



« اصول مهندسی سد »

مقدمه:

صنعت سد سازی به عنوان یکی از قدیمی ترین و پیچیده ترین فعالیت های ساختمانی همواره مد نظر جوامع مختلف بوده و از نظر اقتصادی نیز یکی از منابع مهم اقتصادی هر کشور و منطقه محسوب می شده است. مهندسی سد را می توان مجموعه ای از علوم فنی و پایه مهمی دانست که در کنار یکدیگر طراحی و اجرای سد را ممکن می سازد و سازه سد را از نظر بارگذاری های وارده و مقاومت در برابر عوامل مخرب مورد بررسی قرار می دهند. طراحی و اجرای سدها به گونه ای است که اگر عواملی مثل رسوب گذاری مخزن و غیره وجود نداشته باشد، محدودیتی در عمری و محدوده زمانی بهره برداری از سد وجود نخواهد داشت.

آنچه مسلم است با توجه به گستردگی فنون و علوم مرتبط با سدسازی، تنها اشاره به اصول کلی مهندسی سد نیز مقوله قابل توجهی خواهد بود. لذا در مجموعه حاضر پس از بررسی تاریخچه صنعت سدسازی، به بررسی تقسیم بندی سدها از جنبه های مختلف پرداخته خواهد شد و سپس با آشنائی مختصر در رابطه با مطالعات اولیه مورد نیاز، به اصول کلی طراحی سد اشاره می گردد.

تاریخچه سدسازی در جهان:

همواره سد سازی یا بند سازی به عنوان یکی از مهمترین فعالیتهای مهندسی مطرح بوده است بطوریکه ساکنین مناطق مختلف بنا به شرائط جغرافیایی و ضرورت های ایجاد شده نسبت به احداث سدها یا آبگهی های مختلف با مصالح و مشخصات گوناگون، اقدام نموده اند. در این راستا نیازهایی از جمله تأمین آبیاری و آبرسانی مطرح بوده و یا در مناطقی نیز به خاطر پایین بودن سطح آب های رودخانه ها یا نیاز جهت تغییر مسیر رود، سد سازی انجام می گرفته تا بتوانند سطح آب را بالا آورده و برای نیازهای کشاورزی و عمرانی از آن استفاده کنند.

در سرزمین های باستانی و کهن که از قدیم در معرض سیلاب و طغیان رودخانه ها قرار داشته اند، ساخت بندهای متفاوت در طول مسیر رودخانه ها و یا مناطق سیل خیز به جلوگیری از خسارات کمک فراوانی کرده است. تاریخ سد سازی در ایران، مصر و بین النهرین قدمتی بسیار طولانی دارد و هنوز هم می توان نشانه هایی از آنها را در این سرزمین ها یافت. به طور کلی سدسازی و نیز لایروبی و مرمت آنها از دیر باز مانند سایر کارهای عام المنفعه و پروژه های بزرگ معمولاً به دست حکومت ها و پادشاهانی که به امور آبادانی و آبادی علاقه بیشتری داشتند انجام می گرفته است و در این میان رونق اقتصادی و پیشرفت آبادی ها و شهرهای مرتبط با سیستم های آبیاری و آبرسانی نیز بستگی بسیار زیادی با مقوله سد و سد سازی و اهمیت حکمرانان به این مسایل داشته است. شاید اولین سدی که به دست بشر ساخته شده است، سد «الکافرا» در مصر باشد که تاریخ ساخت آن به ۲۶۰۰ سال قبل از میلاد مسیح بر می گردد. این سد که از نوع خاکی بوده، با هسته خاکی و پوسته سنگریزه ای و پوشش حفاظتی سنگچین با ارتفاع ۱۴ متر



ساخته شده است. همچنین پس از آن، تعداد بیشماری سد توسط تمدن های کهن، در مناطق مختلف خاورمیانه از جمله ایران، عراق و عربستان احداث شده است.

اولین سد مهم ساخته شده با ملات و سنگ نیز در دوران مشابهی در ترکیه ساخته شد، که این سد با نام «کسیس لگو»، ارتفاعی حدود ۱۰ متر دارد. پس از آن دوره، ساخت سدهای مدرن تر، از قرن دهم بعد از میلاد، شروع و ارتفاع سدهای ساخته شده افزایش پیدا کرد. بالاخره در سال ۱۷۸۰ با طلوع اولین انقلاب صنعتی و شروع صنعت کانال سازی، توجه به صنعت سد و سد سازی بیشتر شد و به عنوان مثال کار اجرای سد «انت دیستل» در انگلستان به عنوان اولین سد مدرن در سال ۱۸۳۸ به اتمام رسید. این سد که اولین سد در نوع خود بوده است، ارتفاعی در حدود ۳۰ متر داشت.

تاریخچه سدسازی در ایران:

در ایران به جهت وجود مشکلات ناشی از کمبود آب و شرایط اقلیمی خاص، همواره آب به عنوان ماده ای بسیار ارزشمند و استراتژیک مدنظر بوده است بطوریکه این موضوع سبب گردیده است تا بندسازی، سد سازی و احداث دیگر تأسیسات ذخیره سازی و انتقال آب در آثار به جا مانده در فرهنگ و تمدن ایرانی، نمود خاصی داشته باشد. پادشاهان هخامنشی به واسطه نیاز جغرافیایی کشور ایران و علاقه ای که در گسترش و آبادانی سرزمین تحت فرمانروایی از خود نشان می دادند، در زمان امپراتوری خود سدها و بندهای زیادی در بخش های جنوب غربی و جنوبی ایران ساختند. بسیاری از سیستم های آبرسانی و آبیاری که تا سال های متمادی نیز در ایران از آنها استفاده شد مرهون تلاش مهندسان و صنعتگران ایرانی است که در زمان های بسیار دور تلاش نمودند تا نیازها و کمبودها را در زمینه های عمرانی و آبادی بر طرف نمایند و آثار و شواهد آن را نیز می توان در نقاط مختلف ایران درک نمود. علاوه بر آن بسیاری از آثار به جا مانده از این دوران ها در سرزمین های تابعه حکومت های ایران باستان نیز قابل مشاهده است.



شکل ۲: نمایی از بند قدیمی بهمن



شکل ۱: نمایی از بند قدیمی امیر



شکل ۴: نمایی از بند قدیمی فریمان



شکل ۳: نمایی از بند قدیمی شاه عباسی



تقسیم بندی سدها از نظر کاربرد:

در طراحی سدهای مختلف کاربردهای گوناگونی از جمله تأمین آب مورد نیاز آبیاری دشتهای منطقه، تأمین آب شرب، تولید نیروی برقآبی، مهار سیل و ... مد نظر می باشد که این اهداف با توجه به نیاز و نوع طراحی می تواند به صورت تنها و یا همزمان مورد توجه قرار گیرد. در این راستا می توان تقسیم بندی زیر را بر اساس کاربردهای مختلف سدهای مختلف مد نظر قرار داد:

(الف) سدهای مخزنی: این سدها به منظور ذخیره آب جهت تأمین مصارف شرب، کشاورزی و صنعت احداث می گردد. حجم مخزن این سدها بسیار بزرگ است. این نوع سدها شامل سدهای بتنی دو قوسی و بتنی وزنی و سدهای خاکی می شوند.

(ب) سدهای تنظیمی: هدف از ساخت این سدها تنظیم دبی ثابتی برای رودخانه می باشد. این نوع سدها در پایین دست سدهای مخزنی بزرگ احداث می گردند. ارتفاع آنها کم و میزان حجم آبی که در آن ها ذخیره می شود، کم می باشد. جنس این سدها اکثراً بتنی با حاشیه های سنگریزه ای می باشد.

(ج) سدهای انحرافی: این سدها برای منحرف کردن آب مورد استفاده قرار می گیرند، این سدها در مسیر رودخانه ها احداث می گردند و با افزایش هد آب باعث سوار شدن آب بر زمین های مجاور می گردد. همچنین از این سدها برای منحرف کردن آب قبل و بعد از محل های ساخت سدهای بزرگ استفاده می شود.

(د) سدهای رسوبگیر: این نوع سدها دارای ارتفاع کمی می باشد و جنس آنها بتن و سنگ می باشد. هدف از این سدها برای جلوگیری از ورود رسوبات به داخل سدهای بزرگ می باشد و قبل از این سدها احداث می شوند.

(ه) سدهای برقآبی: این نوع سدها را که می توان از نوع سدهای انحرافی نیز دانست، با تأمین هد آب مورد نیاز نیروگاه های برقآبی، جهت تأمین نیروی برق طراحی و اجرا می گردند.

تقسیم بندی سدها از نظر جنس مصالح مصرفی:

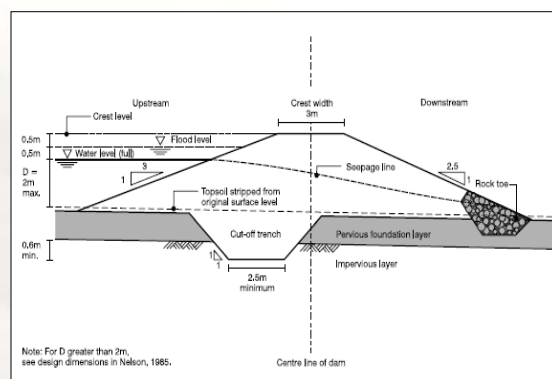
از نظر نوع مصالح مصرفی می توان سدها رو به دو گروه اصلی زیر تقسیم بندی نمود:

الف) سدهای خاکی یا سنگریزه ای:

این سدها با مصالح خاکی یا پاره سنگی اجرا شده و معمولاً با مقاطع دوزنقه ای شکل، طراحی و با شیب های ملایم در بالا دست و پایین دست به صورت عریض اجرا می گردند. بنابراین می توان گفت سدهای خاکی و سنگریزه ای به سدهایی اطلاق می گردد که از مصالح طبیعی موجود در طبیعت از قبیل خاک، سنگ، سنگریزه و ... تشکیل شده باشد و از هیچ گونه مصالح چسباننده طبیعی و غیر طبیعی در آن ها استفاده نشود و مقاومت کافی در برابر نیروها و تراوش آب از آن ها تنها با تراکم مصالح به وجود آید.

با توجه به اینکه در سدهای ذکر شده، هم از مصالح خاکی و هم از مصالح سنگریزه ای استفاده می شود، تنها با توجه به درصد مصرفی هر یک از این مصالح، نوع سد مشخص می شود و وجه تمایز مشخصی را نمی توان برای آن مشخص کرد. با این توصیف معمولاً اگر بیش از ۵۰٪ از حجم مواد جایگذاری شده سد را خاک متراکم تشکیل دهد، آن را سد خاکی گویند و در این گونه سدها، معمولاً تراوش و نفوذ آب توسط هسته های نفوذ ناپذیر و یا توسط خود بدنه کنترل و جلوگیری می شود، ولی در سدهای سنگریزه ای با توجه به اینکه نفوذ آب در بدنه سد قابل کنترل نیست، این عمل توسط المانی دیگر که بر روی بدنه به عنوان المان ناتراوا و یا غشای نفوذ ناپذیر ساخته می شود، در نظر گرفته می شود. این المان ممکن است از مصالح مختلفی مثل بتن ریخته شده، بلوک های بتنی، آسفالت، ژئوممبرین و غیره باشد. در این گونه سدها، بدنه سد که از سنگریزه تشکیل شده است توسط غلtek های سنگین در لایه های کم ضخامت به شدت متراکم شوند.

با توجه به خصوصیات مکانیک خاکی مصالح سنگریزه ای از جمله بالا بودن زاویه اصطکاک نسبت به مصالح خاکی می توان شیب شیروانی های بالا دست و یا مقاومت سدهای سنگریزه ای را کمتر از سدهای خاکی در نظر گرفت، به طوری که در سدهای خاکی این شیب ممکن است بین ۱:۲ تا ۳:۵ باشد، در حالی که در سدهای سنگریزه ای این مقدار ممکن است حتی تا حدود ۱:۱.۵ تا ۲ می تواند کاهش یابد.



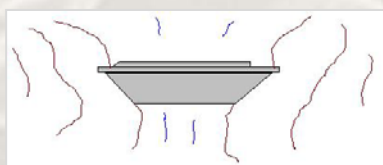
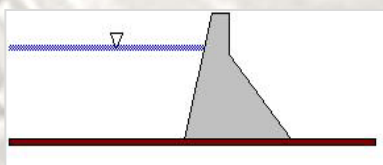
شکل ۵: مقطع عرضی و نمایی از یک سد خاکی

ب) سدهای بتنی:

در زمان های قدیم برای ساخت سدهای نسبتاً بلند، از ترکیب مصالح شنی درشت دانه و ملات استفاده می شد و گاهی به جای سنگ از آجر نیز بهره گرفته می شد. با گذشت زمان به جای مصالح فوق از بتن استفاده شد و به این ترتیب اجرای طرح های مختلف برای سدها آسان تر و اجرای سدهای قوسی امکان پذیر گردید و پس از سال ۱۹۵۰ میلادی، مخلوط کردن بتن با محصولات و مواد اضافه و زائد مثل سرباره کوره یا پودر خاکستر زغال سنگ متداول گردیده تا علاوه بر کاهش هزینه، مشکلات جانبی اجرایی مختلف نیز برطرف گردد.

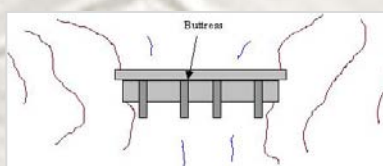
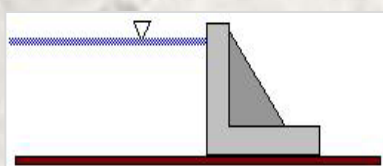
سدهای بتنی ممکن است به یکی از روش های زیر ساخته شود:

– **سدهای وزنی:** این سدها که معمولاً با مقطع مثلثی یا دوزنقه ای ساخته می شوند، در بالا دست تقریباً به صورت قائم و در پایین دست با شیب تند ساخته می شوند. پایداری این سدها تنها از طریق نیروی وزن آن ها تأمین می گردد. گاهی اوقات این سدها در طول به صورت قوسی اجرا شده تا علاوه بر زیبایی، در پایداری سد نیز کمک کرده و در نتیجه سد وزنی قوسی را به وجود آورند. در این حالت معمولاً ضخامت سد نسبت به حالت اول لاغرتر می شود.



شکل ۶: نما، پلان و مقطع عرضی سدهای بتنی وزنی

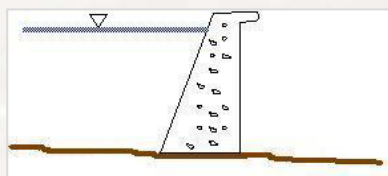
– **سدهای پشت بنددار:** در این نوع سدها، یک نمای بتنی به کمک تعدادی پشت بند که در فاصله های منظم قرار دارند، پایدار شده و در برابر نیروهای وارده از آب مقاومت می کنند. در این نوع سدها معمولاً وزن بدنه سد نسبت به حالت وزنی کاهش می یابد. نحوه اجرا نیز ممکن است مختلف باشد که به عنوان نمونه می توان به روش اجرایی که در شکل زیر آمده است، اشاره نمود.



شکل ۷: نما، پلان و مقطع عرضی سدهای بتنی پشت بنددار

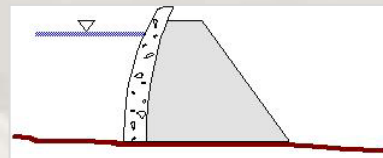
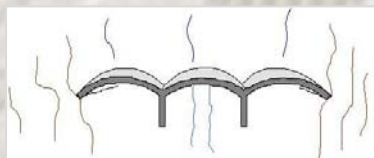


- **سدهای قوسی:** همان طور که گفته شد، گاهی اوقات سدهای وزنی در پلان به صورت قوسی ساخته می شوند که به آن ها سدهای یک قوسی گویند و در برخی اوقات جهت کمک به انتقال از نیروی آب به تکیه گاه های طرفین از قوس های در مقطع و پلان به طور همزمان استفاده می شود که در این صورت سدهای دو قوسی به وجود می آیند که حالتی گنبدی را به وجود می آورند و همانند یک پوسته باید مورد تحلیل قرار گیرند.



شکل ۸: نما، پلان و مقطع عرضی سدهای بتنی قوسی

به جز موارد فوق می توان به انواع دیگری از جمله سدهای وزنی توخالی، سدهای پشت بنددار کفه ای، سدهای پشت بنددار تخت، سدهای قوسی مرکب و ... اشاره نمود که هر یک دارای ویژگی ها و محاسن مربوط به خود و شرایط محیط اجرا دارند.



شکل ۹: نما، پلان و مقطع عرضی سدهای بتنی قوسی پشت بنددار

حجم بتن مصرفی در سدهای بتنی قوسی در مقایسه با سد وزنی در حدود ۵۰٪ کمتر می باشد. سدهای قوسی هم در جهت شعاعی و هم در جهت مماسی باربری دارند. سدهای دو قوسی در دره های باریک و با تکیه گاه های سنگی بنا می شوند. (چون قسمت اعظم نیرو به تکیه گاه ها وارد می شود. این دره ها تقریباً به حالت V شکل می باشد.

