

بسم الله الرحمن الرحيم



برای شرکت در دوره های آموزشی حضوری و آنلاین ، تهیه فیلم ها و
جزوات برتر عمرانی به وبسایت گروه مهندسی سبزه سازه مراجعه
نمایید و از بهترین ها لذت ببرید.



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی

((بسم الله الرحمن الرحيم))

بناهای آبی

استاد محترم :
جناب آقای دکتر ملازاده



فهرست

فصل اول : معرفی و آشنایی با سدها

۱-۱- مقدمه.....	۴
۲-۱- منابع آبی.....	۵
۳-۱- تفاوت آب های زیر زمینی و سطحی.....	۵
۴-۱- حوضه آبریز.....	۵
۵-۱- مراحل مطالعاتی انجام پروژه های آبی.....	۶
۶-۱- تعریف سد.....	۷
۷-۱- اهداف ساخت سد.....	۷
۸-۱- عوامل تعیین کننده مکان احداث سد.....	۸
۹-۱- انواع سد از نظر کاربرد و نوع بهره برداری.....	۹
۱۰-۱- انواع سدها به لحاظ هیدرولیکی.....	۱۲
۱۱-۱- تقسیم بندی سدها از لحاظ جنس مصالح مصرفی در بدنه سد.....	۱۳
۱-۱۱- کاربرد سکو در سدهای خاکی.....	۱۴
۲-۱۱-۱- اهداف ساخت سد لاستیکی.....	۱۸
۳-۱۱-۱- مزایای سد لاستیکی.....	۱۹
۴-۱۱-۱- معایب سد لاستیکی.....	۱۹
۱۲-۱- تفاوت سدهای خاکی و وزنی.....	۱۹
۱۳-۱- ملاحظات طراحی سدهای خاکی.....	۲۰
۱۴-۱- کنترل تراوش در سدهای خاکی.....	۲۰
۱۵-۱- نرم افزارهای مورد استفاده برای تحلیل سدهای خاکی.....	۲۲
۱۶-۱- بارگذاری سدها و انواع بارهای وارده به آن ها.....	۲۳
۱۷-۱- سدهای خاکی.....	۲۳
۱۸-۱- تخلیه سریع مخزن (Rapid Draw Down).....	۲۴
۱۹-۱- انواع پوشش وجه بالادست سد برحسب نوع و میزان کارکرد.....	۲۴
۲۰-۱- طراحی مصالح سنگ چین.....	۲۵
۲۱-۱- تعیین ضخامت لایه فیلتر با کمک ارتفاع موج.....	۲۵
۲۲-۱- هسته سد خاکی (Core).....	۲۶
۲۳-۱- عرض تاج در سد خاکی.....	۲۸
۲۴-۱- تعاریف و اصطلاحات.....	۲۹
۲۵-۱- نکات سدهای خاکی.....	۲۹
۲۶-۱- انواع شکل های تخریب سدهای خاکی.....	۳۰
۲۷-۱- مزایای سد خاکی.....	۳۰



- ۲۸-۱- معایب سد خاکی..... ۳۰
- ۲۹-۱- سدهای بتنی..... ۳۰
- ۳۰-۱- مهم ترین علل تخریب سدهای بتنی دنیا..... ۳۱
- ۳۱-۱- رابطه تعیین عرض تاج..... ۳۲
- ۳۲-۱- مزایای سدهای بتنی..... ۳۲
- ۳۳-۱- معایب سدهای بتنی..... ۳۲

فصل دوم: سرریز سدها

- ۱-۲- مقدمه..... ۳۳
- ۲-۲- طبقه بندی سرریزها براساس اهداف ساخت سد..... ۳۳
- ۳-۲- طبقه بندی بر اساس شکل سرریزها..... ۳۴
- ۴-۲- بخش های اصلی سرریز..... ۳۵
- ۵-۲- سرریز لبه آبریز..... ۳۶
- ۶-۲- ضرایب تصحیح ضریب تخلیه (C)..... ۳۷
- ۷-۲- طراحی رویه سطح سرریز لبه آبریز..... ۳۷
- ۸-۲- طراحی قوس بالادست تاج سرریز..... ۳۹
- ۹-۲- روندیابی سیلاب (Flood Ruting)..... ۴۰
- ۱۰-۲- روش های کلی روندیابی..... ۴۱
- ۱۱-۲- روش های هیدرولوژیکی روندیابی مخزن..... ۴۱
- ۱۲-۲- گام های محاسباتی روندیابی سیلاب با روش سعی و خطا..... ۴۲



۱-۱- مقدمه

آب یکی از فراوان‌ترین مواد بر روی کره زمین است. آب تنها ماده‌ای است که در طبیعت به هر سه حالت جامد، مایع و گاز یافت می‌شود. بیش از ۷۵ درصد وزن انسان و نیز در حدود ۷۱ درصد سطح کره زمین از آب تشکیل شده است (نزدیک به ۳۶۰ میلیون از ۵۱۰ میلیون کیلومتر مربع). با این وجود تنها حدود ۳/۵ درصد از آبهای کره زمین شیرین و قابل شرب بوده و مابقی آن به علت محلول بودن انواع نمک‌ها (خصوصاً نمک طعام) غیر قابل استفاده است. از این ۳/۵ درصد آب شیرین نیز حدوداً ۶۸ درصد آن به صورت یخچال‌های قطبی در دو قطب زمین و دور از دسترس بشر واقع شده است.

گردش آب در طبیعت که به آن چرخه آب یا چرخه هیدرولوژی گفته می‌شود عبارت است از حرکت و جابجایی آب در قسمت‌های مختلف کره زمین. چرخه آب، وجود و حرکت آب را در سطح، زیر سطح و هم‌چنین بالای کره زمین نشان می‌دهد. آب در کره زمین همیشه در حال حرکت و تغییر شکل می‌باشد. منابع آب شیرین به تدریج در حال کاهش می‌باشند. مقدار تقاضای آب از میزان تامین آن در مناطق زیادی از کره زمین که نرخ رشد جمعیت بالایی دارند، فزاینده است که این روند کمبود در سالهای آینده نیز ادامه خواهد داشت.

به علت عدم توزیع یکنواخت مکانی آب، برخی از کشورها با مشکلات شدید کم‌آبی مواجه‌اند و از طرفی برخی نیز جزء پرآب‌ترین کشورها محسوب می‌شوند. در این راستا خاطر نشان می‌شود که ۶۰ درصد کل منابع آب شیرین جهان تنها در اختیار ۹ کشور برزیل، روسیه، کانادا، آمریکا، اندونزی، چین، هند، کلمبیا و پرو می‌باشد.

هرچند که ایران در حدود یک درصد از جمعیت جهان را داراست، کل میزان آب قابل شرب آن تنها ۰/۳۶ درصد از سهم جهانی را شامل می‌شود. علاوه بر این، سرانه مصرف آب در ایران تقریباً دو برابر متوسط سرانه دنیاست. از این رو کشور ما با مشکل کم‌آبی مواجه می‌باشد. مساله بحران آب و اهمیت توجه به آن نیازمند یک مشارکت عمومی و عزم جدی ملی می‌باشد.



فصل اول : معرفی و آشنایی با سدها

۱-۲- منابع آبی

منابع آبی به دو صورت قابل استفاده اند:

۱) منابع آب های سطحی

آب جاری در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها را آب سطحی می‌گویند. آب سطحی به طور طبیعی از طریق بارش برف و باران تامین می‌شود و با ورود به دریاها، تبخیر و نفوذ عمقی به سفره‌های آب زیرزمینی از چرخه دسترسی خارج می‌شوند.

۲) منابع آب های زیر زمینی

بعد از هر بارندگی، مقداری از آب بارندگی در زمین فرو می‌رود و بین لایه‌های مختلف زمین از قبیل سنگ، خاک رس، شن و ماسه زیرزمین جمع می‌شود که به این آب جمع شده، آب زیرزمینی می‌گویند. زندگی بسیاری از مردم کره زمین به آب های زیرزمینی (آبخوان) بستگی دارد.

۱-۳- تفاوت های آبهای زیرزمینی و سطحی

این منابع دو تفاوت عمده دارند :

۱. آب های زیر زمینی معمولاً زلال اند و آلودگی کمتری دارند اما آبهای سطحی دارای سختی زیاد و آلوده به میکروارگانیسم ها می باشند.
۲. منابع آبهای زیرزمینی به مکان مورد استفاده شان نزدیکتر می باشند اما در آبهای سطحی برای استفاده مجبور به انتقال آن هستیم، زیرا این منابع در نقاط خاصی متمرکز شده اند.

۱-۴- حوضه آبریز

طبق تعریف قسمتی از خشکی‌ها که با توجه به شیب و شکل زمین، تمامی بارش های برف، باران، تگرگ و ... را به یک پایانه نظیر اقیانوس، دریا، دریاچه و یا تالاب زهکشی می کند را حوضه آبریز می نامند. سپس آب جمع آوری شده توسط یک سیستم زهکش رودخانه ای جمع شده و در یک نقطه تخلیه می شوند. پست‌ترین مکان یک حوضه ممکن است دریا، دریاچه، باتلاق، رود و ... باشد (شکل ۱-۱).

حوضه های آبریز در مطالعات هیدرولیکی و هیدرولوژی بسیار مهم می باشند. مقدار آب رودخانه در حوضه آبریز به شیب زمین، پوشش گیاهی، میزان بارندگی، مقدار گیاه خاک، نفوذ پذیری زمین بستگی دارد.

مرزهای حوضه های آبریز را خط الراس های آن منطقه تشکیل داده است. معمولاً یک رودخانه اصلی وجود دارد که به آن خط القعر اصلی حوضه می گویند. ژرف ترین نقاط بستر رودخانه خط القعر اصلی می باشد. همه خط القعر ها به سمت نقطه انتهایی که پایانه حوضه آبریز نامیده می شود، هدایت می شوند. معمولاً بهترین مکان برای احداث سد، پایانه حوضه های آبریز می باشند که قسمت اعظم آب حوضه ها را جمع آوری می کنند. هریستم که در فرآیند جمع آوری، انتقال و توزیع آب دخالت داشته باشد، به نوعی یک بنای آبی محسوب می گردد.



شکل ۱-۱- حوضه آبریز

۱-۵- مراحل مطالعاتی انجام پروژه های آبی

طراحی پروژه های آبی که برعهده شرکت های مشاور است به چند فاز (مرحله) تقسیم می شود. علت این کار بالا بودن هزینه این پروژه ها است که باید از قبل مدون و پیش بینی شوند که شامل چه مطالعاتی است.

۱. فاز صفر / فاز سنتز / مرحله مقدماتی (آشنایی)

این مرحله شامل بازدید صحرایی، بررسی شمای کلی مسیرها، بررسی موقعیت شهرها و بناهای موجود در محدوده و نهایتاً ترسیم یک شمای کلی از محل می شود. یک گزارش تهیه می شود که این گزارش کلیات کار را به کارفرما ارائه می دهد. به عبارت دیگر در اولین مرحله مطالعاتی، این سوال مطرح می شود که آیا انجام پروژه موردنظر با در نظر گرفتن شرایط اجمالی امکان پذیر می باشد یا خیر؟

۲. فاز اول / امکان پذیری

با نظر مشاور در صورت مثبت بودن جواب مطالعات فاز صفر، چندین گزینه (واریانت) انتخاب می شود. مشاور روی این گزینه ها مطالعات پایه زمین شناسی، مطالعات منابع قرضه و هیدرولوژی انجام می دهد، سپس نتایج به کارفرما ارائه می شود.



۳. فاز دوم / طرح نهایی

انتخاب گزینه به عنوان طرح نهایی بر عهده کارفرما خواهد بود. تمامی مطالعات روی طرح انجام می شود. نقشه های اجرایی منطقه به علاوه گزارشات فنی برای اجرای پروژه به کارفرما داده می شود.

۴. فاز سوم / اجرا و نظارت

تعیین ناظر و مشاور، برگزاری مناقصه و انتخاب دستگاه پیمانکار در این مرحله انجام می گیرد. مشاور پروژه معمولاً به عنوان ناظر پروژه هم مد نظر قرار می گیرد.

سه فاز اول از نوع مطالعاتی و فاز نهایی از نوع اجرایی خواهند بود. انجام فازهای مطالعاتی بیان شده برای سدها، توسط گروه های کارشناسی مختلفی صورت می گیرد که می توان به گروه های زیر اشاره نمود:

(۱) هیدرولوژی

(۲) زمین شناسی

(۳) هیدرولیک و سازه ها

(۴) مکانیک

(۵) معدن

(۶) کشاورزی

(۷) اقتصادی و اجتماعی

(۸) زیست محیطی

۱-۶- تعریف سد

مانعی در برابر جریان آب که آب در پشت آن جمع می شود و موجب افزایش حجم و ارتفاع آب در پشت آن خواهد شد.

۱-۷- اهداف ساخت سد

(۱) افزایش حجم آب پشت سد برای مصارف شرب (۸ درصد)، کشاورزی (۶۹ درصد) و صنعتی (۲۳ درصد)

(۲) افزایش ارتفاع آب پشت سد که برای مقاصد زیر به کار می رود:

الف) زمانیکه که هدف، تولید نیروی برق آبی توسط توربین ها باشد، زیرا توان ایجاد شده به مقدار آب پشت سد بستگی ندارد بلکه به میزان ارتفاع آب وابسته است.

ب) به منظور انحراف آب از مسیر قبلی به مسیر مورد نظر، به عنوان مثال در مناطقی که از لحاظ ارتفاعی و توپولوژیکی بلند می باشند، احداث سد موجب سوار شدن آب روی منطقه خواهد شد.



۳) کنترل سیلاب و تنظیم جریان رودخانه‌ها: اگر رودخانه طغیانگر و امکان سیل در منطقه زیاد باشد، سیلاب در مخزن سد به تله می افتد و به طور ایمن از طریق سرریزها و آبگیرها تخلیه می شود.

۴) تغذیه سفره های آب زیرزمینی، در مناطقی که سطح آب های زیرزمینی افت کرده باشد و قابل استفاده نباشد، احداث سد موجب تجمع آب می شود و آب جمع شده به مرور زمان به داخل زمین نفوذ می کند تا سطح سفره بالا آید. در این زمینه حتی می توان چندین سد هم احداث کرد. البته بستر این سدها باید نفوذ پذیر باشند.

۵) گردشگری، تفریح، کشتی رانی

۶) پرورش ماهی و حفاظت از حیات وحش و حفظ محیط زیست

سد چند منظوره: سدی است که بیش از چند هدف را تامین کند.

۱-۸- عوامل تعیین کننده مکان احداث سد

مطالعات فنی لازم برای تعیین محل احداث سد عبارتند از:

۱) توپوگرافی

این مطالعات برای تعیین ظرفیت مخزن به کار می روند که مطالعات مهمی محسوب می شوند. به عنوان مثال اگر هدف حجم زیاد آب باشد، بهتر است محور سد در جایی قرار گیرد که دره تنگ و باریک باشد تا هزینه احداث سد کم و از لحاظ اقتصادی بهینه گردد.

۲) زمین شناسی و ژئوتکنیک

برای تعیین مقاومت جداره ها و بستر، عمق آبرفت، وجود یا عدم وجود غارهای آهکی، تعیین ظرفیت باربری کف، بررسی آب بندی مخزن و ... کاربرد دارند. اگر جهت لایه های مصالح بدنه مخزن به سمت بیرون از دریاچه باشد، مشکل فرار آب را خواهیم داشت و اگر به سمت داخل باشند، آب خارج نشده و از محل های دیگر به سمت سد هدایت خواهد شد. مقاومت دیواره های مخزن و پایداری شیروانی ها هم باید مورد بررسی واقع شوند، زیرا با ریزش جداره ها از ظرفیت مفید سد کاسته خواهد شد و هم چنین ریزش شدید خاک به سمت داخل سد سبب ایجاد موج می گردد که ضربه موج به بدنه سد وارد می شود که در صورت لبریز شدن آب از روی سد، تخریب موضعی یا کلی سد را در پی خواهد داشت.

۳) منابع قرضه

تا حد امکان سد باید به مکان تهیه مصالح مصرفی نزدیک باشد، در غیر این صورت هزینه های انتقال موجب غیر اقتصادی شدن طرح خواهد شد. به عنوان مثال برای احداث سد بتنی، کارگاه باید به محل توزیع سیمان نزدیک باشد.



۴) مباحث هیدرولوژیکی

کافی بودن میزان آب پشت سد، بارندگی منطقه، میزان تبخیر آب، نوسانات سطح آب، هیدروگراف ورودی به سد، رسوب پشت سد و... از موارد مربوط به این مبحث می باشند. هرچه نوسانات سطح آب رودخانه کمتر باشد برای محل احداث سد مناسب تر خواهد بود. با کاهش تبخیر و دما، میزان تلفات آب ناشی از تبخیر کمتر می گردد، لذا محیط مرطوب مخزن سد باید زیاد باشد. عمر مفید سدها بر این اساس بیان می شوند که بعد از چه دوره ای دریچه سد از رسوب مسدود می گردد. با افزایش رسوب از ارتفاع سد کاسته می شود و عمر مفید آن هم کاهش می یابد. بدین منظور با یک سری عملیات موضعی خاص مانند فلاشینگ (Dam flushing) مقداری از رسوبات را برداشت می کنند.

۵) هیدرولیکی

سرریزها باید به خوبی مکان یابی شوند. به عنوان مثال کاربرد سرریز کناری در جایی است که احداث سرریز روی بدنه سد امکان پذیر نباشد و یا هزینه احداث بالایی داشته باشد.

۶) پیامد های زیست محیطی

برای احداث یک سد ایمن و اقتصادی باید تمامی موارد بالا به طور هم زمان رعایت گردند.

۱-۹- انواع سدها از نظر کاربرد و نوع بهره برداری

۱) سدهای ذخیره ای / مخزنی (Storage Dam)

این سدها به منظور ذخیره آب جهت تامین مصارف شرب، بهداشت، کشاورزی و صنعتی احداث می گردند. حجم مخزن این نوع سدها بسیار بزرگ است. آب را در فصول پر بارش ذخیره کرده و در فصول کم آبی مورد استفاده قرار می دهند. ۱۲ درصد سدهای بزرگ در سراسر دنیا برای تامین آب شرب احداث شده اند. در حدود ۲۵ درصد زمین های کشاورزی دنیا تحت کشت آبی هستند. نیمی از سدهای بزرگ دنیا منحصراً برای استفاده کشاورزی ساخته شده اند.

۲) سدهای انحرافی (Diversion Dam)

این سدها در مسیر رودخانه ها برای منحرف کردن آب احداث می گردند. سدهای انحرافی که معمولاً چندان بزرگ نیستند، با افزایش ارتفاع آب موجب سوار شدن آب بر زمین های مجاور می گردند. هم چنین از این سدها برای منحرف کردن آب، قبل و بعد از محل های ساخت سدهای بزرگ استفاده می شود.

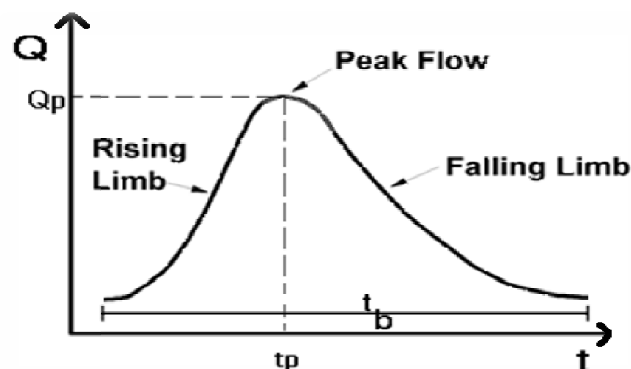
۳) سدهای تاخیری / بازدارنده (Detention Dam)

این گونه سدها بازدارنده از سیل اند. احداث این گونه سدها پیک سیلاب را به تاخیر می اندازد و باعث می شوند که حجم آب زیاد ناشی از سیلاب به صورت کنترل شده به پائین دست تخلیه گردد. حدود ۱۳ درصد از سدهای بزرگ دنیا نقش کنترل و مهار سیلابها را به عهده دارند.

اصولاً بزرگی سیل ها و تکرار آنها در طول زمان تابع شدت بارندگی، نفوذپذیری زمین و وضع توپوگرافی منطقه است. سیلاب ورودی به مخزن سد، یک هیدروگراف (آب نمود) دارد. هیدروگراف، (شکل ۱-۲) نموداری است که تغییرات دبی رواناب را نسبت به زمان، در یک محل مشخص از مسیر رودخانه نشان می‌دهد. هیدروگراف به طور مشخص به جزئیات حوضه از قبیل زمین‌شناسی، توپوگرافی، بزرگی و کوچکی حوضه، وضعیت پوشش گیاهی و عوامل جوی به خصوص شدت و مدت بارندگی بستگی دارد.

