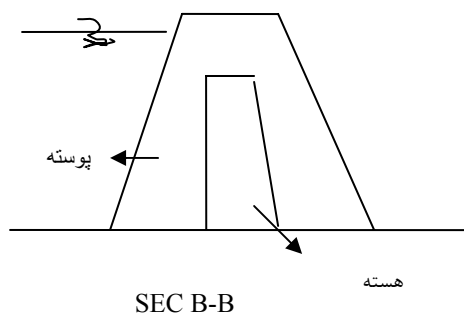
WOCD جدیدتر است و مدعی است که عدم مطالعه کافی برای احداث سدها، بیشتر از سود، ممکن است ضرر داشته باشد.

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 سدهای پاره سنگی (سنگریزه‌ای)

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)

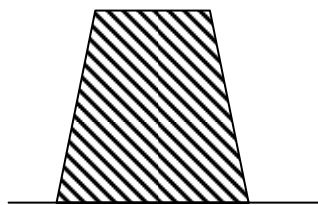
Foundation

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.

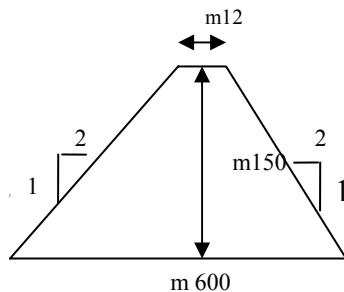
بزرگترین سد بتنی در امریکا 315 متر ارتفاع دارد.

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.



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

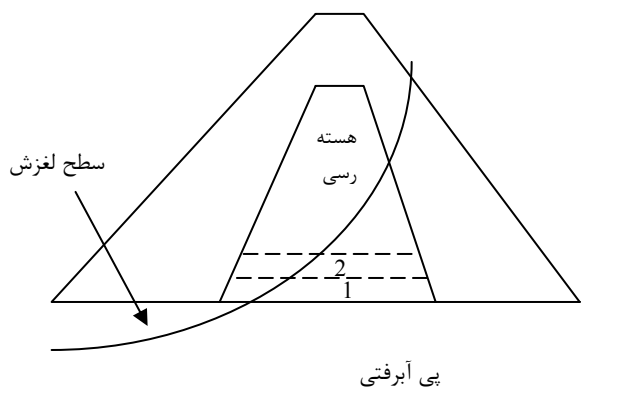
مشخص است که حجم زیادی دارد. بنابراین یک مهندس طراح سد هر چه بتواند این حجم را کمتر کند، طرح او اقتصادی‌تر است. وقتی سد آبیگری می‌شود یک بارگذاری سنگین علاوه بر بار خود سد بر بدنه، پی و بستر مخزن وارد می‌شود.

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

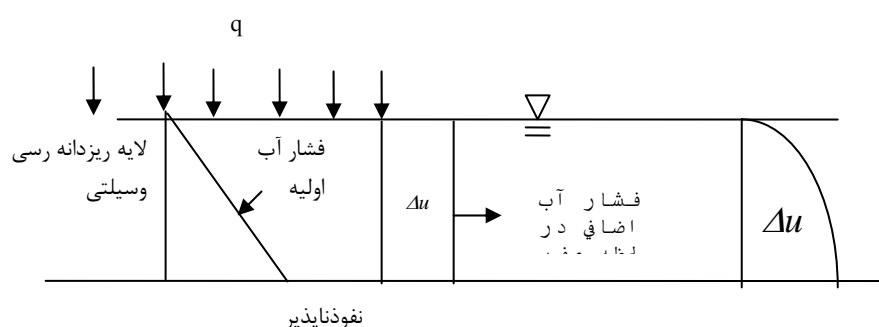
وقتی لایه دوم هسته را می‌کوبند، در نتیجه بارگذاری لایه دوم، درجه اشباع در لایه اول بالا می‌رود. به همین ترتیب، هر چه درجه اشباع بالا می‌رود مقاومت کمتر می‌شود، و ممکن سد ناپایدار شود. همین امر ممکن است در پی آبرفتی هم رخ دهد.



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

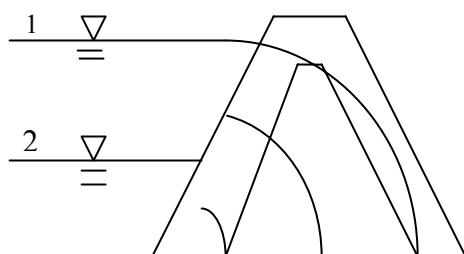
بسته به نفوذپذیری خاک، برابر شدن حجم ورودی آب و حجم خروجی آب به و از هسته رسی ممکن است چند سال بطول انجامد. وقتی که این دو مقدار برابر نیست به آن جریان انتقالی می‌گویند.

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.

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

Porous Media محیط متخلخل

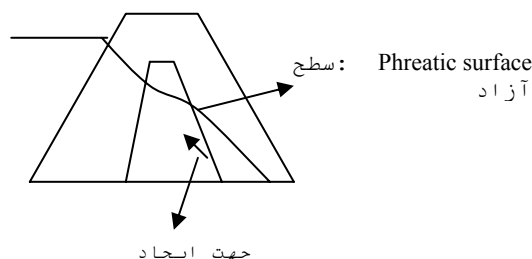
در همه این بارگذاری‌ها بر روی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، آب حضور دارد. در بارگذاری‌های مذکور (بجز حالت تراوش پایدار) شرایط بارگذاری در هسته سد و پی آبرفتی ریزدانه به صورت زه‌کشی نشده می‌باشد.

- 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.

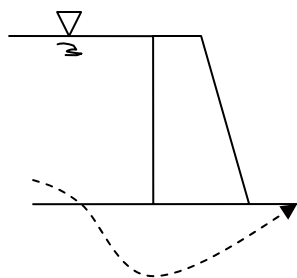
میزان زیاد شدن *seepage* در هسته ممکن است علامت شروع وقوع پدیده رگاب باشد.

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.

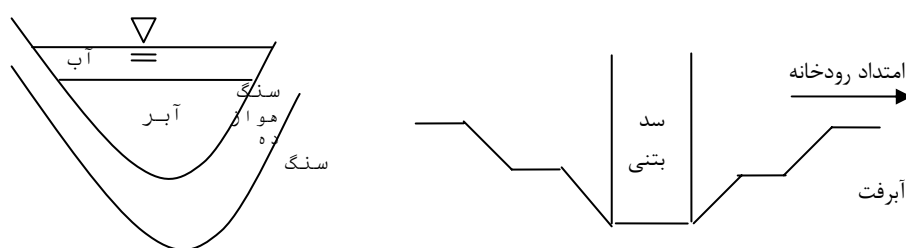
- کنترل میزان نشت از بدنه و پی

- کنترل خطر ایجاد سوراخ ها در بدنه و پی سد (بوسیله حیواناتی نظیر گورکن ها و موشهای صحرایی)

3- مزایا و معایب سدهای خاکی/سنگریزه‌ای

3-1- مزایا

- 1- استفاده از مصالح محلی و در دسترس
- 2- اجرای آن آسانتر و معمولاً سریع تر است (نسبت به سد بتنی)
- 3- اجرای آن ارزان تر 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 آبزدایی (*dewatering*) هم بالا می‌رود.

هوازده‌گی : *weathering*

یعنی سنگ در طی سالیان متمادی تحت تغییر شرایط جوی، فیزیکی و شیمیایی 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:

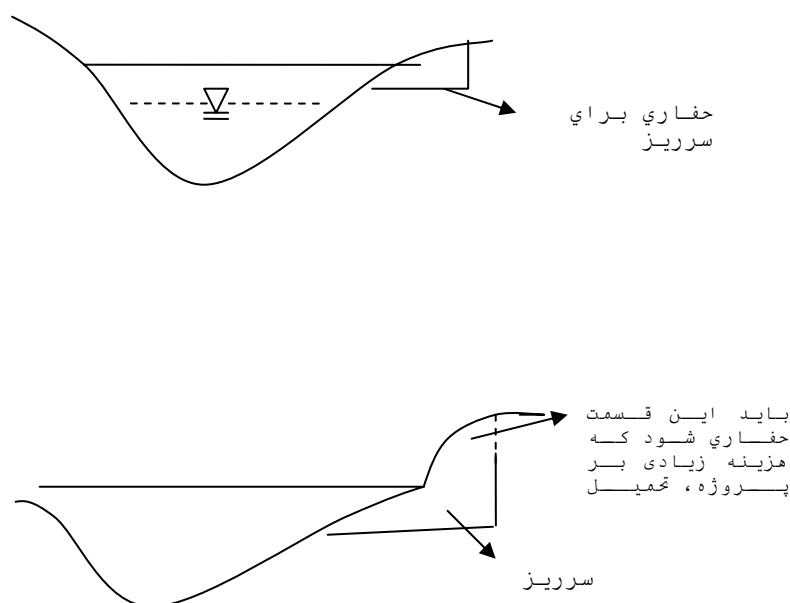
داخلی ← *piping*

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)

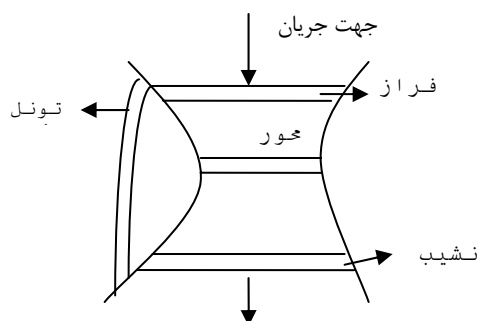
- علت‌های شکست و تخریب سدهای خاکی/پاره سنگی:
 $(H > 15^m)$ در سالهای 1900-1985 (به سدهای با ارتفاع بیش از 15^m large dam می‌گویند)

علت	درصد
سرریز شدن <i>over-topping</i>	35 (با بیشتر کردن <i>Freebord</i> در حال کم شدن است)
رگاب <i>seepage</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

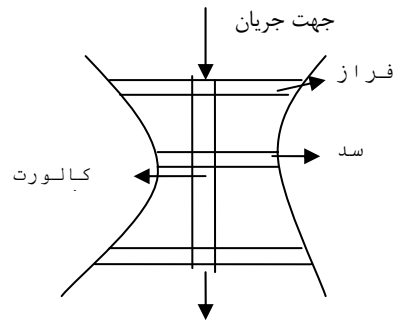
برای خشک کردن سایت سایت جهت ساخت سد، باید تونل انحراف ایجاد کرد. تا آب از تونل بگذرد و رودخانه در محور سد خشک شود. همچنین باید یک سد به نام فراز بند احداث شود تا آب داخل تونل برود. برای عدم برگشت آب در پایین دست هم از نشیب بند استفاده می شود.



در جاهائیکه تکیه گاه ها 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 امکان سنجی 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 $\frac{1}{25000}$ تا $\frac{1}{50000}$)

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 لایه‌بندی
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

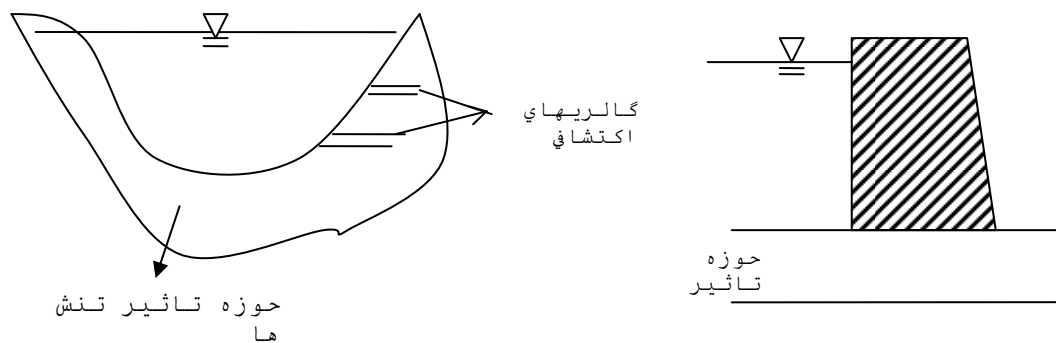
در یک رودخانه باید مطالعه کنیم که در کجا و با چه ارتفاعی و در چه زمانی چه نوع سدی احداث کنیم تا استفاده بهینه از سدها و آب رودخانه داشته باشیم.

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.

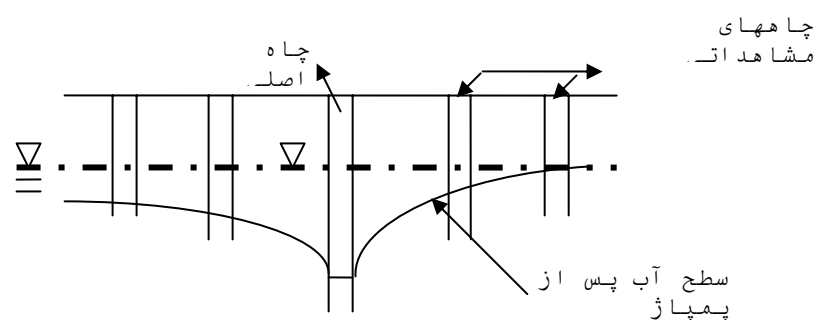
- گمانه رنی
- نمونه گیری
- آزمایشات ژئوفیزیک
- آزمایشات آزمایشگاهی
- حفر گالری‌های اکتشافی
- آزمایشات محلی

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 می‌توان 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 سازه‌ای 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

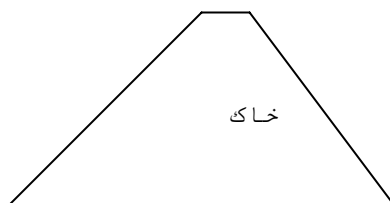
- سدهای سنگریزه‌ای

- هسته خاکی

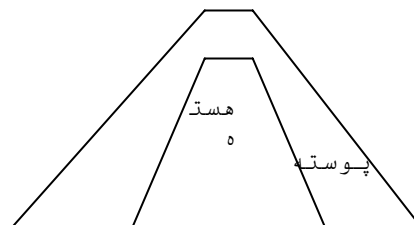
- رویه بتنی (*CFRD*)

- سدهای خاکی / سنگریزه‌ای با هسته آسفالتی

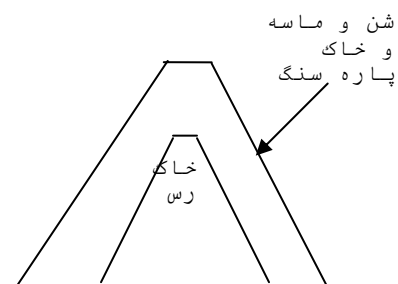
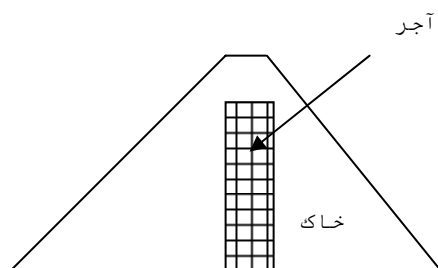
- سدهای خاکی / سنگریزه‌ای با رویه آسفالتی



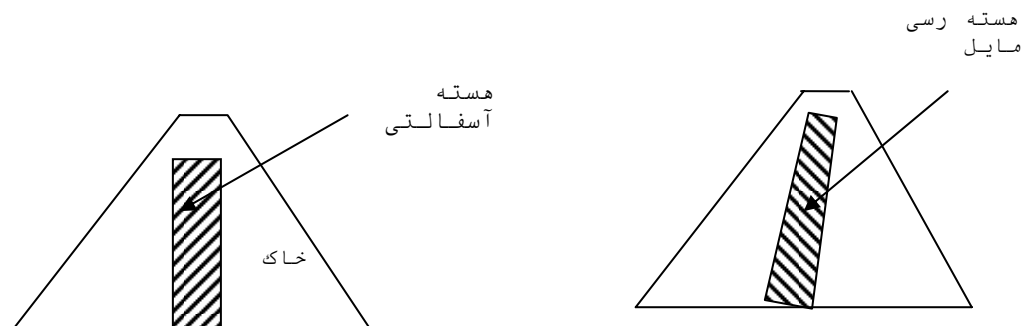
H-D



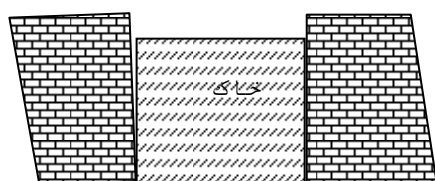
Z-D



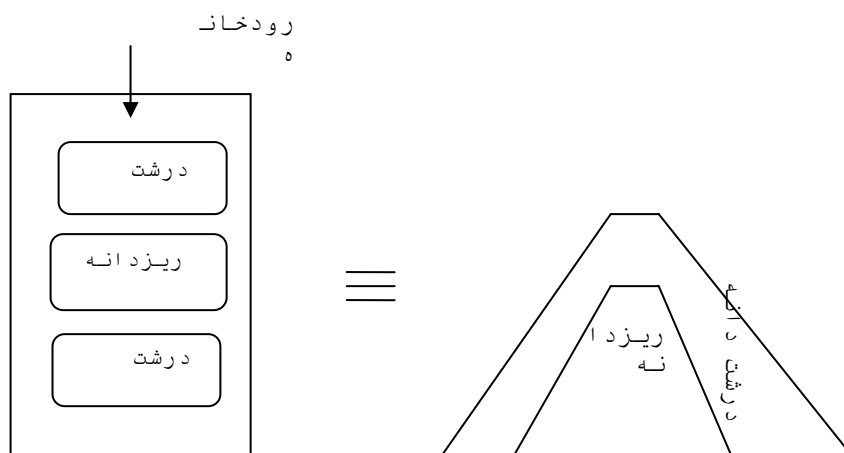
نمونه‌هایی از سدهای خاکی



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



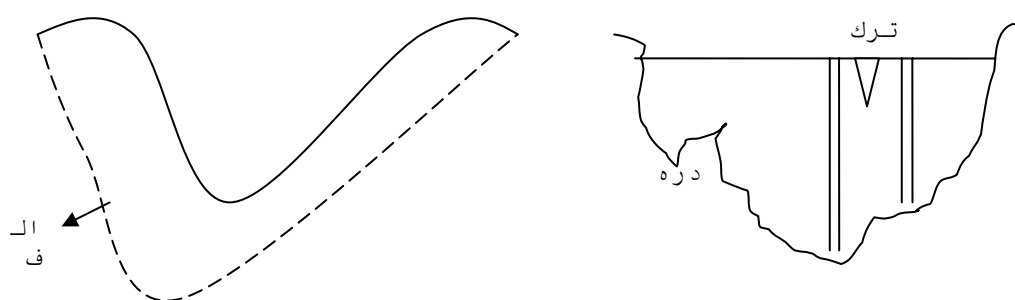
بعد از اینکه فهمیدند که سدهای همگن مناسب نیست، سدهائی ساختند که شبیه به همان سدهای غیر همگن می‌باشد ولی روش اجرای متفاوتی دارند. به این نوع سد، *Hydraulic Fill Dam* می‌گویند.