سدهای بتنی وزنی دارای سازه ای تقریباً صلب و سنگین می باشند که توسط وزن خود در مقابل نیروهای وارده مقاومت می کنند. این سدها معمولاً در پلان مستقیم می باشند. سدهای پایدار وزنی علاوه بر وزن خود از وزن آب نیز در بالادست نیز برای ایجاد پایداری استفاده میکنند. سدهای بتنی وزنی در محل هایی که دارای پی مستحکم باشند، احداث می شوند. این سدها در دره های U شکل ساخته می شوند. جاگذاری یا نصب تجهیزات نیروگاهی در این نوع سدها راحت می باشد و قسمت آبگیر و پنستاک به راحتی در داخل بدنه جا می گیرد. سدهای بتنی در پایین دست دارای شیب یکنواخت در حدود ۷٪ تا ۸٪ افقی و ۱ در حالت عمودی می باشند. رویه بالادست در حالت عادی عمودی است و عرض تاج به گونه ای انتخاب می شود که یک جاده بتواند روی آن قرار گیرد.

المان های اصلی یک سد پایدار عبارتند از: عرشه، شیب بالادست، پایه ها و یا دیواره های قائم و نیز سرپلستیم گالری ها، سوراخ ها، اتاقک ها و شفت ها که در داخل بدنه سد جهت دسترسی و بازدید جمع آوری آب زهکشی، نصب ابزارهای اندازه گیری و وسایل جنبی و کنترلی در بدنه تعبیه می گردد.

در سدهای بتنی تنها در نواحی خاص که نیروی کشش وارد می شود از آرماتور استفاده می شود و در قسمت هایی که صرفاً نیروی فشاری وارد می شود از آرماتور استفاده نمی شود. لذا با توجه به اینکه در سدهای بتنی وزنی پایداری در مقاطع بتن معمولاً فشاری است، در این حالت آرماتور استفاده نمی شود ولی با این وجود در مناطق بحرانی و تمرکز تنش های فشاری و نواحی فشار کم و کششی از آرماتور استفاده می گردد. لازم به ذکر است که در تمام مجاری های بدون پوشش که در معرض فشار داخلی آب هستند و نیز در پائین دست دریچه ها و سرریزها از آرماتور استفاده می شود.



شکل ۱۰: نمایی از سدهای بتنی

لازم به ذکر است که در قدیم نیز سدهایی کوچک (بند) با روش های بنایی و ملات و سنگ و آهک ساخته می شده است که از نظر رده بندی می توان آن ها را جز گروه دوم در نظر گرفت.

ب) سدهای لاستیکی:

تکنولوژی نسبتاً جدیدی که برای مهار آب های سطحی به کار گرفته شده است تکنولوژی ساخت سدهای لاستیکی می باشد. قبل از این نوع سدها برای مهار و هدایت آب به سوی زمین های وسیع و آبروها، از دریچه های فولادی و تخته های چوبی استفاده می شد که در جلوی دریچه ها قرار می گرفت تا آب با فشار بیشتری جریان داشته باشد. در این کار نیز به نیروی انسانی نیاز بود و اگر در باز کردن این دریچه ها تأخیری روی می داد سیل ایجاد می شد و دریچه را با خود می برد.

ایده استفاده از سدهای لاستیکی اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط ایمبرسون مطرح شد. در سال ۱۹۶۵ اولین سد لاستیکی بادی در ژاپن برای ذخیره سازی آب به بهره برداری رسید. هم اکنون در حدود ۱۰۰ سد لاستیکی در آمریکای شمالی، بیش از ۱۰۰۰ سد لاستیکی در ژاپن و خاور دور، و در مجموع ۲۶۰۰ سد در نقاط مختلف جهان به طور موفقیت آمیز در دست بهره برداری می باشند. کلوردها و مزایای سدهای لاستیکی را می توان به شرح زیر بیان نمود:

- کنترل سیلاب ها و تنظیم جریان رودخانه: این کار توسط دستگاه های الکترونیکی در اتاق کنترل و به طور خودکار انجام می گیرد. پایین آمدن رقوم سطح آب از یک سطح مشخص به معنای پایان سیلاب است، که در این صورت دستگاه الکترونیکی کنترل، دستور افراشتن سد را اعلام می دارد که با این اعلام کمپرسور هوا به کار افتاده و سد را باد می کند.

- کنترل رسوب رودخانه: از آن جا که سکوی بتنی محل استقرار سد لاستیکی، در کف رودخانه و هم تراز با بستر آن کار گذاشته می شود، در هنگام خواباندن سد، شرایط رودخانه مانند شرایط قبل از احداث سد لاستیکی است. این ویژگی باعث می شود که پشت سدهای لاستیکی را رسوب پر نکند، زیرا در هنگام وقوع سیل که بیشترین بار رسوب گذاری رودخانه است، سد به صورت اتوماتیک به حالت خوابیده در می آید و رودخانه شرایط طبیعی پیدا می کند.

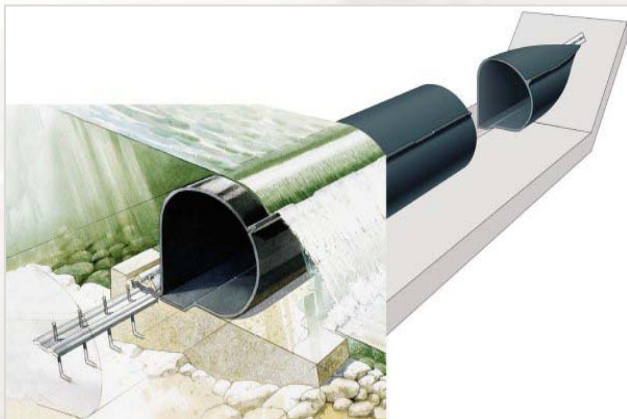
سدهای لاستیکی دارای ارتفاع کمی (حدود ۳ تا ۱۵ متر) می باشند. این سدها برای افزایش هد آب و همچنین انحراف آب مورد استفاده قرار می گیرند. از مزیت های این سد این است که در مواقع سیلابی هوای آنها تخلیه شده و این سد در بستر رودخانه قرار گرفته و رسوبات ناشی از سیلاب در پشت آن جمع نمی شود. همچنین از معایب این سد نیز می توان به مشکلات ناشی از احتمال سوراخ شدن آن اشاره نمود. برای پرکردن این سدها از کمپرسور های خاص استفاده می شود که می تواند داخل این سدها را به سرعت با هوا پر کند.

از جمله دلایل استفاده از سدهای لاستیکی می توان به کنترل سد و حفاظت ساحلی در برابر فرسایش، نصب بر روی بندها و سدها به منظور افزایش ارتفاع آنها و کمک به تولید برق، کاهش آلودگی آب، افزایش ظرفیت ذخیره سدها، مسائل تفریحی از قبیل شنا، قایقرانی و ... و جلوگیری از نفوذ آب شور دریا به هنگام مد به ساحل، اشاره نمود.

از جمله مزایای اقتصادی این سد ها نسبت به موارد جایگزین شده عدم نیاز سدهای لاستیکی به فونداسیون پیچیده، امکان احداث تا دهانه های ۱۰۰ متر، نیاز به حداقل حفاظت و نگهداری، انعطاف پذیری سد در مقابل زلزله و نصب و ساختن بسیار سریع می باشد.



سدهای لاستیکی از یک تیوپ هوا که به یک بستر متصل می شود تشکیل شده است . ساختمان سدهای لاستیکی را می توان متشکل از سه بخش بدنه سد ، بستر سد و تجهیزات مهار و سیستم کنترل و بهره برداری دانست.



شکل ۱۱: نما و مقطعی از سدهای لاستیکی

محاسن و معایب سدهای خاکی و بتنی:

با توجه به موارد ذکر شده، می توان برای سدهای ساخته شده با مصالح خاکی و بتنی، خصوصیات را ذکر نمود که با در نظر گرفتن آن خصوصیات و نیز با لحاظ نمودن شرایط منطقه، نوع مناسب را می توان انتخاب نمود. مزایا و محاسن سدهای خاکی:

از نظر شرایط توپوگرافی محل اجرا، عریض بودن یا تنگ بودن دره محل احداث، مشکلی ایجاد نمی کند. داشتن خصوصیات انطباق پذیری بیشتر مصالح مصرفی بدنه سد با مصالح بستر (چه سنگی باشد و چه خاکی) نسبت به سدهای ساخته شده با مصالح دیگر. فراوانی و کم هزینه بودن مصالح مصرفی در سدهای خاکی نیز به دلیل استفاده از مصالح طبیعی دارای امتیاز می باشد. به دلیل استفاده از مصالح خاکی و سنگریزه ای، بدنه سد و اجزای داخلی آن دارای خاصیت انعطاف پذیری می گردند. عملیات اجرایی به صورت پیوسته قابل اجرا می باشد.

معایب سدهای خاکی:

در هنگام سیلاب و افزایش ارتفاع آب، اگر روگذری سیل اتفاق افتد، سد نمی تواند مقاومت کافی از خود نشان دهد و دچار انهدام می شود.

در صورت بروز نشت پنهان در سد و فرسایش درونی سد یا پی، احتمال خراب شدن سد زیاد خواهد بود.

مزایا و محاسن سدهای بتنی:

برخلاف سدهای خاکی، این سدها در مقابل روگذری سیل از خود مقاومت نشان داده و حتی سرریز می تواند بر روی تاج سد در نظر گرفته شود که در برخی موارد این سرریز تمام طول سد را در بر می گیرد. تجهیزات هیدرولیکی مثل لوله های آبیگر از مخزن، دریچه ها، شیر آلات و تجهیزات و تأسیسات مربوطه را می توان در اتاقک های مناسب یا دالان های احداث شده در بدنه سد بتنی در نظر گرفت.

در هنگام زلزله، مقاومت سدهای بتنی بدون وجود خطر فروپاشی عمده، بیشتر از سدهای دیگر است. به جز سدهای تک قوسی و دو قوسی به شرط وجود بستر سنگی در ساختگاه، احداث انواع دیگر سدهای بتنی در دره های عریض و باریک قابل اجراست.



معایب سدهای بتنی:

-ساختگاه سدهای بتنی باید از بستر سنگی با مقاومت کافی تشکیل شده باشد.
-مصلح مورد نیاز مانند مصلح طبیعی، شن و ماسه و نیز مصلح مصنوعی مثل سیمان باید از نظر کیفیت در حد قابل قبول بوده و به اندازه کافی نزدیک به محل اجرا، انبار و نگهداری شود.
-عملیات بتن ریزی در سدها پیوسته نبوده و به تخصص های مختلفی مثل قالب بندی، بتن سازی بتن ریزی و ... نیاز دارد.
از نظر هزینه تمام شده، هزینه سدهای بتنی به مراتب بیشتر از سدهای خاکی است.

با توجه به آمار موجود، مشخص می شود که بیش از ۸۵٪ از سدهای ساخته شده در جهان از نوع اول یا سدهای ساخته شده با مصلح خاکی و سنگریزه ای می باشد. از مهمترین دلایل انتخاب این نوع سدها می توان دلایلی چون انطباق پذیری بیشتر مصلح خاکی با محیط اطراف و به ویژه با بستر و ساختگاه سد، بیشتر در دسترس بودن مصلح مصرفی و بالاخره تکنولوژی کنترل و اجرای ساده تر سدهای خاکی نسبت به سدهای بتنی را ذکر کرد.

با توجه به توضیحات داده شده، در وهله اول طراحی هر سد نیاز به انتخاب نوع سد، با توجه به شرایط موجود می باشد. سدهای مختلف از نظر شرایط مختلف محیطی، توپوگرافی دریاچه، گرادیان هیدرولیکی نشت ساختگاه سد، تنش انتقالی به پی، تغییر شکل پذیری در پی، گود پذیری پی و ... متفاوت بوده و با توجه به تمامی این موارد می توان یک انتخاب بهینه انجام داد.

طبقه بندی سدها از نظر بزرگی:

بر اساس نظر آئین نامه ICOLD (International Commission On Large Dam) که توسط کمیسیون جهانی سدهای بزرگ تنظیم گردیده است ، سدهایی را که ارتفاع بیش از ۱۵ متر داشته باشند را سدهای بزرگ شناخته و همچنین سدهایی که ارتفاع آن ها ۱۵-۱۰ متر بوده، ولی حجم مخزن آنها بیش از یک میلیون متر مکعب باشد و یا سرریزی با ظرفیت بیش از ۲۰۰۰ متر مکعب در ثانیه داشته باشند را نیز به عنوان سدهای بزرگ می شناسد.

تأسیسات جانبی مهم سدها:

در کنار بدنه سد (چه خاکی و چه بتنی) باید تأسیسات دیگری نیز طراحی و اجرا گردد تا بهره برداری و کنترل آب مهار شده میسر گردد. در این راستا تأسیساتی مثل سرریز و آبگیرهای سد را می توان به عنوان دو المان مهم سد نام برد که طراحی و اجرای آن ها در هر سدی ضروری است.

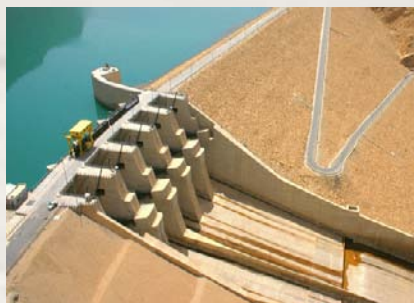
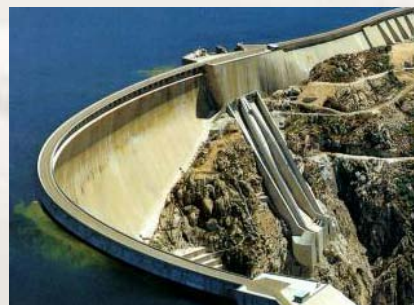
در کنار این دو المان، تأسیسات دیگری مثل زه کش ها، دالان ها، کلیدهای مهاری و نیروگاه ها و ... را می توان به عنوان تأسیسات کمکی در کنار بدنه سد و تأسیسات ضروری در نظر گرفت. در ادامه سعی خواهد شد در مورد هر یک از تأسیسات فوق الذکر توضیحی اجمالی داده شود.

سرریزها: سرریزها تأسیساتی می باشند که در هنگام سیلاب که سطح تراز آب پشت بند از حد نرمال بیشتر می شود، شروع به کار کرده، آب اضافه را به خارج دریاچه سد انتقال می دهند. همان طوری که گفته شد، این المان ها یک المان ضروری هر سدی است، در سدهای خاکی به صورت جانبی یا تنوره ای در کنار بدنه اصلی سد و یا با فاصله از آن احداث می شود، ولی در سدهای بتنی می تواند بر روی بدنه اصلی سد به صورت یک لبه آبریز، ادغام گردد.

سرریزها معمولاً شامل دو قسمت عمده می باشند. یکی قسمت کنترل و یا آستانه کنترل کننده است که کار کنترل جریان ورودی سرریز را بر عهده داشته و پس از آن ممکن است بلافاصله جریان آب را به قسمت بعد انتقال دهد و یا به کمک دریچه های کنترل

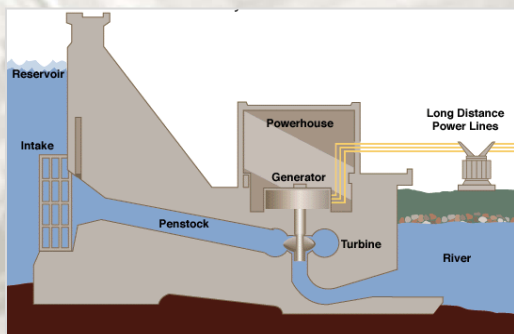


جریان ورودی به سرریز را کنترل و نگهداری نماید و پس از این قسمت، آبراهه سرریز وجود دارد که ممکن است به صورت مصنوعی ساخته شود و یا از مسیرهای طبیعی استفاده شود و در پایان این مسیر ممکن است برای مهار فشار آب از تأسیسات استهلاک کننده انرژی آب مثل حوضچه های آرامش استفاده شود. در کنار این سرریزها ممکن است سرریزهای دیگری مثل سرریزهای خاکی به عنوان کمک به سرریز اصلی در مواقع اضطراری، طراحی و اجرا گردد.



شکل ۱۲: سرریزهای مختلف در سدهای خاکی و بتنی

آبگیرها: از مهمترین اهداف ساخت سدها، آبگیری از آن ها پس از بهره برداری جهت مصارف کشاورزی و شرب می باشد که این عمل توسط پستتاک ها و لوله های تخلیه به همراه شیرهای کنترل و تأسیسات وابسته آن ها صورت می گیرد، در سدهای خاکی جهت بازرسی و کنترل بهتر این تأسیسات معمولاً برج هایی به نام برج های میزان یا آبگیر در ابتدای این تأسیسات و در خارج از بدنه سد احداث می شود.