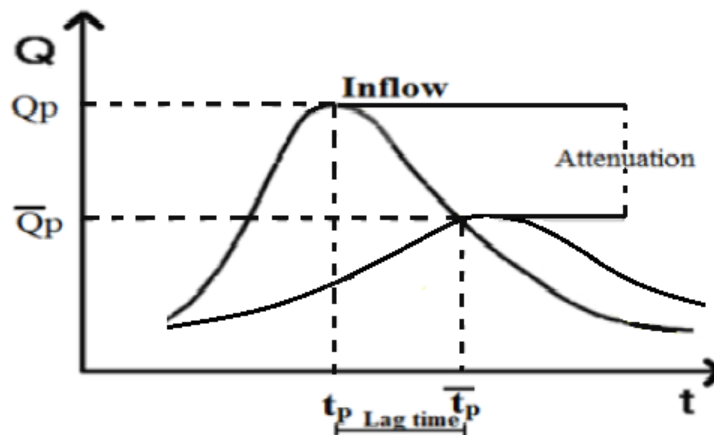
هدف از رسم نمودارهای هیدروگراف برآورد بیشترین دبی جریان و سطح سیلابی است که در یک دوره بازگشت مشخص مثلاً در یک دوره ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ یا ۱۰۰۰ ساله، احتمال وقوع یکباره آن وجود دارد. نتایج این پیش بینی که سیلاب طراحی نام دارد، به عنوان مبنایی برای انتخاب روشهای مقابله با سیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر دوره بازگشت سیلاب کم باشد، مخزن سریع پر شده و با سیلاب بزرگتری تخریب می‌شود و اگر دوره بازگشت خیلی زیاد در نظر گرفته شود، موجب افزایش هزینه خواهد شد. بنابراین انتخاب دبی طراحی بر اساس نیاز آبی نیست بلکه باید عاقلانه انتخاب گردد.

در مواردی که خرابی سازه آبی منجر به از دست رفتن جان انسانها و اموال زیادی شود، طراحی بر مبنای سیلابها با احتمال رخداد کمتر و دوره بازگشت طولانی تر، مثلاً سیلاب ۱۰۰۰ ساله و حتی بیشتر، صورت می‌گیرد.



شکل ۱-۲- هیدروگراف

در شکل فوق پارامترهای t_p و t_b به ترتیب زمان پیک سیلاب و زمان پایه می‌باشند. Q_p نیز معرف دبی پیک سیلاب است. زمان پایه سیلاب مدت زمانی است که سیل به یک نقطه از رودخانه وارد و از آن خارج می‌گردد. اطلاع از چگونگی جریان، حجم، شدت، مدت، مکان و بالاخره زمان وقوع سیل ها اهمیت ویژه‌ای در طراحی و نگهداری سازه‌های مهندسی، مخصوصاً تاسیسات آبی و همچنین پیش بینی خطرات و زیانهای احتمالی ناشی از سیل دارد.



شکل ۱-۳ - هیدروگراف روندیابی شده

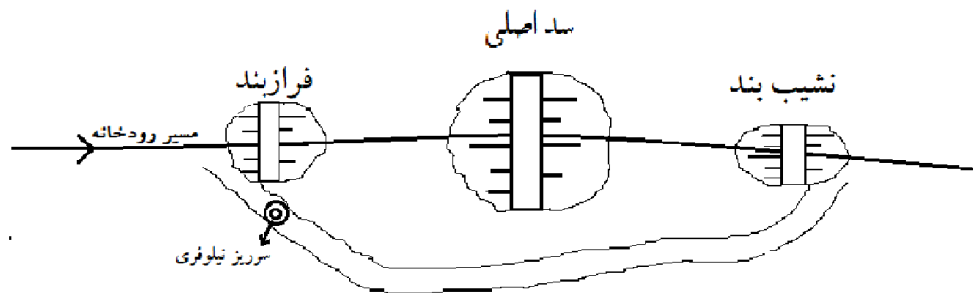
در شکل فوق Q_p و $\bar{Q}_p$ به ترتیب دبی پیک طبیعی یا ورودی (Max Nach peak) و دبی پیک روندیابی شده یا خروجی (Reduced Peak) می باشند. علاوه بر این فاصله زمانی بین پیک سیلاب ورودی و خروجی را زمان تاخیر (Lag time) می نامند.

هیدروگراف خروجی از مخزن با توجه به هیدروگراف ورودی، شکل مخزن و ظرفیت تخلیه کننده های آب مشخص می شود که با توجه به شکل ۱-۳ دارای مشخصات زیر است:

- ۱) پیک سیلاب عبوری از پیک سیلاب اولیه کمتر است.
- ۲) زمان پیک هیدروگراف خروجی، از زمان پیک هیدروگراف ورودی بیشتر می باشد. بنابراین پیک سیلاب دیرتر به مقدار نهایی خود می رسد و زمان واکنش برای پائین دست سد بیشتر خواهد شد.
- مطالب گفته شده در فوق اساس بهره گیری از سدهای بازدارنده (تاخیری) می باشد.

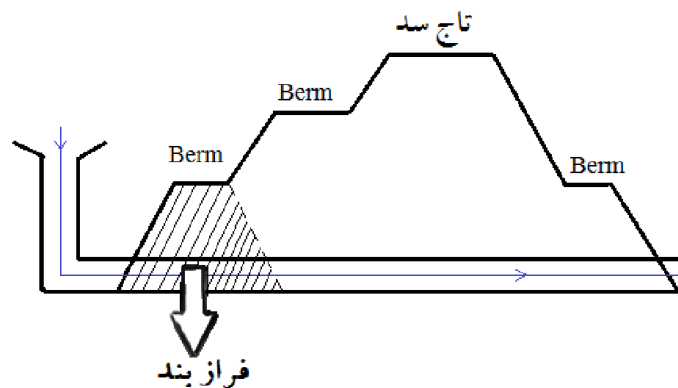
۴) سدهای موقتی (Coffer Dam)

معمولاً ساخت یک سد بین ۳ تا ۵ سال به طول می انجامد از این رو انحراف آب جهت خشک ماندن کارگاه در طول دوره ساخت سد الزامی می باشد. یک فراز بند در بالادست محل اجرای سد برای انحراف آب به تونل احداث می گردد. بعد از تکمیل سد اصلی، جریان آب توسط یک فراز بند دیگر به تاسیسات خروجی هدایت می شود. این فراز بند برای جلوگیری از روگذری آب در طول مدت ساخت سد به نیمه دیگر بستر رودخانه احداث می شود. ممکن است برای خشک نگه داشتن محل کارگاه به یک بند موقت در پایین دست محل اجرای سد نیز نیاز باشد که به آن نشیب بند گویند. شکل ۱-۴ نمونه ای از این سدها را نشان می دهد.



شکل ۱-۴- پلان سدهای موقتی

پس از ساخت سد و برای جلوگیری از اتلاف هزینه می توان فراز بند و نشیب بند را مانند شکل ۱-۵ جزئی از بدنه سد ساخت. با این ترفند مشکل غیراقتصادی بودن طرح حل می گردد.

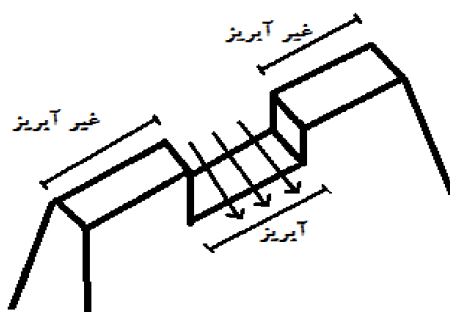


شکل ۱-۵

۱-۱۰- انواع سدها به لحاظ هیدرولیکی

بر اساس هیدرولیکی سدها به دو دسته تقسیم می شوند:

- ۱) آبریز (Overflow Dam): آب اجازه عبور از روی آن را دارد.
 - ۲) غیر آبریز (Non Overflow Dam): آب اجازه عبور از روی آن را ندارد. مانند سدهای خاکی که در صورت عبور آب، سد تخریب خواهد شد.
- در سدهای آبریز، سرریز هم جزء سد محسوب می شود که روی بدنه سد یا خارج آن نصب می گردد. برخی سدها مطابق شکل ۱-۶ ترکیب آبریز و غیر آبریز می باشند. سدهای آبریز معمولاً از مصالح قوی مانند بتن ساخته می شوند تا فرسایش در بدنه رخ ندهد.



شکل ۱-۶

۱-۱- تقسیم بندی سدها از لحاظ جنس مصالح مصرفی در بدنه سد

الف) سدهای خاکی (Earth Dam)

سدهای خاکی به دو گروه خاکریزه ای و سنگریزه ای تقسیم می شوند.

۱) **سد سنگریزه ای (Rock fill Dam):** در سدهای سنگریزه ای نسبت مصالح درشت دانه یا سنگها از مصالح خاکی بیشتر می باشد. بیش از ۵۰ درصد از مواد به کار رفته در این سدها از سنگریزه می باشد. 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، کنترل می گردد. این المان ممکن است از مصالح مختلفی مثل بتن ریخته شده، بلوک های بتنی، آسفالت، ژئوممبرین و ... باشد. در این صورت نیازی به هسته آب بند ندارند. در این گونه سدها، بدنه سد که از سنگریزه تشکیل شده است توسط غلتک های سنگین در لایه های کم ضخامت متراکم می شوند. این نوع سدها در برابر زلزله بسیار مقاوم اند. سنگهای ریخته شده بایستی خواصی مانند جذب آب کم، سایش کم، مقاومت فشاری بالا را دارا بوده و در برابر سرد و گرم شدن مقاومت خوبی داشته باشند.

۲) **سد خاکریزه ای (Earth fill Dam):** قسمت وسیع این سدها از مصالح خاکی متراکم تشکیل شده است. معمولاً تراوش و نفوذ آب توسط هسته های نفوذ ناپذیر و یا توسط خود بدنه کنترل و جلوگیری می شود. این سدها در حدود ۷۵ درصد از سدهای دنیا را تشکیل می دهند. یک سد خاکی عمدتاً از خاک هایی با کیفیت مناسب که بطور یکنواخت و با داشتن رطوبت کنترل شده، متراکم شده باشد در لایه های کم ضخامت و متعدد ساخته می شود. اگر عمده مصالح تشکیل دهنده سد خاکی یکسان بوده و سد فاقد هسته باشد (مانند شکل ۱-۷ الف)، آن سد را ((همگن)) و چنانچه هسته مرکزی سد، خاک رس و دور هسته مرکزی با سنگ های درشت دانه پر شده باشد (شکل ۱-۷ ب)، سد ((غیر همگن)) محسوب می شود.

سدهای خاکی با مصالح خاکی یا سنگی اجرا شده و معمولاً با مقاطع دوزنقه ای شکل، طراحی و با شیب های ملایم و تقریباً برابر در بالا دست و پایین دست به صورت عریض اجرا می گردند. 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 تندتر از سدهای خاکی در نظر گرفت، به طوری که در سدهای خاکریزه ای این شیب می تواند $3/5-1/2$ باشد، در حالی که در سدهای سنگریزه ای این مقدار ممکن است حتی تا حدود $2-1/5$ کاهش یابد. اجرای سدهای خاکی در رودخانه های عریض ساده تر است. این سدها برای زمین های نامناسب از نظر مقاومت، مناسب ترین نوع سد می باشند.



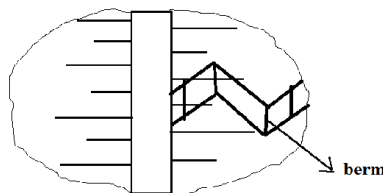
الف) مقطع کلی سدهای همگن با غشاء نفوذناپذیر ب) مقطع کلی سدهای غیر همگن با هسته رسی
شکل ۱-۷

۱-۱۱-۱- کاربرد سکو در سدهای خاکی

۱) وجود سکو (Berm) موجب افزایش پایداری شیروانی خاکی در بالادست و پائین دست سد خاکی می شود و خطر ریزش در دیواره ها با ارتفاع زیاد را کاهش می دهد و ضریب اطمینان در برابر لغزش را افزایش می دهد.

۲) استفاده ثانویه از فراز بند (سد انحرافی موقتی)

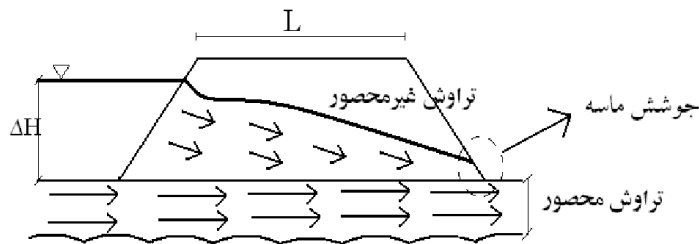
۳) راه های رسیدن ماشین آلات به تاج سد را ممکن می سازد. با ساخت سکو شیب کمتر احساس خواهد شد (شکل ۱-۸).



شکل ۱-۸

۴) کاهش گرا دیان هیدرولیکی خروجی از سد با افزایش طول مسیر تراوش

تراوش آب از سد خاکی به دو صورت محصور و غیر محصور می باشد (شکل ۹-۱).



شکل ۹-۱

(۱) محصور (Confined Seepage): عبور آب از زیر سد که همواره وجود دارد.

(۲) غیر محصور (Unconfined Seepage): به تراوش آب از داخل بدنه سد گفته می شود.

پدیده جوشش یا ماسه جوشان (عمل روباه): تراوش آب از زیر سد و در محل پنجه سد که ممکن است موجب نشست سد گردد.

$$i_E = \frac{\Delta H}{L} < i_{cr}$$

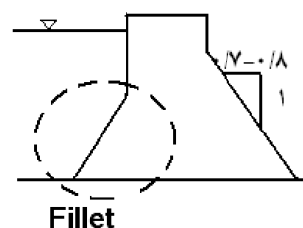
بر اساس رابطه بالا ΔH ، L و i_E به ترتیب اختلاف آب در بالا دست و پائین دست سد، طول مسیر تراوش و گرایان هیدرولیکی خروجی می باشند. با افزایش طول مسیر تراوش، میزان دبی آب خروجی کاهش می یابد. پس با افزایش L ، گرایان هیدرولیکی خروجی (i_E)، کاهش می یابد. بدین ترتیب سد در برابر تراوش ایمن و دبی عبوری را کاهش می دهند. i_{cr} به عوامل مختلفی مانند: دانه بندی و تخلخل مصالح بستر بستگی دارد.

ب) سدهای بتنی (Concrete Dam)

سدهای بتنی که شکل مقطع های متفاوتی دارند ممکن است به یکی از شکلهای زیر باشند:

۱) سدهای وزنی (Gravity Dam)

این سدها که معمولاً برای تامین پایداری با مقطع مثلثی یا دوزنقه ای ساخته می شوند، در بالا دست تقریباً به صورت قائم و در پایین دست با شیبی تند مطابق شکل ۱۰-۱ اجرا می گردند. پایداری این سدها تنها از طریق نیروی وزن آن ها تأمین می گردد. وزن مخصوص بتن از خاک بیشتر می باشد، بنابراین این سدها معمولاً مشکل عدم پایداری نخواهند داشت. این نوع از سدها اغلب در دره های عریض ساخته می شوند.



شکل ۱۰-۱

۲) سدهای قوسی (Arch Dam)

گاهی اوقات سدهای قوسی در پلان به صورت قوس ساخته می شوند که به آن ها سدهای یک قوسی گویند و در برخی مواقع جهت کمک به انتقال نیروی فشار آب در طرفین، از قوس هایی در مقطع و پلان به طور همزمان استفاده می گردد که در این صورت سدهای دو قوسی به وجود می آیند. سدهای قوسی حالتی گنبدی را به وجود می آورند و مانند یک پوسته باید مورد تحلیل قرار گیرند (شکل ۱-۱۱). ضخامت بدنه این سدها هرچه به سمت پائین می آید، بیشتر می شود. حجم بتن مصرفی در سدهای بتنی قوسی در مقایسه با سد وزنی در حدود ۵۰ درصد کمتر می باشد. سدهای قوسی هم در جهت شعاعی و هم در جهت مماسی قابلیت باربری دارند. این سدها با کمک عمل قوسی خود نیروی فشار آب را به دیواره ها و سپس به فونداسیون منتقل می کنند، بنابراین از آن ها در دره های باریک که دیواره ها (Abutments) و کف سنگی قوی دارند، استفاده می گردد. وزن سدهای قوسی نسبت به سدهای بتنی کمتر است زیرا سد قوسی بار را به کف و کناره ها منتقل می کنند، اما در سد وزنی نیرو فقط به کف وارد می شود. قوس بدنه سدهای قوسی به سمت جریان آب می باشد.



شکل ۱-۱۱

۳) سدهای پشت بنددار یا پایه دار (Buttress Dam)

این نوع سدها می توانند قوسی یا وزنی باشند با این تفاوت که قسمت داخل بدنه آن ها توخالی شده است شکل (۱-۱۲). در این نوع سدها، یک دال بتنی به کمک تعدادی پشت بند که در فاصله های منظم قرار دارند، پایدار شده و در برابر نیروهای وارده مقاومت می کنند، به طوری که نیرو ابتدا به پایه ها و سپس به فونداسیون منتقل می شود. کاربرد این نوع سدها معمولاً در محل هایی است که جنس مصالح کف متفاوت و با مقاومت مختلف باشند. بدین ترتیب پایه ها روی قسمت های قوی تر قرار می گیرند. در این نوع سدها وزن

بدنه سد نسبت به حالت وزنی کاهش می یابد. با وجود حجم بتن ریزی کمتر سد پایه دار نسبت به سایر سدها، آرماتورگذاری آن بیشتر خواهد بود.



شکل ۱-۱۲

ج) سدهای چوبی یا الواری (Timber Dam)

مانعی چوبی که جلوی جریان آب را می گیرد.



شکل ۱-۱۳

د) سدهای فلزی (Steel Dam)

کاربرد این گونه از سدها به زمان های بسیار قبل باز می گردد که با توجه به ورود مصالح بتنی و خاکی مسلح، استفاده از این گونه سدها روز به روز با استقبال کمتری مواجه شده است (شکل ۱-۱۴).



شکل ۱-۱۴

(۵) سدهای لاستیکی (Membrain Dam/ Rubber Dam / Inflated)

سدهای لاستیکی تکنولوژی جدیدی است که برای مهار آب های سطحی به کار گرفته شده است. ایده استفاده از سدهای لاستیکی اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط ایمبرسون مطرح شد. در سال ۱۹۶۵ اولین سد لاستیکی بادی در کشور 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 در مجموع ۲۶۰۰ سد در نقاط مختلف جهان به طور موفقیت آمیز در دست بهره برداری می باشند. این سدها از جنس لاستیک چند لایه و با مقاومت کششی بسیار بالا ساخته می شوند تا امکان پاره یا سوراخ شدن در آن ها نباشد. سدهای لاستیکی از یک تیوپ بزرگ و حجیم تشکیل شده که بر روی یک بستر بتنی نصب و به وسیله آب یا هوا پر می شوند. اتصال بدنه لاستیکی سد به بستر بتنی با استفاده از مهارهای فولادی صورت می گیرد (شکل ۱-۱۵). عمر مفید این نوع از سدها ۲۰ الی ۳۰ سال می باشد که در صورت از بین رفتن لاستیک بدنه سد به سبب برخورد اشیاء نوک تیز یا در رطوبت بالا، امکان تعویض دارد. برای پر کردن این سدها از کمپرسورهای خاص استفاده می شود که می تواند داخل این سدها را از هوا یا آب پر و خالی کند. 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.