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.

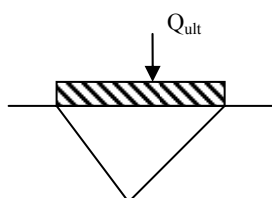


در دره‌های با توپوگرافی ناهموار یا در دره‌های تنگ، مشکل دیگر نشست‌های غیرمتقارن است چون ارتفاع خاک متغیر است و این باعث ایجاد ترک بین مقاطع مختلف می‌شود.

- 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.

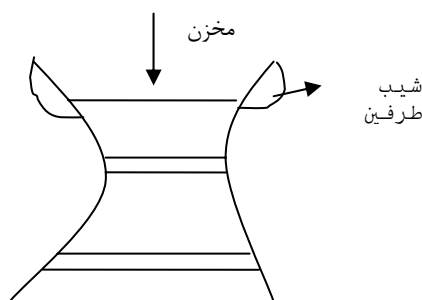
- ظرفیت باربری پی، بیشتر وزن سدهای خاکی و سدهای بتنی وزنی بر روی پی است. برعکس در سدهای بتنی قوسی که نیرو بیشتر بر تکیه‌گاه‌ها وارد می‌شود.



- بررسی پتانسیل روان گرائی (*Liquefaction*)
اگر تحت بارگذاری‌ای 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 روان گرا 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

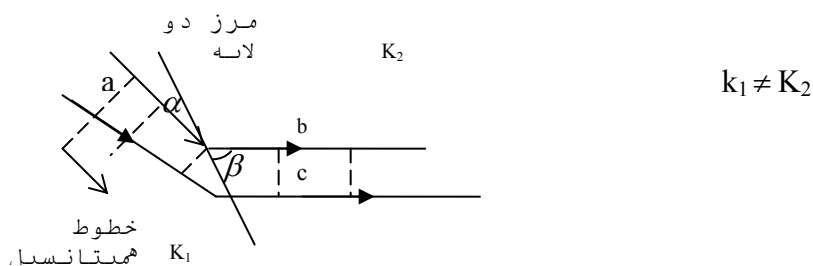
$$\frac{B}{C} = \frac{Benefit}{cost} = ?$$

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 لایه ها و جریان موازی با لایه ها
 - 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 می کند.

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.

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

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

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

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

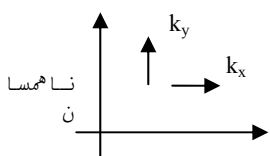
$$\Rightarrow (k_1) \left(\frac{\Delta h}{a} \times a \times 1 \right) = (k_2) \left(\frac{\Delta h}{b} \times c \times 1 \right)$$

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

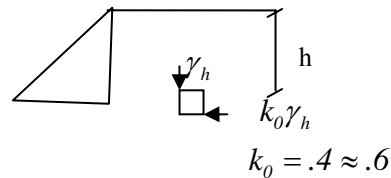
- تمرین: ثابت کنید که در جریان در فصل مشترک لایه‌ها با نفوذپذیری متفاوت، رابطه زیر برقرار است.

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

- 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.

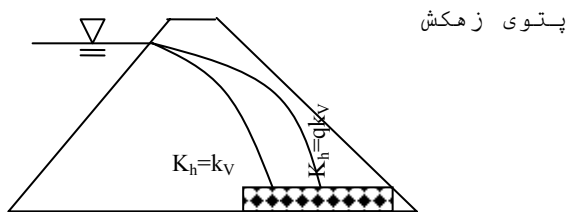
- پس از ترسیم شبکه جریان در مقطع جدید، شبکه جریان را در مقطع اصلی پیاده می‌کنیم در این صورت شکل شبکه جریان به صورت متوازی الاضلاع خواهد بود که در آن خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل بر یکدیگر عمود نیستند. در این صورت، نفوذپذیری معادل (\bar{k}) برابر است با:

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

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

- 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)

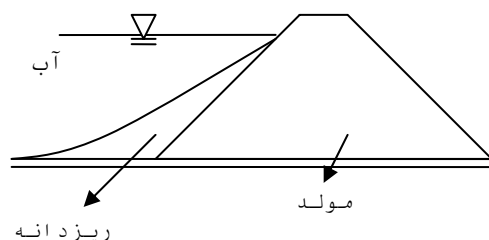
کنترل تراوش یعنی اینکه در محیط‌های متخلخل که آب می‌تواند جریان پیدا کند آن را کنترل کنیم و از آثار مخرب (اقتصادی و فنی) آن بکاهیم.

• دلایل کنترل تراوش

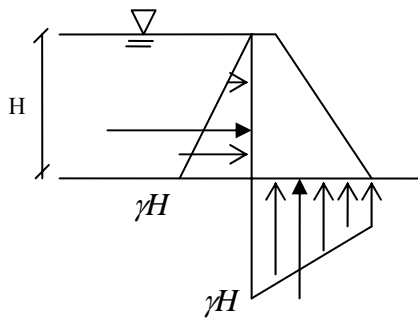
1- حفظ آب (آب تمیز) در سدهای معمولی

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

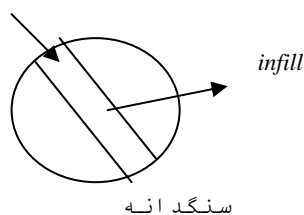
در معادن که پروسه استخراج آنها همراه با اضافه کردن افزودنیها است، وقتی عیار واقعی آن را می‌گیرند، مخلوطی از خاک درشت دانه و ریزدانه، آب و مواد شیمیایی باقی می‌ماند. شرایط زیست محیطی اجازه نمی‌دهد که این مواد آبکی را وارد محیط زیست کنیم. برای حفظ این آبها، از سدهای باطله استفاده می‌شود. از مصالح درشت 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.



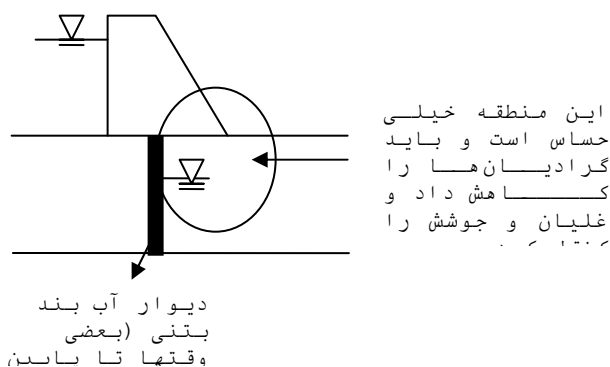
4- کنترل پایداری داخلی خاک در پی و تکیه گاهها و در بدنه سد
 در سدهائی که بر روی پی های سنگی بنا شده اند، در بین لایه های
 سنگ، *infill* هایی وجود دارد (ریزدانه) که اگر گرا دیانی که سد
 تولید می کند از گرا دیان ماکزیمم رودخانه بیشتر باشد، باعث
 می شود که این *infill* ها را بشوید و با خود ببرد و این باعث
 می شود که شدیداً نفوذ پذیری 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.

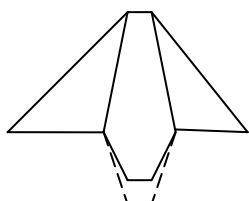
در سمت پائین دست سیستم آب‌بند پی، فشار آب خیلی کمتر از فشار آب در بالادست آن است.



الف- کنترل تراوش در پی و تکیه گاهها

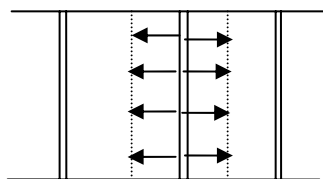
- تقسیم بندی کلی روش‌های کنترل تراوش در پی و تکیه گاهها:
 - آب‌بند کردن کامل ضخامت لایه نفوذپذیر
 - آب‌بند کردن بخشی از ضخامت لایه نفوذپذیر
 - طولانی کردن مسیر تراوش در پی
 - کاهش فشار آب با حفر گمانه‌های زه کش و گالری

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

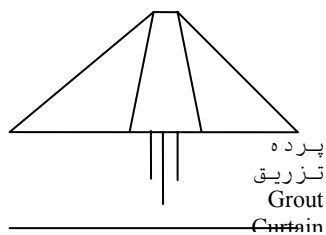


2-تزریق (Grouting)

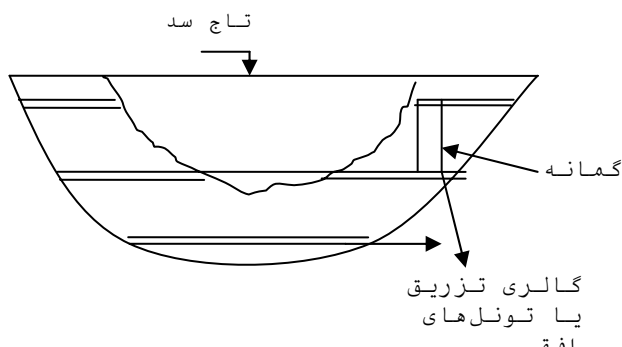
به صورت تزریق ملات آب و سیمان در پی. اصول تزریق بدین صورت است که چال‌هایی می‌کنند و ملات سیمان را با فشار وارد می‌کنند. تعداد این چال‌ها و محل‌های آنها را با توجه به شعاع تاثیر آنها تعیین می‌کنند.



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.

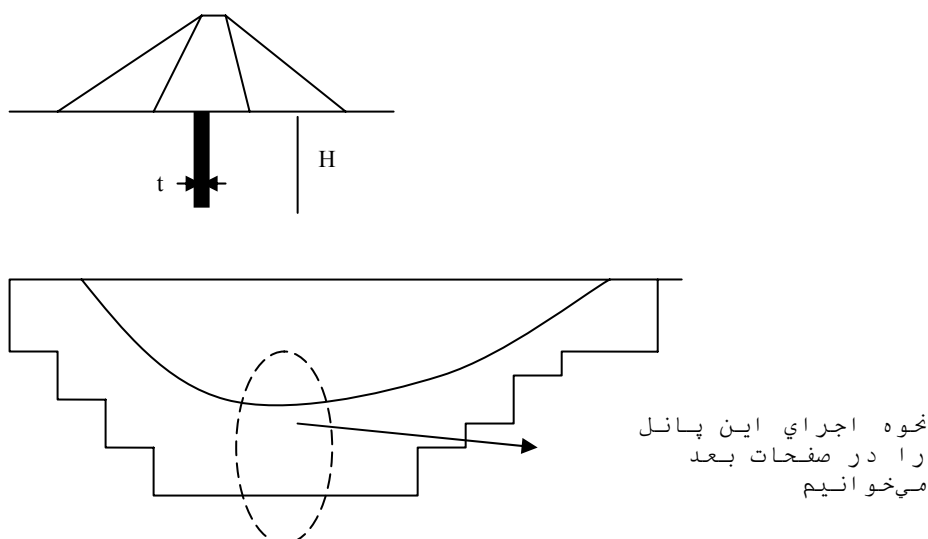
- آزمایش لوژان

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.

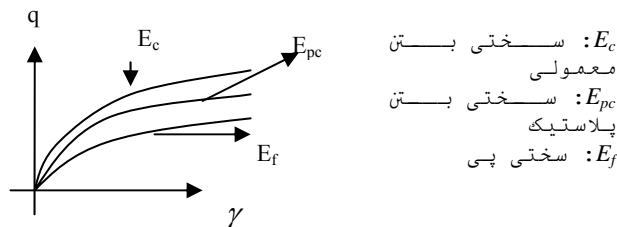
3- دیوار آب‌بند (COW) Cut-off Wall

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



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*:

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

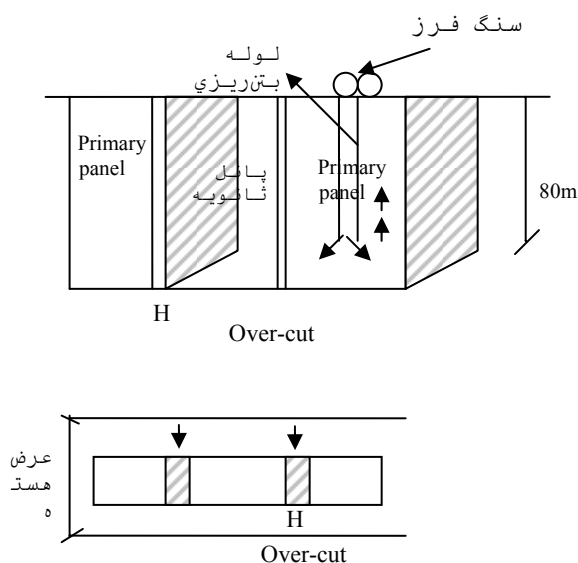
$$E_f = \text{مدول الاستیک مصالح پی}$$

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

اول دو پانل اولیه را اجرا می کنند. تا عمق مورد نظر حفاری می شود توسط هیدورفرز و همراه آن از گل حفاری استفاده می شود. این گل حفاری چند کار می کند:

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

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



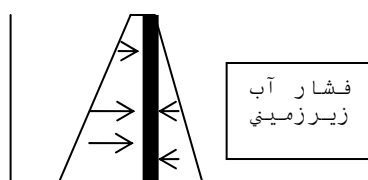
بعد لوله بتن ریزی وارد می شود و بتن می ریزند و چون بتن سنگین تر از گل حفاری است، گل حفاری می آید رو و بتن جای آن را می گیرد.

هر دو تاي اين پانل‌ها را پانل اوليه مي‌گويند و شبيه هم حفاري و اجرا مي‌شوند. براي پانل ثانويه (پانل وسطی) به همين طريق عمل مي‌شود، ولي با اين تفاوت كه مقداري از دو پانل اوليه مجاور را *over-cut* مي‌کنند. يعني بتن ريخته شده را حفاري و مجدداً بتن‌ريزي مي‌کنند.

اجرای اين *over-cut* به دو دليل است:

- 1- اتصال بتن به بتن بهتر است
- 2- اگر *over-cut* نباشد، ممكن است به علت انحرافات دستگاه (مخصوصاً در عمق كه اثر آن زيادتر مي‌شود) پانل‌هاي مجاور به هم متصل نباشند و در نتيجه سيستم يكپارچه نشده و نفوذپذيري ديوار دچار مشكل شود.

در هنگام حفاري به همراه گل حفاري، در كنارهاي حفاري مقداري كيك يا ژل بنتونيت باقي مي‌ماند. اين كيك در زمان حفاري ترانشه و اجراي پانل نقش آب‌بند دارد و جلوي نفوذ آب خارج به داخل ترانشه را مي‌گيرد. اين نقش اصلي آن است.



گفتيم كه با ريختن بتن، گل حفاري رو مي‌آيد. آيا اين بتن ريزي قدرت زدودن كامل ژل بنتونيت را هم دارد؟ چون باقي ماندن كيك

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:

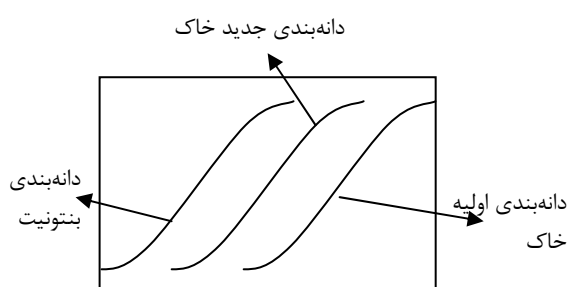
کیک بنتونیت در مقابل تغییرات رطوبت حساس است و اگر کمی خشک شود، ترک می‌خورد. از طرف دیگر ممکن است کیک بنتونیت در مقابل جریان آب شسته شود. آیا خاک جلوی آن می‌تواند نقش فیلتر بازی کند یا نه؟

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)

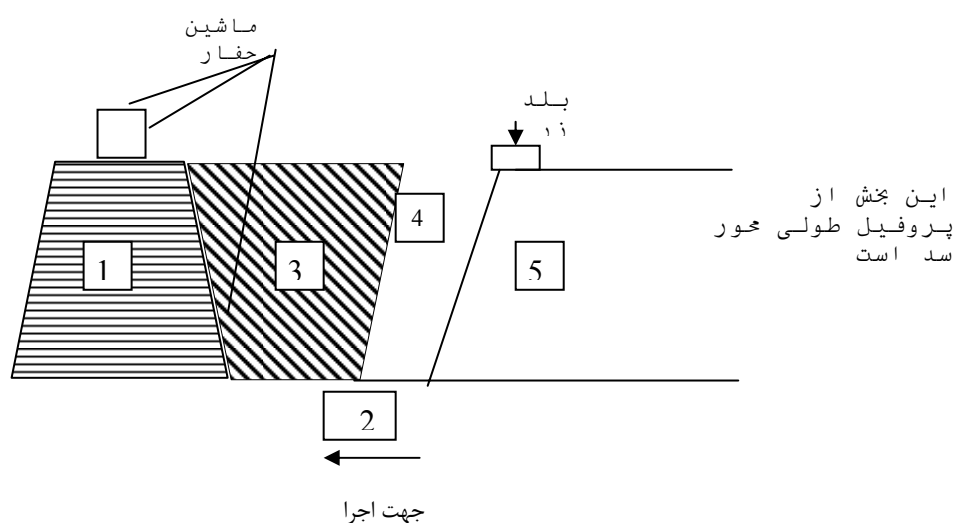
خاک را حفاری کرده خارج می‌کنیم. سپس با آب و بنتونیت خوب مخلوط می‌کنیم و مجدداً وارد ترانشه می‌کنیم. این باعث می‌شود که دانه بندی خاک ریزتر شود.