شکل ۱۳: آبگیر در سدهای مختلف

تونل های انحراف: قبل از شروع اجرای بدنه سد، لازم است مسیر رودخانه به طریقی منحرف شود تا محل اجرای سد کاملاً خشک باشد و جهت دست یابی به این امر معمولاً از تونل های انحراف که در دیواره های کناری ساختگاه سد حفر می شود، استفاده شده و آب به پایین دست منتقل می گردد تا کار اجرای بدنه سد دچار مشکل نگردد و پس از اجرای سد، از تونل های ذکر شده می توان به عنوان تخلیه کننده نیز در زمان بهره برداری استفاده نمود.



شکل ۱۴: نمایی از تونل های انحراف در سدهای خاکی

پرده آب بند یا کلید مهاري: این المان را که می توان المانی از بدنه اصلی سد نیز در نظر گرفت، در زیر بدنه اصلی جهت جلوگیری از نشت آب از بستر، ساخته می شود و به صورت پرده ناتراوا جلوی نفوذ آب را می گیرد.

گالری بازدید و دالان ها: در سدهای بتنی جهت انتقال زه و امکان بازرسی داخلی و در سدهای خاکی جهت بازدید و تزریق بتن، دالان ها و گالری هایی تأسیس می گردد. این دالان ها در سدهای بتنی در گاهی اوقات مکان مناسبی برای جایگیری دریچه ها و شیرآلات به عنوان شیرخانه، محسوب می شوند.

بارگذاری سدها و انواع بارهای وارده:

بارهای وارده به سدها را می توان به سه گروه کلی اصلی، ثانویه و استثنایی تقسیم نمود. بارهای اصلی، بارهایی می باشند که بیشترین اهمیت را در تمامی سدها شامل می شوند. بارهای ثانویه به بارهایی اطلاق می گردند که دارای اهمیت کمتری بوده و تنها در برخی موارد می تواند پراهمیت گردد و بالاخره در بارهای استثنایی، احتمال وقوع کمتری برای اعمال این نوع بارها وجود دارد. با توجه به دسته بندی فوق برای انواع بارها در ادامه سعی خواهد شد به عنوان مثال هایی از بارهای وارده در هر یک از انواع ذکر شده پرداخته شود.

الف) بار های اصلی:

بار آب: بار آب به صورت یک فشار هیدرواستاتیک بر سطح بالا دست سد وارد می شود که برآیند آن به صورت یک نیروی افقی قابل محاسبه می باشد. در صورتی که سطح بالا دست دارای شیب باشد، برآیند مذکور علاوه بر برآیند افقی، شامل یک برآیند قائم نیز بر روی سطح شیب دار بالا دست نیز می گردد.

بار وزن جسم سد: بار وزن جسم نیز به عنوان یک نیرو، با برآیند قائم قابل بررسی است که بر مرکز ثقل مقطع مورد بررسی وارد می گردد.

بار زه آب: به دلیل نشت آب به درون سد، یکسری بار ناشی از زه آب در بدنه به وجود می آید که ناشی از فشار منفذی آب در خلل و فرج می باشد. این بار که به صورت قائم می باشد، به طرف بالا بوده و بر خلاف بار وزن بر مقاطع مختلف وارد می شود.

ب) بارهای ثانویه:

بار رسوب: در اثر گذشت زمان، مقداری رسوب از مواد معلق موجود در آب دریاچه، در پشت سد جمع شده و یک نیروی افقی بر سطح بالا دست وارد می نماید.



بار هیدرودینامیکی موج: بار ناشی از ضربه موج به بدنه سد نیز ممکن است حائز اهمیت باشد، ولی معمولاً در طراحی سدها ممکن است تنها تأثیر امواج بر روی پوشش بالا دست بررسی شود.

بار ناشی از یخ: این نوع بار تنها در مناطق سردسیر مد نظر می باشد که به صورت یک بار متمرکز در قسمت فوقانی وارد می شود.

بار حرارتی: این نوع بار که معمولاً در سدهای بتنی مطرح می باشد، در اثر انبساط و انقباض حجمی بدنه سد، تحت تأثیر تغییر دمای محیط و یا دمای ناشی از فرآیند آگیری سیمان به وجود می آید.

اثرات اندرکنشی: این بار بیشتر ناشی از سختی نسبی بدنه سد و تغییر شکل های غیر یکنواخت سد و پی آن می باشد.

بار هیدرواستاتیک تکیه گاهی: این بار که بیشتر در سدهای قوسی و گنبدی مطرح می باشد، بار زه درونی در توده سنگ بستر می باشد.

ج) بارهای استثنایی:

بار زمین لرزه: این بار باید با بررسی تأثیر مشترک بارهای اینرسی قائم و افقی بدنه سد و آب دریاچه با یکدیگر مورد نظر قرار گیرد که تأثیر آن ها در اثر تداخل بیشتر یا کمتر می گردد.

اثرات تکنوتیکی: در اثر گودبرداری های عمیق در بستر سنگی ممکن است اشباع شدن یا بهم ریختگی به وجود آمده و در اثر حرکت های آهسته تکنوتیکی، یکسری بار بدنه اعمال گردد.

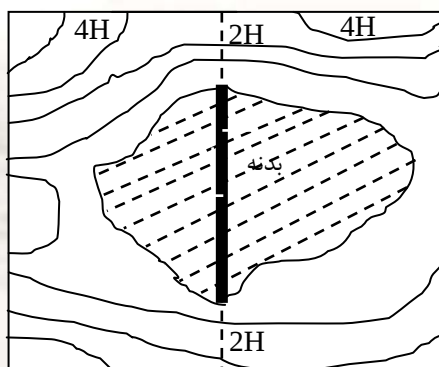
مطالعات اولیه محل احداث سد و ارزیابی ساختگاه:

با توجه به پارامترهای ذکر شده برای انتخاب نوع سد و موارد دیگری چون هیدرولوژی حوزه آبریز، حجم ذخیره، بلندای آب موجود و ... ممکن است چند محل برای احداث سد مد نظر قرار گیرد که باید با مطالعات دقیق و اساسی محل بهینه را انتخاب و با انتخاب نوع سد، مراحل بعدی را آغاز نمود.

در اولین مرحله مطالعاتی که مرحله کارشناسی اولیه می باشد، نیاز به زمان طولانی جهت انجام نمونه برداری ها، داده برداری ها و انجام آزمایشات مختلف می باشد و هدف اصلی در این جمع آوری اطلاعات، بررسی های توپوگرافیک، زمین ساختی و هیدرولوژیک است. در این رابطه می توان ابتدا به کمک نقشه های هوایی و یا نقشه های دیگری که با مقیاس های مربوطه قبلاً تهیه شده است، تحلیل و بررسی های دقیق تر را آغاز نمود که نقشه های هوایی مورد استفاده ممکن است در مقیاس های $\frac{1}{5000}$ یا بزرگتر تهیه شده باشد. در پایان مرحله شناسایی، کارشناسان با تحلیل دقیق به نتیجه گیری پرداخته و امکان پذیری طرح در منطقه را مورد ارزیابی قرار می دهند.

پس از این مرحله با کمک نقشه های توپوگرافیک دقیق مربوط به مخزن سد، یکپارچگی، آب بندی و حجم مورد نیاز مخزن مورد بررسی قرار می گیرد. بررسی و مطالعه دقیق بر روی ساختگاه سد یکی از مهمترین مطالعات اولیه بوده و نسبتاً هزینه بردار نیز می باشد. گاهی اوقات هزینه این مرحله تا ۵٪ هزینه کل طرح نیز می رسد. آزمایش های مختلف بر روی نمونه های برداشته شده از بستر در عمق های مختلف، از جمله ضریب تراوایی، مقاومت و تغییر شکل پذیری و نیز بررسی عمق سنگ هوازده و نامناسب از مهمترین مراحل این مطالعه می باشد. پس از انجام آزمایشات مربوطه، مناسب بودن و شایستگی پی با کمک پایداری، ظرفیت باربری، تغییر شکل پذیری و ناتراوایی مؤثر قابل تعیین می باشد و از نظر اقتصادی نیز، با توجه به هزینه های آماده سازی بستر و مصالح ساختمانی مصرفی نیز، قابل بررسی بوده و مناسب بودن طرح از نظر ایجاد راه دسترسی یا محدودیت محلی نیز قابل برآورد می گردد. اگر به صورت تقریبی بخواهیم یک محدوده برای انجام کاوش های صحرایی بر روی ساختگاه را مشخص کنیم، با فرض ارتفاع H برای سدی که ساخته خواهد شد می توان محدوده بررسیهای دقیق را به صورت زیر در نظر گرفت:

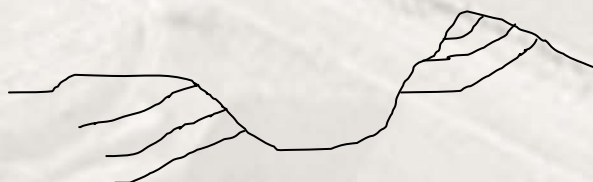
در مرحله بعدی کاوش، باید در یک محدوده کوچکتر از ساختگاه و به ویژه در پای شیروانی سد و نیز زیر تاج سد، کاوش های بسیار دقیق تر به همراه حفاری ها و گمانه برداری های بسیار عمیقی انجام گیرد و سپس در محل مخزن سد نیز حفاری ها و آزمایشات مربوطه آغاز گردد.



شکل ۱۵: محدوده کاوشهای دقیق صحرایی در زیر ساختگاه سد

در مورد کاوش های مربوط به مخزن سد در وهله اول باید با انجام حفاری های استاندارد، فشار آب منفذی در نقاط مختلف انجام گرفته و با روش مثلث بندی و فشارهای بدست آمده مربوط به چاه های پیزومتریک، خطوطی موسوم به ایزوپیز که خطوط هم فشار آب می باشند را رسم نمود. در مرحله بعد لازم است که از تمامی نقاط نمونه برداری شده و آزمایشات مختلفی از جمله آزمایشات حدود اتربرگ، جنس خاک، SPT (نفوذ استاندارد)، درصد عبوری از الک 200# و ... انجام گرفته و سپس با توجه به اطلاعات بدست آمده، نقشه های زون بندی شده در مورد نتایج هر یک از آزمایشات انجام گرفته و محل مخزن سد، تهیه و ترسیم گردد. در مورد وضعیت ژئوتکنیکی محل احداث سد نیز باید چند نکته مهم در نظر گرفته شود که عبارتند از:

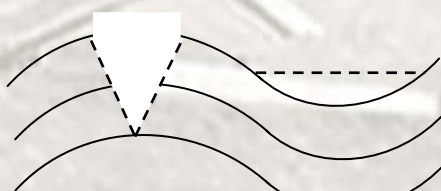
شیب لایه های سنگی دیواره ها: اگر شیب لایه های سنگی به طرف مخزن باشد، امکان لغزش وجود داشته و اگر به طرف بالا باشد، امکان نشست آب وجود خواهد داشت که باید در هر حال مورد بررسی دقیق قرار گیرد.



شکل ۱۶: وضعیت شیب لایه های سنگی در مخزن سد

بررسی خردشدگی سنگ ها و گسل ها: در صورت وجود گسل با توجه به نوع آن (نرمال یا معکوس) باید بررسی های دقیقی انجام گیرد و با توجه به زاویه شیب گسل باید تصمیم گیری مناسب صورت گیرد.

شکل دره و محل احداث سد بر روی چین خوردگی ها: همان طور که قبلاً نیز گفته شد، شکل دره از نظر انتخاب نوع سد حائز اهمیت می باشد. در اینجا باید اضافه کرد که شکل دره علاوه بر مورد فوق باید شرایط مناسب برای گیرداری کافی با بدنه سد را داشته و در مواردی که سد بر روی چین خوردگی ساخته شده باشد، باید دقت کرد که محل دره موجود بر روی چین خوردگی در اثر فرسایش در طاقدیس به وجود نیامده باشد، چرا که در این حالت به علت نیروهای داخلی بین لایه های چین خوردگی، امکان نشست فراوان آب وجود دارد، در حالی که دره در محل ناودیس باشد، بهترین حالت خواهد بود و مشکلی به وجود نخواهد آمد.

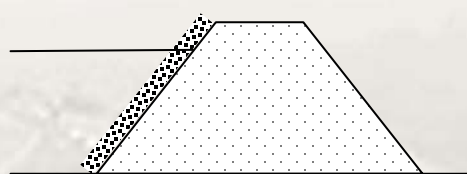


شکل ۱۷: وضعیت شکل دره بر روی چین خوردگی ها

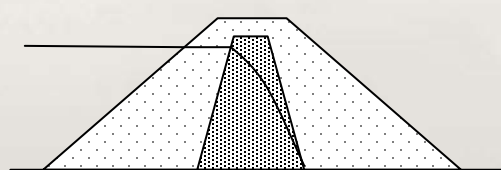


طراحی سدهای خاکی و سنگریزه ای:

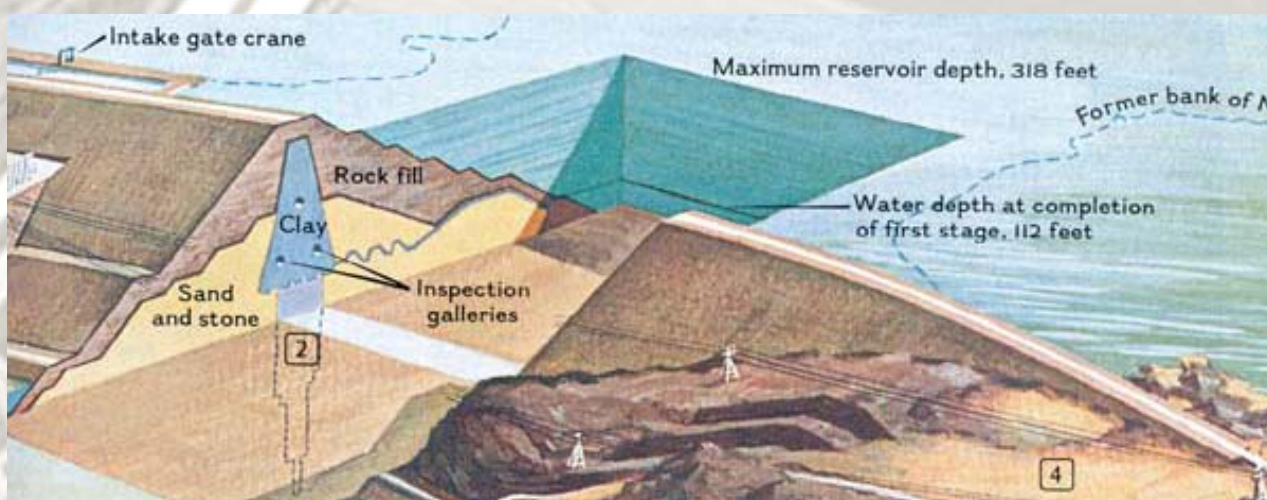
همانطور که قبلاً نیز گفته شد، سدهای ساخته شده با مصالح خاکی به دو دسته کلی سدهای خاکی و سنگریزه ای تقسیم می شوند. از نظر نحوه استفاده مصالح مختلف نیز می توان این سدها را به دو دسته همگن و غیرهمگن (هسته دار) تقسیم بندی کرد که در حالت اول تقریباً می توان گفت بدنه سد دارای یکنواختی در نوع مصالح مصرفی می باشد و جلوگیری از نفوذ آب به سد می بایست توسط یک غشاء نفوذناپذیر صورت گیرد. در نوع دوم در مواردی مصالح دارای گوناگونی بوده که مهمترین این موارد، هسته اجرا شده در سدهای هسته دار می باشد که مصالح مصرفی مربوطه از مصالح ریزدانه تری تشکیل می شود تا از نفوذ آب جلوگیری گردد.



شکل ۱۹: مقطع کلی سدهای همگن با غشاء نفوذناپذیر



شکل ۱۸: مقطع کلی سدهای غیر همگن با هسته رسی



شکل ۲۰: نمونه ای از مقطع یک سد خاکی با هسته رسی

بخشهای مهم یک سد خاکی که عمدتاً در طراحی ها ممکن است به عنوان اجزاء اصلی سد منظر قرار گیرد را می توان به شرح ذیل معرفی نمود:

هسته (Core): در سدهای خاکی غیر همگن و هسته دار به عنوان یک عضو نفوذ ناپذیر در برابر جریان آب در نظر گرفته شده و ممکن است به صورت قائم و یا مایل اجرا گردد.

پوسته (Shell): که بدنه کلی سد را شامل شده و ممکن است خود از یک، دو و یا چندین مصالح مختلف دیگر تشکیل گردد.

تاج (Crest): قسمت فوقانی بدنه سد را شامل می شود.

قشر انتقال (Bedding Layer): عمل انتقال نیرو را به زمین از سد انجام داده و ممکن است خاکی یا سنگی باشد.

شیروانی بالا دست (Up Stream Slope): شیروانی سد که در تماس با دریاچه سد بوده و تحت تأثیر امواج قرار می گیرد.