۱-۱۱-۲- اهداف ساخت سد لاستیکی

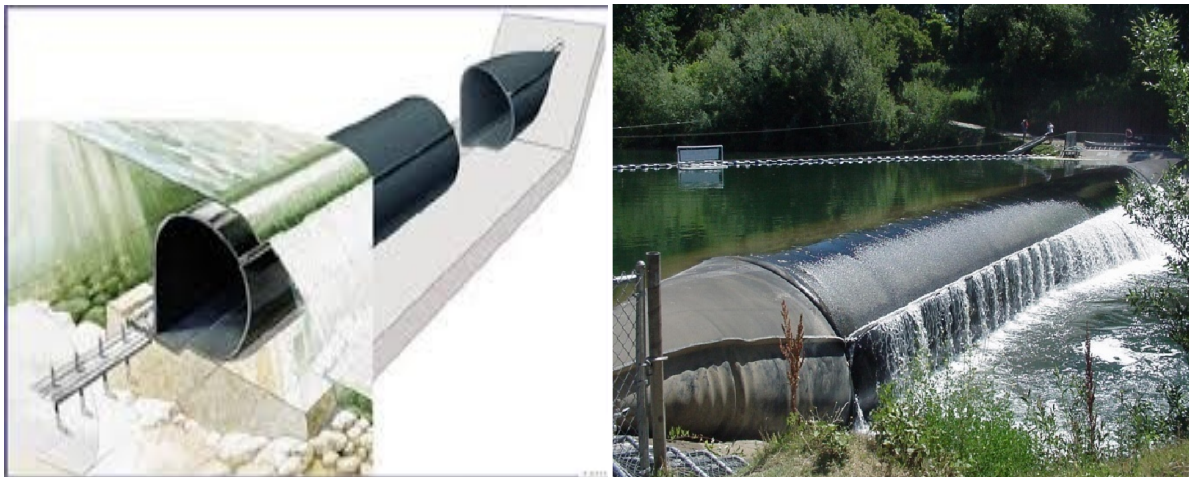
- (۱) کنترل سیلاب ها و تنظیم جریان رودخانه: که این کار توسط دستگاه های الکترونیکی در اتاق کنترل و به طور خودکار انجام می گیرد.
- (۲) ذخیره موقت آب رودخانه ها جهت تامین آب کشاورزی
- (۳) ایجاد حوضچه های پرورش ماهی و میگو
- (۴) انحراف آب رودخانه
- (۵) افزایش ارتفاع سدهای بتنی ساخته شده از قبل
- (۶) استفاده به جای دریچه های فلزی

۱-۱۱-۳- مزایای سد لاستیکی

- (۱) عدم نیاز سدهای لاستیکی به فونداسیون پیچیده
- (۲) نیاز به حداقل حفاظت و نگهداری
- (۳) انعطاف پذیری سد در مقابل زلزله
- (۴) نصب و ساختن بسیار سریع
- (۵) انطباق پذیری با طبیعت رودخانه (عدم برخورد با مشکل تجمع رسوب)
- (۶) پائین بودن نسبی هزینه های اجرا

۱-۱۱-۴- معایب سدهای لاستیکی

- (۱) ارتفاع کمی دارند و حداکثر تا ۱۵ متر قابل ساخت و بهره برداری اند.
- (۲) به سبب برخورد اشیاء نوک تیز احتمال پارگی دارند.



شکل ۱-۱۵

۱-۱۲- تفاوت سدهای خاکی و وزنی

ضخامت آبرفت در سدهای خاکی چندان مهم نیست زیرا مساحت و نیز نسبت عرض به ارتفاع زیادی دارند پس فشار کمی به فونداسیون وارد می کنند. اما در سدهای بتنی قوسی و وزنی به علت سطح مقطع کم باید مقاومت باربری فونداسیون بالا باشد. از این رو ساخت سدهای بتنی بر روی آبرفت امکان پذیر نبوده و حداکثر ضخامت قابل برداشت به نحو اقتصادی آبرفت رودخانه در حدود ۱۰ متر می باشد. گاه در این زمینه از پرده های تزریق استفاده می شود. در سدهای خاکی شیب حدوداً ۱ قائم و ۲ تا ۳/۵ افقی است. این سدها عریض اند اما معمولاً ارتفاع کمی دارند. اکثر سدهای خاکی، جزء بلندترین سدهای ساخته شده نیستند، زیرا حجم خاکریزی زیادی



دارند اما می توانند جزء بزرگترین سدهای دنیا محسوب شوند. حداقل عرض تاج در سدهای خاکی ۶ متر است و این مقدار به عبور ماشین آلات یا شیب هیدرولیکی بستگی دارد.

۱۳-۱- ملاحظات طراحی سدهای خاکی

ملاحظات طراحی در سدهای خاکی عبارتند از :

(۱) تراوش (Seepage)

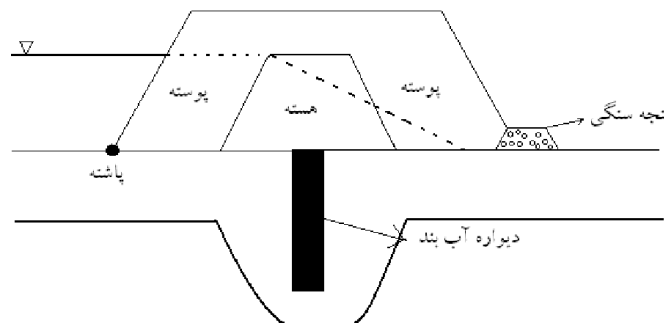
طراحی سد باید به گونه ای باشد که خط زه آب یا خط تراوش آب (Phreatic line)، بدنه پائین دست سد را قطع نکند. خط زه آب معرف تراوش بالایی بدنه سد می باشد و با توجه به جنس مصالح و قابلیت هیدرولیکی آنها فرق دارد.

(۲) پایداری شیروانی های خاکریزی (Slope Stability)

سطوح لغزش با ضریب اطمینان بالاتر از ۲ یا ۳ طراحی می شوند. تحلیل سد خاکی ابتدا خالی صورت می گیرد و در مراحل بعدی سد، نیمه پر، پر، شرایط سیلابی و تخلیه سریع مخزن تحلیل می گردد. شیب بالا دست در سد خاکی از شیب پائین دست ملایم تر است زیرا بالادست سد معمولاً به علت تماس با آب خیس است اما پائین دست خشک یا کم آب می باشد. بنابراین به علت خیس بودن مصالح رویه و کاهش مقاومت برشی، امکان ریزش بالادست سد افزایش می یابد بنابراین شیب این قسمت ملایم تر اجرا می شود. محور سد، خط فرضی قائمی است که از نوک تاج در بالادست سد می گذرد.

۱۴-۱- کنترل تراوش در سدهای خاکی

۱- کنترل از زیر سد با دیواره های آب بند (Cut Off Walls) : این دیواره ها که فلزی یا بتنی نفوذ ناپذیر می باشند، با قرارگیری در زیر سد، مانع تراوش محصور آب می شوند (شکل ۱-۱۶).

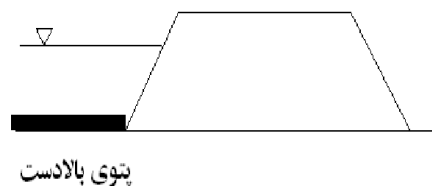


شکل ۱-۱۶

۲- جنس مصالح به کار رفته در سد باید به گونه ای باشد که دبی زیادی را از خود عبور ندهد و آب را به خارج سد زهکش کند. پس از لایه های با دانه بندی مختلف استفاده می شود (Zoned Embankment Earth Dam) سدها معمولاً از دو جنس درشت دانه و ریزدانه تشکیل می شوند. مصالح درشت دانه که نقش پایداری شیروانی های خاکریز را برعهده دارند و برای کنترل تراوش از مصالح ریزدانه استفاده می شود. سد خاکی از دو قسمت هسته و پوسته تشکیل شده است. هسته از مصالح ریزدانه مانند رس بنتونیت که نفوذ پذیری کمی دارد، ساخته می شود. برای جلوگیری از ریزش پوسته (Shell) از مصالح درشت دانه که نقش گارد حفاظتی را دارند، استفاده می شود تا سطح آب پشت سد ثابت بماند. مصالح درشت دانه مانع افت آب می شوند اما مصالح ریزدانه باعث افت خط زه آب می شوند. هر چه به سمت پوسته حرکت کنیم مصالح درشت دانه تر و به سمت هسته، مصالح ریزدانه تر خواهند بود.

۳- استفاده از زهکش های چسبیده به هسته : آب را به طور ایمن به پنجه سنگی (Rock Toe) هدایت می کند.

۴- قبل از ورود آب به هسته و حتی بعد از آن هم از یک لایه فیلتر (Fillter) استفاده می شود تا مانع عبور مصالح ریزدانه به مصالح درشت دانه شود. این فیلترها دارای منحنی دانه بندی مخصوص به خود می باشند. در کنترل تراوش از کف پارامتر گرادیان هیدرولیکی خروجی از سد (i_E) هم تاثیر گذار است. افزایش گرادیان هیدرولیکی خروجی از سد، موجب پدیده ماسه جوشان و نشست سد خواهد شد که نامطلوب می باشد. بنابراین برای کنترل آن می توان با افزایش دادن طول مسیر تراوش (L)، این پارامتر را کاهش داد. به منظور کاهش طول مسیر تراوش می توان از دیوار آب بند در زیر سد استفاده کرد. هم چنین به کمک پتوی بالادست (Up Stream Blanket / Impermeable Blanket) به عنوان یک بستر نفوذناپذیر، می توان طول مسیر تراوش را افزایش داد (شکل ۱-۱۷).



شکل ۱-۱۷

۵- روی جداره خارجی در بالادست از مصالح بسیار درشت دانه استفاده می شود. این مصالح که وزن مخصوص بالایی دارند و مانع از فرسایش پوسته در بالادست سد می شوند، Rip-Rap نام دارند. گاهی از بلوک های بتنی هم استفاده می شود. به علت عدم وجود آب، در بدنه پائین دست نیازی به این مصالح نیست.



۶- مسیرهای اتصال مانند مرز لوله های به کار رفته در بدنه سد بهترین مکان برای تراوش خواهند بود. بنابراین به کمک قلاب هایی مانع حرکت آب می شوند و مسیر تراوش آب را طولانی تر می کنند. هم چنین باید از لانه کردن برخی حیوانات در پائین دست بدنه سد جلوگیری کرد تا مسیرهای مستعد برای تراوش را ایجاد نکنند.

۷- کاشت گیاهان خاص با ریشه های افشان برای جلوگیری از ریزش بدنه پائین دست، تا مانند آرماتور در هم فرو روند و از فرسایش ناشی از هوا در پوسته پائین دست جلوگیری کنند. هم چنین می توان از سکو (Berm) هم استفاده کرد.

۱-۱۵- نرم افزارهای مورد استفاده برای تحلیل سدهای خاکی

Plaxis (۱) Geo slope (۲)

ملاحظات طراحی در سدهای وزنی و قوسی شامل موارد زیر می باشند :

۱. لغزش صفحات افقی بر روی هم

۲. واژگونی

۳. تنش (Stress)

تنش ماکزیمم در رویه بالادست و پائین دست سدها روی می دهد بنابراین جنس و کیفیت این مصالح باید به قدر کافی مناسب باشند. بتن مصرفی در داخل سد را می توان با عیار کمتر و یا حتی توخالی اجرا نمود. ایجاد کردن ماهیچه (Fillet) در بالادست سد موجب افزایش طول مسیر تراوش و از بین بردن تمرکز تنش خواهد شد. هم چنین لغزش ناشی از دو صفحه روی هم را نیز کاهش می دهد. لغزش به ضریب اصطکاک بین مصالح و جنس و طول بستگی دارد. از مقدار نیروی وزن آب روی قسمت ماهیچه برای جلوگیری از لغزش استفاده می شود تا به عنوان یک نیروی مقاوم عمل کند و حول پنجه سد یک ممان مقاوم ایجاد کند. به همین علت ماهیچه شیبدار ساخته می شود اما اگر دیواره قائم باشد، نیرو به بستر وارد می شود. (واژگونی سد همواره حول پنجه سد محاسبه می گردد.)

نیروهای محرک

(۱) نیروی هیدرواستاتیک

(۲) فشار بالا برنده (Up Lift Pressure)

نیروی مقاوم : نیروی وزنی (W)

و در نهایت باید رابطه زیر برقرار گردد :

$$\frac{\sum M_{\text{نیروهای مقاوم}}}{\sum M_{\text{نیروهای محرک}}} > \alpha$$



که α به شرایط بارگذاری بستگی دارد.

نیروی زلزله به دو صورت به سد وارد می شود :

(۱) در جهات رفت و برگشتی به جسم سد اعمال می شود.

(۲) نیروی هیدرودینامیکی (شلاقی): آب داخل مخزن به صورت موجی به بدنه ضربه می زند.

تمامی ملاحظات باید انجام شوند و توزیع تنش ها به کمک نرم افزارهای مربوطه بدست می آیند.

مقطع سد در بارگذاری عادی نباید به کشش افتد اما در حالت بارگذاری غیرعادی که در آن شرایط سیلاب وارد می شود، مقداری تنش کششی به علت شرایط سخت تر بارگذاری وجود خواهد داشت. در شرایط بارگذاری فوق العاده نیروی زلزله هم وارد محاسبات می گردد.

۱-۱۶- طبقه بندی سدها از نظر بزرگی

بر اساس پیشنهاد کمیسیون جهانی سدهای بزرگ ('ICOLD')، که در سال ۱۹۲۸ تاسیس شده است، سدهایی با ارتفاع بیش از ۱۵ متر سدهای بزرگ شناخته شده و همچنین سدهایی که ارتفاع آنها ۱۰ تا ۱۵ متر بوده، ولی حجم مخزن آنها بیش از یک میلیون متر مکعب (۱MCM) است، یا سرریز با ظرفیت بیش از ۲۰۰۰ متر مکعب دارند و یا طول تاج آن ها از ۵۰۰ متر بیشتر است، نیز به عنوان سدهای بزرگ معرفی می شوند. بعضی از انجمن ها و موسسات معتبر در زمینه وضع ضوابط طراحی سازه های آبی عبارتند از: اداره عمران و آبادانی ایالات متحده (USBR) و اداره مهندسين ارتش متحده (USACE).

۱-۱۷- سدهای خاکی

معمولاً عظیم ترین سدهای دنیا، سدهای خاکی اند. این سدها پرکاربرد، ارزان، راحت و اقتصادی ترمی باشند. به علت حجم خاکریز بالا، این سدها نمی توانند زیاد مرتفع باشند. از حدود ۴۲۰۰۰ سد بلند که تا سال ۲۰۰۵ در دنیا ساخته شده است، حدود ۷۱ درصد آن ها از نوع خاکی هستند. دو قسمت مهم سدهای خاکی شامل هسته و پوسته می باشند. هسته (Core)، که قسمت اصلی سد محسوب می گردد از مصالح ریزدانه رسی یا سیلتی و یا ترکیب این دو تشکیل شده است. نفوذپذیری کم این مصالح موجب افت شدید سطح آب می شوند. مصالح ریزدانه نقش کنترل زهکشی از طریق هسته سد را ایفا می کنند. نقش مصالح درشت دانه، محافظت هسته سد در برابر لغزش می باشد. در پائین دست و بالا دست هسته از فیلترهایی استفاده می شود. هرگاه جریان آب از مصالح ریزدانه به سمت درشت دانه صورت گیرد، فیلتر مانع عبور ریزدانه ها می گردد در صورت عدم وجود فیلتر، ریزدانه ها خلل و فرج مصالح درشت دانه را پر می کنند. این تراوش در پائین دست رخ می دهد اما وجود



این فیلترها به علت پدیده تخلیه سریع مخزن، در وجه بالادست هسته و نیز زیر لایه سنگ چین (Rip-Rap) الزامی است.

۱-۱۸- تخلیه سریع مخزن (Rapid Draw Down)

این پدیده مختص سدهای خاکی است. به هنگام تعمیرات خرابی سد یا وقوع سیلاب، سد باید به سرعت تخلیه شود و سطح آب پائین آید. در هنگام تخلیه سریع مخزن، سرعت افت آب در مخزن سد با سرعت تخلیه آب داخل بدنه برابر نیست و خط زه آب با سرعت کمی افت می کند. این فرآیند موجب ایجاد فشار حفره ای (pore pressure) و اختلاف فشار خواهد شد که تخریب سد را به دنبال خواهد داشت.

در وجه رویی پوخته سد از مصالحی به نام سنگ چین (Rip Rap) استفاده می شود. وظیفه این لایه کنترل فرسایش ناشی از موج، باران و هوازگی پوخته می باشد. این لایه به دو صورت اتوماتیک (درهم) (Dumped) و دست چین (Hand placed) اجرا می گردد. در اجرای دست چین، مصالح به خوبی در هم فرو نمی روند و روش اتوماتیک نسبت به روش دست چین ارجحیت دارد. پشت این لایه نیز از یک فیلتر استفاده می شود. طراحی ضخامت لایه فیلتر، جنس و اندازه مصالح آن به کمک منحنی دانه بندی مصالح درشت دانه و ریزدانه تعیین می گردد. اجرای لایه سنگ چین در پائین دست اهمیت چندانی ندارد زیرا این قسمت اغلب در معرض هوا خواهد بود.

۱-۱۹- انواع پوشش وجه بالادست سد بر حسب نوع و میزان کارکرد

۱. سنگ چین (Rip-Rap): ارزان ترین و مطمئن ترین نوع پوشش می باشد.
۲. پوشش بتنی: به صورت بلوکهایی در وجه سد قرار می گیرند. این نوع پوشش نسبت به پوشش های سنگ چین اقتصادی نخواهد بود و باید با ضخامت زیاد اجرا شوند.
۳. پوشش آسفالتی: این نوع پوشش در قدیم مرسوم بوده و اکنون کاربرد زیادی ندارد. پوشش آسفالتی در دماهای مختلف رفتار متفاوتی دارد. قیر داخل این پوشش به سرعت فاسد خواهد شد. پوشش آسفالتی نسبت به دیگر پوشش ها شکل پذیرتر است. در بحث نشست و تحلیل تنش نیز رفتار بهتری از خود نشان می دهد. روی هم رفته، این نوع پوشش ها چندان مناسب نیستند.
۴. ژئوستتیک: دو نوع از پوشش های ژئوستتیک، به نامهای ژئوتکستایل و ژئوممبرین وجود دارند. ژئوتکستایل ها مسلح کننده خاک می باشند و نقش زهکشی و فیلتراسیون را هم بر عهده دارند. ژئوممبرین برای آب بندی بدنه سد به کار می رود.



۵. پوشش گیاهی: این پوشش در برابر ضربات آب و امواج مناسب نیستند و در پائین دست کاربرد زیادی دارند. در مناطقی که رطوبت بالا باشد، از این نوع پوشش استفاده می شود به همین علت پوشش گیاهی در مناطق اروپایی و آمریکا استفاده می شود اما در ایران کاربرد چندانی ندارد.

۱-۲۰- طراحی مصالح سنگ چین

- (۱) انتخاب قطر متوسط مصالح
- (۲) تعیین وزن متوسط هر قطعه سنگ
- (۳) دانه بندی مصالح
- (۴) تعیین ضخامت لایه سنگ چین
- (۵) طراحی لایه فیلتر زیر سنگ چین

تعیین ضخامت لایه فیلتر با کمک ارتفاع موج

- الف) چنانچه ارتفاع موج در مخزن تا ۱/۲ متر باشد، حداقل ضخامت لایه فیلتر، ۱۵ سانتی متر است.
- ب) چنانچه ارتفاع موج در مخزن بین ۱/۲ تا ۲/۴ متر باشد، حداقل ضخامت لایه فیلتر، ۲۲/۵ سانتی متر است.
- ج) چنانچه ارتفاع موج در مخزن بین ۲/۴ تا ۳ متر باشد، حداقل ضخامت لایه فیلتر، ۳۰ سانتی متر است.

انواع جنس پوشش سنگ چین به ترتیب کارکرد

۱. کوارتز و ماسه سنگ
۲. دولومیت و مرمر
۳. گرانیت

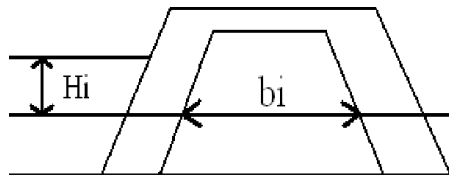
۱-۲۱- هسته سد خاکی (Core)

نقش اصلی این قسمت از سد، کنترل نشت از بدنه و آب بندی سد می باشد. برای اینکه به خوبی این وظیفه را ایفا کند، باید مصالح ریزدانه و با نفوذپذیری کم را به کار برد. در گذشته هسته با جنس آسفالت نیز ساخته شده است. هسته سد با توجه به اندازه ریزدانه هایشان مقاومت برشی کمی دارد. هسته سد خاکی ممکن است نازک یا ضخیم باشد. با کاهش ضخامت هسته سد، پایداری سد افزایش می یابد. اما هسته ضخیم برای کنترل تراوش مناسب است. ملاک تشخیص این دو نوع هسته به صورت زیر است:

الف) اگر $H_i < b_i$ ، هسته سد ضخیم می باشد.

ب) اگر $H_i < b_i$ ، هسته سد نازک می باشد.

پارامترهای b_i و H_i به ترتیب عرض هسته در تراز i ام و ارتفاع آب در تراز i ام می باشند (شکل ۱۸-۱).