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

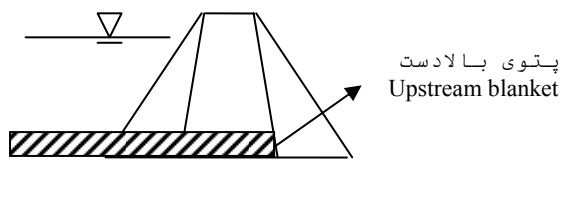
4- بخشی از ترانشه که با مخلوط گل و مصالح حفاری شده پر شده است.

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.

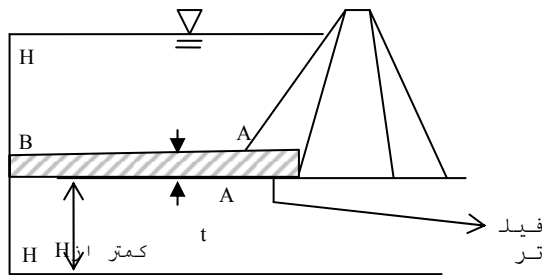
- ضخامت و طول مورد نیاز برای پتو بستگی دارد به:

- 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 متغیر طرح کنند. معمولاً با دورتر شدن از سد نازک‌تر اجرا می‌شود. چرا؟



به عنوان تخمین اولیه تا:

$$t=61+0.02x$$

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

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 می‌رویم، هد بالای پتو همان H است ولی هد پایین پتو کمتر و کمتر از H می‌شود و در نقطه A هد پایین خیلی کمتر از H است. لذا گرادیان بیشتر می‌شود و این یکی از دلایل بیشتر گرفتن ضخامت پتو هست.

در سدی در پاکستان به نام تار بلا از این روش استفاده شد و بعد از اولین آگیری، (*sink hole*) غول چاله در کف مخزن ایجاد شد. این به دلیل این است که فیلتر نگذاشته بودند و ریز دانه‌ها 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.

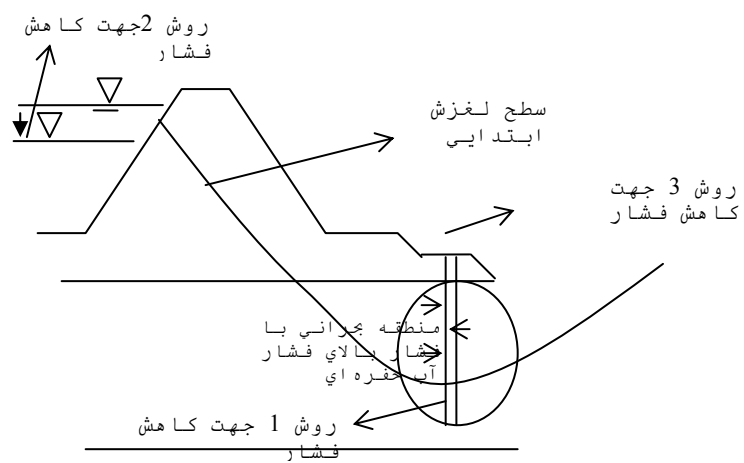
- *sinkhole* ها با مصالح فیلتر پر کرده شدند و ضخامت پتو تا حداکثر 5 متر افزایش داده شد، که گرادیان در پتو را به $0/03$ کاهش داد.

- 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

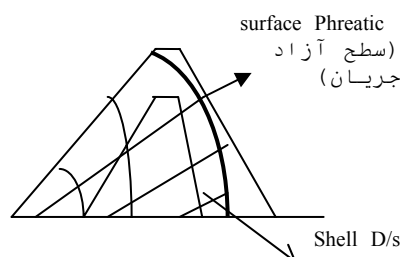
این روش از لحاظ اقتصادی و نشت آب به صرفه نیست ولی به پایداری سد کمک می کند. در ناحیه زیر پنجه سد، فشار آب حفره ای شدید وجود دارد که ممکن است باعث لغزش شود (پایداری شیروانی به خطر می افتد). برای کاهش فشار آب حفره ای در مناطق بحرانی در مقطعی از سد چاهک هایی در پی حفر می کنند تا فشار آب حفره ای کاهش یابد. 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، چاه های زهکش یا چاه های 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 می‌شود.



اولین قدم در کنترل تراوش این است که هسته را در وسط بدنه و پوسته را در طرفین هسته قرار می‌دهیم. اگر سطح آزاد جریان به صورت نشان داده شده (خط چین) در پوسته پایین‌دست 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* می‌شود. تا جایی که امکان دارد باید سطح آزاد جریان را از سطح پوسته پایین‌دست دور کنیم.

پس هدف از کنترل تراوش در بدنه سد:

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

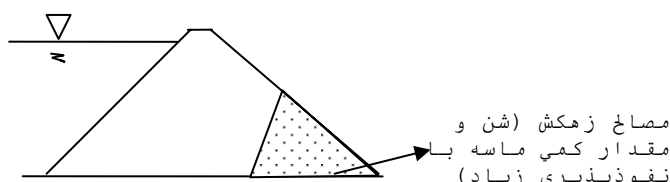
Piping: شسته شدن ذرات ریز در اثر نیروی زه به داخل خاک درشت دانه. این خطر در مرز پایین دست هسته و پوسته احتمال بیشتری دارد که رخ بدهد.

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

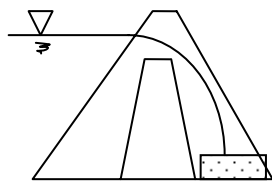
• روش های کنترل تراوش در بدنه

- 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

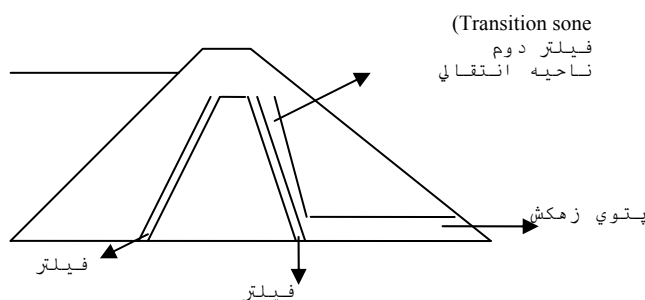
روش (1) قدیمیترین روش است و در سدهای همگن کاربرد دارد. نفوذپذیری این مصالح زه کش بحدی زیاد است که می تواند خط آزاد جریان را پائین بیاورد و از سطح پوسته دور کند. این روش بیشتر در سدهای همگن کاربرد دارد.



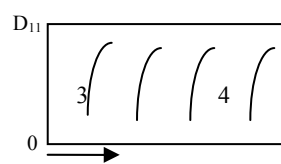
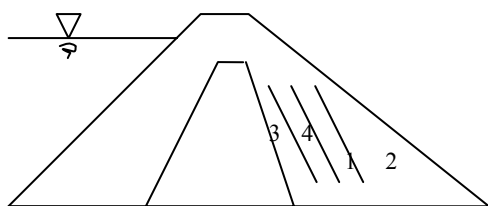
روش (2) در سدهای همگن و غیر همگن کاربرد دارد.



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 می‌شود.

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

5- ضریب اطمینان (SF) به صورت زیر تعریف می‌شود: 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 می‌دهد به عنوان سطح لغزش بحرانی انتخاب می‌شود.

ضریب اطمینان ($Safety Factor$)

ضریب اطمینان در اصل ضریب جهل است و هر چه نادانسته‌ها بیشتر باشد، این ضریب بیشتر می‌شود. نادانسته‌ها در مورد هندسه و پارامترهای مقاومتی می‌باشد. البته بیشتر برای پارامترهای مقاومتی تعریف می‌شود، چون هندسه تقریباً معین است. بنابراین: ضریب اطمینان ضریبی است که بوسیله آن پارامترهای مقاومتی خاک (ϕ, c یا ϕ', c') کاهش داده می‌شود تا مقاومت خاک به حالت تعادل حدی کاهش یابد.

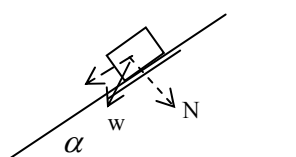
شکل‌های مختلف لغزش و روش تحلیل آنها

- 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 $u = 0$

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

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

$$T = w \sin \alpha$$

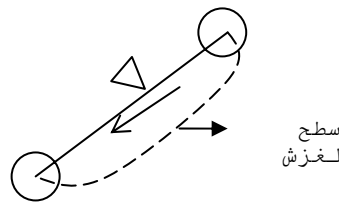
$$SF = R/T = \frac{(w \cos \alpha)(\tan \phi)}{(w \sin \alpha)} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

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

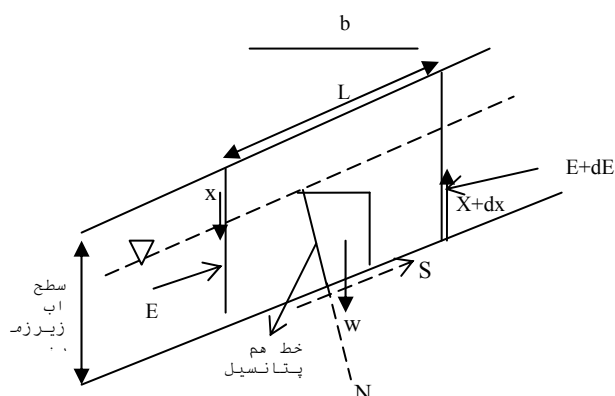
$$\gamma_{sat} = \gamma_t - 3$$

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 می‌گویند
(Slope of Infinite extent)



u = فشار آب حفره ای در امتداد سطح لغزش

$$\begin{aligned}
 w &= \gamma b d \\
 N &= N' + u \ell \\
 u \ell &= \gamma_w h b \sec \alpha \\
 \tau &= c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi' \\
 \tau &= \frac{c'}{SF} + \sigma'_n \cdot \frac{\tan \phi'}{SF} \\
 \vec{s} = \tau \cdot l &= \frac{c'}{SF} (b \cdot \sec \alpha) + (N - u) \frac{\tan \phi'}{SF} \\
 N &= w \cdot \cos \alpha
 \end{aligned}$$

\bar{s} : مقاومتی است که کاهش داده‌ایم 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)

$r_u =$ Pore Water Pressuore 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 خاک، $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 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.

$$1- \text{روش } \phi = 0$$

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 بیشاپ

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

داریم:

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

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 بیشاپ:

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

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

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 بیشاپ را هم دارند.

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

$$SF = m - nr_u$$

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

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 یابنو (*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 آبیاری

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 آبگیری 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.

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

$$u = u_0 + \Delta u \text{ بعد از افت سریع}$$

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

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} می‌توان معادل کرد.

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

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

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

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

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

حالت‌های خاص:

1- سد همگن باشد (خاک رسی)

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

2- اگر از اثر استهلاک انرژی بر اثر تراوش صرف‌نظر 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 تئوریه‌ها و روابط نسبتاً پیچیده انجام می‌شود. فرض اساسی این تئوریه‌ها اینست که تمایل به افزایش حجم (بر اثر نیروی رفت و برگشتی زلزله) در خاک اشباع را به افزایش فشار آب حفره‌ای ارتباط می‌دهند.

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

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

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

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

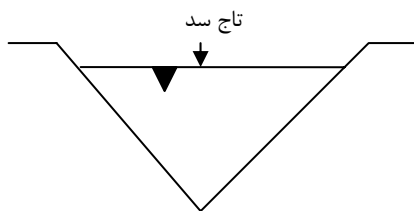
13- ترک خوردگی (*Cracking*) در سدهای خاکی /سنگریزه‌ای

انواع ترک‌ها

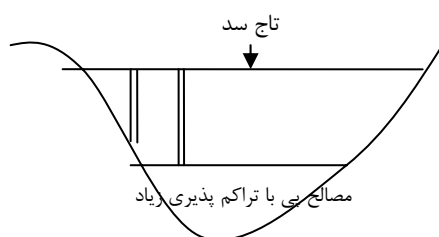
- 1- ترک‌های طولی : امتداد این ترک‌ها در امتداد محور طولی سد (عرض دره) می‌باشد. ترک‌های طولی خیلی بحرانی نیستند
 - 2- ترک‌های عرضی: امتداد این ترک‌ها در امتداد مقطع عرضی سد (امتداد جریان رودخانه) می‌باشد.
- ترک‌های عرضی چون در مسیر جریان آب ایجاد می‌شوند ممکن است بحرانی شده و خطرناک شوند و برای مشکلاتی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

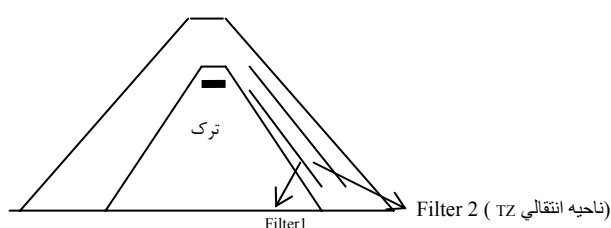
• ترک خوردگی و آب شستگی در بدنه سدهای

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 پایین‌دست 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*)

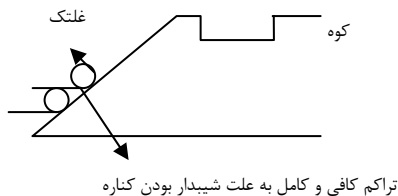
- 1- ترک در بدنه سد به ویژه ترک های عرضی در هسته
- 2- جداسدگی دانه ها (فیلتر و / یا هسته / و یا پوسته)

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 solis*)
- 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.

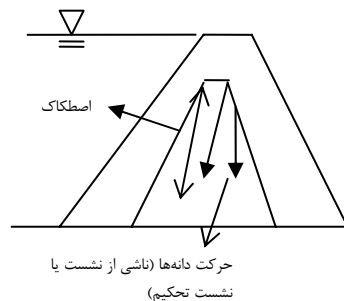
خود ترمیمی ترک‌ها: (*Crack Salf-Healing*)

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.

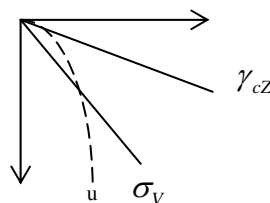
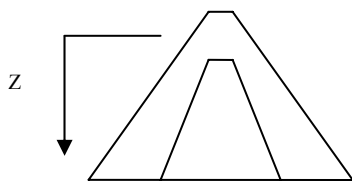
بین هسته و پوسته، نیروی اصطکاک زمانی پیش می‌آید که پوسته ثابت بوده و هسته نشست می‌کند (این بعد از زمان t است که پوسته نشست خود را انجام داده است). این باعث می‌شود بخشی از وزن هسته به فصل مشترک هسته و پوسته اثر کند. به این پدیده *Arching* می‌گویند. یعنی مولفه وزن سه قسمت می‌شود. قسمت مرکزی و قسمت‌های 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 σ_v =

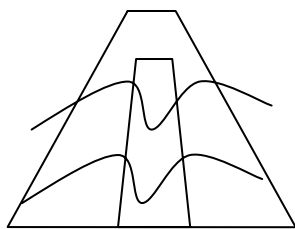
U_{cr} زمانی پیش می‌آید که یک ترک یا لوله در هسته تشکیل شده باشد.

مشاهده می‌شود که بعضی جاها u بیشتر از σ_v شده است. این نشان می‌دهد که $\sigma'_v < 0$ 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.

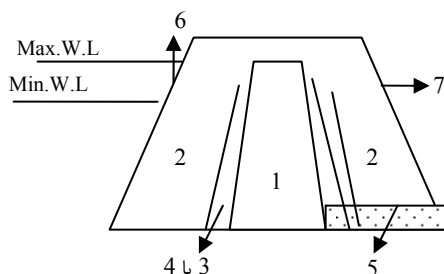
3- تراکم حداکثر هسته در زمان ساخت که باعث کاهش نشست‌های آتی می‌شود.