شیروانی پایین دست (Down Stream Slope): شیروانی سد که تنها در معرض باد، باران و ... قرار می گیرد.



زهکش (Drain): به منظور هدایت آب های ناشی به محل خروج مناسب در نظر گرفته می شود.

لوله جمع کننده آب زهکش (Collector Pipe): عمل هدایت آب های جمع شده توسط زهکش را به سمت یک محل مرکزی انجام می دهد.

فیلتر (Filter): لایه انتقالی که بین مصالح ریزدانه و درشت دانه و در نقاط مختلف در بین تمام اجزای سد ممکن است قرار گیرد و از شستگی مصالح ریزدانه به سمت مصالح درشت دانه جلوگیری می کند.

گالری بازدید (Gallery): عبارت است از یک تونل (معمولاً بتنی) که جهت بازدید، بازرسی، تزریق بتن، ابزار بندی و ... در زیر هسته رسی و در راستای زیر تاج سد اجرا می گردد.

پرده آب بند (Cut Off): از جنس های مختلف مثل بتن پلاستیک، رس و بنتونیت در زیر تاج سد ساخته شده و در بسترهای غیر سنگی، کار کاهش فشار آب و جلوگیری از نفوذ آن به پایین دست را انجام می دهد.

پوشش شیروانی بالا دست سد (Up Stream Slope Protection): جهت محافظت بدنه سد در مقابل شکستگی پوسته و خرابی در اثر نیروی امواج ساخته می شود و در برخی از انواع آن مثل پوشش های بتنی، در سدهای سنگریزه ای می تواند حکم آب بند را نیز اجرا نماید.

پوشش شیروانی پایین دست (Down Stream Slope Protection): که بیشتر جنبه تزئینی داشته و تنها از شستگی پایین دست در مقابل باران، سیلاب و ... جلوگیری می نماید.

پله روی شیروانی (Berm): معمولاً در سدهای مرتفع تر از ۳۰ متر جهت تردد ماشین آلات، ابزار بندی و پایداری بیشتر شیروانی ها و ... طراحی و اجرا می گردد.

ارتفاع تراز نرمال آب دریاچه (N.W.L): تراز است که سد برای آن طراحی می شود و منطبق بر تراز کف سرریز می باشد.

تراز ماکزیمم آب دریاچه (Max.W.L): تراز است که سرریز با حداکثر ظرفیت خود مشغول به تخلیه آب دریاچه می گردد.

تراز مینیمم آب دریاچه (Min.W.L): تراز است که در آن حجم آب دریاچه، حجم مرده و غیر فعال می شود.

ارتفاع آزاد (Free Board): ارتفاع سطح آب از تاج سد است و جهت جلوگیری از تأثیر منفی امواج، طراحی و اجرا می گردد.

اصول طراحی اجزای سدهای خاکی:

در طراحی اجزای سدهای خاکی، می بایست با استفاده از آیین نامه های مختلف معتبر که مورد استفاده می باشد، مشخصات بخشهای مختلف سدهای خاکی را طراحی نمود. در این راستا آئین نامه های متعددی جهت استفاده در طراحی سدهای مختلف مورد نظر می باشد که مهمترین آن ها عبارتند از:

ICOLD: (International Commission On Large Dam)

ANCOLD: (Australian National Commission On Large Dam)

IRCOLD: (IRanian Commission On Large Dam)

مشهورترین و معتبرترین آیین نامه های جهان، ICOLD می باشد. در ایران نیز از سوی کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، نشریاتی جهت برخی از ضوابط مربوط به طراحی سدها به چاپ رسیده است که می تواند در طراحی ها مد نظر قرار گیرد.

طراحی و انتخاب مصالح هسته سدهای خاکی:

برای انتخاب مصالح مربوط به این قسمت، باید مصالحی انتخاب شوند که پس از تراکم، ضریب نفوذ پذیری بسیار کمی را داشته باشند و این مصالح معمولاً عبارتند از (CL)، (SC-CL)، (SM-ML)، (ML)* و گاهی نیز (GC-CI).

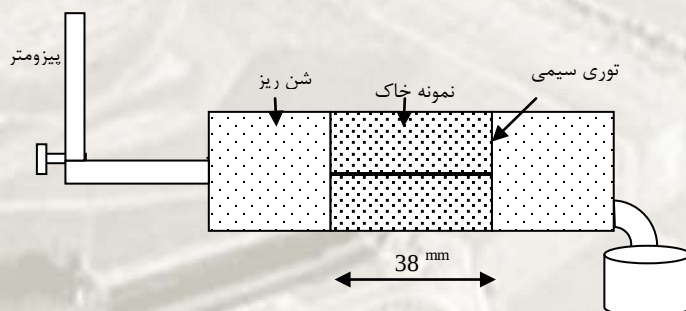


از نظر حدود خمیری نیز معمولاً سعی می شود محدوده $PI=15-25$ انتخاب گردد که گاهی اوقات این محدوده تا $PI=10-28$ نیز قابل قبول می باشد، ولی باید دقت داشت که در محل ساختمان سد جهت پیوستگی بیشتر سد با بستر می بایست از $PI=30$ استفاده کرد. منابع تأمین مصالح معمولاً از نقشه های $\frac{1}{1000}$ تهیه شده و به توصیه ICOLD، قرضه انتخابی باید حداقل $\frac{1}{5}$ برابر حجم مورد نیاز ما را دارا باشد.

بر روی نمونه های مربوط به خاک رس مصرفی باید آزمایشات درصد رطوبت، حدود اتربرگ و واگرایی انجام گیرد. یکی از آزمایشات مهم در این رابطه، همان طور که گفته شد، آزمایشات مربوط به واگرایی می باشد، چرا که در صورت واگرا بودن خاک هسته، هسته سریعاً دچار شستگی شده و سد منهدم می گردد.

خاصیت واگرایی می تواند به کمک انجام آزمایشاتی از قبیل موارد زیر تعیین و مشخص گردد:

- با توجه به بازدید صحرایی و مشاهده رودخانه های گل آلود گذرنده از محل خاک مورد نظر و یا ایجاد شیارهای باریک و عمیق بر روی دیواره های خاکی، نوع خاک واگرا قابل تأیید است.
- انجام آزمایش صحرایی و انداختن گلوله خشک شده ای از خاک مورد نظر در داخل ظرف آب، بطوریکه در صورت واگرا بودن خاک، پس از چند لحظه گلوله متلاشی و شسته می شود.
- واگرایی مصالح خاکی که بیشتر ناشی از میزان وجود یونهای سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم درون خاک می باشد، می تواند با انجام آزمایشات شیمیائی مشخص گردد.
- انجام آزمایش هیدرومتری دوبل
- انجام آزمایش پین هول که در این آزمایش مطابق شکل زیر نمونه خاک مورد نظر با حداقل رطوبت حد خمیری ورز داده شده و بعد از ۲۴ ساعت با فشار در استوانه بین مصالح دانه ای مناسب و توری فلزی قرار گرفته در طرفین نمونه قرار گرفته و با یک میله سوراخی به قطر ۱ میلیمتر در آن ایجاد می شود. با اعمال جریان آب با هدهای مختلف (از ۵۰ تا ۱۰۲۰ میلیمتر) آب در هر مرحله به مدت ۵ دقیقه از نمونه عبور داده می شود و در هر مرحله دبی آب اندازه گیری می شود. به طور کلی با گل آلود شدن آب در هر مرحله، واگرا بودن خاک تأیید شده و با باز کردن نمونه و اندازه گیری قطر جدید سوراخ معیاری جهت میزان واگرایی مشخص می شود.



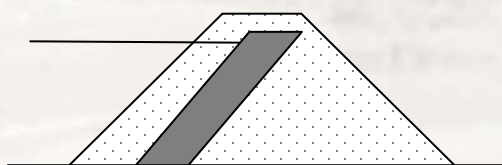
شکل ۲۱: دستگاه آزمایش پین هول جهت تعیین واگرایی خاک

هسته های رسی ممکن است به دو صورت هسته های قائم و هسته های مایل طراحی و اجرا گردند. با توجه به نوع طراحی و اجرای هسته های ذکر شده، می توان به موارد زیر به عنوان تفاوت های بین این دو نوع هسته اشاره نمود:

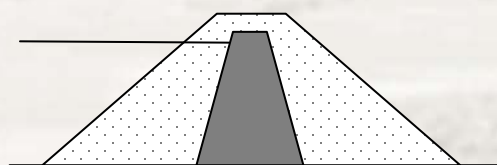
- ضخامت هسته های مایل به ویژه در کف از هسته های قائم کمتر بوده و در نتیجه مصالح مصرفی در این نوع هسته ها کمتر خواهد بود.
- در سدهای ساخته شده با هسته مایل، به دلیل شرایط خاص هندسی هسته، امکان افزایش ارتفاع هسته و کل بدنه سد پس از بهره برداری وجود دارد در حالیکه در هسته های قائم این مورد ممکن نخواهد بود.
- در هسته های مایل به دلیل امکان اجرای پوسته قرار گرفته در قسمت زیر هسته (پائین دست)، امکان ادامه عملیات خاکی پوسته ناحیه مذکور در فصل سرما و یخبندان و ادامه عملیات و اجرای هسته بر روی آن پس از فصل یخبندان وجود داشته و بدین ترتیب محدوده اجرایی احداث سد افزایش می یابد.



- در هسته های مایل با توجه به لنگر گوشه پائین دست هسته و عرض کم هسته در این ناحیه احتمال ترک خوردگی و گسیختگی بیشتر می باشد.
- با توجه به لزوم کنترل عدم عبور خط تراز آب از هسته ، این موضوع به دلیل عرض کم هسته های مایل ، در این نوع هسته ها سخت تر کنترل می گردد.



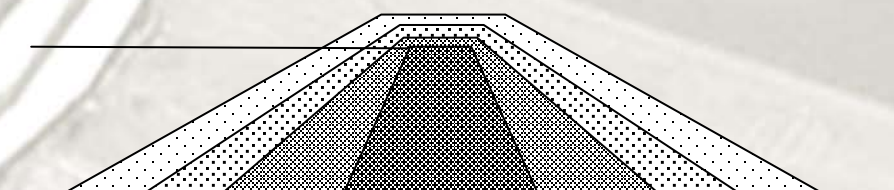
شکل ۲۳: مقطع سد خاکی با هسته رسی مایل



شکل ۲۲: مقطع سد خاکی با هسته رسی قائم

مصالص مصرفی در پوسته سد:

این مصالح با توجه به مقاومت برشی زیاد و با رعایت جوانب اقتصادی با تندترین زاویه شیب ممکن طراحی و انتخاب می گردد. بهتر است مصالح پوسته دارای نفوذ پذیری نسبتاً خوبی باشند تا فشار منفذی را پراکنده نمایند. همگن بودن مصالح پوسته مهم نبوده و با توجه به منابع موجود می تواند مورد بررسی قرار گیرد. اما در صورت استفاده از منابع قرضه ای با دانه بندی مختلف جهت تأمین مصالح پوسته ، توصیه می گردد تا دانه بندی مصالح از طرف شیروانی ها به طرف هسته از درشت تر به ریز تر تبدیل گردد.



شکل ۲۴: اجرای مصالح پوسته با کاهش قطر دانه بندی مصالح با حرکت از طرف شیروانی به سمت هسته

تاج سد:

بر اساس آئین نامه های موجود عرض تاج سد علاوه بر ایفای نقش در هندسه سد و پایداری شیروانی سد خاکی ، معمولاً باید به گونه ای طراحی شود که حداقل یک خودرو از روی آن بتواند حرکت نموده و یا به عبارت دیگر حداقل ۳ متر در نظر گرفته شود. در مواردی که تاج سد به عنوان یک پل ارتباطی و حمل و نقل (با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه احداث سد) عمل نماید، می تواند عرض های بسیار بزرگی را نیز در حد یک بزرگراه شامل گردد که در این حالت علاوه بر اعمال بارهای مربوطه در هنگام طراحی بدنه سد ، می بایست مشخصات فنی مربوط به جاده مورد نظر در تاج سد نیز مد نظر قرار گیرد.

لازم به ذکر است که طبق آیین نامه ICOLD ، به منظور محاسبه عرض تاج سد می توان از رابطه تجربی زیر نیز استفاده نمود که در آن H ارتفاع سد و W عرض تاج سد می باشد.

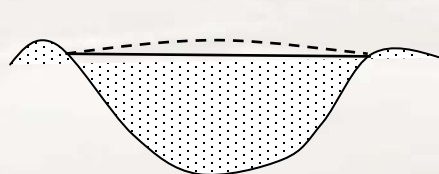
$$W = \frac{H}{5} + 3^m$$



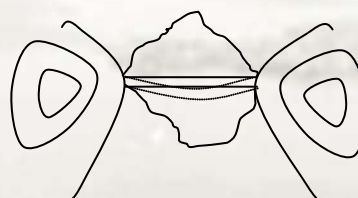
شکل ۲۵: نمایی از تاج سد در سدهای خاکی



همچنین باید دقت داشت که به دلایلی چون افت و خزش مصالح بدنه سد و نیز نشست بستر سد ممکن است تاج سد با گذشت زمان دچار افتادگی و انحنا گردد که در برخی موارد مانند سدهای سنگریزه ای (خزش گاهی اوقات با توجه به ارتفاع سد، برای هر متر ارتفاع ۰/۷۵-۰/۰۵ درصد نیز می گردد.) این انحنا بیشتر به چشم می خورد، سعی می شود با اجرای گرده ای یا انحنای معکوس تاج سد، به نحوی عمل نمود تا پس از خزش و افت مصالح و نشست بستر سد، تاج مسطح و افقی گردد. همچنین برای انتقال بهتر نیروها و کاهش مقدار لنگر در تکیه گاه ها، سعی می شود یک انحنای جزئی افقی به سمت دریاچه سد، به تاج سد در پلان داده شود.



شکل ۲۷: اجرای گرده ای تاج سد در نما



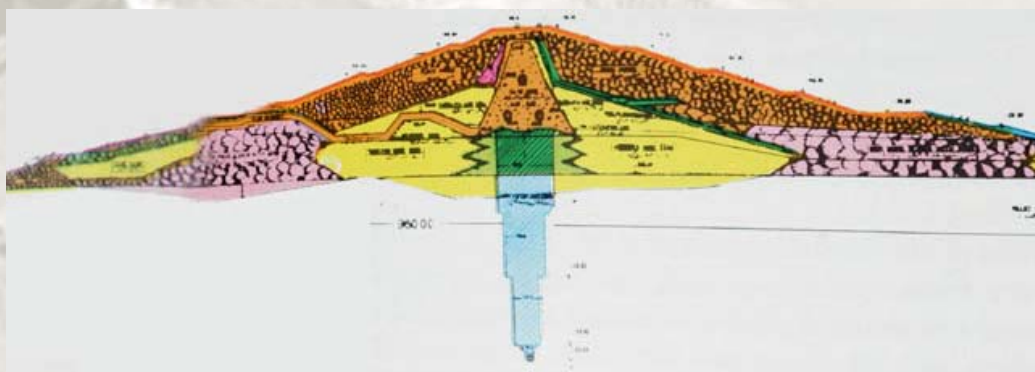
شکل ۲۶: ایجاد انحناء بسیار کم در پلان سد به سمت دریاچه

پرده آب بند و هسته معکوس :

در سدهای خاکی که بر روی بستر خاکی احداث می گردند ، به علت امکان نفوذ و نشست آب از بالادست به سمت پائین دست در زیر بدنه سد خاکی ، می بایست با طراحی و اجرای هسته معکوس و یا پرده آب بند ، مسیر حرکت آب در زیر سد را افزایش داده تا با ایجاد افت فشار ، امکان تراوش آب در پائین دست را به صفر رساند.

در هسته معکوس ، در زیر هسته سد و با شیب متقارن با آن و با مصالح مشابه مصالح هسته رسی ، طراحی و اجرا صورت می گیرد. پرده آب بند نیز که به صورت تیغه یا دیواره ای نفوذناپذیر در زیر هسته رسی اجرا می شود، معمولاً از مصالحی استفاده می شود که علاوه بر نفوذناپذیری در برابر جریان آب ، دارای انعطاف پذیری مناسب به منظور جلوگیری از ترک خوردگی و یا گسیختگی ناشی از جابجائی ها و نیروهای احتمالی باشد. در این راستا معمولاً از مصالح رسی ، بنتونیت ، بتن پلاستیک و یا ترکیبی از موارد ذکر شده استفاده می شود. به منظور اجرای پرده آب بند ، معمولاً پس از حفر دیواره مربوطه ، مصالح با قالب بندی یک درمیان اجرا تا قطعات اجرا شده به طور مطلوبی در یکدیگر ترکیب شوند.