شکل ۱۸-۱

در سد با هسته نازک، گرادیان هیدرولیکی خروجی (i) بیشتر از ۱ می باشد و در هسته های ضخیم گرادیان هیدرولیکی خروجی (i) کمتر از ۱ است.

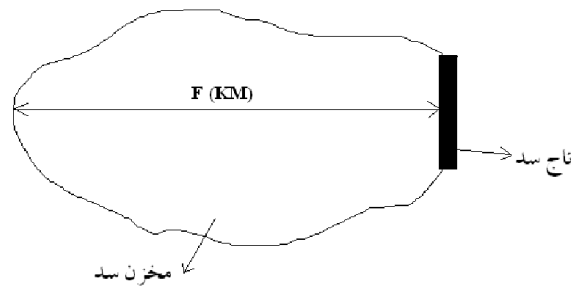
۱-۲۲- ارتفاع آزاد سد یا پیشانی سد (Freeboard)

ارتفاع آزاد، فاصله بین تراز سیلابی مخزن تا تراز تاج سد است. ارتفاع آزاد ناخالص یا نرمال، فاصله بین تراز نرمال تا تراز تاج سد می باشد. تراز نرمال یا عادی آب، حداکثر تراز است که مخزن می تواند داشته باشد تا قابل استفاده برای آبیگری باشد. تراز نرمال که از مطالعات قبلی منابع آب بدست می آید، در طراحی بدنه سد بسیار موثر است که با توجه به میزان بارندگی، جنس مصالح پی، نیاز آبی پائین دست، شیب هیدرولیکی و ... تعیین می گردد. تعیین تراز تاج سد بر عهده طراح می باشد و از ابتدا معین نیست. تراز سیلاب که از مجموع تراز نرمال آب و ضخامت تیغاب بدست می آید، تعیین می شود. به منظور اطمینان بیشتر، تراز تاج سد باید بالاتر از تراز سیلاب در نظر گرفته شود.

وزش باد در مخزن سد، موج هایی را ایجاد می کند و با افزایش سرعت وزش باد، ارتفاع موج افزایش می یابد. در نتیجه باید اثر ارتفاع موج به صورت (H_w) در رابطه تعیین تراز تاج سد لحاظ گردد. هم چنین ضربه امواج به بدنه شیبدار سد، موجب بالارفتن مقداری آب در سطح رویه می شود که به این پدیده روراندگی یا بالازدگی موج (Wave Runup) گویند. ارتفاع روراندگی نیز در محاسبه تراز تاج سد تاثیر خواهد داشت. ارتفاع روراندگی تابع عواملی از قبیل: ارتفاع موج، شیب بدنه سد، طول موج، سرعت باد و طول موج دامنه تاثیر باد (Fetch) می باشد. برای اعمال ارتفاع روراندگی در رابطه تراز تاج سد، به میزان ۵۰ درصد به ارتفاع موج اضافه می شود $(1/5 H_w)$. عامل دیگر موثر بر ارتفاع موج، طول موج دامنه تاثیر باد (Fetch) نامیده می شود. طول موج دامنه تاثیر باد، حداکثر طولی از مخزن سد می باشد که سد روی آن قرار گرفته است.

رابطه مولیتور - استیفنسن:

$$H_w = \begin{cases} 0.322\sqrt{FV} & ; F > 32 \text{ km} \\ 0.322\sqrt{FV} + 0.763 - 0.271\sqrt{F} & ; F \leq 32 \text{ km} \end{cases}$$



شکل ۱-۱۹

تراز تاج سد به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$H_A + S + H_d + \frac{1}{5} H_W + N.W.L$$

در رابطه فوق H_A ، S ، H_d ، H_W و $N.W.L$ به ترتیب ارتفاع ایمنی، نشست سد، ارتفاع سیلاب یا تیغه آب، ارتفاع موج و تراز نرمال می باشند.

اگر پوشش وجه بالادست صاف و از جنس بتن یا آسفالت باشد، مقدار $\frac{1}{5} H_W$ در رابطه فوق به $2H_W$ تبدیل خواهد شد. نشست سد باید به طور دقیق یا حتی الامکان تخمینی محاسبه گردد. برای مناطق زلزله خیز میزان S تا ۳ درصد ارتفاع سد و در دیگر مناطق تا ۲ درصد آن خواهد بود. برای مقادیر $\frac{1}{5} H_W$ و H_d دو نوع ترکیب بارگذاری زیر در نظر گرفته می شود و سپس بحرانی ترین حالت مورد بررسی واقع می شود:

$$\text{الف) } H_{d1} + \frac{1}{5} H_{W1} \quad \text{ب) } H_{d2} + \frac{1}{5} H_{W2}$$

H_W بدست آمده از رابطه مولیتور به سرعت باد وابسته است. H_{W1} و H_{W2} به ترتیب باد با احتمال وزش ۱ درصد و باد با احتمال وزش ۲۰ درصد می باشد و نیز H_{d1} و H_{d2} به ترتیب ارتفاع سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله می باشند. در نهایت با بررسی روابط فوق، هر کدام که بحرانی تر باشد را ملاک طراحی قرار می دهند. در سد خاکی آب نباید از روی سد عبور کند که یک ضعف برای این سد محسوب می شود. ارتفاع آزاد سد (f) شامل $\frac{1}{5} H_W$ ، S و H_A می شود و ارتفاع آزاد نرمال (f') نیز شامل $\frac{1}{5} H_W$ ، S ، H_A و H_d می گردد. محاسبه ارتفاع آزاد آب (f) در سد خاکی بسیار مهم است و دقت بالایی را می طلبد.

گاهی جهت اطمینان از عدم ریزش آب از روی سد، در وجه بالادست سد دیواره هایی به نام پاراپت قرار می دهند. به عبارت دیگر در صورتیکه احتمال سیلاب بیشتر باشد، دیواره هایی روی سد قرار دارند تا تراز تاج سد را بیشتر کنند. محاسبه f برعهده طراح است و بهتر است که مقدار بیشتری در نظر گرفته شود تا ضریب اطمینان بالا رود.



۱-۲۳- عرض تاج در سد خاکی

مقدار عرض تاج (B) برای سدهای با ارتفاع مختلف، متفاوت است. عوامل اجرایی نیز در تعیین مقدار آن موثر خواهند بود. حداقل عرض برای عبور و مرور ماشین آلات ساختمانی ۶ متر است. طبق پیشنهاد USBR، برای سدهای خاکی با ارتفاع کمتر از ۲۰ متر، عرض تاج طبق رابطه ذیل قابل محاسبه است:

$$B = \frac{H}{5} + 3$$

که پارامتر H، ارتفاع سد می باشد.

چنانچه ارتفاع سد بیش از ۲۰ متر باشد، عرض سد به کمک آئین نامه ژاپن محاسبه می گردد:

$$B = 3/6 H^{1/3} - 3$$

اگر بر روی تاج عبور و مرور صورت نگیرد، حداقل عرض تاج ۳ متر است.

عوامل موثر در تعیین عرض تاج سد عبارتند از:

۱. نوع مصالح مصرفی
 ۲. ارتفاع سد
 ۳. میزان اهمیت سد
 ۴. عرض جاده عبوری از روی سد
 ۵. حداقل عرض تاج برای انجام عملیات ساختمانی
- اگر ضخامت لایه آبرفت کم باشد، از هسته معکوس استفاده می شود تا تراوش محصور سد را کنترل کند. در گذشته سیستم زهکشی سدهای همگن دودکشی بوده است. ضخامت لایه های زهکش به کمک رابطه داریسی ($Q=k.i.A$) تعیین می گردد.

پایداری سدهای خاکی تنها از طریق تراکم امکان دارد و از ماده چسباننده ای در تراکم سد خاکی استفاده نمی شود. تراکم قائم به کمک غلتکها صورت می گیرد اما تراکم افقی انجام نمی شود، بنابراین ضریب نفوذپذیری مصالح در راستای افقی بدنه سد خاکی بیشتر از راستای قائم می باشد. بنابراین در محاسبات، ضریب نفوذپذیری معادلی در نظر گرفته می شود و ضخامت لایه آبرفت نسبت به این ضریب معادل تعیین می گردد. در سدهای خاکی انواع گالری ها با کارکرد خاص قرار دارند. به عنوان مثال گالری های زهکش، برای کنترل زهکشی در بدنه سد کاربرد دارند. گالری بازرسی، در طول دوره بهره برداری به طور مداوم فشار آب و تغییرات تنش-کرنش در نقاط مختلف را ثبت می کنند.

۱-۲۴- تعاریف و اصطلاحات



ارتفاع نرمال یا تراز عادی آب N.W.L: حداکثر ارتفاع آب در تراز تاج سرریز می باشد.

تراز سیلابی: بالاترین تراز آب در زمان سیل طرح است.

تراز حداقل آب: پائین ترین تراز در شرایط بهره برداری عادی

ارتفاع آزاد یا پیشانی سد: فاصله قائم بین حداکثر تراز مخزن و تاج سد است.

ارتفاع مرده: تراز که حجم رسوبات وارد شده به مخزن در طول زمان بهره برداری سد را نشان می دهد.

این تراز در زمان های مختلف، متفاوت خواهد بود.

حجم کل مخزن یا ظرفیت کلی: فاصله بین حجم تراز بستر تا تراز نرمال آب می باشد.

حجم مفید یا زنده: حجمی که در نهایت توسط رسوبات اشغال می شود. حجم مفید شامل دو بخش فعال

(active) و غیر فعال (inactive) می باشد. حجم غیر فعال به جز در زمان تعمیرات سد و کم آبی پائین دست،

همواره در مخزن موجود است.

حجم اضافی یا سربار: حد فاصل تراز نرمال و تراز سیلاب را حجم اضافی می نامند.

ارتفاع سازه ای سد: فاصله قائم از کف فونداسیون تا تاج سد می باشد.

ارتفاع هیدرولیکی: فاصله قائم از بستر رودخانه تا تراز نرمال مخزن می باشد.

۱-۲۵- نکات سدهای خاکی

۱) اگر ضخامت لایه آبرفت کم باشد، از هسته معکوس جهت کنترل تراوش محصور استفاده می شود. در گذشته سیستم زهکشی سدهای همگن دودکشی بوده است. ضخامت لایه های زهکش بر اساس رابطه داریسی ($Q=k.i.A$) تعیین می گردد.

۲) پایداری سدهای خاکی تنها از طریق تراکم امکان دارد و از ماده چسباننده ای در تراکم سد خاکی استفاده نمی شود. تراکم قائم به کمک غلتکها صورت می گیرد اما تراکم افقی انجام نمی شود، بنابراین ضریب نفوذپذیری مصالح در راستای افقی بدنه سد خاکی بیشتر از راستای قائم می باشد. بنابراین در محاسبات، ضریب نفوذپذیری معادلی در نظر گرفته می شود و میزان تراوش از بدنه سد و یا آبرفت با توجه به این ضریب معادل تعیین می گردد.

۳) در سدهای خاکی انواع گالری ها با کارکرد خاص قرار دارند. به عنوان مثال گالری های زهکش، برای کنترل زهکشی در بدنه سد کاربرد دارند. در طول دوره بهره برداری و از طریق گالری های بازرسی، فشار آب و تغییرات تنش _ کرنش در نقاط مختلف ثبت می شود.

۴) در سدهای خاکی از نوع سنگریزه ای کنترل تراوش آب از بدنه توسط المان ناتراوا (غشای نفوذپذیر) که روی بدنه بالا دست ساخته می شود، انجام می گیرد.

۵) نقش زهکش ها در ساخت سدهای خاکی:



زهکش ها نقش جمع آوری و هدایت زه آب عبور کرده در بدنه یا شالوده را دارند تا از این طریق حتی الامکان بدنه پائین دست خشک نگه داشته شود. مصالح زهکش نفوذپذیری بالایی دارند که در نتیجه ارتباط بین آن ها و بدنه سد به خصوص هسته سد باید به طور تدریجی و با تعبیه فیلتر انجام شود.

(۶) پنجه سنگی سیستمی از سنگ هایی با قطعات درشت است که به همراه زهکش افقی مورد استفاده قرار می گیرد. اندازه قطر متوسط قطعات سنگ تشکیل دهنده آن ۱۵ تا ۲۰ سانتی متر است. ارتباط بین پنجه سنگی و بدنه سد از طریق لایه های فیلتر انجام می شود. در مناطق زلزله خیز ضخامت لایه های فیلتر و زهکش به علت نشست زیاد سد، در حدود ۲ تا ۳ برابر افزایش می یابد. بنابراین ضخامت هسته سد باید افزایش یابد و حتی اجرای هسته مایل در مناطق زلزله خیز مناسب تر خواهد بود.

(۷) پوسته سد، برای سد خاکی نقش یک تکیه گاه مناسب را ایفا می کند که از مصالح مختلف ساخته می شود.

۱-۲۷- انواع شکل های تخریب سدهای خاکی

۱. سرریز شدن از روی لبه سد: به علت ارتفاع آزاد نرمال کم و در نظر گرفتن سیلاب طرح ناکافی
۲. فرسایش داخلی / تراوش داخلی
۳. نشست بدنه و پی

۱-۲۸- مزایای سد خاکی

۱. از نظر شرایط توپوگرافی، محل اجرا و عریض یا تنگ بودن محل احداث سد مشکلی ایجاد نمی کند.
۲. دارای خصوصیت انطباق پذیری بیشتر مصالح مصرفی بدنه سد با مصالح بستر می باشد.
۳. فراوانی و کم هزینه بودن مصالح مصرفی در سدهای خاکی
۴. به علت استفاده از مصالح خاکی و سنگریزه ای، بدنه سد و اجزای داخلی آن نسبت به مصالح صلب بتنی دارای خاصیت انعطاف پذیری است.
۵. عملیات اجرایی سد خاکی به طور پیوسته قابل اجرا، سریع تر و کم هزینه تر خواهد بود.

۱-۲۹- معایب سد خاکی

۱. به هنگام سیلاب و افزایش ارتفاع آب، اگر روگذری سیل اتفاق افتد، سد از خود مقاومت نشان نداده و دچار تخریب می شود.
۲. نشست پنهان در بدنه و پی سد که احتمال خرابی را افزایش می دهد.



۱-۳۰- سدهای بتنی

پایداری سد بتنی وزنی به کمک وزن شان تامین می گردد. مهم ترین نیروی مقاوم در این سدها، نیروی وزن می باشد. به علت بالا بودن وزن مخصوص بتن نسبت به مصالح خاکی، این نوع سدها پایداری بیشتری از خود نشان می دهند. وزن زیاد سد بتنی بر روی سطح مقطع کوچک آن وارد می شود و در نتیجه تنش بیشتری به فونداسیون وارد می گردد. از این رو سدهای بتنی در مناطقی که مصالح بستر از نوع سنگی و مقاوم باشند، اجرا می شوند. ظرفیت باربری پی در سدهای بتنی باید بالا باشد. اجرای این سدها از لحاظ توپوگرافی در دره های تنگ تر به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می باشد.

سه معیار برای طراحی سدهای بتنی واژگونی، لغزش و تنش می باشد. طراحی اینگونه سدها باید به صورتی باشد که تا حتی الامکان مقطع سد به کشش نیافتد. اگر در هر مقطع برآیند نیروهای وزن، فشار آب و... در یک سوم میانی عرض تاج وارد شود، هیچ قسمتی از سد در کشش نخواهد بود و مقطع تماماً تحت فشار قرار خواهد گرفت. واژگونی همواره حول پنجه سد بررسی می گردد. بیشترین تنش در رویه های پائین دست و بالادست رخ می دهد. این سدها فاقد آرماتور محاسباتی هستند اما می توانند آرماتور افت و حرارت داشته باشند. عملیات بتن ریزی سدهای بتنی، بسیار حساس و محافظه کارانه می باشد. در حین بتن ریزی مقداری از حرارت داخل بدنه باقی می ماند و مغزه سد (هسته) نسبت به بالادست و پائین دست گرم تر است. در نتیجه تنش های حرارتی در مغزه ایجاد می شود. به منظور کاستن از تنش های حرارتی موجود، از شیوه های پیش سرمایش و پس سرمایش استفاده می شود. به عنوان مثال در فرآیند پس سرمایش، از لوله های خنک کننده در داخل سد استفاده نموده، با ایجاد سیستم چرخش آب داخل بدنه سد را خنک نگه می دارد. این عمل باعث پائین آمدن دمای بالای بتن که ناشی از واکنش هیدراتاسیون بتن ریزی بدنه سد است، خواهد شد. از عملیات پیش سرمایش (pre cooling)، نیز می توان به کاهش دمای مصالح مصرفی داخل بدنه قبل از بتن ریزی، بتن ریزی در ایام خنک روز و سال و... اشاره نمود.

نوع دیگر گالری مورد استفاده در سد بتنی، گالری تزریق (Groting) می باشد که دوغاب سیمان را به فونداسیون منتقل می کند تا ترک ها را پوشش دهد. برخی از گالری ها فشار بالا برنده (uplift) را کاهش می دهند. عملکرد این گالری ها بدین صورت است که با زهکشی آب و خشک نگه داشتن محیط، فشار uplift را کاهش می دهند.

نیروی زلزله وارده به بدنه سد، ایجاد شتاب قائم و افقی می کند و متناسب با جرم سازه ممان اینرسی روی می دهد. نیروی زلزله در جهت رو به پائین سد، تنش فشاری در پی را افزایش می دهد. در صورت خالی بودن سد، نیروی زلزله رو به بالادست بدترین شرایط را به وجود خواهد آورد.

به سبب کمتر بودن تنش در داخل بدنه نسبت به رویه سد بتنی، گاهی در هنگام اجرا در این قسمت ها، از بتن ضعیف تر و با مقاومت فشاری کمتر استفاده می شود. حتی در برخی موارد این سدها به صورت توخالی اجرا



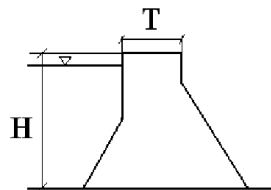
می شوند. بتن قسمت های داخلی، تنش های حرارتی را افزایش داده و پایداری سد را به خطر می اندازد. حسن سدهای بتنی صلبیت و دوام بالای آنها است اما سدهای خاکی در سیلاب های قوی احتمال تخریب زیادی دارند. سدهای بتنی به مراقبت دائمی و نگهداری بالا نیاز ندارند و پایداری قابل توجهی دارند.

۱-۳۱- مهم ترین علل تخریب سدهای بتنی دنیا

۱. ۴۰ درصد، ناشی از مشکل فونداسیون ضعیف و یا عدم تزریق بتن به داخل پی
۲. ۲۳ درصد، ناشی از ظرفیت ناکافی سرریز
۳. ۱۲ درصد، ناشی از کیفیت پائین ساخت و بتن ریزی بی کیفیت
۴. ۱۰ درصد، ناشی از نشست نامتقارن
۵. ۳ درصد، ناشی از عملیات تروریستی و خرابکارانه
۶. ۱ درصد، ناشی از زلزله

۱-۳۲- رابطه تعیین عرض تاج در سدهای بتنی

به کمک رابطه زیر می توان عرض تاج سد (T) را بدست آورد (شکل ۲۰-۱):



شکل ۲۰-۱

$$T \geq \frac{1}{10} (H + \frac{1}{10})$$

از رابطه $T \cong \sqrt{H}$ نیز به عنوان حدس اولیه عرض تاج سد استفاده می شود.

۱-۳۳- مزایای سدهای بتنی

- ۱) در مقابل روگذری سیل تا حدی از خود مقاومت نشان داده و حتی سرریز می تواند بر روی بدنه سد قرار گیرد.
- ۲) تجهیزات هیدرولیکی شامل لوله های آبگیر از مخزن، دریچه ها، شیرآلات و ... را می توان در اتاقک های مناسب یا دالان های احداث شده در بدنه سد در نظر گرفت.



۳) در هنگام زلزله مقاومت سدهای بتنی بدون خطر فروپاشی عمده بیشتر از سدهای خاکی است.

۱-۳۴- معایب سدهای بتنی

- ۱) بستر و ساختگاه سدهای بتنی باید از بستر سنگی با مقاومت کافی تشکیل شده باشد.
- ۲) مصالح طبیعی و مصنوعی مورد نیاز باید از نظر کیفیت در حد قابل قبول بوده و به اندازه کافی به محل اجرا نزدیک باشد.
- ۳) عملیات بتن ریزی در سدهای بتنی پیوسته نیست و نیاز به تخصص های متعددی نیز دارد.
- ۴) هزینه تمام شده اجرای سدهای بتنی از سدهای خاکی بیشتر است.