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 می تواند باشد؛ در دشت، شن و خاک و در کوهستانها، سنگ های ناشی از حفاری. لذا با توجه به موجود بودن مصالح نزدیک به کارگاه، نوع مصالح تعیین می شود، 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 محدوده ای از مخزن سطح آب نوسان می کند و در این محدوده تراز آب هر جا که باشد ایجاد موج می کند. برای جلوگیری از شسته شدن پوسته بر اثر موج، از قطعات بزرگ سنگ استفاده می شود. گاهی از مخلوط خاک و سیمان استفاده می شود (ولی گزینه اول نیست) و گاهی هم از ترکیب این دو روش. *RipRap* ها دانه های بزرگ سنگ هستند. و با چنگک هایی برداشته شده با نظم خاصی آنها را روی سطح پوسته می چینند. 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 باز کردن و ... ممکن است از قطعات سنگ یا

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

3 و 4- فیلتر

وظیفه اصلی فیلتر، جلوگیری از آب شستگی است. طبق تجربه و آزمایشات به این نتیجه رسیده‌اند 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.

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

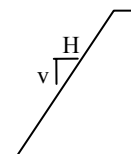
- هر چه پی ضعیفتر باشد، شیب‌ها باید ملایم‌تر باشد.

- 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 پاره سنگی	
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: $W=(0.5-0.7)H$

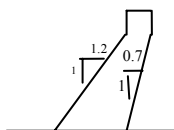
مزایای هسته عریض: نفوذپذیری بیشتر

- 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 نشت 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 تکتونیکی 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

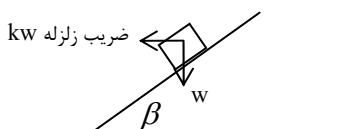
5-مقطع عمر سد (آبگیری یا پایان ساخت یا تراوش دائم)

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 تفاوتهای 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 صرفنظر می شود و به موجب روش بلوکی داریم:



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

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

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.

بسمه تعالی

ابزار دقیق، پایش و رفتار سنجی
در سدهای خاکی/سنگریزه‌ای

**Instrumentation, Monitoring, and Surveillance
in Earthfill and Rockfill Dams**

عباس سروش
دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بهمن ماه 1386

فهرست مطالب

پیشگفتار

3

1-تعریف برداشت اطلاعات از سد (Monitoring)

4

2- تعریف مراقبت از سد (Surveillance)

4

3-چرا برداشت اطلاعات؟ چرا مراقبت؟

4

4-چه نوع اطلاعاتی باید برداشت شود؟

5

4-1- کمیته‌های کلی و عمومی

5

4-2- کمیته‌های جزئی تر

5

5- مهم ترین اطلاعاتی که باید برداشت شود

11

5-1- تحقیق محلی و چشمی

11

5-2- اندازه گیری تراوش

12

5-3- تغییر شکل‌های سطحی

13

5-4- فشار آب حفره‌ای

16

5-4-1- چاه مشاهده‌ای

21

5-4-2- پیزومتر کازاگراند

22

5-4-3- پیزومتر هیدرولیکی

23

5-4-4- پیزومتر پنوماتیکی

25

5-4-5- پیزومتر تار مرتعش

26

5-5- تغییر مکانها و تغییر شکل‌های داخلی

27

5-5-1- تغییر شکل‌های قائم

27

5-5-2- تغییر شکل‌های افقی

31

6- فرکانس پایش (Monitoring Frequency)

34

6-1- مزایای اتوماسیون

34

6-2- معایب اتوماسیون

34

7- رفتار سنجی

35

پیشگفتار

جزوه پیش رو مقدمه‌ای است بر موضوع ابزار دقیق، پایش و رفتار سنجی در سدهای خاکی/سنگریزه‌ای. مطالب این جزوه برای آشنائی با موضوعات مذکور می‌باشد. بسته به مورد مقالاتی نیز معرفی شده که در قسمت دو جزوه آمده است.

برداشت اطلاعات از رفتار سد، تحلیل رفتار سد و مراقبت از سد

1- تعریف برداشت اطلاعات از سد (Monitoring)

طبق تعریف: برداشت مداوم اطلاعات از وسائل اندازه‌گیری (ابزار دقیق و سایر ابزار) بنحوی که عملکرد و رفتار سد و سازه‌های جنبی و سازه‌های داخل آن از این اطلاعات قابل درک باشد.

اطلاعات فوق باید به نحو مناسب پردازش شود تا شناخت رفتار سد به طور شفاف و مناسب عملی باشد.

2- تعریف مراقبت از سد (Surveillance)

ارزیابی مستمر از شرایط سد و سازه‌های آن و مرور نحوه عملکرد سد و نیز عملکرد وسائل اندازه‌گیری (ابزار دقیق) و نتایج حاصله از آنها. این کار بدین منظور انجام می‌گیرد که ببینیم آیا حادثه ناگواری رخ می‌دهد یا نه

• برداشت اطلاعات و مراقبت باید در مدت زمان

- ساخت

- اولین آب‌گیری

- بهره‌برداری از سد

برای سدهای بزرگ بصورت مستمر انجام شود.

3- چرا باید اطلاعات مربوط به رفتار سد را برداشت کنیم و چرا

مراقبت کنیم؟

- 1-ارزیابی فرضیات طراحی سد و عملکرد سد و پیش بینی عملکرد آن در زمان ساخت و اولین آبگیری سد و زمان بهره‌برداری
- 2-متوجه شدن نسبت به هرگونه رفتار خطرناک سد که ممکن است عواقب ناخوشایندی داشته باشد.
- 3-جمع‌آوری اطلاعات جهت مقایسه بین آنچه در واقعیت در سد می‌گذرد و آنچه براساس تئوری مورد انتظار بوده است.
- 4-مطمئن شدن از اینکه ادامه کار [در حالت ساخت، اضافه کردن لایه روی سد و در زمان آبگیری، بالاآوردن سطح آب و در حین افت سریع پائین آوردن سطح آب] شرایط بحرانی پیش نمی‌آورد؛ مثلاً باعث افزایش فشار آب و متعاقباً ناپایداری شیبها نمی‌شود.
- 5-جمع‌آوری اطلاعات و تحلیل آنها برای شناخت رفتار سدها (به طور کلی)

4- چه اطلاعاتی باید برداشت شود؟

نوع اطلاعات مورد نیاز و توالی (فرکانس) اندازه‌گیریها و نوع ابزار دقیق مورد نیاز بستگی دارد به:

- نوع سد
- بزرگی سد

- در چه مرحله‌ای از عمر سد هستیم (زمان ساخت، اولین آب‌گیری، تراوش دائم، در مراحل از عمر سد که سد خیلی مشکل پیدا کرده است و یا ...)
- اینکه آیا سد طبق استانداردهای ساخت سد درست شده یا نه
- عواقب خرابی سد (Hazard Rating) که بستگی دارد به:
 - ابعاد سد
 - شرایط پائین دست سد
 - محتویات مخزن (سد باطله؟)

● بطور کلی در سدها دو نوع اطلاعات برداشت می‌شود:

1-4 کمیتهای کلی و عمومی

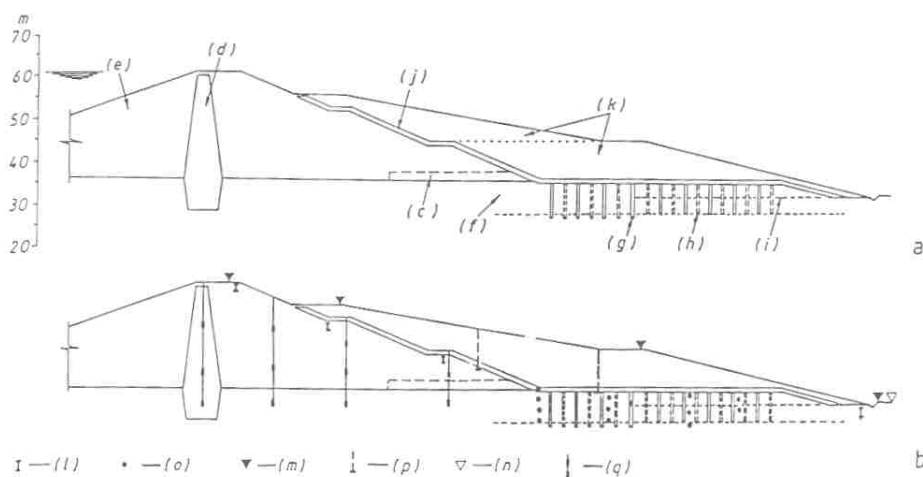
مثل:

- سطح آب در مخزن
- میزان بارش (باران و برف)
- حرارت
- فعالیتهای لرزه‌ای در محل سد

2-4 کمیتهای جزئی‌تر

- تغییر شکلهای سطحی (بیرونی) مثل میزان نشست تاج سد
- ترکها
- میزان فشار آب در سد و پی
- میزان فشار و تنش در سد

- میزان تراوش از پی و از بدنه
- تغییر شکلهای قائم و افقی در بدنه سد
- شتابهای لرزه‌ای در سد
- رشد و یا نابودی گیاهان در سد
- غلظت شیمایی تراوش
- امکان وجود سیلت در تراوش



شکل 1- ابزار در سد خاکی Prospect

- (a) مقطع سد
- (b) مقطع سد به همراه سیستم ابزار دقیق
- (c) پتوی زه‌کش (مصالح شن و قلوه سنگ)
- (d) هسته رسی
- (e) پوسته رسی (درشت دانه‌تر)
- (f) پی خاک رسی آبرفتی (Alluvium)

(g) دیواره زهکش، به همراه فیلتر، در پی پائین دست، که تا سنگ بستر عمق دارد

(h) زهکش های قائم ماسه ای

(i) زهکش های جانبی (Lateral Drains)

(j) فیلتر

(k) خاکریز متشکل از شیل که برای پایدار سازی سد در دو مرحله احداث شده است.

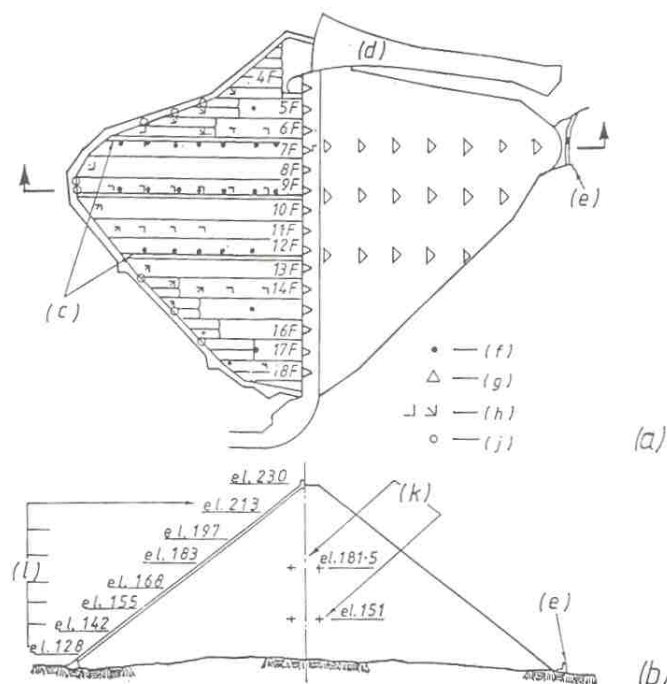
(l) میل سنج ها (Inclinometers)

(m) نقاط نشانه برای اندازه گیری نشست های سطحی

(n) جمع آوری و اندازه گیری تراوش

(o) پیزومترهای الکتریکی و پنوماتیکی

(p) پیزومتر لوله قائم (Standpipe)



شکل 2- ابزار و پایش در سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی Centhana

(a) پلان

(b) مقطع

(c) لوله‌های Inclinometers

(d) سرریز

(e) مجرای اندازه‌گیری تراوش (Leakage weir)

(f)

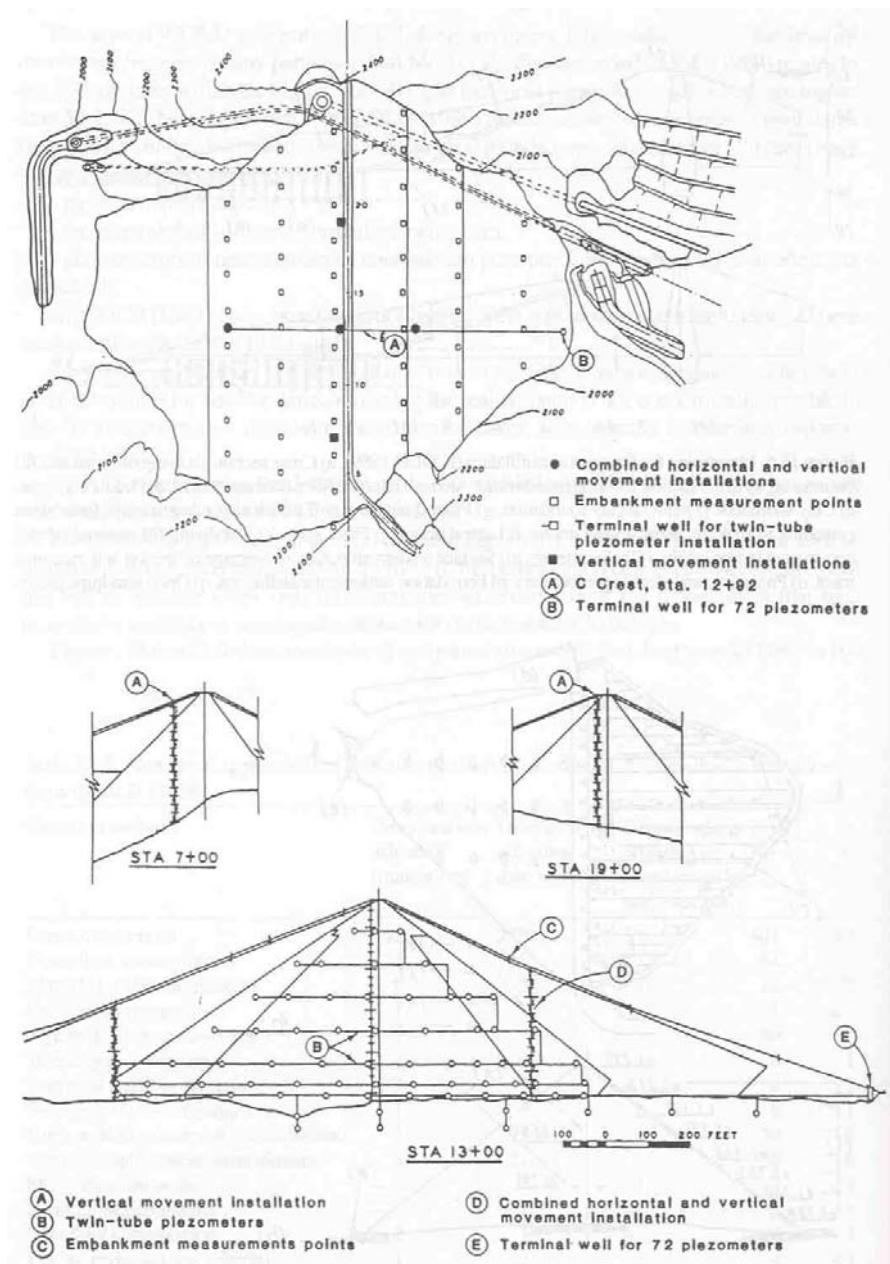
(g) نقاط نقشه‌برداری

(h) کرنش سنج‌ها (Strain Gauges)

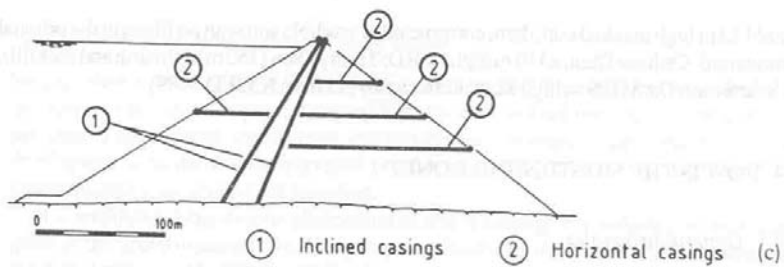
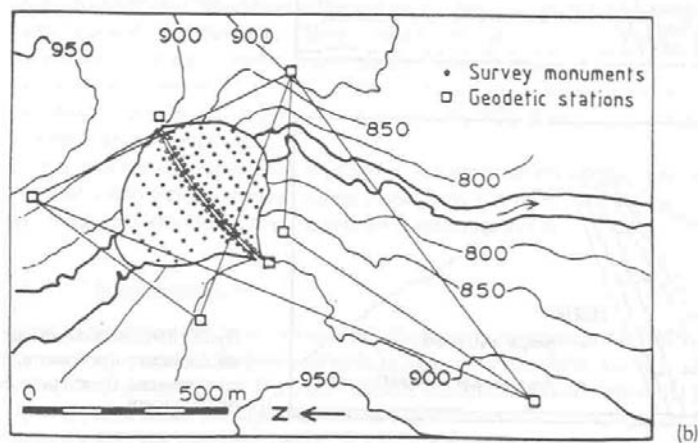
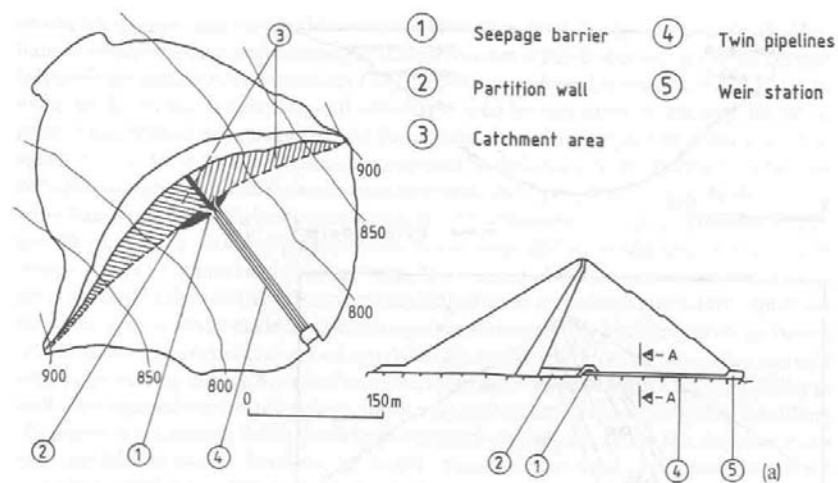
(j) درزه سنج‌های محیطی