گل بنتونیت که یکی از مصالح متداول در اجرای پرده آب بند می باشد ، در صورت جریان و حرکت دچار کاهش ویسکوزیته شده و با جریان یافتن روان تر می شود. به همین منظور علاوه بر مصرف ذکر شده در حفاری ها به ویژه حفاری چاه های ریزی نیز استفاده شده تا با ایجاد یک جریان چرخشی در چاه حفاری از طریق یک پمپ و مخزن مصالح بنتونیت خارج از چاه ، علاوه بر خنک کردن مته حفاری، انتقال مصالح کنده شدن به خارج از چاه و جلوگیری از ریزش دیواره چاه ، در صورت قطع احتمالی برق و خاموش شدن پمپ، با افزایش ویسکوزیته ، قطعات شناور در حال خروج را در خود نگه داشته و از سقوط آنها بر روی مته جلوگیری نماید.



شکل ۲۸: طراحی و اجرای پرده آب بند در بسترهای خاکی

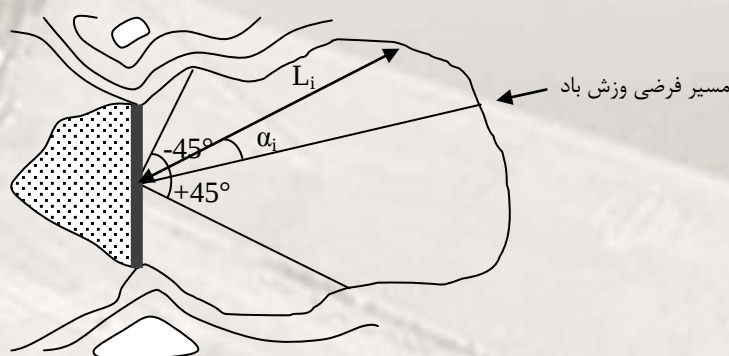


طراحی ارتفاع آزاد:

با توجه به عدم مقاومت مصالح خاکی بدنه سدهای خاکی در برابر روگذری سیل و امواج دریاچه، می بایست ارتفاع بدنه سد را به میزان مشخص و مطمئنی بلندتر از ارتفاع تراز آب دریاچه در نظر گرفت. دریاچه سد همواره در معرض امواج بزرگی می باشد که این امواج ممکن است همدیگر را تشدید و یا تضعیف نموده و در نهایت در محل بدنه سد و شیروانی بالا دست سد، یکسری بالا آمدگی و نیز نیروی ضربه به بدنه را وارد نمایند. با توجه به مشخصات امواج ذکر شده می توان تخمینی از ارتفاع آزاد که به عنوان ارتفاع مطمئنه جهت جلوگیری از عبور امواج از روی بدنه سدهای خاکی مطرح می باشد را بدست آورد. با بررسی عوامل مؤثر در ایجاد امواج در سطح دریاچه مخزن سد، دو فاکتور سرعت باد در محل و نیز طول مؤثر دریاچه به عنوان دو عامل اصلی تعیین کننده مشخصات موج خواهد بود.

طول مؤثر دریاچه یا موج گاه (Fetch):

با توجه به نقشه توپوگرافی مخزن سد و نیز سطح تراز آب و همچنین جهت های مختلفی که می توانیم برای جهت باد در نظر بگیریم، می توانیم با توجه به رابطه زیر به عنوان یکی از روابط تجربی متداول در طراحی ها و شکل مربوطه، طول مؤثر دریاچه یا F_e را محاسبه نماییم:



شکل ۲۹: پلان فرضی دریاچه سد و انتخاب مسیر فرضی وزش باد

$$F_e = \frac{\sum_{-45}^{+45} l_i \cos \alpha_i}{\sum_{-45}^{+45} \cos \alpha_i}$$

در این رابطه، ابتدا یک جهت را به عنوان جهت وزش باد در نظر گرفته که این مسیر از کرانه دریاچه سد به میانه تاج سد منتهی می شود. سپس با انتخاب یک محدوده از -45° درجه تا $+45^\circ$ درجه قبل و بعد از امتداد مذکور و تقسیم بندی این محدوده به زوایای مساوی (هرچه مقادیر تقسیم بندی کوچکتر باشد، مقدار محاسبه شده دقیق تر می شود)، از فرمول فوق الذکر جهت محاسبه طول مؤثر دریاچه استفاده می گردد. در رابطه مذکور l_i ها، زاویه های هر امتداد تا مسیر جریان باد و l_i ها، طول هر امتداد حداثی میانه تاج و لبه دریاچه می باشد. پس از محاسبه طول F_e در این مسیر، در جهت های مختلف، مسیرهای مختلفی را انتخاب کرده و برای هر یک، طول مؤثر جداگانه ای را محاسبه و در پایان، ماکزیمم مقادیر بدست آمده را به عنوان طول مؤثر دریاچه در محاسبات در نظر می گیریم.

باید توجه داشت در صورتی که از سرعت باد ۱۰۰ ساله استفاده شود، جهت محاسبات طول مؤثر دریاچه از تراز نرمال استفاده شده و اگر از سرعت باد ۱۰ ساله استفاده شود، از تراز ماکزیمم یا بحرانی استفاده می شود.

**سرعت متوسط روی سطح دریاچه:**

برای بدست آوردن سرعت باد بر روی سطح دریاچه ابتدا می بایست سرعت باد در محل دریاچه سد را از اطلاعات هواشناسی موجود و در صورت نیاز و اهمیت پروژه با اندازه گیری مستقیم بدست آورد. با توجه به اینکه سرعت مذکور مربوط به قبل از آگیری مخزن و مربوط به سرعت باد در مجاورت کف دریاچه می باشد ، می بایست با روشهای تجربی مقدار سرعت باد بر روی سطح دریاچه مخزن سد که در آینده آگیری خواهد شد بدست آورد.

بر اساس یکی از روشهای تجربی توصیه شده می توان با در دست داشتن طول مؤثر دریاچه و با استفاده از ضرائب مندرج در جدول زیر، ضریبی را به عنوان ضریب تبدیل سرعت باد در کف مخزن به سرعت متوسط باد در سطح دریاچه تعیین و از آنجا مقدار u را به عنوان سرعت متوسط باد بر روی سطح دریاچه تخمین زد.

F_e : طول مؤثر دریاچه:	۰/۸	۱/۶	۳/۲	۴/۸	۶/۴	>8
ضریب تبدیل سرعت	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۲۶	۱/۲۸	۰/۱

جدول ۱: ضرائب تبدیل سرعت باد بر روی سطح دریاچه

ارتفاع موج مشخصه (H_s):

همان طور که قبلاً گفته شده، موج های سطح دریاچه ممکن است یکدیگر را تشدید و یا تضعیف کنند که در این صورت با توجه به بررسی یک زنجیره موج، می توان با روش های آماری و ترسیم تابع توزیع نرمال مربوطه ، طبق تعریف ارتفاع موج متوسط مربوط به ۳۳ درصد از امواج را در زنجیره موج دلخواه به عنوان متوسط یا ارتفاع موج مشخصه (H_s) معرفی کرد. پس از محاسبه مقدار H_s ، دیگر مشخصات مربوط به موج نیز مطابق با روابط زیر، قابل محاسبه خواهد بود:

$$H_{\max} = 2 H_s$$

$$H_{0.1} = 1.27 H_s$$

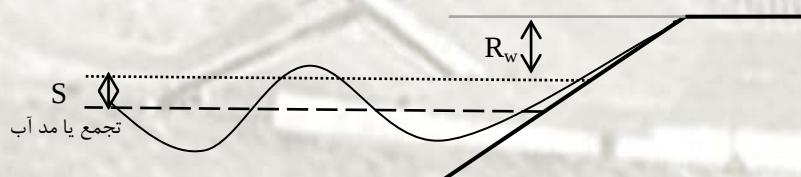
$$H_{0.01} = 1.67 H_s$$

$$H_d = 0.5 H_s \text{ (متوسط)}$$

برای محاسبه H_s ، نیز می توان از روابط تجربی مختلفی استفاده نمود که مشهورترین این رابطه ها، رابطه زیر می باشد که در این رابطه u سرعت باد در سطح دریاچه ، F_e طول مؤثر دریاچه و g شتاب ثقل می باشد.

$$H_s = 0.0026 \cdot u \sqrt{\frac{F_e}{g}}$$

پس از محاسبه ارتفاع موج مشخصه، می توان پارامترهای عمده مورد نظر در رابطه با ارتفاع آزاد و نیز پوشش شیروانی بالادست که در بخش بعد به آن پرداخته خواهد شد را محاسبه نمود. به عنوان مثال مطابق شکل زیر می توان با در دست داشتن H_s مطابق فرمول زیر مقدار R_w را محاسبه و از آنجا ارتفاع آزاد (Free Board) را با توجه به آیین نامه های طراحی محاسبه نمود:



شکل ۳۰: بالآمدگی سطح آب و برخورد امواج با شیروانی بالادست سدهای خاکی



$$R_w = r.H_s$$

در این رابطه مقدار r به عوامل مهمی چون شیب شیروانی و زبری بستگی داشته و مقدار آن از $۰/۵$ تا $۲/۵$ متغیر می باشد. در این راستا هرچه زبری سطح شیروانی بیشتر و شیب شیروانی نیز کمتر باشد، مقدار این ضریب کمتر و بالعکس با صاف بودن سطح شیروانی و افزایش شیب شیروانی، مقدار ضریب بیشتر می گردد.

پوشش شیروانی پائین دست سدهای خاکی:

شیروانی پایین دست تنها در برابر عوامل مخربی چون باران های شدید و سیلاب قرار می گیرد که نیاز به طراحی پیچیده و هزینه اجرایی فراوانی برای پوشش محافظ ندارد. به خاطر همین امر، معمولاً این شیروانی ها، با مصالح خارج از حد مجاز پوشش بالا دست و یا دیگر قسمتهای متشکل از مصالح سنگی بدنه اصلی سد و یا با پوشش های گیاهی، پوشش داده می شود. در مورد پوشش های گیاهی باید دقت کرد که از پوشش بوسیله گیاهانی با ریشه های عمیق جداً خودداری گردد تا با گذشت زمان موجب تخریب بدنه سد نشود. همچنین باید دقت گردد تا وضعیت پوشش به گونه ای باشد تا امکان نقب زنی و یا ایجاد حفره توسط حیوانات مختلف وجود نداشته باشد.



شکل ۳۱: انواع پوشش شیروانی پائین دست سدهای خاکی

پوشش شیروانی بالا دست سدهای خاکی:

شیروانی بالا دست سدهای خاکی علاوه بر موارد ذکر شده در شیروانی پائین دست، در مقابل نیروهای مخربی از جمله نیروی ضربه موج و قطعات یخ و تنه های درخت شناور نیز قرار داشته و در معرض خطر شستگی مصالح پوسته نیز قرار دارد. لذا دقت در طراحی پوشش محافظ برای این ناحیه از سدهای خاکی، بسیار حائز اهمیت بوده و گاهی اوقات اجرای آن در برخی از سدهای جهان تا ۵۰ درصد هزینه کل بدنه سد را نیز شامل می شود.

لازم به ذکر است که پوشش شیروانی بالادست سدهای خاکی همگن که فاقد هسته رسی می باشند، می بایست علاوه بر محافظت بالادست سد در برابر نیروهای وارده به عنوان یک غشاء نفوذناپذیر از عبور جریان آب از بالادست به سمت پائین دست جلوگیری نماید ولی در سدهای غیرهمگن تنها بحث محافظت از شیروانی در بالادست مطرح خواهد بود.

روش های اجرایی پوشش سد و نوع مصالح مصرفی متفاوت می باشد. با توجه به توضیحات ذکر شده، پوشش شیروانی بالادست ممکن است به یکی از روشهای زیر طراحی و اجرا گردد:

پوشش سنگی (Rip Rap):

این نوع پوشش که متداول ترین نوع پوشش می باشد تنها در سدهای غیر همگن با هسته رسی قابل اجرا بوده و به عنوان یک غشاء نفوذناپذیر قابل بررسی نمی باشد. در این راستا، پوشش سنگی از نظر اجرایی ممکن است به دو روش پوشش سنگی ریخته شده



(Dumped Rip Rap) و پوشش سنگی دستچین (Hand Placed Rip Rap) اجرا گردد. پوشش سنگی دستچین نیاز به هزینه فراوان و وقت اجرایی بیشتری داشته، ولی در عوض ضخامت طراحی آن می تواند کمتر از حالت اول باشد و به کمک کارگرهای ماهر، سنگ ها به طور منظم و با دست در کنار هم جفت و محکم می شوند. ولی در نوع اول، سنگ ها به کمک کمپرسی و دیگر وسایل حمل مصالح روی شیروانی ریخته شده و سپس به کمک ماشین آلاتی چون بیل مکانیکی و کلامشل بر روی سطح شیروانی مرتب می شوند. با توجه به در دسترس بودن مصالح و نیز دیگر عوامل، پوشش های سنگی نسبت به دیگر پوشش ها متداول تر بوده و بیشتر مورد نظر قرار گرفته است.

به منظور اجرای پوشش های سنگی ریخته شده، پس از بسترسازی به کمک مصالح شن و ماسه ای (حدود ۳۰ سانتیمتر)، باید از مصالح سنگی با محدودیت دانه بندی مناسب بر روی بستر استفاده کرد. در این راستا روابط تجربی مختلفی ارائه شده است که یکی از مهمترین فاکتورهای طراحی در روابط مختلف، وزن متوسط مربوط به ۵۰ درصد از سنگ های مصرفی یا W_{50} است که در مشهورترین رابطه تجربی محاسباتی ارائه شده می توان مقدار آنرا به شرح زیر محاسبه نمود:

$$W_{50} = \frac{K\gamma H_w^3}{h (\cot\beta (G_s - 1))}$$

در رابطه فوق، γ چگالی آب، $H_w = 1.27H_s$ ، β زاویه شیروانی، G_s چگالی خشک سنگ های مصرفی و بالاخره K ضریبی مربوط به شکل سنگ های مصرفی می باشد. مقدار K برای سنگ های تیز گوشه حدود ۲/۵ بوده و برای سنگ های درشت حاصل از حفاری حدود ۴/۲۷ می باشد.

باید توجه داشت که سنگ های مورد استفاده باید دارای دانسیته کافی بوده و سبک نباشد ($G_s > 2500 \text{ kg/m}^3$) و آزمایشات مختلف چون درصد جذب آب، واکنش با سولفات ها و مقاومت در برابر ۱۲ سیکل ذوب و انجماد بر روی نمونه های آن ها انجام و در صورت مناسب بودن مورد استفاده قرار می گیرند.

از دیگر نکات مهم در طراحی پوشش سنگی شیروانی بالادست می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- پس از محاسبه W_{50} ، مقدار W_{max} و W_{min} به عنوان ماکزیمم و مینیمم وزن سنگهای قابل استفاده در پوشش شیروانی بالادست به صورت زیر قابل تعیین می باشد:

$$W_{min} = \frac{1}{8} W_{50} \quad W_{max} = 4 W_{50}$$



شکل ۳۳: پوشش شیروانی سنگی ریخته شده



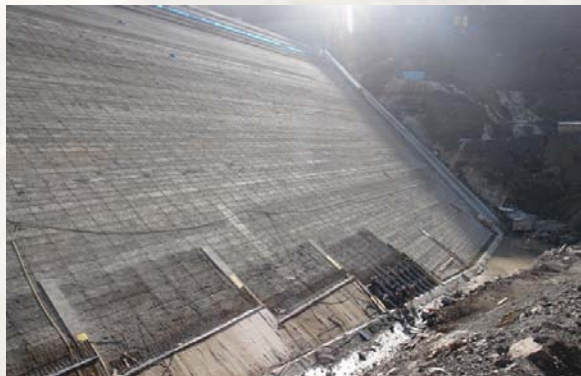
شکل ۳۲: پوشش شیروانی سنگی دستچین

پوشش بتنی:

این نوع پوشش ممکن است به کمک دال های بتنی درجا ریخته شده، دال های بتنی پیش ساخته و یا بلوک های بتنی پیش ساخته شده، اجرا شود. دال های بتنی درجا و پیش ساخته با توجه به امکان آب بندی و ایجاد سطحی نفوذناپذیر در برابر جریان آب،



می تواند در سدهای غیر همگن به عنوان غشاء نفوذناپذیر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در مناطقی که تأمین سنگهای مناسب جهت اجرای پوشش ریپ رپ مقرون به صرفه نبوده و یا غیر ممکن باشد، گاهی با ساخت بلوکهای بتنی چند وجهی از جنس بتن، پوششی شبیه به پوشش ریپ رپ در سدهای غیر همگن بوجود می آورند.