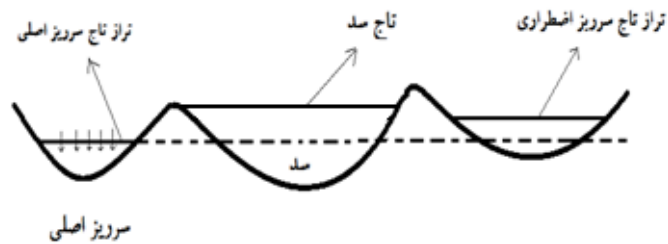
فصل دوم: سرریز سدها (Spillways)

۲-۱- مقدمه

سرریزها موانعی در جلوی آب می باشند که آب از روی آن عبور می کند و در اثر این عبور، یک رابطه هیدرولیکی مشخص بین دبی و مشخصات جریان در اطراف این سازه برقرار می باشد. سرریزها جزو مقاطع کنترل می باشند. جریان عبوری از روی تاج سرریزها، حالت بحرانی دارد. سرریزها برخی مواقع قسمتی از عرض مسیر و یا کل عرض رودخانه را پر می کنند. در سدهای بتنی تا حد امکان سرریز را در داخل بدنه سد تعبیه می کنند. سرریز سدها، سازه هایی در سد می باشند که امکان خروج سیلاب های اضافه بر ظرفیت سد را میسر می سازند و هدف از ساخت آنها، کنترل ارتفاع و حجم آب پشت دریاچه سد می باشد.

۲-۲- طبقه بندی سرریزها براساس اهداف ساخت سد

- ۱) سرریز اصلی Main Sp.: سیلاب را به پائین دست منتقل می کند.
- ۲) سرریز کمکی Auxiliary Sp.: در مناطقی مانند دره های تنگ که سرریز اصلی نمی تواند کل سیلاب را هدایت کند، از این نوع سرریز استفاده می شود.
- ۳) سرریز اضطراری Emergency Sp.: این سرریزها در مواقع عادی و سیل طرح عمل نمی کنند. در صورت ایجاد سیل با دوره بازگشت طولانی و دبی زیاد، سرریز اضطراری به صورت خاکیز مانند (Dike) عمل می کند و نقش فیوز را دارند (شکل ۱-۲). بنابراین سازه سرریز اصلی دچار خسارت نشده و آب از سمت دیگر تخلیه خواهد شد. نمونه مرسوم این نوع از سرریزها (Fuse Plug Dike) هستند.



شکل ۲-۱

۲-۳- طبقه بندی بر اساس شکل سرریزها

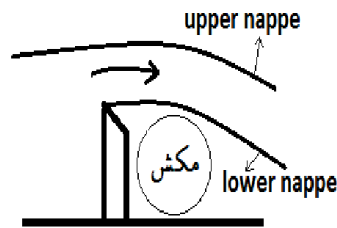
(۱) سرریز ریزشی (Free Overfall Spillways):

حداکثر ارتفاع این سرریز ۶ متر است. اگر ارتفاع سد زیاد باشد، پائین دست سد دچار فرسایش می شود. مصالح پائین سد باید سنگی و مرغوب باشند و یا از یک استخر (plunge pool) با مصالح درشت دانه که جلوی ضربه آب را می گیرند، استفاده شود. به کمک Overhanging lip، آب به قسمت های دورتر ریزش می کند و فرسایش از پای سد دورتر می شود (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲

(۲) سرریز اوجی (Over Flow Spillways / Ogee Spillways / Sharp Crested Weir):



شکل ۲-۳

فشار روی تیغه بالایی و پائینی، فشار جو است اما زیر این دو تیغه، ناحیه فشار منفی (مکش) است (شکل ۲-۳). این ناحیه بدون هوادهی است و باعث ایجاد پدیده حفره زایی (cavitation) می گردد.

۳) **سرریز شوت (Chute Spillways / Open Channel):** این سرریز یک کانال تخلیه طولانی است که آب را به فواصل دورتر هدایت می کند.

۴) **سرریز کناری یا جانبی (Slide - Channel Spillways):** تفاوت این سرریز با سرریز شوت این است که آب ریزشی در همان مسیر حرکت نمی کند بلکه یک چرخش حدوداً ۹۰ درجه ای دارد و توسط کانال دیگر هدایت می شود. این سرریز روی بدنه نیست. از این سرریز می توان به عنوان یک سرریز کمکی هم استفاده نمود.

۵) **سرریز نیلوفری (Morning Glory Spillways):** این سرریز معمولاً در سدهای خاکی اجرا می شود. ظرفیت تخلیه زیادی ندارد اما در سدهای کوچک و متوسط به عنوان سرریز اصلی و در مخازن و سدهای بزرگ، به عنوان سرریز کمکی کاربرد دارند. یکی از اهداف جنبی در کاربرد این نوع سرریزها، می توان به زیبایی و جذب توریست اشاره نمود.

۶) **سرریز سیفونی (Siphon Spillways):** این سرریز از طریق مکش آب را به پائین دست می کشد اما چندان پرکاربرد نیست. هزینه نگهداری از این سرریز بالا است اما سرعت تخلیه بالایی دارد.

۷) **سرریز پلکانی (Cascade Spillways / Stepped Spillways):** سرریز پلکانی مانند سرریز شوت اما پله دار می باشد.

۸) **سرریز مارپیچی یا کنگره ای (Labyrinth Spillways):** طول موثر در این سرریزها، به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

سرریزها به دو نوع داخل یا خارج بدنه اجرا می شوند. سرریزهای اوجی، سیفونی و مارپیچی در داخل بدنه و سرریزهای کناری و نیلوفری در خارج از بدنه استفاده می شوند. سرریزهای پلکانی و شوت می توانند در داخل و نیز خارج بدنه استفاده شوند.



۲-۴- بخش های اصلی سرریز

۱. **کانال ورودی (Entrance channel):** در سرریزهای خارج از بدنه، آب به طور مستقیم از مخزن خارج نمی شود. کانال ورودی آب را به سمت سرریز هدایت می کند.
۲. **سازه کنترل (Control structure):** قسمت اصلی سرریز که آب از روی آن ریزش می کند و تاج در آن قرار می گیرد. معمولاً به صورت یک اوجی مستقیم (straight ogee) است. البته سازه کنترلی می تواند انحنای هم داشته باشد. سازه کنترل در انتهای بالادست سرریز واقع می شوند. سازه کنترل در سرریز نیلوفری بسته به تراز آب داخل مخزن، می تواند در بالادست و نیز پائین دست قرار گیرد.
۳. **کانال تخلیه (Discharge channel - water way):** آب از روی سازه کنترلی عبور و سپس از طریق یک کانال تخلیه به سمت پائین دست هدایت می شود. این کانال بسته به محل و موقعیت، طول متفاوتی خواهد داشت. شکل مقطع آن می تواند به صورت دایره ای و یا کانال باشد. کانال تخلیه در واقع یک سازه انتقال (conveyance structure) آب است.
۴. **سازه پایانه یا ترمینال (Terminal structure):** پایانه سرریز بوده و مستهلک کننده انرژی (Energy Dissipator) است. با ریزش آب از روی سرریز، انرژی زیادی در بالادست ذخیره می شود. با تبدیل انرژی پتانسیل بالای آب بالا دست به انرژی جنبشی در پای سرریز، آب سرعت زیادی خواهد داشت که می تواند موجب فرسایش در پائین دست شود. از اینرو باید سازه ای وجود داشته باشد تا این انرژی بالا را مستهلک کند. به منظور استهلاک انرژی می توان از حوضچه های آرامش، پرتابه های جامی شکل (Flip bucket) و sky - jump ها استفاده نمود.

۲-۵- سرریز لبه آبریز

این نوع سرریزها که مدل اصلاح شده از سرریزهای ریزشی هستند، اقتصادی ترین، ساده ترین و پرکاربردترین نوع سرریز سد می باشند. رابطه هیدرولیکی عبور دبی از روی آن ها به صورت زیر می باشد:

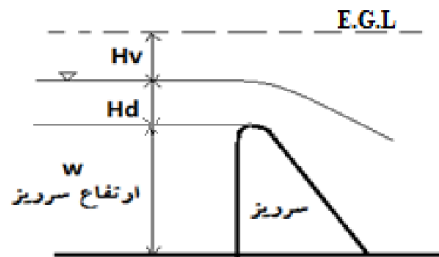
$$Q = C. Le. He^{\frac{3}{2}}$$

در رابطه بالا Q ، He ، Le و C به ترتیب دبی عبوری از روی سرریز، بار موثر آبی (بار کلی)، طول موثر سرریز و ضریب تخلیه سرریز می باشند.

به دلیل انقباض شدید جریان آب در عبور از سرریز، در کناره دیواره های سرریز، فشردگی جریان وجود خواهد داشت که در نتیجه در طول کوتاهی از طرفین طول سرریز، آب عبور نمی کند و داریم:

$$Le = L - \frac{1}{2}(NKp + Ka)He$$

در رابطه فوق Ka ، Kp و N به ترتیب ضریب انقباض دماغه سرریز، ضریب انقباض پایه های پل، تعداد پایه پل و طول اجرایی سرریز می باشند. ضرایب Ka و Kp بسته به شکل دماغه انتهایی و پایه پل متغیر است.



شکل ۲-۴

در شکل ۲-۴، هد سرعت، فاصله تاج سرریز تا سطح آب (ارتفاع طراحی یا تیغه آب) و ارتفاع سرریز به ترتیب با H_v ، H_d و w نمایش داده شده اند. در رابطه $H_v = \frac{V_o^2}{2g}$ ، V_o سرعت آب در نزدیکی سرریز می باشد که به طور تقریبی از رابطه زیر بدست می آید:

$$V_o = \frac{Q}{Le(w+H_d)}$$

هر چه سرریز، بلندتر باشد مقدار سرعت آب در ورود به سرریز کمتر خواهد بود و در نتیجه هد سرعت کاهش خواهد یافت. رابطه بین هد طراحی و هد کل آبی به صورت زیر است:

$$H_e = H_d + H_v$$

در سرریزهای بلند مقدار H_d و H_e خیلی به یکدیگر نزدیک و حتی گاهی عملاً برابر است. برای عبور و مرور افراد و وسایل از روی سرریز باید روی آن یک پل احداث گردد. به شیوه مشابه در اطراف پایه های پل نیز جریان انقباض خواهد داشت که باید در رابطه طول موثر سرریز اعمال گردد.

طراحی سطح رویی سرریز آب باید به گونه ای باشد که بر lower nappe منطبق گردد زیرا در این صورت جریان دقیقاً مماس بر سطح حرکت می کند و فشار وارد بر بدنه، حداقل می گردد. با افزایش دبی از دبی طراحی، آب از روی بدنه جدا شده و ضریب تخلیه (c) بیشتر می شود اما این امر موجب فشار منفی بر روی بدنه سرریز و وقوع پدیده کاویتاسیون خواهد شد که بدنه سرریز را دچار تخریب خواهد نمود. برای کاهش خطرات ناشی از تخریب بدنه، می توان از مجراهای هواده در ناحیه فشار منفی استفاده کرد تا در صورت بروز سیلاب بزرگتر از سیلاب طرح، سرریز تخریب نشود. همواره سعی می شود تا مقدار ارتفاع طرح به درستی انتخاب گردد. حالت دیگر عکس حالت قبل است یعنی با کاهش دبی آب، جریان بر روی بدنه می خوابد و دچار



depression می گردد. در این حالت اصطکاک اضافه ایجاد می شود که باعث کاهش ضریب تخلیه سرریز و در نتیجه کاهش دبی می شود. اگر ارتفاع مخزن (H_1) از ارتفاع طراحی (H_d) کمتر باشد، خواهیم داشت:

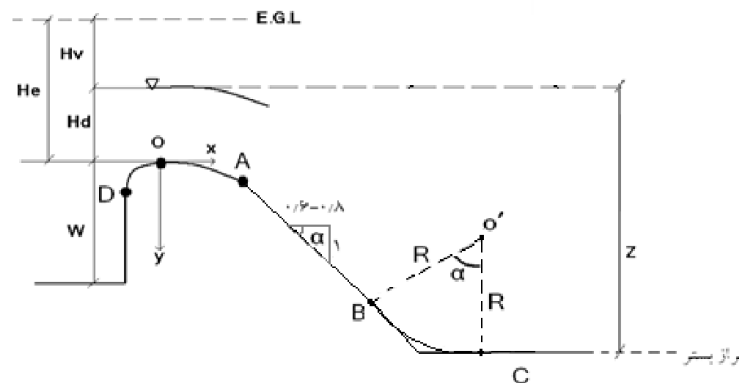
$$C_1 = C \left(\frac{H_1}{H_d} \right)^{0.12}$$

۲-۶- تعیین ضریب تخلیه (C)

ضریب تخلیه سرریز با دیواره قائم، به کمک نمودار شکل (۱) و با داشتن $\frac{w}{H_e}$ بدست می آید. چنانچه دیواره بالادست سرریز به صورت مایل باشد، ضریب تخلیه به دست آمده از نمودار (۱) باید در ضریب تصحیحی که از نمودار شکل (۲) به دست می آید، ضرب و اصلاح شود. در صورتی که شرایط در پائین دست به گونه ای باشد که پرش مستغرق ایجاد گردد و تراز آب در پائین دست از تراز تاج سرریز بیشتر باشد، تصحیح دیگری نیز باید انجام شود. این ضریب اصلاحی به صورت کاهش درصد C توسط نمودار شماره (۳) و با داشتن مقادیر $\frac{hd+d}{H_e}$ و $\frac{hd}{H_e}$ بدست می آید.

۲-۷- طراحی رویه سطح سرریز لبه آبریز

شکل متعارف سرریزهای اوجی به صورت زیر می باشد:



شکل ۲-۵

معادله منحنی پائین دست تاج سرریز (OA) به صورت زیر است:

$$y = \frac{x^n}{K \cdot H_d^{n-1}}$$

این منحنی تا نقطه ای به نام نقطه تماسی (point of Tangency) ادامه می یابد که از آن نقطه به بعد شیب بدنه سرریز با شیب بدنه سد یکسان خواهد شد. مقدار شیب در نقطه مماسی بر اساس ملاحظات پایداری سد بدست می آید.



در رابطه بالا n و k اعداد ثابتی هستند که با توجه به جدول زیر و براساس شیب دیوار سرریز تعیین می گردند.

جدول ۱-۲

شیب بالا دست ($H:V$)	k	n	R_1	R_2	a	B
$1:\infty$	۲	$1/85$	$0.5 H_d$	$0.2 H_d$	$0.175 H_d$	$0.282 H_d$
$1:3$	$1/936$	$1/836$	$0.68 H_d$	$0.21 H_d$	$0.139 H_d$	$0.237 H_d$
$1:1.5$	$1/939$	$1/81$	$0.48 H_d$	$0.22 H_d$	$0.115 H_d$	$0.214 H_d$
$1:1$	$1/873$	$1/776$	$0.45 H_d$	۰	$0.119 H_d$	$0.119 H_d$

شکل سرریز لبه آبریز به پارامترهای زیر بستگی دارد:

۱. هد روی تاج (H_d)
۲. ارتفاع سرریز
۳. زاویه تمایل وجه بالادست
۴. استغراق یا دم استغراق سرریز

سرریز اوجی بعد از منحنی OA، به خطی با شیب ثابت می رسد که مقدار این شیب از ملاحظات پایداری سد بدست می آید. در نتیجه شیب سرریز تا نقطه B یکسان خواهد بود. با مشتق گیری از رابطه معادله منحنی OA می توان شیب رویه سرریز را در هر نقطه محاسبه نمود که در نقطه مماسی مقدار معلوم و از قبل تعیین شده ای است.

$$m = \frac{dy}{dx} = \frac{n.x^{n-1}}{K.Hd^{n-1}}$$

شیب منحنی OA لحظه به لحظه افزایش می یابد تا به نقطه A برسد. در پای سرریز باید از یک قوس معکوس استفاده نمود که این قوس دارای شعاعی است که به پیشنهاد USBR از رابطه زیر به دست می آید:

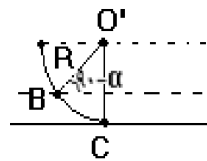
$$R = 0.305 \times 10^{\frac{Vt + 6/4 Hd + 4/88}{3/6 Hd + 19/52}}$$

Vt در رابطه بالا سرعت تئوریک جریان در پای سرریز می باشد که بر اساس پیشنهاد Peterka در سال ۱۹۵۷ از رابطه زیر به دست می آید:

$$V_t = \sqrt{2g(z - \frac{H_d}{2})}$$



پارامتر Z در رابطه فوق، فاصله ارتفاعی تراز بستر در پائین دست تا تراز آب در بالادست سرریز می باشد. زاویه مرکزی این قوس معکوس برابر زاویه ای است که خط AB با محور افقی می سازد. به منظور به هم پیوستن این قوس، از بستر به اندازه $R(1-\cos\alpha)$ بالا رفته تا شیب ثابت پائین دست سرریز را در نقطه ای مانند B قطع کند. نقطه B ، نقطه شروع قوس معکوس است. حال از این نقطه خطی در امتداد زاویه $90^\circ - \alpha$ درجه نسبت به افقی رسم می کنیم. محل تقاطع این خط با خطی به فاصله R از بستر، مرکز قوس معکوس خواهد بود. انتهای قوس معکوس نیز از ترسیم عمودی بر بستر از نقطه O' بدست خواهد آمد (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲

۸-۲- طراحی قوس بالادست تاج سرریز

اگر دیواره سرریز قائم باشد، می توان به کمک رابطه پیشنهادی زیر که توسط Cassidy در سال ۱۹۷۰ مطرح گردید، قوس بالادست را طراحی نمود:

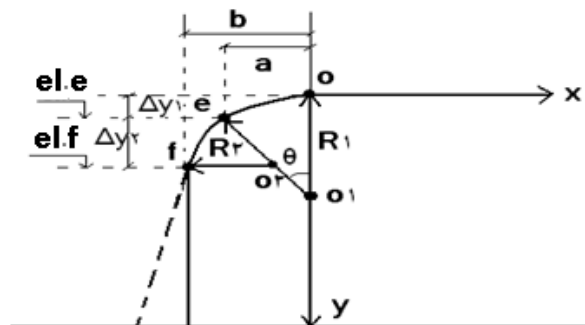
$$\left\{ \begin{array}{l} y = \frac{0.724 (x + 0.27H_d)^{1/85}}{H_d^{0.85}} - 0.4315 H_d^{0.775} (x + 0.27H_d)^{0.625} + 0.126 H_d \\ 0.126 \geq \frac{y}{H_d} \geq 0, \quad 0 \geq \frac{x}{H_d} \geq -0.27 \end{array} \right.$$

منحنی پیشنهادی Cassidy تنها برای سرریزهای با دیواره بالادست قائم می باشد. اما در حالت کلی می توان از منحنی پیشنهادی موسسه USBR که به صورت ترکیب دو دایره با شعاع و مراکز مختلف است، استفاده نمود. برای طراحی این قوس باید مقادیر R_1, R_2, a و b را از جدول ۱-۲ بدست آورد.

جدول ۱-۲

شیب بالادست ($H:V$)	k	n	R_1	R_2	a	B
$1:\infty$	۲	$1/85$	$0.5 H_d$	$0.2 H_d$	$0.175 H_d$	$0.282 H_d$
$1:3$	$1/936$	$1/836$	$0.68 H_d$	$0.21 H_d$	$0.139 H_d$	$0.237 H_d$
$1:1.5$	$1/939$	$1/81$	$0.48 H_d$	$0.22 H_d$	$0.115 H_d$	$0.214 H_d$
$1:1$	$1/873$	$1/776$	$0.45 H_d$	۰	$0.119 H_d$	$0.119 H_d$

نحوه رسم این قوس دو مرکزی بدین صورت می باشد که از نقطه O به اندازه R_1 به سمت پائین خطی رسم کرده تا به نقطه O_1 برسیم. سپس نوک پرگار را در نقطه O_1 قرار داده و دایره ای با شعاع R_1 رسم می کنیم. نقطه e محل تقاطع دایره اول با خطی فرضی به فاصله افقی a از O می باشد. برای رسم قوس دوم، روی خط O_1e به اندازه R_2 پائین آمده تا به نقطه O_2 برسیم. سپس دایره ای با شعاع R_2 رسم می کنیم. محل تقاطع دایره دوم با خط فرضی به فاصله افقی b از O ، نقطه پایان قوس دوم (f) می باشد. بعد از نقطه f ، دیواره سرریز می تواند به صورت مایل یا قائم ادامه یابد (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲

در این حالت خواهیم داشت:

$El.e = El.o - \Delta y_1$	$El.f = El.o - (\Delta y_1 + \Delta y_2)$	$\Delta y_1 = R_1(1 - \cos \theta)$	$\Delta y_2 = (b - a) \tan \theta$	$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{a}{R_1} \right)$
----------------------------	---	-------------------------------------	------------------------------------	---

مثال) مطلوبست طرح مقطع مناسبی برای یک سرریز لبه آبریز اجرا شده در یک سد وزنی که در سمت پائین دست دارای حداکثر شیبی معادل ۱:۷/۰ (H : V) باشد. شدت جریان ۵۰۰ ساله ای که به عنوان دبی طرح در نظر گرفته شده، ۵۱۶۵ متر مکعب بر ثانیه و تراز تاج سرریز در رقوم ۲۰۴ متر حفظ می شود. رقوم متوسط بستر رودخانه ۱۰۰ متر و طول اجرایی سرریز ۱۱۰ متر است که در روی آن ۴ عدد پایه با کناره های نیم دایره به ضخامت هر یک برابر ۱ متر قرار دارد. سایر فرضیات لازم را به صورت منطقی انتخاب نمایید (دیواره بالادست سرریز قائم فرض شود).