(k) سلول نشست سنج

(l) تراز نصب کرنش سنج‌ها



شکل 3- ابزار در سد سنگریزه‌ای Trinity



شکل 4- ابزار و پایش برای سد خاکی/سنگریزه‌ای Svartevann

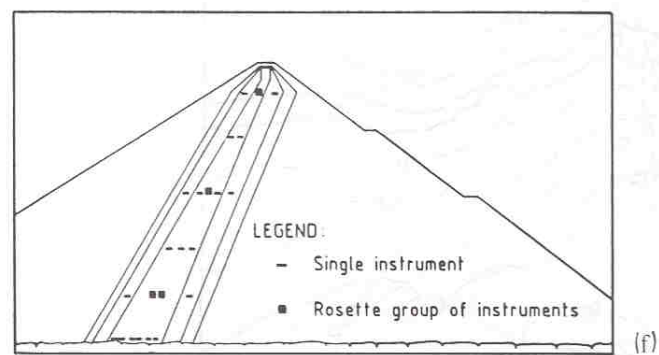
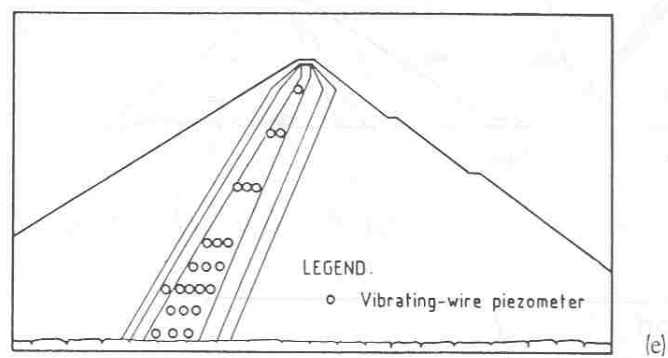
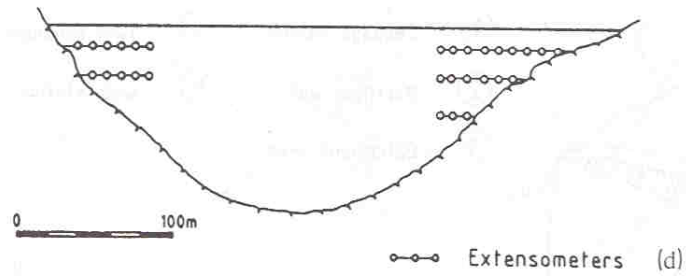
(a) اندازه‌گیری تراوش

(b) تغییر مکانهای سطحی

(c) کرنشها و تغییر مکانهای داخلی

(d) کرنشها و تغییر مکانهای داخلی (ادامه از قبل)

(e) پیزومترها
(f) فشار (کل) سنجها



شکل 4- ادامه

5- مهمترین اطلاعاتی که باید برداشت شود

5-1- تحقیق محلی و چشمی (Visual Inspection)

مشاهدات محلی می‌تواند طبق لیست زیر انجام پذیرد:

- (a) وضعیت رویش گیاهان در سد و حدود 20 متر فراتر از آن
- رشد زیاد گیاهان: کوتاه کردن آنها، کندن علفهای هرز و ...
 - منطقه‌ای که با علفها خیلی سرسبز شده، نشانگر وجود آب زیاد در محل می‌باشد.

(b) نهرهای زه‌کشی

- بسته شده بوسیله گیاهان و خاشاک
- میزان آب جاری در آنها

(c) بدنه سد شامل

- ارتفاع آزاد (Free board)
- تاج سد: ترک، فرورفتگی (Subsidence)
- شیب بالادست سد:
- ترک؟ فرسایش سطحی؟ پستی و بلندی‌های موضعی
- وضعیت سنگ چین‌ها (Rip Rap)
- شیب پایین دست:
- ترک، فرورفتگی، بادکردگی، فرسایش، نشت آب
- برمها و تا 15 متر اطراف سد

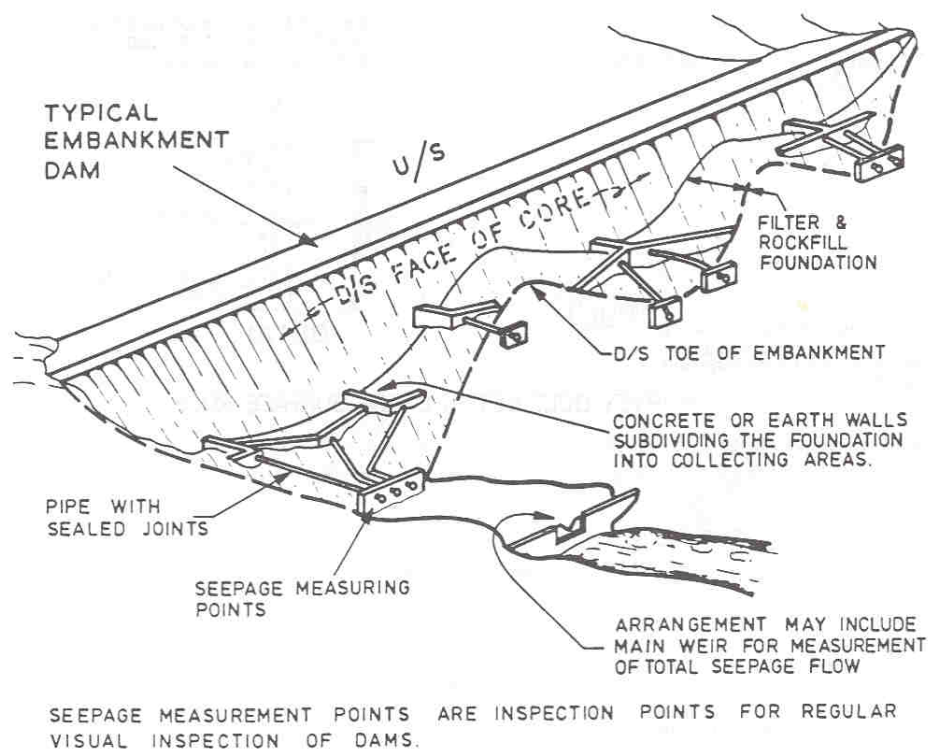
(d) سرریزها

- سطح آب در آب گیرها
- فرسایش در اطراف لوله ها و دیوارهای سرریز؟
- ترک و یا برآمدگی در کف دال سرریز؟

(e) مناطقی که قبلاً تعمیر شده اند.

- اثر تعمیرات
- توسعه مشکل به مناطق همجوار

5-2- اندازه گیری تراوش

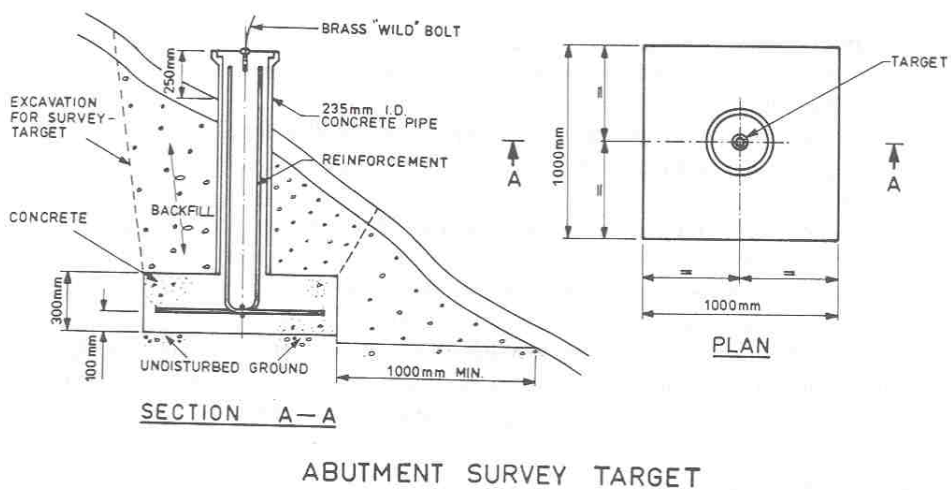
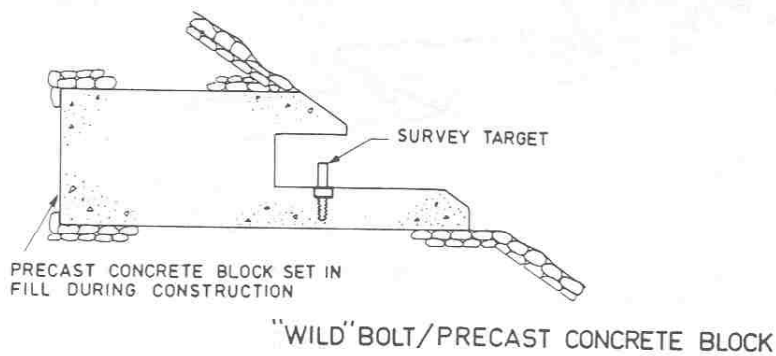
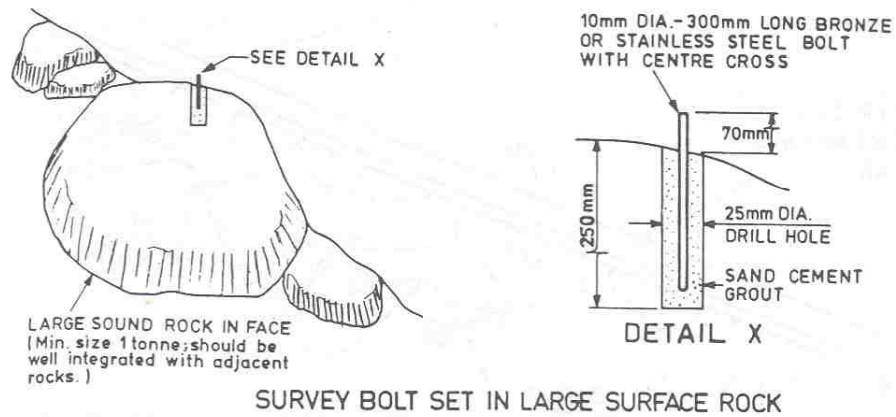


شکل 5- سیستم جمع‌آوری و اندازه‌گیری تراوش برای یک سد سنگریزه‌ای/خاکی (ANCOLD 1983)

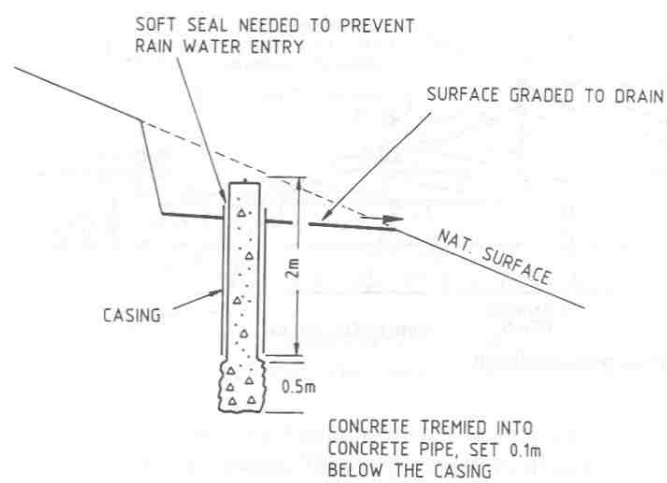
5-3- تغییر شکلهای سطحی

اینکار معمولاً با اندازه‌گیری تغییر مکانهای برخی نقاط سطحی سد نسبت به یک نقطه ثابت مشخص شده، بوسیله بازدیدهای منظم انجام می‌شود. آن نقطه ثابت (Stationary Bench Mark) در محلی نصب می‌شود که احتمال تغییر مکان آن نباشد؛ مثلاً روی یک صخره محکم و یا در روی تپه (ولی پی آن در عمق در یک نقطه ثابت است)

در اکثر موارد تغییر شکلهای قائم و افقی اندازه‌گیری می‌شود بنحوی که بردار حرکت مشخص شود. این بردارهای حرکت غالباً به ما کمک می‌کنند تا مکانیزم تغییر شکل را دریابیم.



شکل 6- نقاط نشانه برای اندازه گیری نشستهای سطحی در سدها



شکل 7- نقاط نقشه‌برداری در خاکی که پتانسیل تورم و انقباض دارد

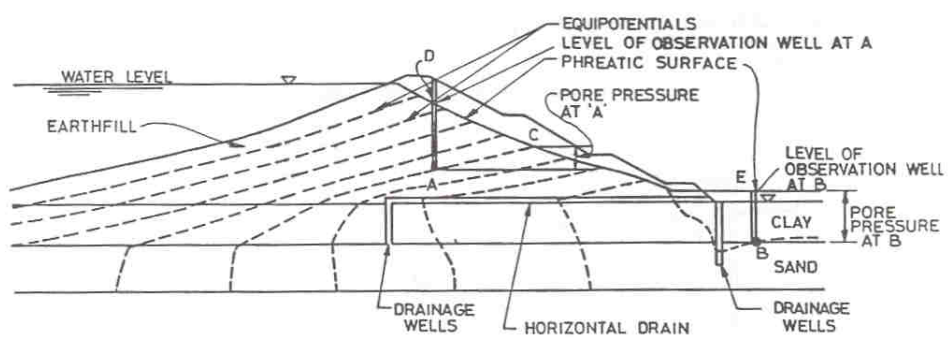
5-4- فشار آب حفره‌ای

اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در بدنه سد و در پی آن در تمام مراحل ساخت سد، اولین آبگیری، تراوش دائم، تخلیه سریع مخزن و ... جزو ضروریات نگهداری و حفاظت سدها می‌باشد.

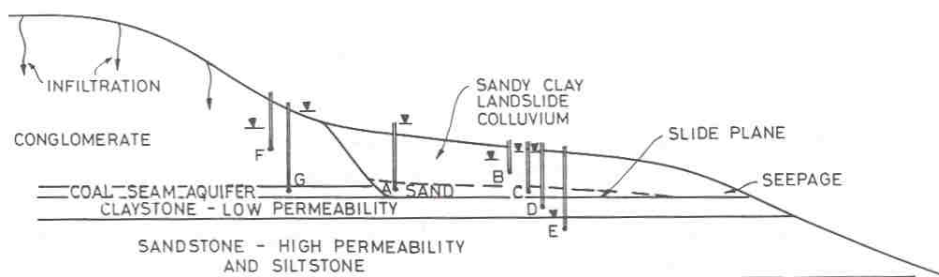
نقش فشار آب در پایداری سد نقشی مهم و تعیین کننده است. فشار آب حفره‌ای پارامتری است که باید دائماً کنترل شود.

نکته مهم در تحلیل قرائت‌های فشار آب حفره‌ای در بدنه و پی سد، مقایسه آنها با نتایج حاصل از تحلیل عددی (مقدار مورد انتظار) می‌باشد. این مقایسه به ما کمک می‌کند که هرگونه شرایط غیر نرمال و یا بحرانی را به موقع شناسائی کنیم.

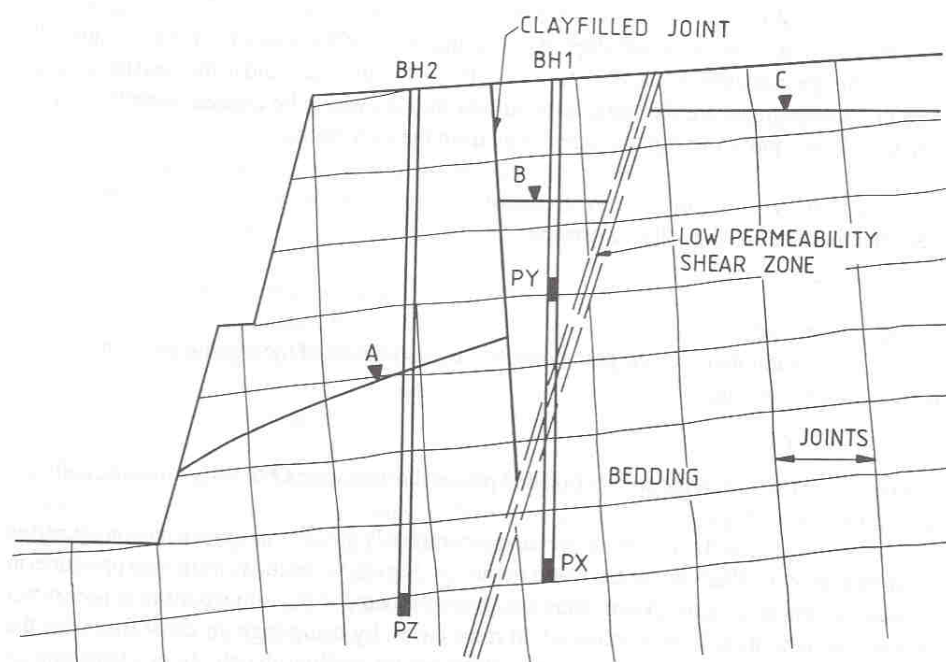
البته مقایسه بین نتایج قرائت‌ها و نتایج حاصل از تحلیل عددی برای بقیه پارامترها، از قبیل تغییر شکل‌ها و نشست‌ها، نیز ضروری است؛ با این وجود برای فشار آب حفره‌ای از همه ضروری تر می‌باشد.