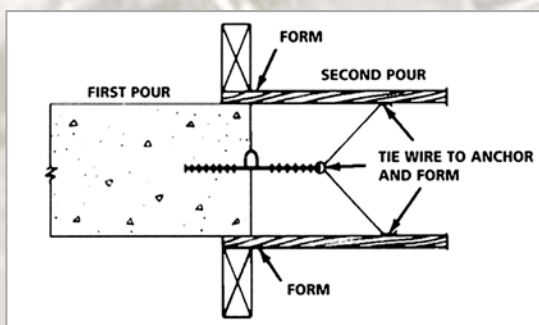


شکل ۳۴: پوشش شیروانی بالادست با استفاده از دالهای بتنی

در روش دالهای بتنی درجا بتن، پس از زیرسازی مناسب و قالب بندی لازم با رعایت درز انبساطی در بین دالها، بتن ریزی دالهای روی شیروانی به صورت یک درمیان و شطرنجی اجرا می گردد. در این حالت دالهای بتنی بوسیله داول های ساخته شده از میلگرد ساده که پس از گریسکاری درون قطعه ای از لوله پلیکا درون دالهای بتنی قرار می گیرند، علاوه بر ایجاد اتصال بین دالها، قابلیت حرکت های جزئی را تأمین می نماید. پس از اجرای دالها، درزهای موجود بوسیله مواد پرکننده مثل شن و ماسه و نیز مصالح انعطاف پذیر و در عین حال نفوذناپذیر مثل آسفالت، قیر و رزین های مخصوص پر می شود.

در دال های بتنی پیش ساخته، این دالها به صورت کام و زبانه و یا به صورت دال هایی شامل پلیت های فلزی، خارج از محل سدساخته شده و پس از زیرسازی شیروانی ها در محل نصب می شوند و سپس درزهای مربوطه با مصالح مناسب مطابق روش گفته شده در قسمت قبل پوشیده می شود.

در پروژه های حائز اهمیت به ویژه در حالتیکه از پوشش بتنی به عنوان غشاء نفوذناپذیر نیز استفاده می شود، استفاده از مصالح واتراستاپ جهت اتصال بین دالهای بتنی و جلوگیری از نفوذ جریان آب از درزهای میانی، ضروری است. این مصالح که با مقطعی توخالی و مصالح انعطاف پذیر علاوه بر نفوذناپذیری کامل در برابر آب، در برابر جابجائیهای اندک انعطاف لازم را دارند، در پروژه های عمرانی دیگر مانند مخازن بتنی آب و کانالها که نیاز به آب بندی بتن وجود دارد، پس از قرار گیری در امتداد درز بین دالها و بتن ریزی یک دال، در دال مجاور نیز قرار گرفته تا پس از بتن ریزی دال مجاور نیز، آب بندی لازم را تأمین نماید.



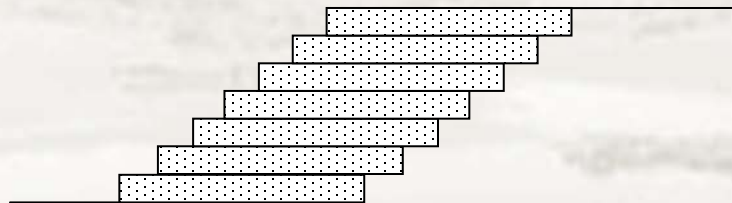
شکل ۳۶: نحوه اجرای واتراستاپ در بین دالها



شکل ۳۵: مصالح واتراستاپ با مقاطع مختلف

**پوشش های خاک-سیمان:**

این نوع پوشش ها که بیشتر در آمریکا متداول است، با پخش مخلوطی از سیمان و خاک و رطوبت بسیار کمی بر روی شیروانی های بالا دست (پخش به صورت پله ای انجام می شود) و سپس تراکم آن با غلتک های وایبره دار، تأمین می گردد.

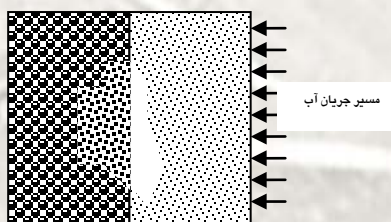


شکل ۳۷: پوشش شیروانی با روش خاک - سیمان

پوشش های دیگر: غیر از موارد ذکر شده به منظور اجرای پوشش شیروانی بالادست سدهای خاکی، روش های دیگری چون پوشش ژئوممبرین، آسفالتی، فلزی (به همراه حفاظت کاتدیک)، چوبی و نیز پوشش با ورق های اپانولی را می توان نام برد که نسبت به روش های قبل، کمتر متداول می باشند. نکته ای که باید به آن توجه داشت این است که همانطور که گفته شد، به جز پوشش های سنگی و پوشش با بلوک های بتنی، در بقیه موارد، پوشش می تواند به عنوان یک غشاء آب بند یا ناتراوا عمل نماید.

طراحی فیلتر:

فیلتر به عنوان یک خط دفاعی مطمئن به منظور جلوگیری از حمل احتمالی مصالح لایه های ریز دانه به لایه های درشت دانه مجاور تحت تاثیر گرا دیان هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرد. به بیان دیگر هرگاه دو لایه با دانه بندی نسبتاً متفاوت در کنار یکدیگر قرار گیرد و جریان آب از لایه ریز دانه به لایه درشت دانه برقرار گردد، به منظور جلوگیری از نفوذ و حرکت مصالح ریزدانه به درون فضای خالی مصالح درشت دانه لایه مجاور، لایه ای انتقالی موسوم به فیلتر نیاز است تا از این تغییرات جلوگیری نماید. در صورت عدم استفاده از فیلتر با حرکت ذرات ریز از لایه مینا به طرف لایه درشت دانه، اولاً فضای بین ذرات خاک خالی شده و احتمال تخریب و ناپایداری آن افزایش می یابد و ثانیاً با انسداد فضاهای خالی لایه دوم، جلوی عبور آب گرفته شده و فشار هیدرواستاتیکی به شدت افزایش می یابد که این موضوع خود به عنوان عامل مخربی در محدوده فوق الذکر نقش ایفا خواهد نمود. بررسی ها نشان می دهد که عمر خرابی سدهای خاکی به عواملی از جمله نشت آب، آب شستگی مصالح و پدیده Piping بستگی دارد. در سدهای خاکی با توجه به استفاده از مصالح مختلف و با در نظر گرفتن زون بندی مصالح مصرفی، استفاده از لایه انتقالی یا فیلتر اجتناب ناپذیر است. این نواحی ممکن است شامل فاصله بین زونهای هسته، پوسته، زهکش، پوشش سنگی محافظ و ... گردد. بطور کلی فیلترها می بایست به گونه ای طراحی گردند تا دو شرط نفوذپذیری و جلوگیری از آبشستگی را برقرار سازند. فیلتر می بایست دارای نفوذپذیری (Permeability) نسبتاً زیادی باشد تا از افزایش فشار هیدرواستاتیکی جلوگیری نماید. همچنین به منظور جلوگیری از شسته شدن ذرات ریز خاک لایه مینا و آبشستگی (Piping)، می بایست دارای خاصیت نگهداری باشد. فیلترهای مورد استفاده در قسمتهای مختلف سدهای خاکی ممکن است به دو روش فیلتر دانه ای و فیلترهای متشکل از مواد ژئوتکستایل مورد نظر قرار گیرند. در این بخش به بررسی نکات لازم در طراحی فیلترهای دانه ای پرداخته شده و در بخشهای آتی نیز به بررسی استفاده از مصالح ژئوسنتتیک و ژئوتکستایل به عنوان فیلتر پرداخته خواهد شد.



لایه خاک ریز دانه لایه خاک درشت دانه

شکل ۳۸: جابجایی ذرات ریزدانه با جریان آب بین دو لایه با دانه بندی متفاوت



انتخاب مصالح دانه ای (شن و ماسه ای) با دانه بندی مناسب به عنوان روشی تجربه شده در اکثر سدهای ساخته شده دارای مزایا و معایب مختلفی می باشد. در طراحی فیلترهای دانه ای می بایست نکات مختلفی را مد نظر قرار داد که از جمله این نکات می توان به موارد زیر اشاره نمود.

- مصالح فیلتر دانه ای باید دارای خاصیت ریزشی باشند. از مهمترین عوامل موثر در این رابطه عدم وجود مصالح ریز دانه و چسبیده در مصالح فیلتر است. به عنوان مثال اداره مهندسی ارتش آمریکا، میزان مجاز مصالح گذرنده از الک #200 یا کوچکتر از 0.075^{mm} را 5٪ کل مصالح فیلتر تعیین نموده است.
- جنس مصالح فیلتر باید به گونه ای باشد که در اثر حمل و نقل و جابجائی دچار شکستگی و خوردگی و در نتیجه تغییر در دانه بندی نگردد.
- همانطور که قبلاً نیز گفته شد، دانه بندی مصالح فیلتر باید به گونه ای باشد که شرایط نفوذپذیری و آبستنگی را مد نظر قرار دهد. در این راستا روابط مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله می توان به قدیمیترین این روابط که توسط ترزاقی توصیه شده است اشاره نمود. برترام (۱۹۴۰) نیز روابط مشابهی را مطابق روابط (۱) و (۲) به منظور کنترل شرایط نگهداری و نفوذپذیری ارائه نموده است:

$$\text{Piping} \quad \rightarrow \quad \frac{D_{15(filter)}}{d_{85(soil)}} \leq 4 \sim 5 \quad (1)$$

$$\text{Permeability} \quad \rightarrow \quad \frac{D_{15(filter)}}{d_{15(soil)}} \geq 4 \sim 5 \quad (2)$$

- درشت ترین مصالح مورد استفاده در فیلتر نباید از 76^{mm} بزرگتر باشد تا جداسازی دانه ها در فیلتر اتفاق نیفتد.
- یکنواختی دانه بندی مصالح فیلتر در نقاط مختلف به خصوص پس از جابجائی و ریزش بایستی حفظ گردد.
- نمودار دانه بندی مصالح فیلتر باید به گونه ای باشد تا در صورت تقسیم نمودار بوسیله هر خط افقی به دو نمودار دیگر، شرایط دانه بندی فوق الذکر به عنوان یک نمودار به عنوان فیلتر و یک نمودار به عنوان خاک مبنا برقرار گردد.
- فیلتر دانه ای می بایست قدرت پانسمن کنندگی خوبی داشته باشد تا در هنگام بروز ترک در خاک بتواند سریعاً محل ترک را ترمیم و مقابل گسترش آنرا بگیرد.

کاربرد مصالح ژئوسنتتیک در سدهای خاکی :

با گسترش تولید الیافهای نفتی، تولید مصالح ژئوسنتتیک نیز گسترش روزافزونی یافته است. ژئوسنتتیک ها منسوجات یا پوششهای نازک و انعطاف پذیری هستند که در داخل توده خاک و یا در کنار مصالح خاکی به منظور تامین اهداف مختلفی از جمله مسلح سازی، جداسازی، عایق بندی رطوبتی، مهار فرسایش، ایفای نقش صافی (فیلتر)، زهکشی و غیره مورد استفاده قرار می گیرد. شاید اولین کاربرد مصالح ژئوسنتتیک، استفاده از ورقه های تک رشته ای ژئوتکستایل در سال ۱۹۵۰، به عنوان فیلتر در کنترل فرسایش در ایالت فلوریدای آمریکا بوده است. در اواسط دهه ۱۹۶۰، هیات مهندسين آمریکا، این کاربرد را در سیستم های کنترل فرسایش و حفاظت شیب ها مودد بررسی قرار داده و در سال ۱۹۷۵ مجموعه ای از استانداردهای فنی در این رابطه را ارائه نمودند. پس از این مرحله در هلند نیز حفاظت سواحل رودخانه ها ه همین روش مورد توجه قرار گرفت. پس از رشد کاربرد ژئوتکستایلها از اواخر دهه ۱۹۷۰ در آمریکا به عنوان فیلتر، در سال ۱۹۷۷ اولین کنفرانس ژئوتکستایل ها برگزار و کاربرد این مصالح مورد توجه و پذیرش بسیاری از کارشناسان و مهندسين قرار گرفت. در این راستا می توان به کاربردهای فراوانی از این مصالح در صنعت سد سازی اشاره نمود که تعدادی از آنها در جدول (۱) ذکر گردیده است.



نام کشور و نام سد	ارتفاع سد از پی	سال ساخت	مکان و کارکرد فیلتر	سطح فیلتر (متر مربع)
Loy yang/ استرالیا	۱۷ متر	۱۹۷۹	در زیر پوشش ریپ رپ (در سرآب)	۲۹۰۰
Nove mlyn/ چکسلواکی	-	۱۹۷۴-۷۹	فیلتر داخلی بین هسته و پوسته شنی	۱۰۳۷۲
Frauenau/ آلمان فدرال	۸۶ متر	۱۹۷۶-۸۰	حفاظت رویه پایاب از فرسایش داخلی و حفاظت زهکش عمودی	۲۷۰۰۰
Longefan/ فرانسه	-	۱۹۷۷	پوشش چاه فشار شکن در سرآب	-
Verney/ فرانسه	۴۲ متر	۱۹۸۰-۸۳	حفاظت از زهکش افقی	۶۲۰۰۰
Dharjo dam/ هندوستان	-	۱۹۸۱	حفاظت چاه فشار شکن و پایاب از فرسایش داخلی و نیروهای ناشی از تراوش	۴۵۰
Simbirizzi/ ایتالیا	۲۲ متر	۱۹۸۳-۸۵	حفاظت و نگهداری پایاب	۴۰۰۰۰
Goronyo/ نیجریه	۲۱ متر	۱۹۸۰-۸۳	زهکش پایاب و لایه فیلتر افقی	۳۰۰۰۰۰
Elandspruit/ آفریقای جنوبی	۹۵ متر	۱۹۷۸-۸۵	در زیر پوشش ریپ رپ و اطراف زهکش های داخلی و خروجی	۱۴۵۰۰۰
Copland/ انگلستان	۱۹ متر	۱۸۷۹	اراف زهکش جهت حفاظت	۶۶۰۰
Sam Rayburn/ ایالات متحده	-	۱۹۸۲	تعمیر و بازسازی بستر پوشش ریپ رپ	-

جدول ۲: تاریخچه کاربرد مصالح ژئوتکستایل در برخی از سدهای خاکی جهان

انواع مصالح ژئوسنتتیک و کاربرد آنها:

مصالح ژئوسنتتیک ممکن است به صورت منسوج یا بافته شده (Wovens) و غیر منسوج یا بافته نشده (Non-Woven) تولید و مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که مصالح ژئوسنتتیک از نظر شیمیایی ترکیبی ساخته شده از انواع مواد پلیمری از جمله پلی اتیلن (PE)، پلی پروپیلین (PP)، پلی وینیل کلراید (PVC) و پلی استر (PET) می باشند و مواد طبیعی به دلیل فساد پذیر بودن، کاربردی در تولید مصالح ژئوسنتتیک ندارند. از نظر انواع تولیدات و کاربردهای مختلف نیز می توان به مصالح ژئوسنتتیکی از ژئوممبرین، ژئوگرید، ژئو تکستایل، ژئونت، ژئوسل، ژئوسنتتیک رسی، ژئو کمپزیت، ژئوفوم و ژئوپایپ، اشاره نمود که دو مورد ژئوممبرین و ژئوتکستایل به عنوان پرکاربردترین مصالح ژئوسنتتیک مطرح می باشند.

ژئوممبرین: ورقه های انعطاف پذیر با نفوذ پذیری بسیار کم (در حدود صفر) هستند که عموماً جهت آب بندی مخازن، کانالها، حوضچه ها و سایر سازه های مشابه مورد استفاده قرار می گیرند. در ابتدا برای ساخت این ماده از رزین ها استفاده می شد اما امروزه پی وی سی و پلی اتیلن بیشترین کاربرد را برای تولید آن دارند.

ژئو تکستایل ها: صفحات نفوذ پذیری هستند که از الیاف پلی پروپیلین و یا پلی استر و به دو صورت کلی بافته می شده (تک رشته ای و چند رشته ای) و بافته نشده ساخته می شود. در ژئوتکستایل های بافته شده رشته های الیاف با تکنولوژی بافت منسوجات بشکل مختلف بافته می شوند در حالی که در نوع بافته نشده توده ای از الیاف با استفاده از حرارت، چسب های شیمیایی یا فشار مکانیکی به هم اتصال یافته و بدین ترتیب انواع مختلف ژئوتکستایل ها تولید می گردند. این مواد به علت نفوذپذیری مناسب و بافت ریز قابل کنترل، عموماً به عنوان فیلتر مورد استفاده قرار می گیرند.