(حل)



$$L=110-4(1)=106$$

با فرض دماغه ربع دایره، $Ka=0.1$ می باشد.

$$5165=2.1805 \times (106-0.28H_e) \times H_e^{\frac{3}{2}}$$

$$H_e=8.0481$$

$$\frac{w}{H_e} = 12.92 > 2.5 \quad \text{از نمودار} \quad c=2.1805 \quad H_d = H_e - H_v = 8.0481 - \left(\frac{\left(\frac{5165}{103.7461 (104 + H_d)} \right)^2}{2g} \right)$$

$$H_d=8.038$$

طراحی منحنی پائین دست:

$$K=2, n=1.85 \quad \frac{dy}{dx} = \frac{x^{n-1}}{2(8.03 \cdot 9^{0.85})} \quad x_c=13.40$$

$$y_c = \frac{13.40^{1.85}}{11.76} = 10.35$$

طراحی قوس پائین دست:

$$R=40$$

$$\tan(\alpha) = \frac{1}{0.7} \quad \alpha = 55 \quad R(1 - \cos\alpha) = 17.06$$

$$x_F=67.01$$

$$x_D = R \sin(\alpha) + x_F = 99.78$$

تعیین سرعت واقعی:

$$v_t = \sqrt{2g(z - \frac{H_d}{2})} = 46.04 \quad H_d = 26 \text{ ft}, \quad z = 368 \text{ ft} \quad \text{از نمودار} \quad \frac{V_a}{V_t} = 0.83$$

$$V_a=38.21$$

طراحی قوس بالادست:

- طبق رابطه Cassidy:

$$x_B = -2.17 \quad y_B = 1.01$$

- USBR:

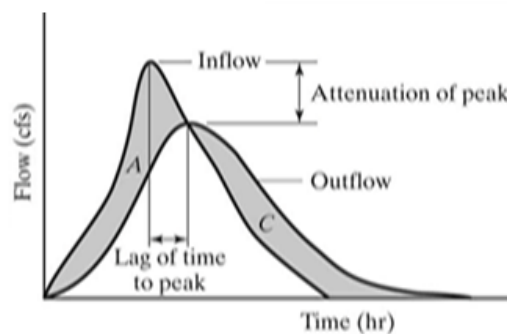
$$R_1=4.019, \quad R_2=1.61, \quad a=1.41, \quad b=2.27$$

$$El.N=204-0.25=203.75$$

$$El.B=204-0.25-0.32=203.43$$

۹-۲- روندیابی سیلاب (Flood Routing)

به منظور کنترل سیل در دریاچه های پشت سد لازم است تا تغییرات ارتفاع و حجم آب و نیز مقدار شدت جریان ورودی و خروجی به منطقه مورد مطالعه را در طول زمان سیلاب معین کنیم، که به این عمل روندیابی سیلاب می گویند. به عبارت دیگر روندیابی سیل که یکی از مسائل مربوط به جریان های غیردائمی است، عبارت است از تعیین هیدروگراف خروجی با داشتن هیدروگراف ورودی. منحنی هیدروگراف در روند یابی سیلاب در مخازن و رودخانه ها، ساخت سازه های مهار سیلاب مانند : Dike، سرریز سدها، دیواره های مهار آب در رودخانه و ... کاربرد فراوانی دارند. هیدروگراف، ناشی از یک بارش موثر (مازاد)، با شدت i و تداوم بارش T می باشد. بارش مازاد، میزان بارشی است که صرف نفوذ در خاک نمی شود و بعد از اشباع خاک، Rainfall منجر به یک رواناب (Runoff) می شود. شکل کلی هیدروگراف به صورت شکل زیر می باشد:



شکل ۲-۸

شکل نمودار هیدروگراف به دو عامل خصوصیات فیزیکی حوضه و خصوصیات بارشی، وابسته می باشد. ازجمله عوامل موثر بر خواص فیزیکی حوضه عبارتند از: میزان مساحت حوضه، کشیدگی و یا پهن بودن آن، مورفولوژی رودخانه، پوشش گیاهی، نوع خاک، نحوه پراکنش سنگ در حوضه، شیب رودخانه اصلی و خصوصیات بارشی شامل: شدت بارندگی (i)، مدت بارندگی (T)، نوع حرکت ابرهای باران زا، نوع بارش (برف، تگرگ، باران) و ... می باشد.

اسامی شکل هیدروگراف به صورت زیر توضیح داده می شود:

- ۱) شاخه اوج یا تمرکز/ بازوی بالا رونده / Rising Limb
- ۲) شاخه نزولی/ بازوی پائین رونده/ Falling Limb / منحنی خشکیدگی (Recession Curve)
- ۳) سطح زیر نمودار هیدروگراف که برابر با حجم رواناب سطحی (Runoff Volume) است که در حوضه رخ داده است.
- ۴) زمان پایه (Base Time): زمانی که منحنی هیدروگراف محور زمان را قطع می کند. این زمان نشان دهنده فروکش کردن کامل سیلاب و اتمام آن می باشد.
- ۵) زمان تا اوج (time to peak): زمان ابتدای ورود سیلاب به مخزن تا حداکثر بارش است.

۶) زمان تمرکز هیدرو گراف (consetrate time): بازه زمانی از انتهای بارش تا نقطه عطف منحنی هیدرو گراف می باشد.

۷) زمان تاخیر (lag time): بازه زمانی از مرکز سطح بارش تا مرکز ثقل منحنی هیدرو گراف می باشد.

۸) زمان تاخیر تا اوج (lag to peak time): بازه زمانی از مرکز سطح بارش تا نقطه peak منحنی هیدرو گراف می باشد.

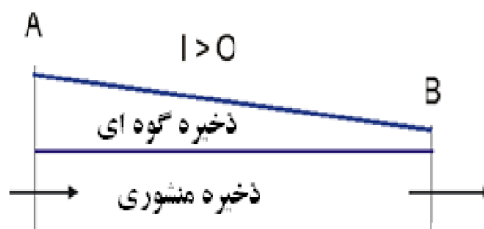
بررسی موضوع روند یابی سیلاب در سدها از اهمیت زیادی برخوردار است. روندیابی سیلاب را می توان به لحاظ نوع آبراهه ای که جریان در آن برقرار است، به دو دسته زیر تقسیم نمود:

۱. روندیابی مخزن (Storage (reservoir) Routing)
۲. روندیابی رودخانه (River Routing)

روندیابی رودخانه (River Routing)

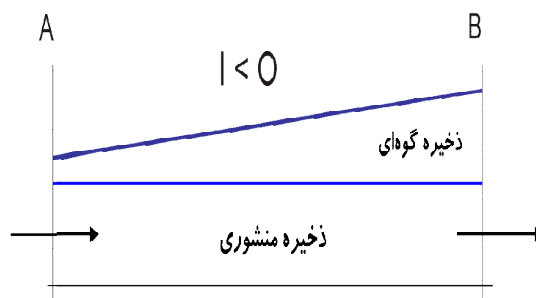
هیدرو گراف بالادست و پائین دست رودخانه متفاوت می باشد و هیدرو گراف سیلاب با گذشت زمان و با توجه به مقاومت بستر، افت می کند. روش ماسکینگهام یکی از روش های روندیابی رودخانه می باشد. روش ماسکینگهام-کانک که غیر خطی است و از روش قبل دقیق تر می باشد، نیز به منظور روندیابی رودخانه کاربرد دارد. روندیابی رودخانه به دو قسمت تقسیم می گردد:

۱. سیل در حال وارد شدن به مسیر رودخانه باشد (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹

۲. سیل در حال خارج شدن از رودخانه باشد (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰

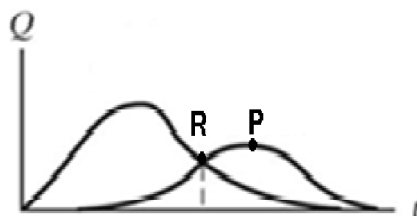


روندیابی مخزن (Level pool / Storage Routing)

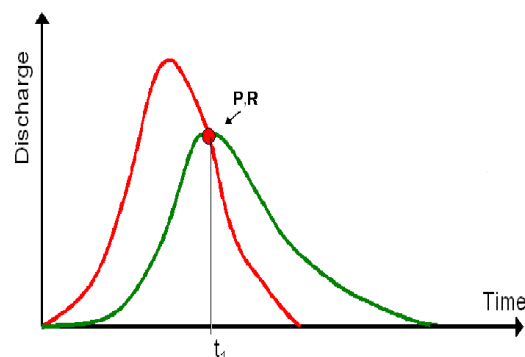
هدف از درونیابی مخزن، بدست آوردن هیدروگراف خروجی می باشد. روندیابی مخزن به صورت هیدرولوژیکی و متمرکز صورت می گیرد.

تفاوت روندیابی مخزن و رودخانه

منحنی $S-Q$ در مخازن به صورت شکل می باشد. در این منحنی S و Q تک مقداری (Invariant Relation Ship) می باشند. اما در رودخانه مقادیر Variable Relation Ship می باشند. نقاط P و R به ترتیب نشان دهنده محل بیشترین دبی و حداکثر ذخیره می باشند. نقاط P و R در منحنی $S-Q$ مخازن بر هم منطبق هستند (شکل ۱۱-۲) اما در منحنی رودخانه مکان نقاط P و R متفاوت می باشد (شکل ۱۲-۲).



شکل ۱۲-۲



شکل ۱۱-۲

چنانچه هدف از روندیابی بررسی تغییرات زمانی جریان در یک نقطه خاص باشد، به این نوع روندیابی، توده ای (متمرکز) می گویند و چنانچه تغییرات در طی زمان و در مکان های متعدد روندیابی گردد به آن روندیابی توزیعی (گسترده) می گویند. بر اساس نوع معادلات به کار رفته در پروسه روندیابی، می توان آن را به دو دسته هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تقسیم نمود. روش روندیابی هیدرولوژیکی از معادله پیوستگی استفاده می کند در حالیکه در روش روندیابی هیدرولیکی، معادله پیوستگی به همراه معادله حرکت جریان غیر دائمی کاربرد دارد. معادلات دیفرانسیل اساسی مورد استفاده در روندیابی هیدرولیکی را معادلات سن ونان تشکیل می دهند که موجب توصیف بهتری از جریان غیردائمی نسبت به روش های هیدرولوژیکی می شوند.

معادله پیوستگی مورد استفاده در تمام روش های هیدرولوژیکی روندیابی، بیان می کند که اختلاف بین دبی ورودی و خروجی برابر است با نرخ تغییر ذخیره مخزن:

$$I - O = \frac{ds}{dt}$$



در رابطه فوق O, I و $\frac{ds}{dt}$ به ترتیب دبی ورودی، دبی خروجی و نرخ تغییر ذخیره مخزن می باشند.

۱۱-۲- روش های متداول هیدرولوژیکی در روندیابی مخزن

از جمله روش های هیدرولوژیکی روندیابی مخزن می توان به شامل سه مورد زیر اشاره نمود:

(۱) روش سعی و خطا

(۲) روش پالس اصلاح شده (Level Pool/(Modified Pul's Method)

(۳) روش Goodrich

مسیر عبور موج سیل، از یک مخزن یا رودخانه یک پدیده جریان غیر دائمی می باشد که آن را در علم هیدرولیک به صورت یک جریان متغیر تدریجی (G.V.F) طبقه بندی می کنیم. هیدروگراف دبی ورودی با کمک دستگاه های خاص و صورت گسسته به دست آمده است. به منظور استفاده عملی بایستی رابطه قبل به صورت گسسته شده زیر نوشته شود:

$$\bar{I}\Delta t - \bar{O}\Delta t = \Delta s \quad \rightarrow \quad \frac{I_1 + I_2}{2}\Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2}\Delta t = S_2 - S_1$$

در رابطه بالا $\bar{I}$ ، $\bar{O}$ و Δs به ترتیب متوسط دبی خروجی در طی زمان Δt ، متوسط دبی ورودی در طی زمان Δt و تغییر حجم مخزن در زمان Δt می باشند. بازه زمانی باید تا حد امکان کوچک باشد تا بتوان از فرض خطی بودن هیدروگراف ورودی و خروجی استفاده کرد. اندیس ۱ ابتدای بازه زمانی و اندیس ۲ انتهای بازه زمانی را نشان می دهد.

برای روند یابی به سه منحنی نیاز خواهیم داشت:

(۱) هیدروگراف ورودی

(۲) منحنی تراز ذخیره (Elevation-Storage Curve)

(۳) دبی خروجی - تراز (معادله تخلیه)

معادله تخلیه به ظرفیت و نوع سازه تخلیه کننده وابسته است.

در هنگام روندیابی بحرانی ترین حالت که مخزن سد پر است و سپس سیلاب آمده است، در نظر گرفته می شود.

۱۲-۲) روندیابی مخزن به روش سعی و خطا

به منظور انجام روند یابی، رابطه قبل را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\frac{I_1 + I_2}{2}\Delta t = \frac{O_1 + O_2}{2}\Delta t + (S_2 - S_1)$$



در رابطه فوق مجهولات در سمت راست و معلومات مسئله در سمت چپ واقع می گردند.

گام های محاسباتی برای روندیابی عبارتند از:

۱. هیدروگراف ورودی سیلاب را به تعدادی بازه های کوچک تقسیم می کنیم. بازه زمانی باید طوری باشد که مقادیر Peak را از دست ندهد.

۲. تراز نرمال مخزن که در آن تاج سرریز قرار دارد و نیز ترازى که قبل از سیلاب در مخزن وجود داشته را معین می کنیم. این دو تراز معمولاً مشابه هستند زیرا فرض شده است که بدترین سیل طراحی تنها پس از اینکه مخزن تا تراز نرمال پر است، وارد مخزن می شود.

۳. منحنی دبی تخمینی سرریز را معین کنید.

۴. منحنی تراز- ظرفیت مخزن را از روی منحنی تراز مساحت به دست آورید. برای این منظور از فرمول های متعددی می توان استفاده کرد. به کمک نقشه های توپوگرافی مساحت ها را تا تراز نرمال محاسبه می کنیم. سپس حجم بین دو تراز را می توان محاسبه نمود. با داشتن مساحت بین دو تراز متوالی، حجم آب بین این دو تراز مطابق روابط ذیل بدست می آید:

$$\Delta V = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}) \quad \text{روش مخروطی}$$

$$\Delta V = \frac{h}{3} (A_1 + 4A_2 + A_3) \quad \text{روش منشوری}$$

$$\Delta V = \frac{h}{2} (A_1 + A_2) \quad \text{روش دوزنقه}$$

که در رابطه مخروطی و دوزنقه A_1 ، A_2 و h به ترتیب مساحت تراز پائین در زمان اول، مساحت تراز بالایی سطح مخروط و اختلاف ارتفاع (بازه کنتور) می باشند و در رابطه منشوری A_1 ، A_2 و A_3 به ترتیب مساحت ابتدایی و انتهایی، مساحت های زوج و مساحت های فرد می باشند.

۵. از اولین بازه زمانی محاسبات را شروع می کنیم و حجم کل ورودی در طی یک بازه را با ضرب دبی ورودی میانگین در زمان محاسبه می کنیم.

$$I_v = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t$$

۶. یک مقدار برای تراز مخزن در انتهای بازه حدس می زنیم.

۷. حجم کل خروجی در طی بازه را محاسبه می کنیم.

$$O_v = \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t$$

۸. با استفاده از منحنی تراز ذخیره میزان ذخیره مخزن در آغاز و انتهای یک بازه را تعیین می کنیم (تعیین S_1 و S_2). سپس ΔS را بدست می آوریم که معرف مقدار سیلاب ذخیره شده در طی یک بازه است.



۹. مقدار حجم خروجی به دست آمده در گام ۷ را با مقادیر ΔS به دست آمده از گام ۸ جمع می کنیم و آن را با Iv محاسبه شده در گام ۵ مقایسه می کنیم. اگر تساوی رابطه $Iv = Ov + \Delta S$ برقرار بود، تراز فرضی مخزن در انتهای بازه صحیح است. در غیر این صورت با تغییر تراز فرضی مربوطه گام های فوق را تا زمانی که تساوی مربوطه برقرار گردد، تکرار می کنیم.
۱۰. تمام مراحل و گام های فوق را باید برای بازه های زمانی دیگر نیز تکرار نمود تا کل سیلاب روندیابی شود و سطح مخزن به سطح قبل از سیلاب برگردد.

مثال ۱) جدول زیر مساحت های محصور شده خطوط تراز در ترازهای مختلف را نشان می دهد. مقدار حجم مخزن را در رقوم بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ محاسبه کنید.

۳۰۰	۲۸۰	۲۶۰	۲۴۰	۲۲۰	۲۰۰	رقوم (m)
۴۰۰	۳۲۰	۲۷۰	۲۱۰	۱۷۵	۱۵۰	مساحت (km ^۲)

(حل)

$$\Delta V = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}) = \frac{20}{3} [150 + 2(175 + 210 + 270 + 320) + 400 + \sqrt{150 \times 175} + \sqrt{210 \times 175} + \sqrt{210 \times 270} + \sqrt{270 \times 320} + \sqrt{320 \times 400}] = 25000 \text{ Mcm}$$

مثال ۲) دبی های سیلاب ورودی برای بدترین سیل محتمل در جدول ۱ داده شده است. این سیل به یک مخزن با سرریز آزاد می رسد که تاج آن در رقوم ۱۴۰ متر می باشد. حداکثر تراز مخزن را تعیین نمایید و هیدروگراف سیل روندیابی شده را تعیین کنید. مقادیر ظرفیت مخزن و دبی خروجی در ترازهای مختلف در جدول ۲ و ۳ آمده است.