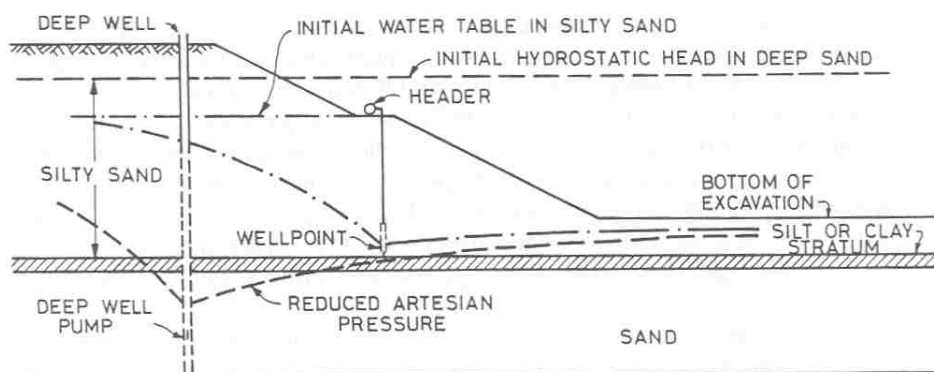
شکل 8- شرایط پیزومترها در یک سد خاکی



شکل 9- موقعیت پیزومترها در شیروانی با پتانسیل لغزش



شکل 10- شرایط و موقعیت پیزومترها در توده سنگ درزه دار و برش خورده



شکل 11- آب زدائی (Dewatering) در محل یک حفاری

مثلاً حالت سد در زمان جریان پایدار با تراوش دائم را در نظر بگیرید.

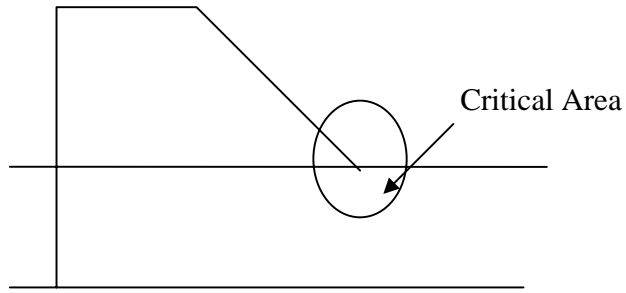
بصورت تئوریک شبکه جریان را می توان کشید. مثلاً بصورت فوق (خطوط هم فشار). در نظر داشته باشید که این شبکه جریان براساس فرضیاتی برای نفوذ پذیری خاک (k) ترسیم شده است. همچنین در نظر داشته باشید که آنالیز پایداری سد در حالت تراوش دائم با فرض این شبکه جریان و این فشار آبها انجام شده است. اگر فشار آب در نقاطی از سد خیلی بیش از آنچه در آنالیز منظور شده است، باشد ممکن است پایداری سد را به خطر بیاندازد.

در نظر داشته باشید معمولاً $k_h > k_v$ در بعضی موارد حتی $k_h = 15k_v$ ؛ و ممکن است ما اینها را در آنالیز دقیقاً منظور نکرده باشیم

باید دائماً پیزومترها را کنترل کنیم تا فشار آب بیشتر از مقادیر مجاز نشود. اگر شد باید راه حل ارائه داد. مثلاً پائین آوردن سطح آب در مخزن.

پیزومتر نصب شده در A بصورت تئوری باید سطح آب را در B نشان دهد. ولی اگر در C نشان داد، BC اضافه فشار است و ممکن است خطرناک باشد.

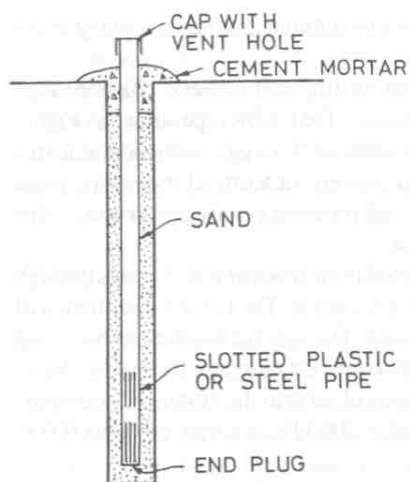
دقت شود که در نقاطی مثل پنجه سد (Toe) فشار آب اثر ناپایدار کننده زیادی دارد. اضافه شدن فشار آب، کاهش تنش موثر در آن منطقه و در نتیجه ناپایدار شدن شیب را بدنبال دارد.



- انواع ابزار دقیق برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای

5-4-1- چاه مشاهده‌ای

- معمولاً حداکثر آبی که وارد سوراخ شده را اندازه می‌گیرد
- اثرات شبکه جریان را منعکس نمی‌کند.
- Time lag زیاد است

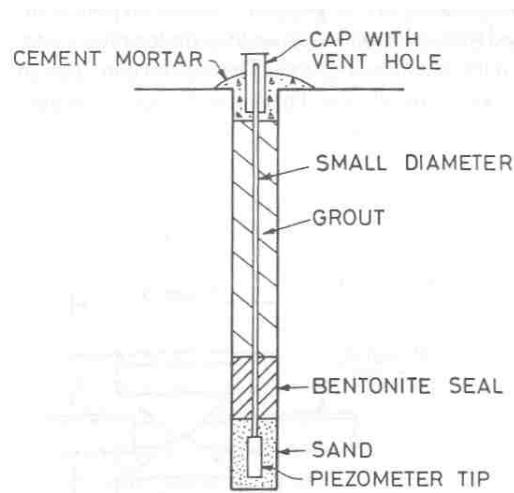


شکل 12- چاه مشاهده‌ای

5-4-2- پیزومتر کازاگراند

- U_w را اندازه می گیرد و مشکلی ندارد

- time lag کم است



شکل 13- پیزومتر کازاگراند

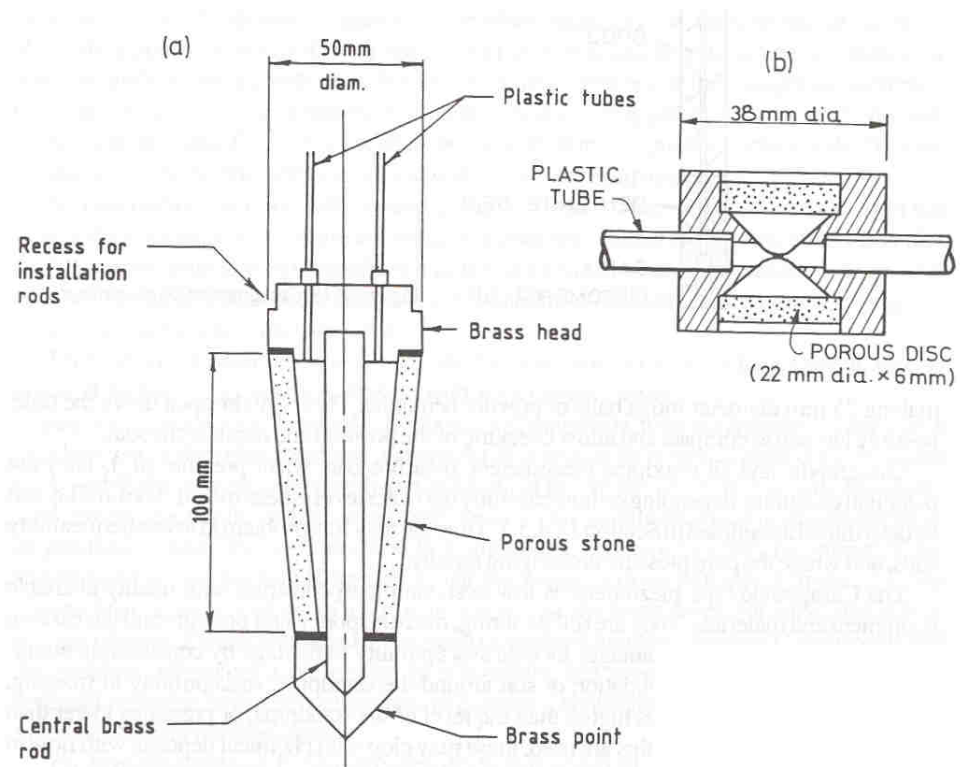
معایب:

- در معرض خسارت دیدن بواسطه تجهیزات و ماشینهای ساخت
- تحکیم خاکهای اطراف آن
- یخ زدن
- عدم امکان برای اندازه گیری فشار آبهای بیشتر از طول Stand pipe ، یا فشارهای کمتر از فشار اتمسفر
- بسته شدن اطراف نوک بواسطه اندرکنشهای شیمیائی

3-4-5- پیزومترهیدرولیکی دو لوله‌ای (Double Tube Hydraulic Piezometer)

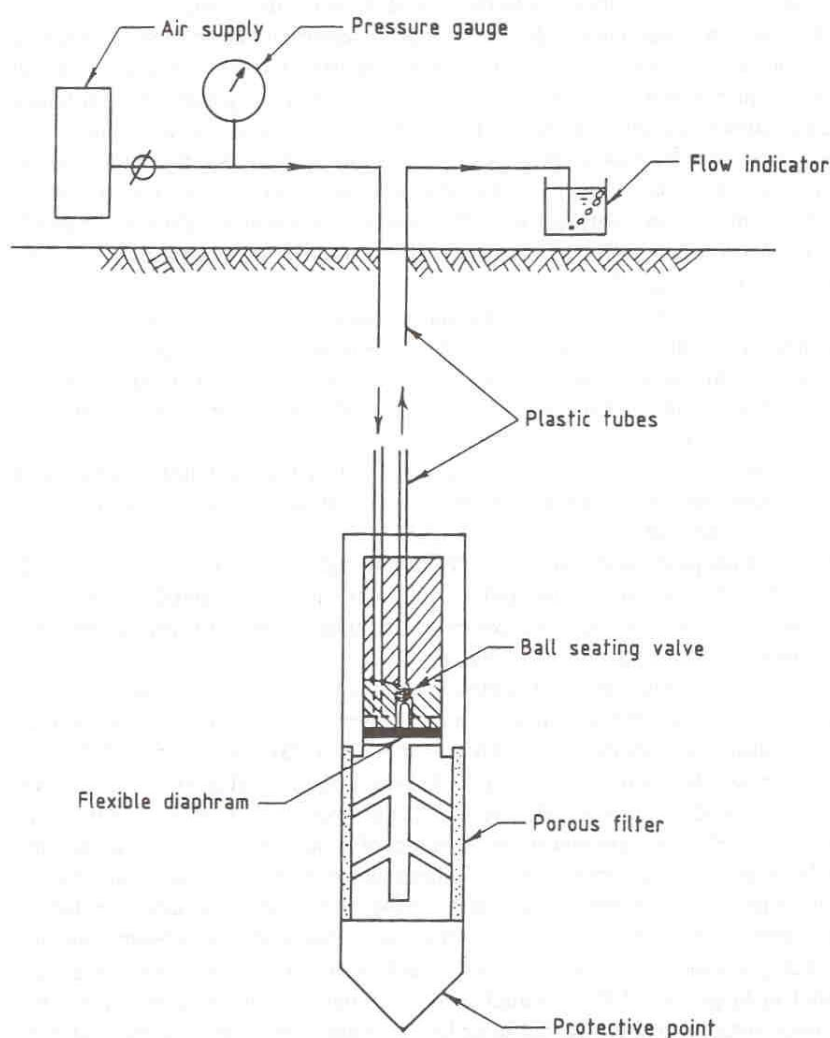
اساس کار

- دو لوله است؛ یکی برای خارج کردن هوا (deairing) می‌باشد.
- نوک پیزومتر که در شکل بالا کشیده شده به وسیله لوله‌ها به یک ترمینال اندازه‌گیری هدایت می‌شود. فشار اندازه‌گیری شده مساوی فشار آب + اختلاف ارتفاع نوک پیزومتر و ترمینال (که در آن Gauge اندازه‌گیری است) می‌باشد.



شکل 14- (a) پیزومتر هیدرولیکی از نوع بیشاب
(b) پیزومتر هیدرولیکی از نوع USBR

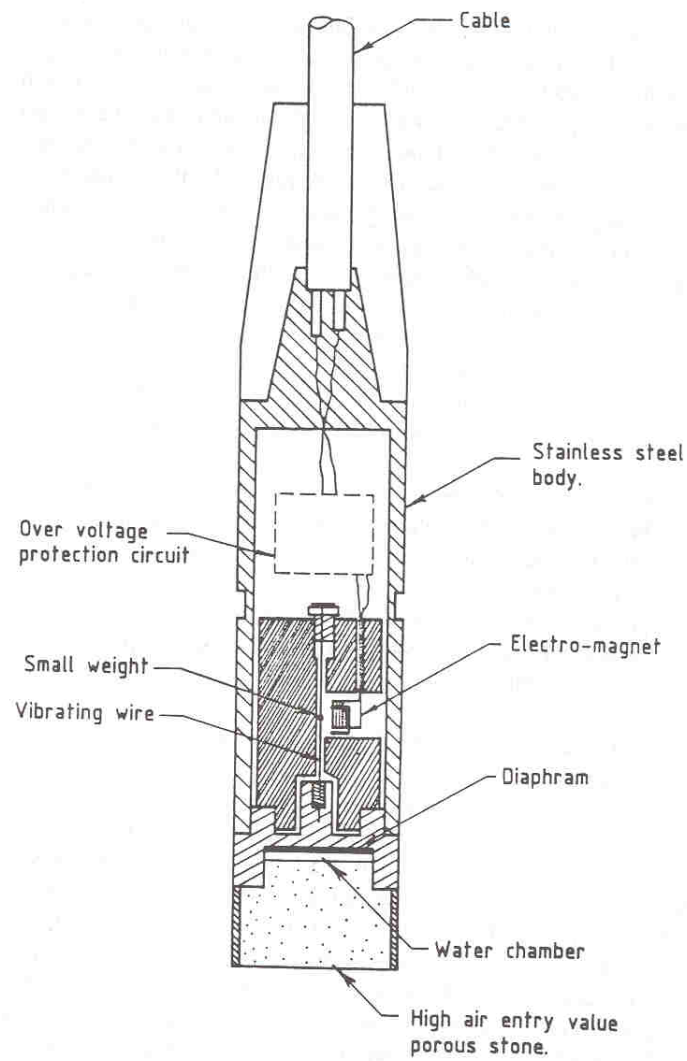
4-4-5- پیزومتر پنوماتیکی (با فشار گاز کار می کند)
 اصول کار: با اعمال فشار یک نوع گاز (اکثراً نیتروژن خشک) در دیافراگمی نازک را که در معرض فشار آب است بسته نگه می دارند.
 فشار گاز = فشار آب



شکل 15- پیزومتر پنوماتیکی

5-4-5- پیزومترهای تار مرتعش

شبیه پیزومترهای پنوماتیکی، با این فرق که بجای فشار گاز از یک سیم نازک پیش تنیده استفاده می‌کنند. باز شدن و بسته شدن دیافراگم (شکل بالا) بر روی فرکانس طبیعی سیم اثر می‌گذارد.