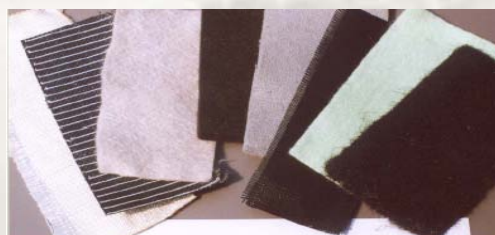
شکل ۴۰: نمونه هائی از ورقهای ژئوگرید



شکل ۳۹: نمونه هائی از ورقهای ژئو ممبرین



شکل ۴۲: نمونه هائی از ورقهای ژئونت

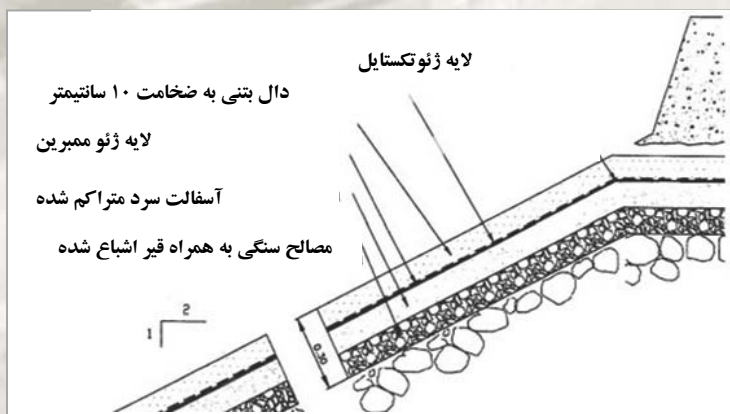


شکل ۴۱: نمونه هائی از ورقهای ژئوتکستایل

از مهمترین مزایای کاربرد ژئوتکستایل به جای فیلترهای دانه ای می توان به برتری و سرعت از نظر اجرا ، بهینه بودن از نظر اقتصادی ، مقاومت شیمیائی ، کاربری آسان ، عدم تغییر در دانه بندی ، ضخامت کم ، حمل و نقل آسان و عمل بهتر در برابر خاکهای واگرا اشاره نمود. همچنین می توان به مقاومت کششی مناسب و مقاومت در برابر مواد اسیدی (در کوتاه مدت) اشاره نمود. فیلترهای دانه ای علاوه بر مشکلات متعدد در تهیه و اسقرار در محل ، دارای نوسانات زیادی در مقابل فشار آب منفذی بوده که این موضوع در ژئو تکستایل ها مشاهده نمی شود.

لازم به ذکر است که ژئو تکستایل ها در دماهای پائین ، ترد و شکننده بوده و ممکن است دچار ترک خوردگی شوند و در مجاورت مواد اسیدی با PH بالا در بلند مدت زیر شوند. لذا لازم است در شرائط محیطی محل استفاده از ژئوتکستایل ها ، می بایست آزمایشات کافی بر روی نمونه ها صورت گیرد.

مصالح ژئوتکستایل و ژئوممبرین به عنوان دو مصالح پر مصرف ژئوسنتتیک می تواند در اجرای پوشش شیروانی بالادست سدهای خاکی به صورت تکی و یا ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان نمونه در شکل زیر که جزئیات اجرایی یک شیروانی بالادست سد خاکی که با صفحات بتنی اجرا می گردد نشان داده شده است ، به منظور جلوگیری از شسته شدگی مصالح بستر و نیز به منظور افزایش پایداری و مقاومت پوشش اجرا شده می توان از یک لایه ژئوممبرین استفاده نمود و در کنار آن نیز با استفاده از یک لایه ژئوتکستایل مقاومت و پایداری بستر و لایه ژئوممبرین را نیز افزایش داد.



شکل ۴۳: جزئیات اجرایی پوشش محافظ شیروانی بالادست با صفحات بتنی و مصالح ژئوسنتتیک



با توجه به جزئیات فوق الذکر ، اجرای لایه های پوشش از دشواریهای خاص خود تبعیت می نماید. در این راستا می توان به روش اجرا شده مطابق تصاویر زیر عمل نمود که به منظور اجرا و تسطیح لایه بستر ، مواد شنی توسط کامیونهای کمپرسی و از تاج سد در امتداد دامنه تخلیه می شوند و سپس به کمک دستگاه های بلدوزر پهن شده و شیب مورد نیاز را به خود می گیرند. دستگاه های تسطیح کننده با استفاده از یک سیستم لیزر چرخشی و با کمک بلدزرها مجهز به با سنسورهای لازم که موقعیت تیغه دستگاه را به رانندگان مشخص می نماید ، عملیات آماده سازی بستر را انجام می دهند. عملیات تراکم نیز با کنترل مستمر تراکم با تجهیزات دقیق از جمله گلما دنیس متر صورت می گیرد. در مناطقی که نمی توان از غلطکهای سنگین در عملیات تراکم استفاده نمود ، با استفاده از یک صفحه لرزان سوار شده بردستگاه حفاری هیدرولیک ، متراکم می شوند. پس از مراحل فوق لایه های دیگر با استفاده از امولسیون قیر اشباع شده و مخلوط آسفالت سرد اجرا می گردد و پس از آن لایه های ژئوتکستایل و ژئوممبرین با تجهیزات خاص مورد نیاز و دستگاه های جوشکاری مختص به مصالح ژئوممبرین اجرا می شود.



شکل ۴۵: اجرای لایه ژئوتکستایل بر روی بستر آماده شده



شکل ۴۴: اجرا و تسطیح بستر پوشش محافظ



شکل ۴۶: اجرای لایه ژئوممبرین بر روی لایه ژئوتکستایل اجرا شده

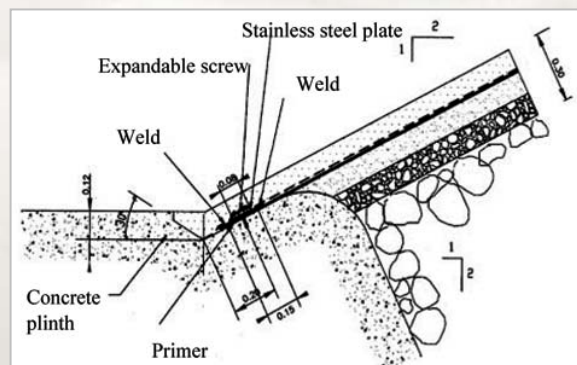
پس از اجرای لایه های ژئوسنتتیک ، می بایست دریای دامنه و در کل امتداد شیروانی لایه های مذکور با استفاده از پاشنه بتونی تثبیت و تقویت شده و با پی شیروانی محکم می شود. این اتصال بر روی سطح بتونی نیز مرتبط می گردد و سپس با صفحه های فلزی فولادی ضد زنگ درون پاشنه سنگی چفت می شوند.



به منظور کنترل جوش خوردگی لایه های ژئوممبرین و اطمینان از عدم نشت آب از لایه مذکور، از دستگاهی شامل یک چرخ اندازه گیری که شامل ۲۴ سنسور فراصوتی می باشد، استفاده می شود. اطلاعات هر کدام از این سنسورها به یک کامپیوتر منتقل شده و یک نرم افزار ویژه اطلاعات دریافتی را آنالیز می نماید. اگر نتایج حاصله نشان دهنده وجود خرابی و یا نواقص در بخش جوش خوردگی باشد، یک قطعه عریض تر با حداقل عرض 20 cm در اطراف ترک قرار می گیرد و پس از گرم کردن جوش خوردگی و کنترل دوباره صورت می گیرد.



شکل ۴۸: کنترل جوش خوردگی لایه ژئوممبرین



شکل ۴۷: جزئیات اتصال لایه های در پای شیروانی

موارد مهم در طراحی اجزای سدهای خاکی:

- ۱- در کنار لحاظ دانستن مسائل اقتصادی، پهنای هسته را حتی المقدور باید افزایش داد.
- ۲- مصالح ریزدانه پوسته، در مجاورت هسته اجرا گردند و مصالح درشت دانه در نزدیکی شیروانی ها قرار گیرند، به طوری که هر چه به شیروانی ها نزدیکتر می شویم، مصالح رفته رفته درشت تر گردند.
- ۳- در مواردی که در دو ناحیه مختلف تغییر قابل توجه مصالح وجود داشته باشد، با ایجاد ناحیه های انتقالی یا میانی اثرات، سطوح تماسی مابین این نواحی را تعدیل می نماییم.

انواع ترک ها در سدهای خاکی:

ترک ها در سدهای خاکی را می توان به ترک های قائم عرضی، ترک های قائم طولی و ترک های افقی تقسیم بندی نمود. ترک های عرضی در امتداد رودخانه رخ می دهد و خطرناک ترین نوع ترک می باشد. طبق آمار این نوع ترک ها در سدهای کوتاه تر از ۳۰ متر و یا در ارتفاع کمتر از ۳۰ متر سدهای بلندتر به وجود می آید. یکی از دلایل مهم ایجاد این نوع ترک ها، نشست نا همگون بستر و عدم توجه به آن می باشد. از نظر نوع خاک نیز، خاک های با $PI < 15$ مخصوصاً اگر خشک کوبی شده باشند، جابجایی های اندکی را می توانند کنند و فوراً ترک می خورند. البته باید توجه داشت که $PI < 25$ نیز به دلیل مشکلات اجرایی مناسب نمی باشد. ترک های قائم طولی از نظر آب گذاری خطری ندارند، ولی شکل هندسی سد را نا همگون و کج می نمایند. یکی از دلایل مهم ایجاد این نوع ترک ها، عدم تراکم مناسب در پوسته و یا جابجایی بین پوسته و هسته در اثر تخلیه سریع می باشد. البته در مواردی نیز تورم و یا افت حجمی، بی تأثیر نیست.

ترک های افقی نیز ترک هایی هستند که اغلب دیده نمی شوند و آثارشان، از زه آب شدید و تخریب برای ما مشخص می گردد. یکی از دلایل آویزان شدن هسته از پوسته، همین نوع ترک ها می باشد که گاهی در دره های تنگ، مسئله آویختگی را به وجود می آورند.



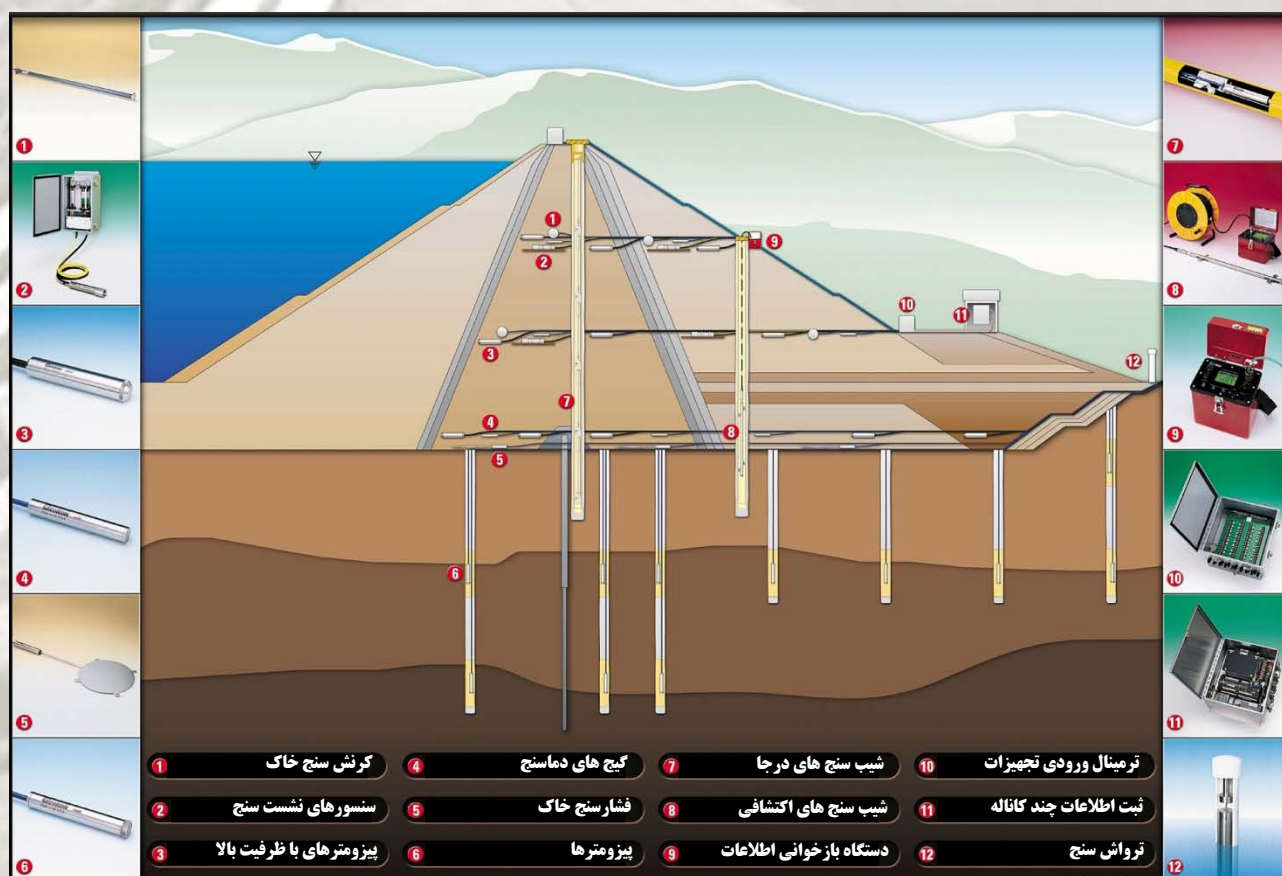
ابزاربندی در سدهای خاکی:

جهت کنترل رفتار فیزیکی، مکانیکی و ... مربوط به المانهای مختلف سدهای خاکی در مدت اجرا و زمان بهره برداری، نیاز به نصب تجهیزات و ابزار آلای در نقاط مختلف سد می باشد که این ابزار آلات، ابزار دقیق و به نصب این ابزار در بدنه سد، ابزار بندی (Instrumentation) گویند.

یکی از مهمترین ابزار آلای که مورد استفاده قرار می گیرد، پیزومترها (Piezometers) می باشند که با زدن گمانه هایی به عمق مورد نظر که حداقل آن از نظر تجربی ۱۰۱ میلیمتر و از نظر آیین نامه ۷۵ میلیمتر باید باشد، نصب می گردند. نصب پیزومترها بسیار دقیق بوده و با توجه به نوع پیزومترهای مورد استفاده، دقت بیشتری مورد نیاز می باشد.

از انواع پیزومترها می توان لوله ایستایی (Stand Pipe)، پیزومترهای شامل هوا یا گاز (Pneumatics) و پیزومترهای الکترونیکی یا ارتعاشی (Vibrating Wire) را نام برد.

علاوه بر پیزومترها، ابزار آلات دیگری مثل نشست سنج ها (Settlement sensors)، شیب سنج ها (Inclinometers)، گنج های دماسنج (Temperature gage)، فشارسنج خاک (Earth Pressure Cells)، کرنش سنج خاک (Soil Strain meters)، سیموگراف یا لرزه نگارها (Seismograph)، ایستگاه های کنترل با دستگاه های نقشه برداری (Bench Mark) و ... نیز وجود دارد که مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل زیر نحوه استقرار برخی از ابزارآلات ذکر شده در سدهای خاکی به صورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۴۹: ابزاربندی در سدهای خاکی

نکات مهم در اجرای سدهای خاکی:

پس از تجهیز مقدماتی کارگاه، باید مراحل زیر را جهت اجرای سد انجام داد:

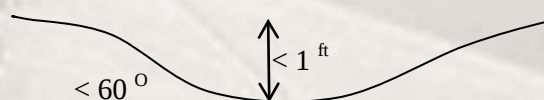


توسعه قرضه های مصالح: عملیات توسعه قرضه های مصالح شامل باز کردن قرضه ها و معادن و نصب و راه اندازی ماشین آلاتی از قبیل سنگ شکن، تسمه نقاله و غیره می گردد. همچنین باید راه های دسترسی به حمل بین قرضه های گوناگون و ساختمان سد احداث گردد و ماشین آلات حمل را نیز تجهیز نمود.

آماده سازی پی و بستر: این عملیات شامل عملیات انحراف رودخانه است که می تواند همزمان با مرحله قبل انجام گیرد. این عملیات معمولاً با احداث تونل انحرافی در یکی از تکیه گاه ها که بعداً آبگیر سد در آن جایدهی می شود، انجام گیرد. در این مرحله آماده سازی بستر انجام خواهد شد.

در صورتی که سد دارای هسته معکوس، پرده آب بند و یا گالری باشد، پس از اجرای این موارد به آماده سازی بستر باید پرداخت. منظور از آماده سازی بستر، فراهم آوردن سطحی است که عاری از قسمت های هوازده و بخش های ریشه دار و نیز عاری از شیب های تند و زه آب باشد و درز و ترک های تند و لق نیز باید برطرف گردد.

همانطور که قبلاً اشاره شده است، بسترها ممکن است خاکی و یا سنگی باشند. در بسترهای سنگی باید دو مورد را مد نظر قرار داد. یکی بستر هسته که باید کلیه سنگ های هوازده تخلیه گردد که این سنگ ها معمولاً بیش از ۱/۵ متر ضخامت دارند و سنگ های لق نیز باید برداشته شده و پله ها و یا شیب های بیش از ۶۰ درجه یا ارتفاع ۱ فوت نیز برطرف گردند.



شکل ۵۰: حد مجاز گود افتادگی های بستر

برای از بین بردن لقی ها، باید تزریق تحکیمی صورت گیرد، درزهایی که عرض کمتر از ۲ اینچ دارند، باید تا عمق ۳ برابر عرضشان باز شده و با دوغاب سیمان پر شوند. گود افتادگی هایی که در سطح بستر وجود دارند، ممکن است مانع تراکم مطلوب در هنگام اجرای بدنه شوند، لذا این گود افتادگی ها باید به کمک بتن پرکننده برطرف گردند و باید دقت کرد که لبه های این بتن ریزی نباید از ۱۵ سانتیمتر یا ۶ اینچ کوچکتر شود و بهتر است با یک زاویه ۴۵ درجه ختم گردد.