جدول (۱)

۳۰	۲۴	۱۸	۱۲	۶	۰	زمان
۱۹۰۰	۱۲۹۰	۶۱۰	۲۸۰	۵۰	۰	دبی ورودی

جدول (۲)

۱۴۶	۱۴۵	۱۴۴	۱۴۳	۱۴۲	۱۴۱	۱۴۰	تراز (m)
۲۴۰	۱۴۰	۹۵	۶۰	۳۵	۱۵	۰	ذخیره (Mcm)



جدول (۳)

تراز (m)	۱۴۰	۱۴۱	۱۴۲	۱۴۳	۱۴۴	۱۴۵	۱۴۶
دبی خروجی (m ^۳ /s)	۰	۱۷۰	۴۸۲	۸۸۳	۱۳۶۰	۱۹۰۵	۲۵۰۰

ج

زمان شروع	بازه زمانی	تراز مخزن در آغاز بازه	دبی ورودی در آغاز بازه	دبی ورودی در انتهای بازه	حجم ورودی	دبی خروجی در آغاز بازه	تراز مخزن در	دبی خروجی در انتهای بازه	حجم متوسط در طی بازه
۰-۶	۶	۱۴۰	۰	۵۰	۰.۵۴	۰.۵۴	۱۴۰.۳۳	۵.۴۴	۰.۰۶
۶-۱۲	۶	۱۴۰.۳۳	۵۰	۲۸۰	۳.۵۶	۳.۵۶	۱۴۰.۳۳۷	۴۰.۲۹	۰.۴۹
۱۲-۱۸	۶	۱۴۰.۳۳۷	۲۸۰	۶۱۰	۹.۶۱۲	۹.۶۱۲	۱۴۰.۷۵۶	۱۲۸.۵۲	۱.۸۳۳
۱۸-۲۴	۶	۱۴۰.۷۶۵	۶۱۰	۱۲۹۰	۲۰.۵۲	۲۰.۵۲	۱۴۱.۵۸۳	۳۵۱.۸۹۶	۵۱.۸۸
۲۴-۳۰	۶	۱۴۱.۵۸۳	۱۲۹۰	۱۹۰۰	۳۴.۴۵۲	۳۴.۴۵۲	۱۴۲.۵۸۳	۷۱۵.۷۸۳	۱۱.۵۳۱
۳۰-۳۶	۶	۱۴۲.۵۸۳	۱۹۰۰	۲۱۳۰	۴۳.۵۲۴	۴۳.۵۲۴	۱۴۳.۳۹۴	۱۰۷۰.۹۳۸	۱۹.۲۹۷
۳۶-۴۲	۶	۱۴۳.۳۹۴	۲۱۳۰	۱۹۰۰	۴۳.۵۲۴	۴۳.۵۲۴	۱۴۳.۹۰۲	۱۳۱۳.۲۵۴	۲۵.۷۴۹
۴۲-۴۸	۶	۱۴۳.۹۰۲	۱۹۰۰	۱۶۰۰	۳۷.۸	۳۷.۸	۱۴۴.۱۰۸	۱۴۱۸.۸۶	۲۹.۵۰۷
۴۸-۵۱	۶	۱۴۴.۱۰۸	۱۶۰۰	۱۴۴۰	۱۶.۴۱۶	۱۶.۴۱۶	۱۴۴.۱۳۰۴	۱۴۳۱.۰۶۸	۱۵.۲۸۹۶
۵۱-۶۰	۶	۱۴۴.۱۳۰۴	۱۴۴۰	۱۰۶۰	۴۰.۵	۴۰.۵	۱۴۴.۲۱۵	۱۳۷۱.۷۱۷۵	۴۵.۴۰۵۱
۶۰-۶۶	۶	۱۴۴.۲۱۵	۱۰۶۰	۷۸۰	۱۹.۸۷۲	۱۹.۸۷۲	۱۴۴.۷۸۴	۱۲۵۶.۹۶۸	۲۸.۲۸۹۸
۶۶-۷۸	۶	۱۴۴.۷۸۴	۷۸۰	۵۰۰	۲۷.۶۴۸	۲۷.۶۴۸	۱۴۴.۱۹۵۵	۹۷۶.۲۵۳۵	۴۸.۲۳۷۶
۷۸-۹۰	۶	۱۴۴.۱۹۵۵	۵۰۰	۳۷۰	۱۸.۷۹۲	۱۸.۷۹۲	۱۴۴.۵۶۹	۷۱۰.۱۵۹	۳۶.۲۴۶۷
۹۰-۱۰۲	۶	۱۴۴.۵۶۹	۳۷۰	۲۲۰	۱۲.۷۴۴	۱۲.۷۴۴	۱۴۴.۰۳۶	۴۹۶.۴۳۶	۲۶.۰۶۲۷
۱۰۲-۱۱۴	۶	۱۴۴.۰۳۶	۲۲۰	۱۳۰	۷.۵۶	۷.۵۶	۱۴۱.۵۴۶	۳۳۴.۱۱۲	۱۷.۹۳۹۸



ظرفیت ذخیره در	ظرفیت ذخیره سیلاب	تغییرات مخزن در طی	O+Δs
۰	۰.۴۸	۰.۴۸	۰.۵۴
۰.۴۸	۳.۵۵	۳.۰۷	۳.۵۶
۳.۵۵	۱۱.۳۳	۷.۷۹	۹.۶۱۳
۱۱.۳۳	۲۶.۶۶	۱۵.۳۳	۲۰.۵۰۸
۲۶.۶۶	۴۹.۵۷۵	۲۲.۹۱۵	۳۴.۴۴۶
۴۹.۵۷۵	۷۳.۷۹	۲۴.۲۱۵	۴۳.۵۱۲
۷۳.۷۹	۹۱.۵۷	۱۷.۷۸	۴۳.۵۱۹
۹۱.۵۷	۹۹.۸۶	۸.۲۹	۳۷.۷۹۷
۹۹.۸۶	۱۰۰.۸۶۸	۱.۰۰۸	۱۵.۳۹۸
۱۰۰.۸۶۸	۹۵.۹۶۷۵	-۴.۹	۴۰.۵۰۵
۹۵.۹۶۷۵	۸۷.۳۳	-۸.۵۳۷۵	۱۹.۸۶۲
۸۷.۳۳	۶۶.۸۳۳۵	-۲۰.۵۹۷۵	۲۷.۶۴
۶۶.۸۳۳۵	۴۹.۳۳۵	-۱۷.۶۱۷۵	۱۸.۸۰۹۲
۴۹.۳۳۵	۳۵.۹	-۱۳.۳۳۵	۱۲.۷۳۷۷
۳۵.۹	۲۵.۵۲	-۱۰.۳۸	۷.۵۵۹

۲-۱۳- گام های محاسباتی روندیابی سیلاب با روش پالس اصلاح شده

(۱) با انتگرال گیری از رابطه $I - O = \frac{ds}{dt}$ به رابطه زیر می رسم:

$$\left(\frac{{}^2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1}\right) = \left(\frac{{}^2S_j}{\Delta t} - Q_j\right) + (I_j + I_{j+1})$$

به ازای هر مقدار از H مقادیر S و Q از نمودار های تراز تخلیه و تراز ذخیره بدست می آیند و سپس مقدار

$$\frac{{}^2S}{\Delta t} + Q \text{ محاسبه می گردد.}$$

(۲) در نمودار معرف ذخیره نقطه ای با مختصات $\frac{{}^2S}{\Delta t} + Q$ و ترسیم می شود. انجام این کار برای H های مختلف منجر به ترسیم نمودار معرف ذخیره خواهد شد. مقادیر گام های زمانی (Δt) را با Δt داده شده در هیدروگراف ورودی برابر در نظر می گیرند.

(۳) در روندیابی جریان در طی بازه زمانی J ام، تمام term های سمت چپ معادله بالا معلوم اند و در نتیجه (۱) قابل محاسبه است. آنگاه مقدار مربوطه Q_{j+1} را می توان از روی نمودار ترسیم شده فوق محاسبه نمود. از درونیابی خطی مقادیر H نیز قابل محاسبه است. برای تنظیم نمودن داده های مورد نیاز جهت گام زمانی بعدی مقادیر $\left(\frac{{}^2S_{j+1}}{\Delta t} - Q_{j+1}\right)$ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\left(\frac{{}^2S_{j+1}}{\Delta t} - Q_{j+1}\right) = \frac{{}^2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1} - 2Q_{j+1}$$



۴) در نهایت محاسبات برای دوره های زمانی بعدی نیز تکرار خواهد شد.

مثال ۳) یک مخزن برای نگهداری جریان سیلاب ساخته شده است. این مخزن دارای مساحت افقی ۱ac و دیواره های قائم است. رابطه تراز تخلیه در ستون های ۱ و ۲ جدول داده شده است. به کمک روش پالس اصلاح شده، خروجی مخزن را از روی هیدروگراف داده شده در ستون های ۶ و ۷ جدول محاسبه کنید. فرض کنید مخزن در ابتدا به صورت خالی بوده است.

(حل)

H	Q	S	$\frac{2s}{\Delta t} + Q$	I	$I_j + I_{j+1}$	$\frac{2s_j}{\Delta t} - Q_j$	$\frac{2s_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1}$	Q_{j+1}	تراز آب
0	0	0	0	0	-	0	-	-	
0.5	3	21780	76	60	60	55.2	60	2.4	0.4
1	8	43560	153	120	180	201.14	235.2	17.03	1.259
1.5	17	65340	235	180	300	378.9	501.1	68.6	3.239
2	30	87120	320	240	420	552.6	798.9	123.2	4.655
2.5	43	108900	406	300	540	728.2	1092.6	182.2	6.271
3	60	130680	423	360	660	927.5	1388.2	230.3	7.973
3.5	78	152460	586	320	680	1089.0	1607.5	259.3	9.286
4	98	174240	679	280	600	1149.0	1689.0	270	9.773
4.5	117	196020	770	240	520	1134.3	1669.0	267.4	9.655
5	137	217800	863	200	440	1064.4	1574.3	254.9	9.086
5.5	156	239580	955	160	360	954.1	1424.4	235.2	8.191
6	173	261360	1044	120	280	820.2	1234.1	206.9	7.073
6.5	190	283140	1134	80	200	683.3	1020.2	168.5	5.868
7	205	304920	1221	40	120	555.1	803.3	124.1	4.678
7.5	218	326700	1307	0	40	435.4	595.1	79.8	3.545
8	231	348480	1393	-	-	338.2	435.4	48.6	2.665
8.5	242	370260	1476	-	-	272.8	338.2	32.7	2.104
9	253	392040	1560	-	-	227.3	272.8	22.8	1.723
9.5	264	413820	1643	-	-	194.9	227.3	16.2	1.456
10	275	435660	1727	-	-	169.7	194.9	12.6	1.256
							169.7	9.8	1.1

۲-۱۴- سرریز جانبی

سرریزهای جانبی نسبت به دیگر سرریزها عملکرد هیدرولیکی ضعیف تری دارند اما گاهی استفاده از این نوع سرریز اجتناب ناپذیر است. به عنوان مثال در سدهای خاکی که نمی توان از سرریز اوجی استفاده کرد، به کار بردن سرریز جانبی در خارج از بدنه سد، مناسب خواهد بود. از سرریز جانبی در گوشه مخزن در صورتی که شرایط توپوگرافی مناسب و بستر مقاوم باشد، می توان به عنوان جایگاه سرریز استفاده کرد.



۲-۱۵- شرایط استفاده از سرریز جانبی

- (۱) اگر احداث سرریز روی بدنه سد امکان پذیر نباشد.
- (۲) در صورتی که محل ساخت سرریز در دره تنگ و باریکی قرار گیرد که عرض کافی برای سرریز وجود نداشته باشد، زیرا سرریز به ظرفیت کافی برای تخلیه از محل دره نیاز دارد.
- (۳) در مواقعی که برخورد آب از روی اوجی تا پائین دست، به صورت پرتابی یا ریزشی باشد و بستر پائین دست مقاوم نباشد و یا تاسیساتی وجود دارد که مکان شان باید خشک و امن بماند، استفاده از سرریز جانبی مناسب می باشد. معمولاً در سدهای قوسی که به علت ارتفاع زیاد آب از آن برای ایجاد نیروی برق آبی کمک می گیرند، به منظور جلوگیری از مشکلات ناشی از نیروی ضربه ای آب (Impact Forces) یا آب شستگی، از سرریز جانبی کمک گرفته می شود.
- هد آب روی سرریز جانبی نباید از ۳ متر بیشتر باشد. این سرریز ظرفیت تخلیه بیشتر از ۳ متر آب را ندارد زیرا ممکن است جریان مستغرق ایجاد گردد.

۲-۱۶- بخش های سرریز جانبی

۱. آستانه یا اوجی متعارف
 ۲. کانال جانبی یا لاوک
 ۳. شوت
 ۴. حوضچه آرامش
- جریان آب هدایت شده در کانال جانبی به صورت زیر بحرانی حرکت می کند اما در انتهای کانال جریان باید به فوق بحرانی تبدیل شود. برای تبدیل جریان به حالت فوق بحرانی می توان کانال را تنگ کرد تا عمق آب تثبیت گردد و یا یک پله ایجاد شود. فوق بحرانی بودن جریان، موجب افزایش سرعت آب و تخلیه سریع تر می گردد. در نتیجه عمق آب پائین تر می آید و به کانال شوت کوچکتری نیاز است در نتیجه کانال شوت بهینه خواهد شد. در انتهای جریان که به پایاب نزدیک می گردد، از سرعت آب باید کاسته شود تا پائین دست دچار فرسایش نگردد. بنابراین با نزدیک شدن به انتهای کانال شوت عرض آن نیز کاهش می یابد تا سرعت آب کاهش پیدا کند. در نهایت با ایجاد حوضچه های آرامش، انرژی آب به طور کامل گرفته می شود.



به منظور کاهش ضربه آب ریزشی از اوجی به کف کانال، عرض مقطع کانال کاهش داده می شود تا سرعت آب کاهش یابد. پس مقطع ایده آل برای یک کانال جانبی، مقطع مثلثی با عرض کف کم و شیب جداره تند، می باشد اما اجرای این مقطع دشوار است. بنابراین مقطع به صورت ذوزنقه ای اجرا می گردد. متوسط عرض کانال جانبی بین ۳ تا ۵ متر می باشد که البته به شرایط توپوگرافی وابسته می باشد.

با افزایش طول سرریز، ظرفیت تخلیه دبی بالا می رود بنابراین می توان آستانه تاج سرریز را به صورت u شکل (L-Saped Side Channel Spillway)، L شکل و یا y اجرا کرد تا آب از هر دو طرف ریزش کند و طول موثر سرریز و ضریب تخلیه افزایش یابد.

جریان در سرریز جانبی ممکن است به دو صورت زیر باشد:

۱. جریان تا انتهای کانال انحراف زیر بحرانی بماند.

۲. جریان در طول کانال انحراف از حالت زیر بحرانی به فوق بحرانی تبدیل شود.

در کانال های جانبی دبی واحد طول مطرح می گردد ($Q^* = \frac{Q}{L} = CH^{\frac{2}{3}}$).

جریان در کانال جانبی غیریکنواخت (non uniform) و از نوع متغیر مکانی (s.v.f) می باشد زیرا دبی در طول کانال افزایش می یابد. معادله دیفرانسیلی این جریان به صورت زیر می باشد:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \frac{\beta Q}{gA^3} \left(\frac{dQ}{dx} \right) + \frac{Q}{gA^3} \left(\frac{dA}{dx} \right)}{1 - Fr^2}$$

در ابتدا باید مکان مقطع کنترل سرریز جانبی پیدا شود که در مقطع کنترل جریان بحرانی خواهد بود و می توان رابطه ای خاص بین دبی و عمق آب نوشت. در فاصله x_C عمق بحرانی رخ می دهد. در صورتی که $x_C > L$ باید در طول کانال پله بنزیم.

رابطه x_C که توسط Henderson به دست آمد، به صورت زیر می باشد:

$$x_C = \frac{\beta Q^{\frac{2}{3}}}{g T^{\frac{2}{3}} \left[S_0 - \frac{n^2 g P}{\beta T R^{\frac{2}{3}}} \right]^{\frac{2}{3}}}$$

در رابطه فوق β ، S_0 ، P ، n و T به ترتیب ضریب تصحیح سرعت در معادله اندازه حرکت، شیب کف کانال، پیرامون مرطوب، ضریب زبری مانینگ و سطح آزاد مقطع می باشند.

به منظور تعیین سطح آزاد آب در کانال جانبی، با فرض Q_0 و به کمک رابطه زیر عمق بحرانی محاسبه می گردد:



$$\frac{\alpha Q_c^2}{g \cos(\theta)} = \frac{Ac^3}{Tc}$$

سپس با ضرب Q^* داده شده در X_C حاصله از فرمول، Q_c جدیدی بدست می آید. ادامه روند سعی و خطای فوق موجب بدست آمدن Q_c می گردد. با بدست آمدن مشخصات و مکان مقطع کنترل می توان تراز آب در نقاط جلوتر و عقب تر از این مقطع را نیز بدست آورد.

مثال) یک سرریز جانبی به طول موثر ۱۲۲ متر در کانالی ذوزنقه ای برای عبور شدت جریان معادل $3/72 \left(\frac{m^3}{s.m}\right)$ طرح گردیده است. عرض کف سرریز ۳ متر و شیب کناره آن (H) : ۵/۰ : ۱ (v) است. شیب طولی کانال ۰/۱۵ و رقوم کف آن در نقطه شروع ۲۲/۵ فرض می شود. مطلوب است طرح نیمرخ سطح آب اگر ضریب زبری ۰/۰۱۵ و ضریب تصحیح سرعت در معادله انرژی ۱/۱ و ضریب تصحیح سرعت در معادله اندازه حرکت ۱/۰۵ باشد.

حل) با یک دبی حدسی سعی و خطا را شروع می کنیم:

Q_c	y_c	X_c	Q^*	Q_c
185	5.54	51.11	3.72	190.13
190.13	5.63	50.05	3.72	186.19
186.19	5.56	50.88	3.72	189.27

حال می توان در مقاطع قبل از عمق بحرانی و بعد از آن تراز سطح آب را به کمک جدول زیر بدست آورد:



x	Δx	Z0	Δy حتمي	رقم سطح آب	y	A	Q	v	Q1+Q2	ΔQ	$v1+v2$	Δv	$\Delta y'$	p	R	Sf	$Sf_{\Delta x}$
51	14.87		2.02	20.43	5.56	32	189.27	5.89						15.43	2.08	0.0029	
30	20.88	18	2.2	22.45	4.45	23	111.6	4.8	300.87	77.67	10.69	1.09	2.202	12.95	1.8	0.0024	0.055
			2.35	22.63	4.63	25	111.6	4.51	300.87	77.67	10.4	1.38	2.262	13.35	1.84	0.002	0.051
				22.78	4.78	26	111.6	4.33	300.87	77.67	10.22		2.296	13.69	1.88	0.0018	0.049
65	14.12	12.7 5	1.47	18.96	6.21	37.9 1	241.8	6.38	431.07	12.27	52.53	0.49	1.304	16.89	2.25	0.0031	0.042
			1.77	18.66	5.91	35.1 9	241.8	6.87	431.07	12.76	52.75	0.98	1.731	17.23	2.65	0.0061	0.049



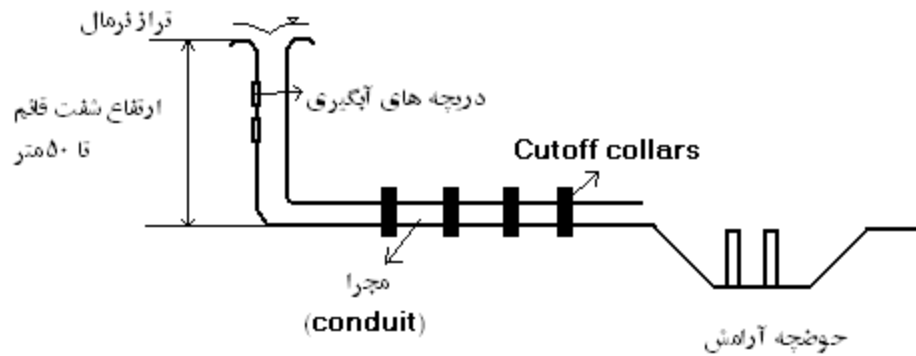
Δy		2.257	2.313	2.345	1.346	1.77
----	--	-------	-------	-------	-------	------

۲-۱۷- سرریز نیلوفری/لاله ای/تنوره ای/Shaft Spillway/Morning Glory Spillway

این سرریز برای دبی های زیاد مناسب نیست زیرا ظرفیت تخلیه بالایی ندارد اما چند منظوره اند و مزیت آنها انعطاف پذیریشان می باشد. سرریز نیلوفری جنبه زیبایی و جذب توریست دارد همچنین به عنوان آبگیر نیز قابل استفاده است. این نوع سرریز باید به طور محکم به فونداسیون متصل شود زیرا این سازه ها حساس و لاغر می باشند. شفت قائم در اثر عبور جریان آب لرزش زیادی دارد که به علت فشارهای منفی مجرای جریان مکش روی می دهد. مکش موجب کاویتاسیون می گردد و پدیده حفره زایی صورت می گیرد. این نوع سرریز ها کاربرد زیادی در سدهای خاکی که ظرفیت تخلیه شان حداکثر تا ۱۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه می باشند، دارند. در نتیجه به عنوان سرریز کمکی کاربرد دارند.