شکل 16- پیزومتر تار مرتعش از نوع Maihak

5-5 تغییر مکانها و تغییر شکلهای داخلی:

5-5-1- تغییر شکلهای قائم، با استفاده از وسائل:

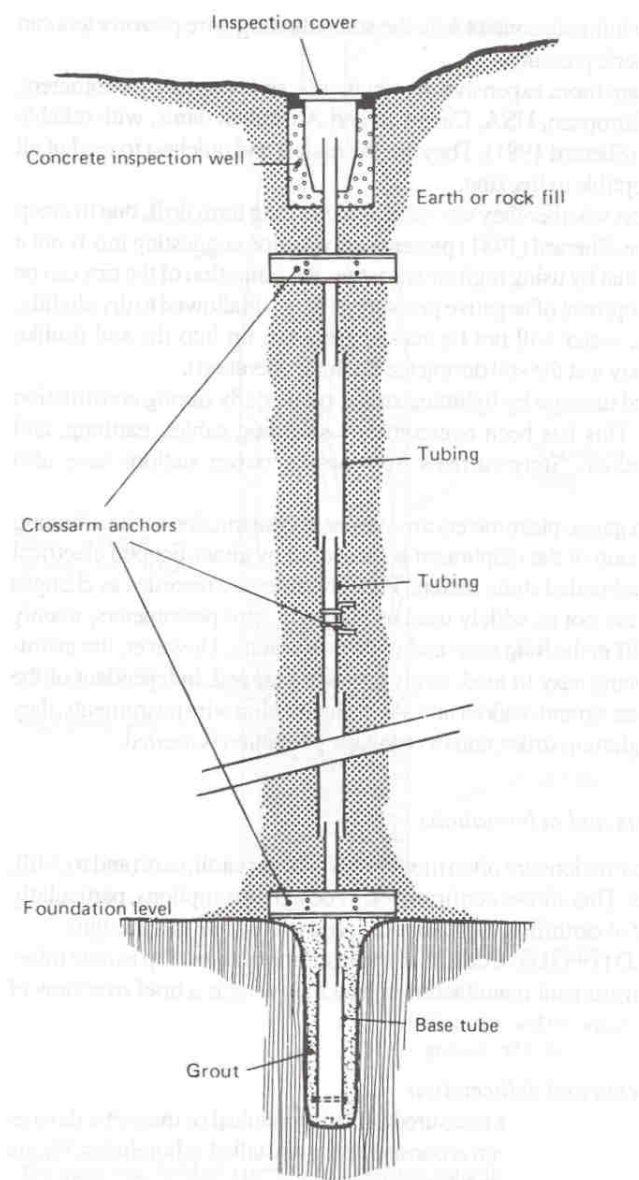
- مکانیکی

- مغناطیسی

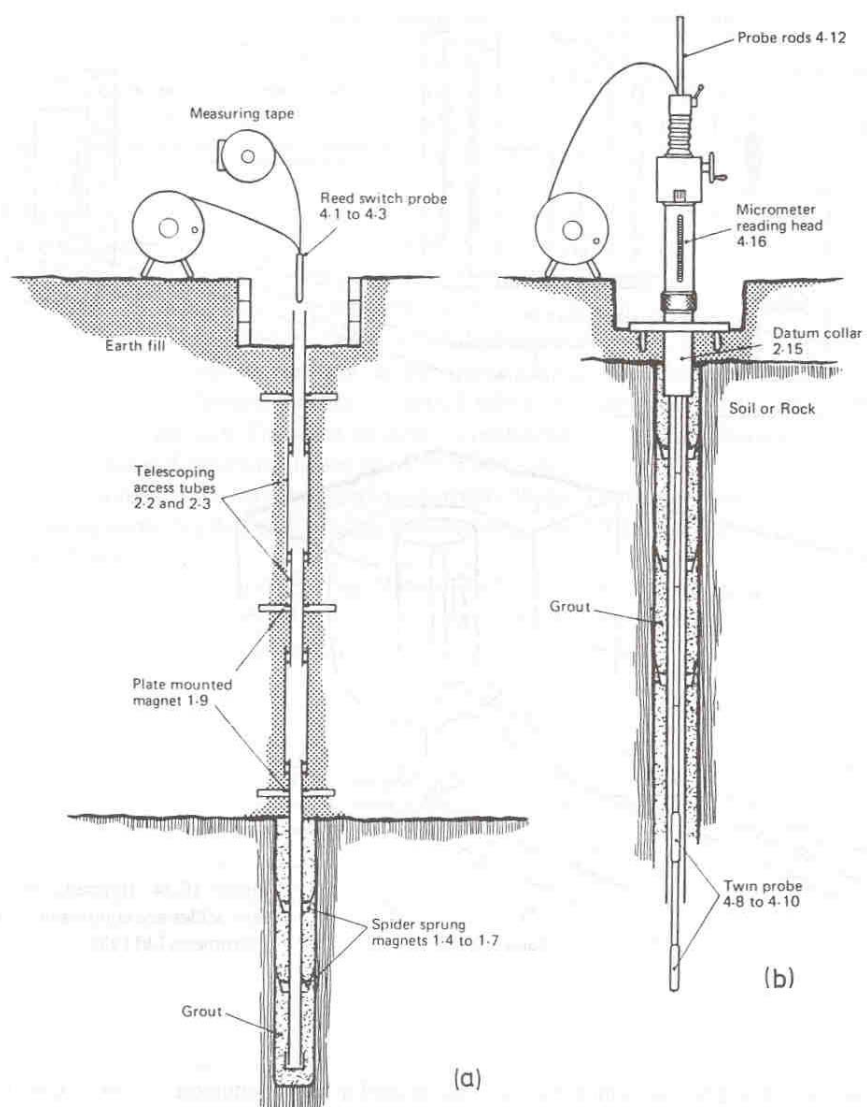
- یا در دل خاک کار گذارده می‌شوند (در حین ساختن سد)

- یا در حفره‌های از پیش حفاری شده قرار داده می‌شوند.

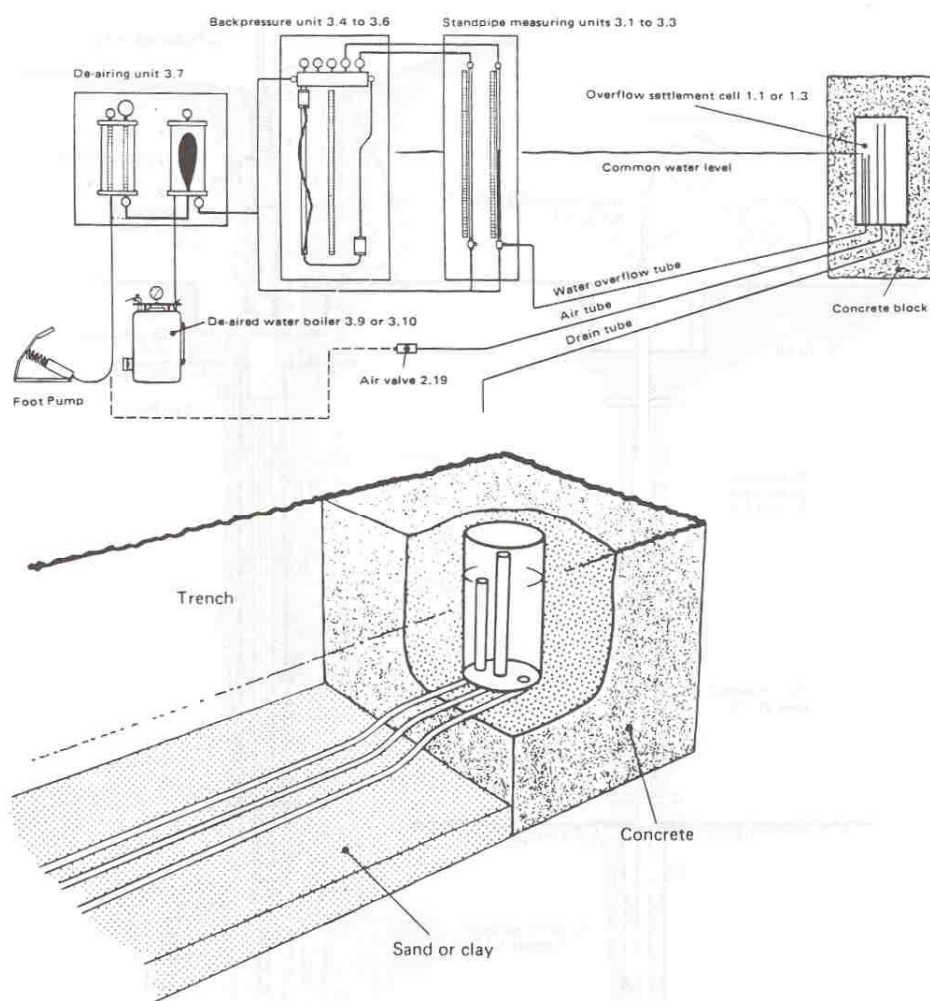
میله در داخل تیوب‌ها می‌تواند حرکت کند و تغییر شکل نسبی نقاط نسبت به یکدیگر را منعکس کند.



شکل 17- کرنش سنج (Settlement Gauge)

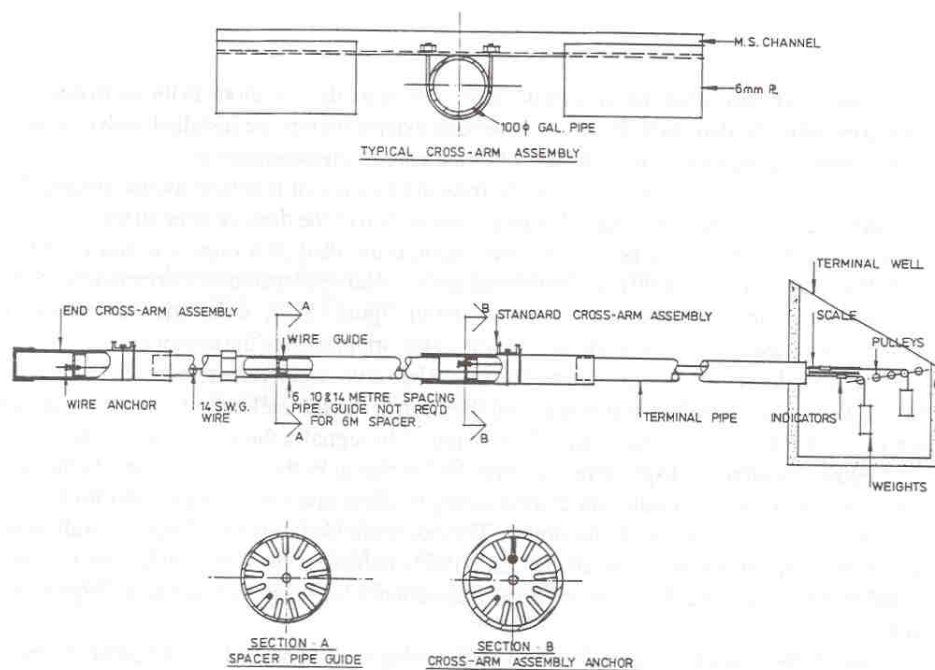


شکل 18- کرنش سنج مغناطیسی

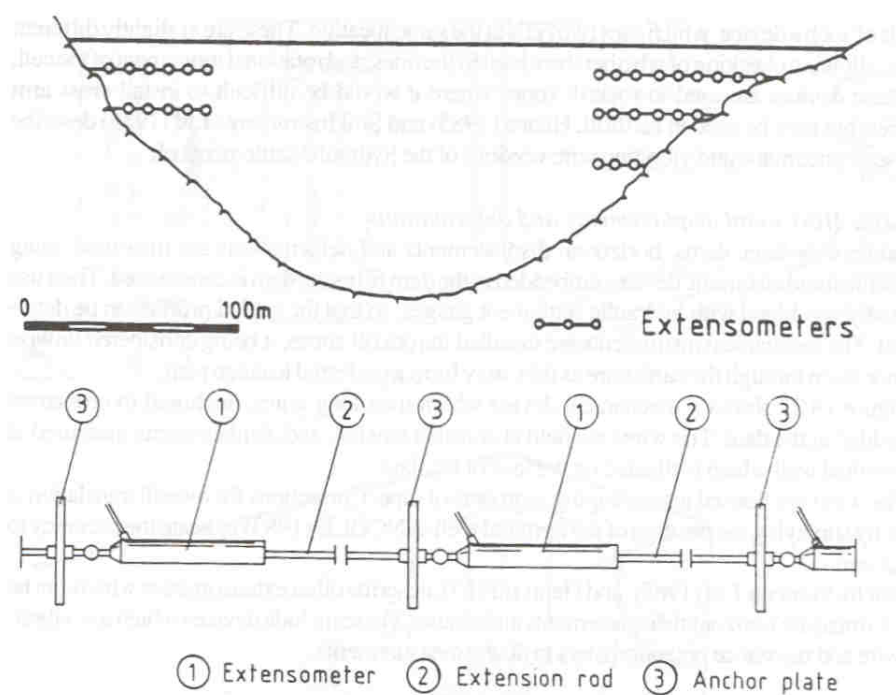


شکل 19- تجهیزات و محل نصب دستگاه اندازه گیری نشست

5-5-2 تغییر شکل‌های افقی
تقریباً مثل فوق ، فقط در جهت افقی



شکل 20- کشیدگی سنج (Extensometer) با سیم طولانی



شکل 21- استفاده از Extensometer برای اندازه گیری کرنشهای موازی
با محور سد

6- فرکانس پایش (Monitoring Frequency)

فرکانس قرائت و ثبت اطلاعات بستگی به چهار عامل عمده زیر دارد.

1- نوع اطلاعات (فشار آب حفره‌ای، میزان تراوش، ...)

2- نوع سد

3- بزرگی سد (ارتفاع، حجم مخزن، ...)

4- مقطع عمر سد

برای پی بردن به جزئیات موضوع، به مقاله فراسی تحت عنوان "برنامه زمانی رفتار نگاری (monitoring) در سدهای بزرگ" که در پیوست 1 آمده است مراجعه شود.

6-1- مزایای اتوماسیون

طبیعی است که در سیستم‌های اتوماسیون، بخشی از اطلاعات و داده‌ها به صورت پیوسته ثبت می‌شوند و نیازی به تعیین فرکانس ثبت برای آنها نمی‌باشد.

- ثبت اطلاعات به صورت کامل و پیوسته
- امکان برقراری رابطه بین اطلاعات مختلف به صورت سریع و دقیق
- ثبت اطلاعات در هرگونه شرایط آب و هوایی

- امکان استفاده دقیقتر و سریعتر از اطلاعات
- از بین رفتن خطاهای عامل انسانی

6-2- معایب اتوماسیون

- امکان از قلم افتادن برخی پارمترها و عوارضی که با سیستم اتوماسیون قابل ثبت نیست.
 - امکان از چشم دور ماندن خطاها و اشکالات موجود در سیستم اتوماسیون
 - اتکاء بیش از حد به داده‌های الکترونیکی و ایجاد اکراه در مهندس سد برای بازدید و سرکشی از سد.
- در این رابطه، به مقاله "قدرت مشاهده" (مقاله 3 فارسی) در پیوست مراجعه شود.

7- رفتار سنجی

رفتار سنجی سدها عبارتست از "پی بردن به نحوه عملکرد، میزان ایمنی و ... رفتار سد" در این مرحله با استفاده از تمام اطلاعات ثبت شده از ابزارها و پایش آنها رفتار سد مورد مطالعه و تحلیل قرار می‌گیرد. برای رفتارسنجی صحیح و سریع سدها باید به سه نکته مهم زیر توجه شود:

- اطلاعات ثبت شده باید به صورت مناسب و با شکل‌های گویا مورد پردازش قرار گیرد.
- نتایج ثبت شده و پردازش شده با آنچه از تئوری مورد انتظار هست مورد مقایسه قرار گیرد.
- در صورت نیاز، برنامه‌های علاج بخشی در سطوح مختلف به موقع مورد بررسی و مورد عمل قرار گیرد.

از مقالات پیوست (مقالات 3 و 4 فارسی و مقالات 1 تا 4 انگلیسی) برای تبیین بیشتر موضوع رفتارسنجی سدها استفاده خواهد شد.

@civilengaut

سدهای خاکی: ۲۶۱۹۱۸۲

مدرس: عباس سروش
تعمین سری چهارم (۴)

۱. سطح آب مخزن در پشت یک سد خاکی - که از خاک چسبنده ریزران تشکیل شده - سریعاً پائین آورده می شود. هندسه سد و مشخصات خاک آن در شکل (۱) نشان داده شده است. تعیین کنید سطح آب چقدر می تواند پائین آورده شود قبل از اینکه لغزش در سد اتفاق بی افتد. فرضیات زیر را برای حل مسئله در نظر بگیرید:

(i) تغییر در فشار آب حفره ای - برابر افت سریع - برابر با تغییر در تنش کل قائم می باشد.

(ii) برای هر میزان از افت، سطح لغزش بحرانی بصورت دایره ای و ماس بر سطح افقی در قوم افت مخزن خواهد بود.