بستر زیر هسته همچنین باید عاری از آب بوده و از هر گونه مصالح خاکی و ریز دانه در سطح بستر پاک گردد. در زیر بستر پوسته نیازی به تزریق تحکیمی یا جلوگیری از نشت آب وجود ندارد و نیازی به تمیز نمودن بستر با آب و برس سیمی و هوای فشرده نمی باشد.

در بسترهای خاکی، آماده سازی راحت تر است. در صورتی که از پرده آب بند استفاده شده باشد، این دیواره را تا حدود ۱ متر بالا می آورند تا در درون هسته قرار گیرد. باید رأس پرده آب بند عاری از هرگونه مصالحی مثل شن و ماسه باشد و ابتدا با قشری از رس پوشیده و متراکم گردد. کلیه خاک هایی که دارای مواد آلی هستند و یا کلیه نیزارها باید تخلیه شوند و عملیات تراکم خاک بستر نیز انجام پذیرد.



شکل ۵۱: آماده سازی بستر



ساخت خاکریز یا سنگریزه و کنترل آن: این مرحله به موازات پیشرفت جایگذاری و ساخت هسته و پوسته ها، نصب ابزار دقیق در هسته و پوسته ها انجام می گیرد. عملیات اجرایی خاکریز و یا سنگریز با ساخت محافظ شیروانی بالا دست به اتمام می رسد. اجرای بدنه سد به روش پله پله انجام شده و قبل از هر چیز، یک لایه رس با $PI > 25$ (حدود $PI = 30$) به عنوان عامل چسبندگی هسته و بستر در زیر آن اجرا می گردد که مسلماً این مشخصات عملیات اجرایی سد را به شدت دشوار می کند. در مرحله بعد ابتدا قشر هسته با ضخامت حداکثر ۲۰ سانتیمتر اجرا و پس از تأمین رطوبت اپتیمم جهت دستیابی به تراکم ماکزیمم تا حد تراکم مطلوب با غلتک های لاستیکی مترکام می شوند. لازم به ذکر است که جهت ایجاد شرایط پیوند مناسب با لایه بعدی هسته رسی در مرحله آخر تراکم هر لایه هسته رسی، لایه مذکور با غلتک پاچه بزی، غلتک زده می شود تا با ایجاد سطحی ناهموار، پیوستگی بیشتری بین لایه های هسته رسی ایجاد شود.



شکل ۵۲: استفاده از غلتک های پاچه بزی در آخرین مرحله تراکم هر لایه هسته رسی

پس از اجرای چند لایه از مصالح هسته، زهکش و فیلتر اجرا می گردد و پس از آن یک قشر پوسته اجرا می شود که ضخامت اجرای آن تا حدود ۶۰ سانتیمتر نیز بلامانع می باشد. در مورد پوسته نیز جهت تراکم از غلتک های دینامیکی استفاده می شود و گاهی اوقات رفت و آمد ماشین آلات سنگین در حال رفت و آمد نیز می تواند به عنوان متراکم کننده در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است با توجه به مشخصات مصالح پوسته، گاهی اوقات عملیات تراکم این قشر با روش غرقابی انجام می گیرد.



شکل ۵۳: مراحل اجرایی بدنه سدهای خاکی

ساخت تأسیسات کمکی و جانبی: این مرحله ممکن است شامل ساخت سرریز، حوضچه های آرامش، برج آبگیری و تأسیسات مهار کننده مشابه می باشد. این عملیات همچنین شامل اجرای کارهای تکمیلی در روی تاج سد، زهکشی، جمع آوری آب های سطحی، دیوار موج گیر و غیره می گردد.



شکل ۵۴: ساخت تأسیسات و تجهیزات جانبی

بررسی پایداری شیروانی های سدهای خاکی:

یکی از مهمترین مراحل طراحی سدخاکی بررسی پایداری شیروانی های بالا دست و پایین دست سد مورد نظر می باشد. بررسی پایداری شیروانی ها باید در حالت های مختلف مورد بررسی قرار گیرد و در هر حالت با روش مورد نظر طراح، بدترین حالت برای لغزش در نظر گرفته شده و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ذکر شده در آئین نامه مربوطه کنترل گردد.

به طور کلی می توان سه حالت مختلف سد در حالت اجرا، سد در هنگام بهره برداری و بالاخره سد در هنگام تخلیه سریع را جهت تحلیل پایداری شیروانی در نظر گرفت. در حالت اول، به علت عدم وجود جریان آب و در نتیجه عدم وجود فشار منفذی مربوطه، تأثیر این عامل در طراحی در نظر گرفته نمی شود ولی در حالت دوم با توجه به سطح زه آبی می توان فشار منفذی آب را در هر نقطه بدست آورد و بر آن اساس، محدوده مصالح خشک و اشباع را بدست آورده و محاسبات لغزش را بر آن اساس انجام داد. در حالت تخلیه سریع نیز به دلیل ریزدانه بودن خاک مصالح هسته رسی، سطح زه آبی در داخل هسته تقریباً بدون تغییر مانده و این سطح در پوسته بالا دست کاهش پیدا می کند و وزن آب پشت سد نیز بر خلاف حالت دوم، حذف می گردد.

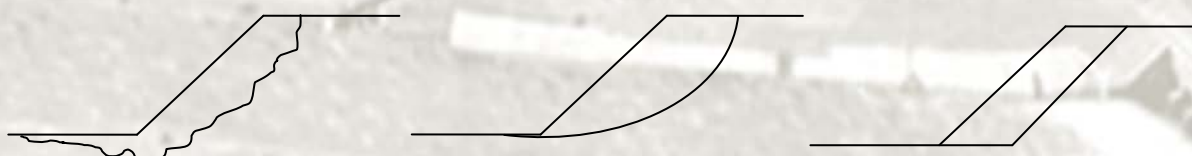


شکل ۵۷: سد در حال تخلیه سریع

شکل ۵۶: سد در حال بهره برداری

شکل ۵۵: سد در حال اجرا

همان طور که می دانیم، لغزش در شیروانی ها ممکن است به صورت کلی به لغزش نامحدود، لغزش دایره ای و لغزش عمومی تقسیم بندی گردد. در حالت اول، یک لایه از شیروانی خاکی به دلایل مختلف ممکن است به موازات سطح فوقانی خود دچار لغزش شود و در حالت دوم، لغزش در یک سطح استوانه ای صورت گرفته و بالاخره در حالت آخر، سطح نامشخصی به عنوان سطح لغزش مشاهده می شود.



شکل ۶۰: لغزش نامشخص

شکل ۵۹: لغزش دایره ای یا استوانه ای

شکل ۵۸: لغزش نامحدود یا موازی



در شیروانی سدهای خاکی، می توان لغزش را تقریباً دایره ای و بر روی یک سطح استوانه ای در نظر گرفت که خود ممکن است به سه حالت مختلف رخ دهد. در حالت اول، دایره لغزش بر روی سطح شیروانی قرار گرفته و به پای شیروانی نمی رسد که به آن لغزش روی شیروانی می گویند. در حالت دوم، لغزش درست از پای شیروانی گذشته و به آن لغزش پای شیروانی می گویند و بالاخره در حالت آخر، دایره لغزش قسمتی از بستر را نیز در بر می گیرد که به آن لغزش عمیق می گویند. همان طور که مشخص است لغزش نوع اول و دوم در مواردی اتفاق می افتد که مصالح بستر دارای مقاومت زیادی باشد. مثلاً در بسترهای سنگی، نوع لغزش حتماً یکی از دو حالت اول خواهد بود. در مواردی که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح بدنه سد و بستر به هم شبیه باشند، لغزش ممکن است از نوع عمیق نیز باشد که در این حالت دایره لغزش قسمتی از بستر را نیز در بر می گیرد.



شکل ۶۲: لغزش عمیق



شکل ۶۱: لغزش پای شیروانی



شکل ۶۰: لغزش روی شیروانی

ضریب ایمنی در لغزش شیروانی ها:

مهمترین قسمت محاسبه پایداری شیروانی ها، کنترل ضریب اطمینان لغزش می باشد که در کل می تواند به صورت زیر تعریف گردد:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

که در این رابطه τ_f عبارت از مقاومت متوسط خاک بوده، τ_d نیز تنش برشی متوسط بسیج شده در سطح لغزش بحرانی می باشد. با توجه به دو فاکتور ضریب چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی ϕ ، می توان مقاومت برشی خاک را از رابطه زیر بدست آورد:

$$\tau_f = C_f + \delta \cdot \tan \phi_f$$

که در این رابطه نیز C_f چسبندگی خاک مورد نظر و ϕ_f زاویه اصطکاک داخلی و δ تنش قائم و متوسط در روی لغزش بحرانی است. تنش برشی متوسط بسیج شده جهت لغزش شیروانی نیز می تواند به صورت مشابهی معادل سازی شود که عبارت خواهد بود با:

$$\tau_d = C_d + \delta \cdot \tan \phi_d$$

که C_d و چسبندگی و ϕ_d زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده در سطح لغزش می باشد و با توجه به رابطه اول خواهیم داشت:

$$F_s = \frac{C + \sigma \cdot \tan \phi}{C_d + \sigma \cdot \tan \phi_d}$$

$$F_c = \frac{C}{C_d} \qquad F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

$$F_c = F_\phi \Rightarrow f_c = f_\phi = f_s$$

با توضیحات ذکر شده، هنگامی که F_s برابر یک می گردد، سطح مورد نظر در آستانه لغزش قرار داشته و آماده لغزش می باشد، پس با توجه به لزوم کسب اطمینان، مقدارمی بایست F_s بزرگتر از یک باشد و معمولاً F_s را بزرگتر از ۱/۵ در نظر می گیرند. ولی در سدهای مختلف، با توجه به شرایط، نوع سد و مصالح مصرفی، توسط آیین نامه های مربوط از جمله ICOLD، مقادیر مختلفی پیشنهاد شده است.



روش های محاسباتی پایداری شیروانی ها:

همان طور که گفته شد، با توجه به مقادیر تنش برشی متوسط بسیج شده در سطح لغزش و مقاومت برشی متوسط خاک، می توان ضریب اطمینان را محاسبه نمود. در ادامه سعی خواهد شد روش هایی از نحوه محاسبه چند نمونه از لغزش های احتمالی را بیان کنیم. لازم به ذکر است اطلاعات کامل مربوط به روش های مذکور در کتابهای مکانیک خاک موجود است که لازم است جهت اطلاع بیشتر به اینگونه کتابها مراجعه شود.

پایداری شیروانی نامحدود: می توان لغزش نامحدود در یک سطح با زاویه α با افق را مورد نظر قرار داد. در حالتی که فشار حفره ای صفر باشد، ضریب اطمینان را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$W = \gamma \cdot L \cdot H$$

$$W \cdot \cos \alpha = \gamma \cdot L \cdot H \cdot \cos \alpha$$

$$W \cdot \sin \alpha = \gamma \cdot L \cdot H \cdot \sin \alpha$$

$$\tau = \frac{\gamma \cdot L \cdot H \cdot \sin \alpha}{L / \cos \alpha} = \gamma \cdot H \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\sigma = \frac{\gamma \cdot L \cdot H \cdot \cos \alpha}{L / \cos \alpha} = \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha$$

$$\tau_d = C_d + \sigma \cdot \tan \phi_d \Rightarrow \tau_d = C_d + \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \times \tan \phi_d$$

$$\Rightarrow \tau = \gamma \cdot H \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\Rightarrow \gamma \cdot H \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = C_d + \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \phi_d$$

$$\frac{C_d}{\gamma \cdot H} = \sin \alpha \cdot \cos \alpha - \cos^2 \alpha \cdot \tan \phi_d = \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \phi_d)$$

$$\tan \phi_d = \frac{\tan \phi}{f_s}, C_d = \frac{c}{f_s} \Rightarrow f_s = \frac{C}{\gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \alpha} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

$$f_s = 1 \Rightarrow H = H_{cr} \Rightarrow H_{cr} = \frac{C}{\gamma \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \phi)}$$

در صورتی که شیروانی شامل مصالح همراه با تراوش آب باشد، در آن صورت روابط ذکر شده باید با توجه به مقادیر زیر محاسبه شود:

$$\tau_d = C_d + (\sigma - u) \tan \phi_d$$

$$u = \gamma_w \cdot H \cdot \cos^2 \alpha$$

$$F_s = \frac{C}{\gamma \cdot H_{sat} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \alpha} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \alpha}$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

پایداری شیروانی برای سطح لغزش استوانه ای (روش توده): در حالتی که لغزش به صورت دایره ای باشد، مطابق شکل می توان یک سطح لغزش دلخواه را در نظر گرفت. در یک حالت خاص که مصالح همگن و زاویه اصطکاک مصالح برابر صفر باشد ($\phi = 0$)، مطابق شکل خواهیم داشت:

$$W = W_1 + W_2 \quad W_1 = (FCDEF) \times \gamma \quad W_2 = (ABFEA) \times \gamma$$

$$M_d = W_1 L_1 - W_2 L_2 \quad M_r = C_d (A\vec{E}D) (r) = C_d r^2 \theta$$



$$F_s = \frac{f}{c_d} = \frac{c_u}{c_d} \quad M_d = M_r \Rightarrow C_d = \frac{w_1 l_1 - w_2 l_2}{r^2 \theta}$$

پایداری شیروانی برای سطح لغزش استوانه ای (روش قطعه بندی): در بیشتر موارد، سدهای مورد بررسی دارای مصالح مختلفی بوده که استفاده از روش توده را دچار مشکل می سازد. به همین منظور سعی می شود از روش قطعه بندی سطح مورد نظر جهت بررسی پایداری استفاده نمود که در این روش سطح مزبور به قطعات قائم متعددی تقسیم می شود. عرض قطعات لازم نیست مساوی باشد، ولی آنچه مسلم است، هرچه عرض قطعت کمتر باشد، دقت محاسبات بیشتر می گردد. به عنوان مثال مطابق المان n ام، قطعات تقسیم شده را مورد نظر قرار می دهیم:

$$N_T N_R \sin \alpha \quad W_n L_n \cos \alpha$$

در ساده ترین حالت فرض می کنیم که فشار منفذی آب وجود نداشته، برآیند نیروهای P_n و P_{n+1} و نیز T_n و T_{n+1} صفر باشد. در این صورت داریم:

$$\begin{aligned} N_r &= W_n \cdot \cos \alpha_n, \tau_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{f_s} = \frac{1}{f_s} (c + \tan \phi) \Delta L_n \\ \sigma &= \frac{N_n}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cdot \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \\ \sum M_o &= 0 = \sum_{n=1}^{n=p} w_n \cdot r \cdot \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{f_s} \left[c + W_n \frac{\cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \phi \right] (\Delta L_n)(n) \\ \Rightarrow f_s &= \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \cdot \Delta L_n + U_n \cdot \cos \alpha_n \cdot \tan \phi)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \cdot \sin \alpha_n} \\ &\quad \left(\Delta L_n = \frac{b_n}{\cos \alpha_n} \right) \end{aligned}$$

این روش که به روش معمولی موسوم است، برای حالتی که خاک همگن نباشد نیز کاربرد داشته و W_n مربوطه، بر اساس وزن قسمت های تشکیل دهنده قطعه مورد نظر، محاسبه شده c و ϕ مربوط به خاک تماس نیز در نظر گرفته می شود. دانشمندی به نام «بیشاب» با در نظر گرفتن مقدار کمی از تأثیر P_n و T_n مربوط به هر قطعه، اصلاحیه ای برای روش فوق وارد نمود که به فرمول بیشاب ختم گردید.

طبق این فرمول برای محاسبه f_s داریم:

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{\sum_{n=1}^{n=p} \left(\frac{(c \cdot b_n + W_n \cdot \tan \phi) \times 1}{(m \times C_n)} \right)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \cdot \sin \alpha_n} \\ M \times n &= \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi - \sin \alpha_n}{f_s} \end{aligned}$$

همان طور که مشاهده می شود، در این روش محاسبه f_s نیاز به استفاده از روش آزمون و خطا داشته و علی رغم جواب دقیق تر، پیچیدگی بیشتری دارد. این روش امروز به عنوان یکی از متداول ترین روش ها در محاسبات کامپیوتری پایداری شیروانی ها، مورد استفاده قرار می گیرد.

در مواردی که فشار منفذی نیز وجود داشته باشد، به جای σ از $(\sigma - u)$ استفاده خواهد شد که در روابط فوق از مقدار وزن قطعات در صورت، عبارت $u \times \Delta L_n$ یا $u \times b_n$ کم خواهد شد.

همان طور که گفته شد، برای تحلیل پایداری شیروانی ها، باید با مراکز و شعاع های مختلف، دایری را ترسیم و برای هر حالت f_s مربوطه را بدست آورده و در پایان f_s مینیمم را به عنوان f_s کل در نظر گرفت و با حد معین شده در آیین نامه مقایسه نمود.