۲. در یک زمین رسی که بصورت عادی تحکیم یافته (Normally consolidated)، یک حفاری مانند شکل (۲) انجام شده است. مشخصات زمین به قرار زیر است:

$$\phi' = 35^\circ, \quad c' = 0$$

$$K_0 = 0.5$$

$$A = 0.75$$

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

در پایان حفاری، تنشهای اصلی کل اندازه گرفته شده اند که به قرار زیر می باشد:

نقطه	σ_1 (kN/m ²)	σ_3 (kN/m ²)
A	۵۰	۲۰
B	۱۰۰	۴۰
C	۱۱۰	۴۰

σ_1 و σ_3 تنشهای اصلی کل و به ترتیب در استوار قائم و افق می باشند. مطلوب است:

- (i) میزان تغییر در فشار آب حفره ای (Δu) بر اثر حفاری در نقاط A، B و C
- (ii) نسبت فشار آب حفره ای (r_u) در نقاط A، B و C
- (iii) با فرض اینکه فشارهای کل اندازه گیری شده نمایانگر وضع تنش بر روی یک سطح

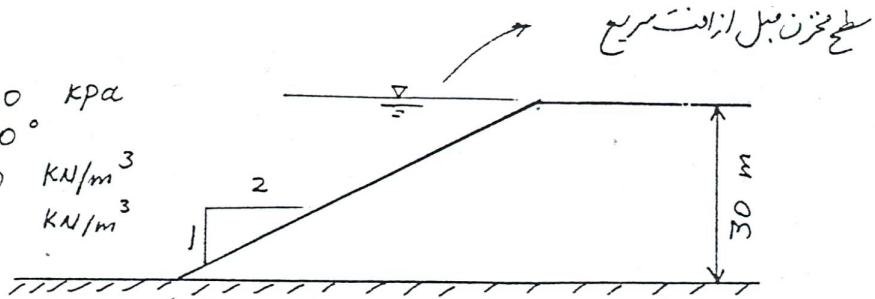
لغزش باشد، ضرب اولین درجه اول لغزش را می بینیم.

$$c' = 20 \text{ kPa}$$

$$\phi' = 30^\circ$$

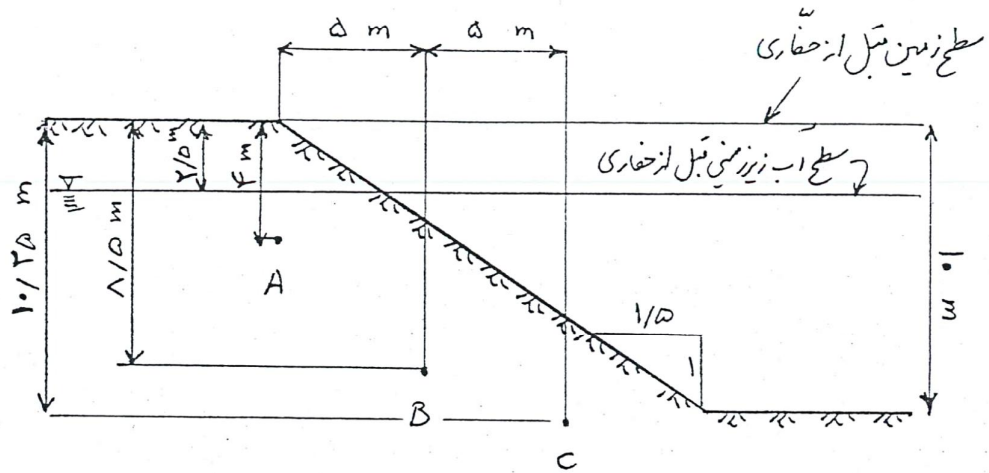
$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$$

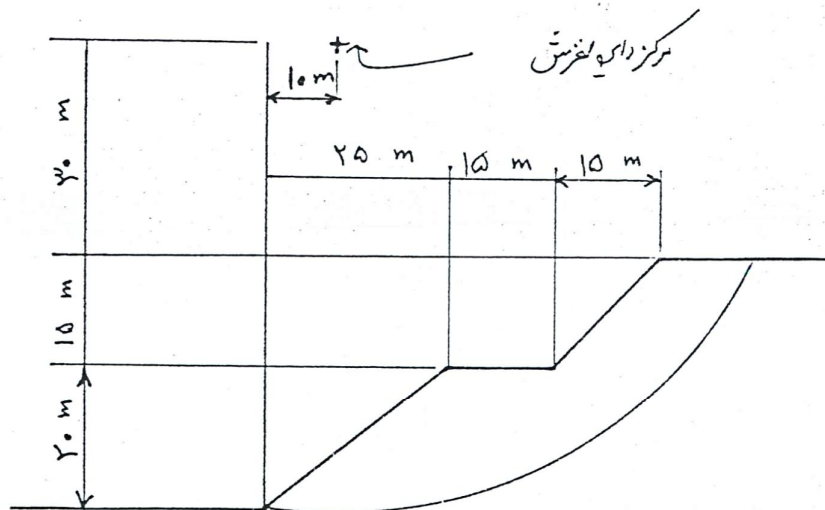


سؤال ۱
شکل ۱

سؤال ۲
شکل ۲

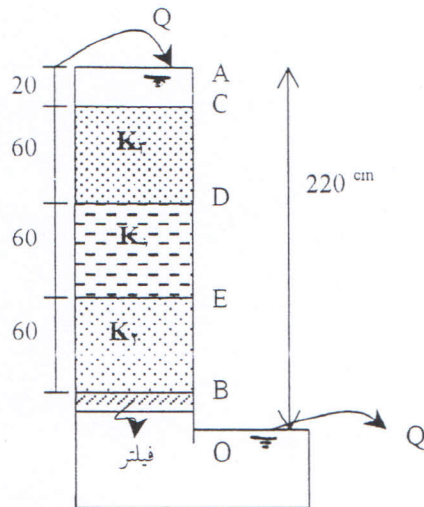


سؤال ۳
شکل ۳



تمرین / نفوذپذیری خاکهای چند لایه

در شکل زیر رابطه‌ای برای محاسبه مقدار متوسط ضریب نفوذپذیری در امتداد قائم (K_{in}) پیدا کرده و سپس مقدار آن را محاسبه نمایید. همچنین میزان Q با فرض سطح مقطع واحد و نیز توزیع پتانسیل کل و فشار (head) در نقاط A, D, C, B, A را محاسبه و ترسیم کنید.



$$K_1 < K_2 < K_3$$

$$K_1 = 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

$$K_2 = 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

$$K_3 = 10^{-2} \text{ cm/sec}$$

توجه

- نقطه O را بعنوان مبنا در نظر بگیرید.
- درصد افت در هر لایه را محاسبه نمایید.

تمرین شماره ۱

آنالیز پایداری با $\phi = 0$

(۲۴۱۹۱۸۲)

درس : سدهای خاکی

۱- رابطه بین عدد پایداری (Stability Number) و زاویه شیب (β) را برای فاکتورهای عمق داده شده (n_d) ترسیم نمائید (اعداد در صفحه بعد) .

۲- تحقیقات محلی نشان داده است که یک لایه رس نرم بر روی سنگ بستر در عمق ۱۲/۲ متری قرار دارد . مقاومت برشی متوسط لایه رس ۳۶ kPa می باشد . پیشنهاد شده ترانشه ای به عمق ۹ متر در این لایه حفر شود . اگر ضریب اطمینان برابر ۱/۵ فرض شده باشد ، شیب زاویه حفاری را محاسبه نمائید . $\gamma = ۱۹/۲ \text{ kN} / \text{m}^3$

۳- در محل دیگری، بلافاصله پس از حفاری ترانشه ای به عمق ۶ متر و زاویه ۱:۳ (۳ افقی، ۱ عمودی)، ترانشه تخریب شد (لغزید) . وضعیت زمین بدینگونه بود که لایه ای از رس نرم به عمق ۱۰/۷ متر بر روی شیل سخت (Hard shale) قرار داشت . با فرض اینکه برای رس $\gamma = ۱۶/۸ \text{ KN} / \text{m}^3$ ، مقاومت برشی متوسط لایه رسی را محاسبه نمائید .

۴- با فرض ۲۵٪ کاهش در مقاومت برشی برای اینکه ترکهای کششی ایجاد شوند، پیدا کنید عمقی را که یک ترانشه عمودی می تواند بدون حمایت جانبی برای یک مدت کوتاه پایدار بایستد . زمین مورد نظر رس نرم اشباع با $\gamma = ۲۰ \text{ KN} / \text{m}^3$ و مقاومت برشی ۵۷/۴ kPa می باشد .

اعداد پایداری (N) برای حالت تحلیل پایداری با $\phi = 0$

β	$n_d = 1$	$n_d = 1/5$	$n_d = 2$	$n_d = 3$
۹۰	۰/۲۶	-	-	-
۷۵	۰/۲۱۹	-	-	-
۶۰	۰/۱۹۱	-	-	-
۴۵	۰/۱۶۴	۰/۱۷۴	۰/۱۷۷	۰/۱۸۰
۳۰	۰/۱۳۳	۰/۱۶۴	۰/۱۷۲	۰/۱۷۸
۲۲/۵	۱/۱۱۳	۰/۱۵۳	۰/۱۶۶	۰/۱۷۵
۱۵	۰/۰۸۷	۰/۱۲۸	۰/۱۵۰	۰/۱۶۷
۷/۵	۰/۰۵۴	۰/۰۸۰	۰/۱۰۷	۰/۱۴۰

اسکمپتون (1954) Skempton رابطه زیر را برای برآورد میزان فشار آب در خاکها در حالت بارگذاری زه کشی نشده (Undrained Loading) در آزمایشات سه محوری (Triaxial Tests) پیشنهاد داده است.

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

۱- پارامترهای رابطه فوق را تعریف نمائید.

۲- اگر بخواهیم رابطه فوق را در محاسبه افزایش فشار آب حفره ای در هسته رسی یک سد خاکی و یا در پی سد (اگر پی خاک ریزدانه باشد) در موقع ساخت سد استفاده کنیم، چه فرض ساده کننده ای نموده ایم؟

۳- ضرایب A و B را دقیقاً تعریف کنید. مقدار B برای خاکهای کاملاً اشباع چقدر است؟

۴- با مراجعه به کتابهای کلاسیک مکانیک خاک، مقدار تقریبی ضریب A را برای خاکهای مختلف بنویسید. همچنین تحقیق کنید که مقدار A - علاوه بر جنس خاک - به چه عوامل دیگری بستگی دارد.

~~۵- سد خاکی شکل صفحه بعد را در نظر بگیرید. پی سد از خاکهای ریزدانه بسیار حساس ($A = 1/5$) تشکیل شده~~

~~است. در صورتیکه میزان فشار آب حفره ای در نقطه O قبل از شروع ساخت سد برابر $15/5 \text{ KN/m}^2$ باشد، فشار~~

~~آب را پس از اجرای لایه اول سد محاسبه نمائید. $B = 0/95$ فرض شود.~~

~~۶- آیا اجرای لایه دوم سد را بلافاصله پس از اجرای لایه اول توصیه می کنید؟ برای پاسخ خود دلیل بیاورید.~~

~~این رابطه چه توصیه ای دارید؟~~

۱. اهمیت کنترل تراوش در پی سدها (به ویژه سدهای خاکی) از نقطه نظر پایداری و عملکرد صحیح سدها را به طور واضح با ذکر مثال شرح دهید.

۲. انواع روشهای کنترل تراوش در پی سدها را نام برده و پارامترهای تعیین کننده برای انتخاب نوع روش کنترل تراوش را همراه با شرح کوتاهی نام ببرید.

۳. یک سد خاکی با ارتفاع حدود 150 m بر روی یک پپی ناهمگن متشکل از آبرفتهای قدیمی که برخی قسمتهای آن سماتته شده در دست طراحی است. سایر مشخصات پی و وضعیت منابع قرضه به قرار زیر است:

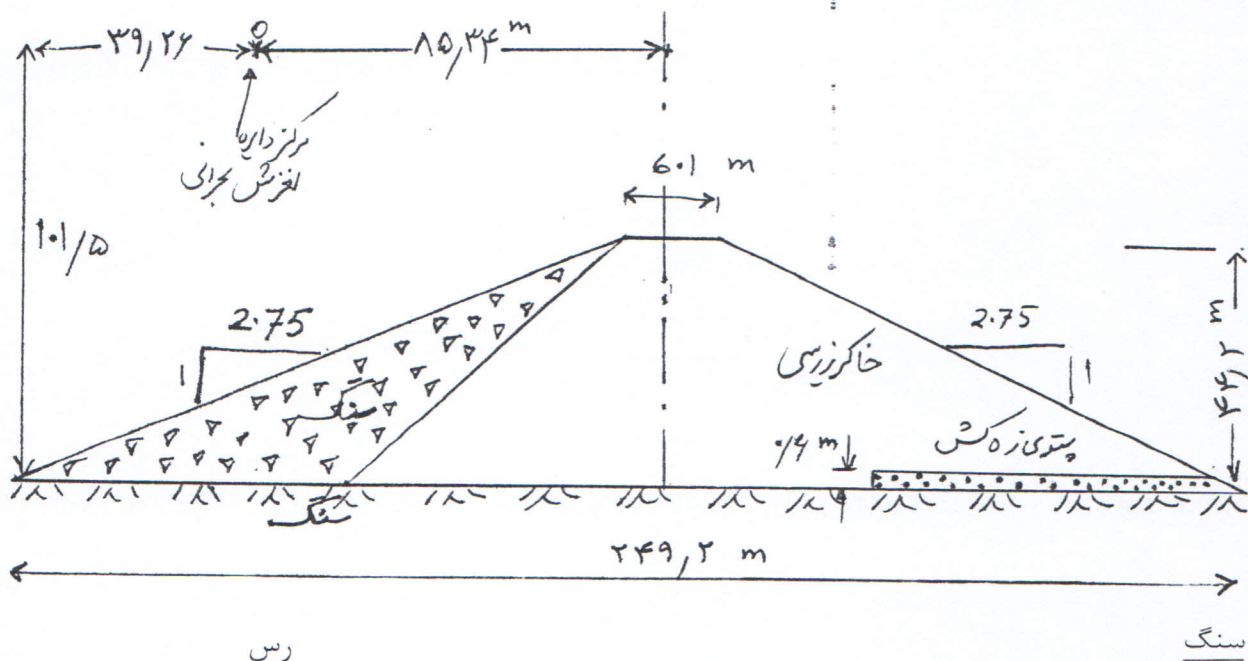
- ضخامت پی نفوذپذیر نسبتاً زیاد است (حدود 150 m)
- ناهمگنی پی زیاد بوده به گونه‌ای که مناطقی با نفوذپذیری نسبتاً زیاد (حدود 120 لوژان) و مناطق دیگر در پی با نفوذپذیری کم (در حدود 5 لوژان) می‌باشد.

- ناهمسانی پی به لحاظ نفوذپذیری نسبتاً زیاد است. $K_H \cong 10K_V$
 - منابع قرضه برای تامین رس به میزان زیاد در نزدیکی محور سد موجود است.
 - سیمان به میزان زیاد در کارخانه‌ای در نزدیکی محل سد تولید می‌شود
- با توجه به اطلاعات فوق شما به عنوان طراح سیستم کنترل تراوش در پی چه روشی را توصیه می‌کنید؟ برای توصیه خود دلایل کافی ذکر کرده و در مورد دلایل توضیح دهید.

۴. در صورتیکه پتوی رسی (Clayey Soil Blanket) در کف مخزن به عنوان روش آب بندی پی در یک سد خاکی انتخاب شده باشد، مراحل طراحی و تحلیل آن را همراه با شرح مختصر نام ببرید.

۱- شبکه جریان برای حالت تراوش دائم در سد شکل زیر ترسیم شده است (شکل صفحه ۲) • ضریب اطمینان (S.F.) را برای حالت افت سریع و کامل در مخزن تعیین کنید • فقط دایره لغزش با مرکز داده شده را در نظر بگیرید (بزرگترین دایره ممکن) • محاسبات پایداری را از روش Bishop و با تقسیم توده لغزنده به ۹ ستون انجام دهید •

۲- نسبت k_h/k_v (ضرایب نفوذپذیری افقی و قائم) در خاکریز رسی چند است ؟



رس

$$\gamma = 22.78 \quad \text{kN/m}^3$$

$$c' = 14.4 \quad \text{kN/m}^2$$

$$\phi' = 33^\circ$$

سنگ

$$\gamma_d = 16.5 \quad \text{kN/m}^3$$

$$\phi' = 40^\circ$$

$$n = 40 \%$$

$$e = 0.67$$

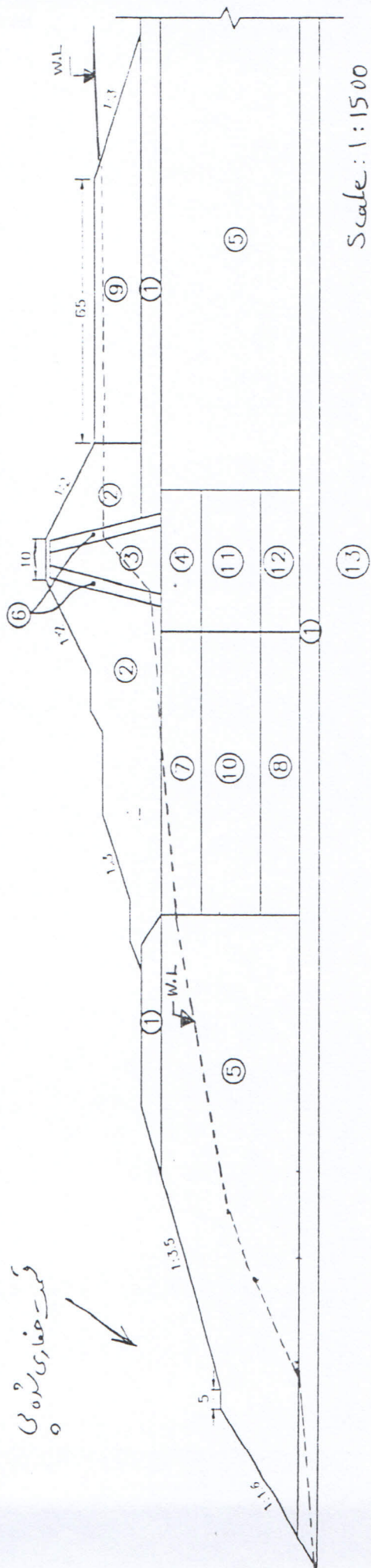
پایداری دو شیب با مشخصات زیر را با استفاده از روش "مدیران استرن" محاسبه کنید
از نتایج گرفته و ضریب اطمینان برای هر یک را به دست آورید:

شیب (۱) : $\frac{c'}{\gamma H} = 0.065$; $\phi' = 3^\circ$; $r_u = 0.25$

شیب (۲) : $\begin{cases} c' = 20 \text{ kPa} \\ \gamma = 20 \text{ kN/m}^3 \end{cases}$; $\phi' = 2^\circ$; $r_u = 0.35$; $H = 25 \text{ m}$

$\beta = 30^\circ$

Zone No.	γ_{wet} (t/m^3)	γ_{sat} (t/m^3)	Short term			Long term	
			C (kg/cm^2)	ϕ (deg)	r_u	C (kg/cm^2)	ϕ (deg)
1	1.95	2.00	0	35	0	0	35
2	2.15	2.20	0	42	0	0	42
3	1.90	1.95	0.2	28	0.21	0.2	28
4	1.95	2.00	0.5	16	0.42	0.4	20
5	1.95	2.00	0.9	4	0	0.4	20
6	1.90	2.00	0	30	0	0	30
7	1.95	2.00	0.5	16	0.03	0.4	20
8	1.95	2.00	0.5	16	0.07	0.4	20
9	2.00	2.05	0	38	0	0	38
10	1.95	2.00	0.5	16	0.01	0.4	20
11	1.95	2.00	0.5	16	0.4	0.4	20
12	1.95	2.00	0.5	16	0.35	0.4	20
13	2.60	2.60	5	35	0	5	35



قسمت عمادی سد خاکی