۲-۱۸- اجزای سرریز نیلوفری

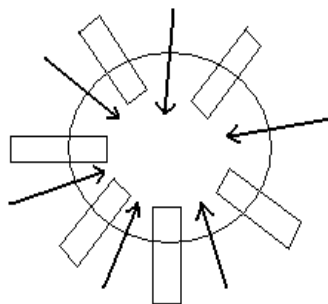
۱. تاج ورودی: این قسمت فنجانی شکل است و آب را وارد یک تنوره می کند.
 ۲. مجرای قائم (شفت قائم)
 ۳. زانویی با مجرای هواده
 ۴. مجرای انحراف تقریباً افقی
- آب از روی یک تاج افقی وارد یک تنوره قائم و یا مایل شده و سپس از طریق یک تونل یا مجرای سرپوشیده ی تقریباً افقی به رودخانه پایین دست می پیوندد. بزرگترین سرریز نیلوفری جهان احتمالاً در سد مانتی سلوی کالیفرنیا قرار دارد که این خروجی قیفی شکل هنگامی که ظرفیت سد به حد نهایی خود برسد می تواند در هر ثانیه تا ۱۳۷۰ متر مکعب آب را بلعیده و به پایین دست منتقل کند. در طول تونل افقی از طوقه هایی (cut off collars) استفاده می شود تا طول مسیر تراوش را افزایش دهد اما نقش اصلی این طوقه ها قفل و بست کردن تونل اصلی به فونداسیون است (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳

۱۹-۲- مشکلات سرریز نیلوفری

- ۱- وجود لاشه درختان یا اجسامی که حجم زیادی دارند، موجب گرفتگی این سرریز می شود. برای رفع این مشکل روی تاج سرریز، آشغال گیر (trash rack) نصب می شود.
- ۲- به وجود آمدن امواج عرضی (گردابی) در سرریز نیلوفری که موجب کاهش ضریب تخلیه می شوند. به منظور رفع این مشکل از یک سری دیواره های هدایت کننده به نام Anti-Vortex Piers که بر روی تاج نصب می شوند، استفاده می شوند. این پایه های ضد گردابه جلوی جریان شعاعی را می گیرند و آب را به طور هدایت شده وارد سرریز می کنند (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۴

- ۳- ظرفیت تخلیه سرریز نیلوفری به هد آب روی آن وابسته است به طوری که تا هد محدودی ظرفیت تخلیه بالا بوده اما بعد از آن تغییرات هد منجر به تغییرات تخلیه نمی شود.



۲-۲۰- شرایط استفاده از سرریز های نیلوفری

- ۱- احتمال وقوع زلزله کم باشد.
- ۲- سرریز افقی را بتوان به مجرای انحرافی موجود متصل کرد.
- ۳- مقدار زباله ها و مواد شناور در مخزن زیاد نباشد.
- ۴- محدودیت فضا برای ساخت سرریز مستقیم وجود داشته باشد.
- ۵- شرایط زمین شناسی از نظر نشست سازه مناسب باشد.

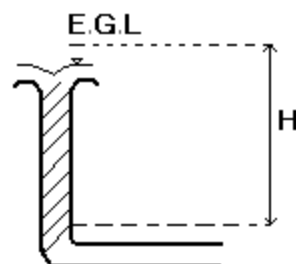
۲-۲۱- انواع کنترل در سرریز نیلوفری

- ۱- **کنترل از تاج:** بهترین جریان در حالتی است که جریان در داخل دیواره قائم و سرریز افقی آزاد باشد. این حالت در مواقعی رخ می دهد که هد آب روی تاج سرریز کم باشد در این نوع از کنترل مشکلات حفره زایی کمتر می شود و سرریز بهترین عملکرد را خواهد داشت. رابطه تخلیه سرریز در این حالت مشابه سرریزهای مستقیم و به صورت زیر می باشد:

$$Q = C. Le. He^{\frac{3}{2}}$$

البته رابطه فوق به ازای تمامی ارتفاع ها برقرار نیست. ضریب تخلیه سرریز برای این حالت حدود ۲/۲-۲/۳ است.

- ۲- **کنترل روزنه ای:** این حالت در صورتی رخ می دهد که تنوره به صورت پر و کانال افقی به صورت آزاد عمل کند (شکل ۲-۱۵).

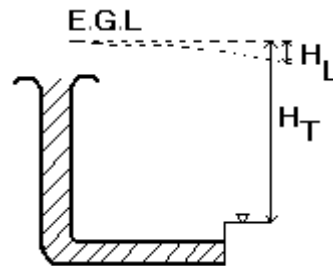


شکل ۲-۱۵

رابطه تخلیه سرریز به صورت زیر می باشد:

$$Q = f(He)^{\frac{1}{2}}$$

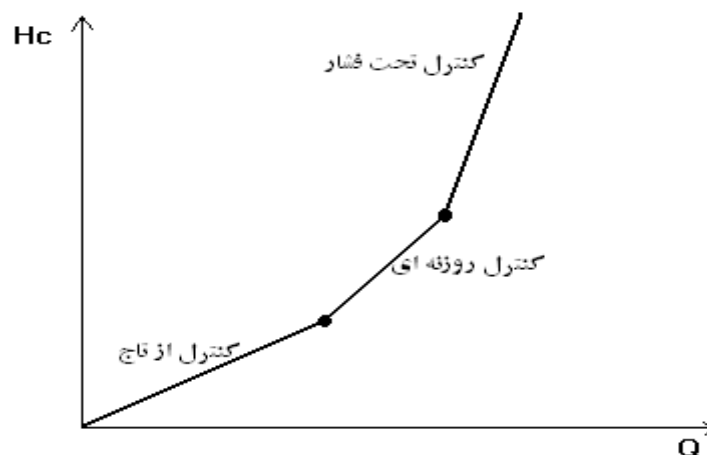
۳- کنترل تحت فشار (لوله ای پر): در این حالت هردو قسمت قائم و افقی به صورت تماماً پر عمل می کنند (شکل ۱۶-۲).



شکل ۱۶-۲

رابطه Q به صورت زیر می باشد:

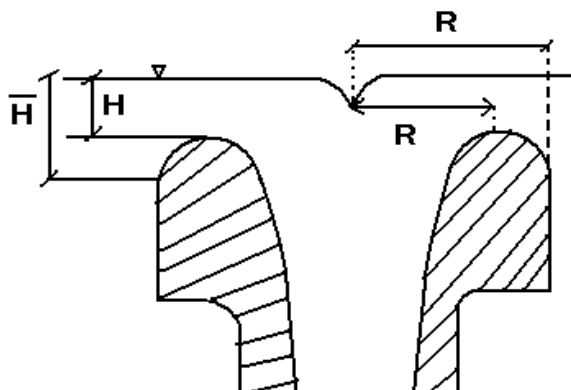
$$Q = f(H_T - H_L)^{\frac{1}{2}}$$



شکل ۱۷-۲

در حالت کنترل روزنه ای و تحت فشار میزان ضریب تخلیه تا حدود ۰/۵۵ افت می کند که البته به میزان دبی آب روی آن ها بستگی دارد. خصوصیات هیدرولیکی این نوع سرریزها با تغییرات ارتفاع آب بر روی سرریز متغیر خواهد بود. به عنوان مثال هرگاه ارتفاع آب روی تاج سرریز کم باشد، جریان به صورت آزاد است و کنترل در تاج سرریز می باشد با افزایش ارتفاع آب قسمت کنترل به تبدیل قائم منتقل می شود و دبی جریان توسط جریان روزنه ای کنترل می شود. از این مرحله به بعد ممکن است جریان مجاری تحت فشار حاکم شود و دبی جریان

توسط تونل پر کنترل شود که این نحوه طراحی توصیه نمی شود (تنها در صورتیکه ارتفاع سرریز کم باشد). نقطه قوت این سرریز این است که با ارتفاع نسبتاً کم می توان به ظرفیت حداکثر سرریز نزدیک شد اما نقطه ضعف آن این است که اگر ارتفاع آب روی سرریز از ارتفاع مبنای طرح تجاوز کند، تغییرات دبی خروجی بسیار جزئی خواهد بود (شکل ۱۸-۲).



شکل ۱۸-۲

رابطه بین ارتفاع و شعاع به صورت زیر می باشد:

$$\frac{H}{R} = 1.06 \left(\frac{\bar{H}}{R} \right)^{1/0.7}$$

$\frac{H}{R}$ بر ضریب تخلیه مؤثر است. با افزایش این نسبت، دبی افزایش و ضریب تخلیه کاهش می یابند. محدوده $\frac{H}{R}$ بین ۰/۲ تا ۰/۴۵ مناسب می باشد و اگر $\frac{H}{R} > ۰/۲$ ، سرریز از نظر هیدرولیکی عملکرد خوبی ندارند.

در صورتی که هد طراحی مشخص باشد و هد آب از هد طراحی کمتر باشد، فشار منفی نخواهیم داشت در غیر این صورت نواحی کم فشار به وجود می آید. برای رفع مشکل حفره زایی و مکش، معمولاً در قسمت زانویی، هوادهی (air vents) انجام می گیرد. سطح رویی بدنه باید تا حد امکان صاف و صیقلی باشد تا مشکل کاویتاسیون کمتر شود. تغییر در انتهای سرریز باید به طور تدریجی صورت گیرد و در نهایت به شعاع ثابت تبدیل شود.

تاج سرریز و تبدیل آن به مجرای عمودی و نیز تبدیل زانویی کف، باید دارای پوشش کاملاً صاف و همواری باشد تا از خسارت ناشی از کاویتاسیون جلوگیری شود. علاوه بر این برای تثبیت جریان در مجرا معمولاً مجرای هواده مجرای در بالا دست زانویی تعبیه می شود.



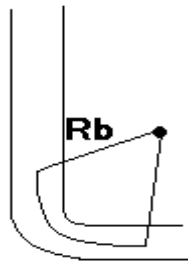
با توجه به شکل؟ برای طرح مقدماتی، میزان شعاع مجرای عمودی (R_S) از روابط زیر به دست می آید:

$$1- R_S < 1/5 \text{ متر}$$

$$2- R_S = 1 + 0.1 \bar{R}$$

اگر ارتفاع ریزش موج کمتر از ۲۰ متر باشد: $6R_S < R_b$

و اگر ارتفاع ریزش موج بیشتر از ۲۰ متر باشد (تا ۵۰ متر): $10R_S < R_b$



شکل ۱۹-۲

۲۲-۲- نکاتی در مورد سرریز نیلوفری

۱- سرریز نیلوفری از بدنه سد جدا است و برای کنترل و نگهداری آن باید به سرریز دسترسی داشت بنابراین

با احداث پل هایی، سرریز را به بدنه و یا جناحین سد متصل می کند.

۲- برای کنترل از تاج، ظرفیت مجرای افقی و قائم باید زیاد باشند تا جریان به صورت آزاد عمل کند. به

عبارت دیگر قطر سرریز در تاج باید از قطر محور قائم و تونل بیشتر باشد تا فواره جریان به راحتی از روی

سرریز روگذر دایره ای که منطبق بر خطوط جریان طراحی می گردد، عبور کند. دبی طراحی باید سطح

آزاد جریان را در مجرا ایجاد کند یعنی ظرفیت مجرای قائم و مجرای انحراف باید بیش از ظرفیت سازه

ورودی سرریز باشد.



۲-۲۳- سرریز شیب دار (شوت-تند آب)/ chute spillway

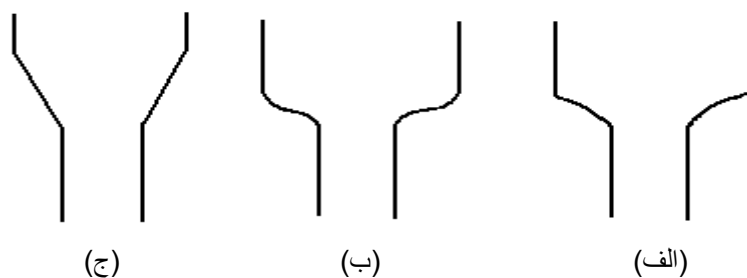
از این سرریز در مکان هایی که اختلاف هد زیادی را در یک مسیر طولانی جابجا می کنند، استفاده می شود. این سرریز متشکل از یک اوجی و یک شوت می باشد. سرریز شوت در سد خاکی کاربرد زیادی دارد و مشابه سرریز جانبی است. تند آب یا شوت، کانالی روباز با شیب تند از جنس بتن است که دبی مازاد عبور کرده از تاج سرریز از طریق آن به پایاب منتقل می شود. ویژگی مشخص تند آب، سرعت بالای جریان (بیش از ۲۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه) است. در این نوع سرریز مشکلاتی ناشی از هوادهی، کاویتاسیون، امواج تداخلی و فرسایش وجود دارد. تند آب معمولاً در سرریزهایی که از سازه سد جداست بکار می روند. شیب کف آن معمولاً از ۲۰ تا ۶۰ درجه متغیر است. دیواره های اطراف تند آب معمولاً عمودی و یا دارای شیب ۱ به ۲ است و سطح آن برای جلوگیری از کاویتاسیون صاف است. در صورتی که جریان فوق بحرانی باشد، عمق آب کم است. با توجه به این که این سرریز در کناره ها ساخته می شود می تواند با شیب زیاد اجرا گردد تا جریان فوق بحرانی گردد. در صورتی که جریان زیر بحرانی باشد، جریان آب با دیواره ها برخورد کرده و عمق آب افزایش می یابد در نتیجه اصطکاک بیشتر می شود و توزیع سرعت غیریکنواخت می گردد. توزیع سرعت در جریان فوق بحرانی، یکنواخت است و طراحی حوضچه های آرامش در انتهای کانال شوت نیز براساس توزیع سرعت یکنواخت می باشد. بنابراین در صورت فوق بحرانی بودن جریان در کانال شوت ارتفاع آب کم و سرعت افزایش می یابد که موجب اقتصادی شدن طرح می گردد. هم چنین افت انرژی کاهش می یابد. به منظور اقتصادی کردن طرح سعی می شود عرض کانال کاهش داده شود تا سرعت آب افزایش یابد.

۲-۲۴- حالت های مختلف تنگ شدگی

۱- تنگ شدگی قیفی (شکل ۲-۲۰- الف)

۲- تنگ شدگی بادبزنی (پنکه ای) (شکل ۲-۲۰- ب)

۳- تنگ شدگی روزنه ای (شکل ۲-۲۰- ج)



شکل ۲-۲۰

۲-۲۵- مشکلات سرریز شوت

- ۱- آشفته‌گی ناشی از وجود پایه‌های سرریز دریچه‌دار، به پیدایش برآمدگی و نوساناتی در سطح آب معروف به دم خروس (rooster tail) می‌شود که به صورت امواج ایستاده بلند است.
- ۲- به سبب ورود مایل یا اریبی شکل جریان تغییر در سطح مقطع جریان، وجود پایه‌های پل، امکان تشکیل امواج تداخلی بلافاصله پس از سرریز اوجی وجود دارد که با هواده‌ی، شکل دهی تدریجی به تغییرات اثر آن کاهش می‌یابد. به منظور رفع این مشکل در طول سرریز از هواده‌هایی استفاده می‌شود که فاصله بین دو هواده متوالی تقریباً با سرعت متوسط جریان برابر است. هواده‌ی از طریق زائده‌ها و شیارهایی روی بدنه ایجاد می‌شود. بدنه سرریز باید از جنس بتن مسلح باشد و روی بدنه آن درزهای انبساطی به کار گرفت و در بین درزها از water stop استفاده نمود. سرریز شوت اساساً شامل یک کانال باز با شیب تند در امتداد کناری سد یا دیواره مخزن می‌باشد. این کانال آب را از مخزن به کانال پائین دست منتقل می‌کند. جنس بستر آن معمولاً از دال‌های بتنی مسلح با ضخامت ۲۵ الی ۵۰ cm می‌باشد. بتن با ۰/۲۵ درصد آرماتور در بالای دال‌ها و در دو جهت قرار داده می‌شود. شوت گاهی با عرض ثابت می‌باشد ولی معمولاً به جهت اقتصادی باریک می‌شود و سپس در انتهای کانال برای کاهش سرعت جریان عریض می‌شود. ارتفاع آب در کناره‌های سرریز بیشتر است، بنابراین عرض کم می‌شود تا طرح اقتصادی گردد اما امواج تداخلی مفید نیستند که برای جلوگیری از به وجود آمدن آن‌ها، باید تغییرات تدریجی رخ دهد و هواده‌ی در طول مسیر صورت گیرد. معمولاً از درزهای انبساطی در فواصل ۱۰ متر در دو جهت استفاده می‌شود. چنانچه شیب شوت با توپوگرافی منطقه تطابق داشته باشد، حفاری‌ها حداقل خواهد بود. اما حداقل شیب باید طوری باشد

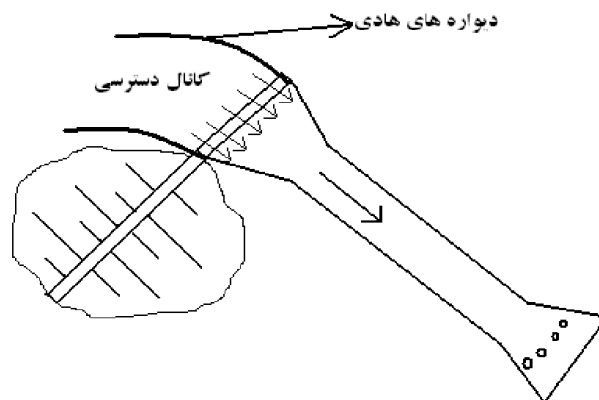
که منجر به ایجاد جریان فوق بحرانی گردد. زیرا جریان فوق بحرانی طرح را اقتصادی و توزیع سرعت را یکنواخت می کند.

۲-۲۶- مزایای سرریز شوت

۱. به سادگی قابل طرح و اجرا می باشند.
 ۲. تقریباً در کلیه شرایط فونداسیون قابل اجرا هستند.
 ۳. حجم عظیم خاکبرداری حاصله را می توان در بدنه سد خاکی مورد استفاده قرار داد.
- به منظور کاهش در هزینه خاکبرداری، حتی الامکان سعی می شود که شیب شوت با توپوگرافی منطقه سازگار باشد. ارتفاع سرریز شوت کوتاه می باشد و ضریب تخلیه آن کمتر از $2/18$ می باشد. بعد از اتمام شیب اوجی، توسط یک شیب ملایم و کوتاه به کف مخزن می رسد تا شیب زمین طبیعی را قطع کند و سپس با شیب تند ادامه می یابد.

۲-۲۷- قسمت های اصلی سرریز شوت

۱. آبراهه ورودی/کانال ورودی (Entrance (Approach) Channel): کانالی مصنوعی است با شکل دوزنقه ای و شیب کناره های $1:1$ که نقش هدایت آب مخزن به سمت سرریز را بر عهده دارد. سرعت آب در این کانال کم می باشد. این کانال می تواند در پلان به صورت قوسی نیز باشد. مسیر شوت نباید دارای انحنا باشد زیرا سرعت آب در داخل آن بالا است (شکل ۲-۲۱).



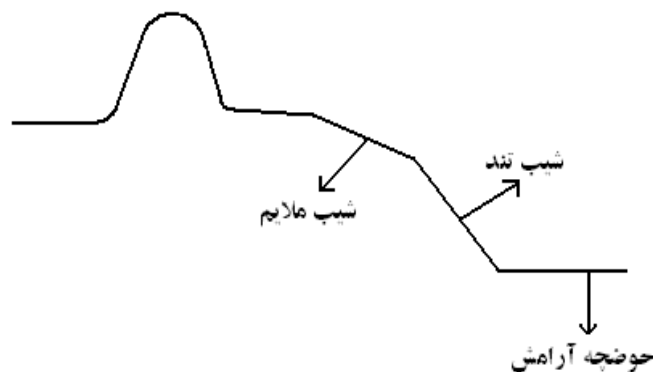
شکل ۲-۲۱

۲. سازه کنترل/سرریز اوجی کوتاه (Control Structure\Low Ogee Weir): در صورت شیبدار بودن

منحنی بالادست سرریز، تصحیح شیب توسط نمودارهای مربوطه صورت می گیرد. سازه کنترل معمولاً صاف و بدون انحنا می باشد. به علت این که این سرریز در دیواره مخزن و کناره ها ساخته می شود، ارتفاع آن کم می باشد. بیشتر اوقات یک سرریز کوتاه صاف، مورد نیاز خواهد بود.

۳. کانال شوت (Chute Channel\Discharge Carrier): مسیر طولانی است که آب را هدایت می کند و

شیب تندی دارد. حتی الامکان سعی می شود که شیب آن بر شیب طبیعی زمین منطبق باشد اما می تواند در قسمت های مختلف دارای شیب های متفاوتی باشد (شکل ۲-۲۲).



شکل ۲-۲۲

برای کاهش هزینه ساخت کانال سعی می شود تا سطح مقطع کانال شوت کاهش یابد. بدین منظور باید جریان داخل کانال فوق بحرانی گردد تا سرعت آب زیاد شود. بنابراین در ابتدای کانال از تبدیل های تنگ شونده، استفاده می گردد. اما در انتهای کانال باید از سرعت آب کاسته شود و جریان را به زیر بحرانی تبدیل می کنند. زاویه α زاویه ای است که تبدیل با محور طولی می سازد که $\cot \alpha = 3/375 Fr_{ave}$ و Fr_{ave} معادل با میانگین اعداد فرود ابتدا و انتهای تبدیل می باشند.

کانال شوت دیواره هایی دارد و مقطع آن مستطیلی می باشد. بنابراین یک حداقل ارتفاع برای جلوگیری از ریزش آب به نام freeboard تعیین می گردد که طبق روابط زیر قابل محاسبه می باشد:

$$USBR : f = 0.6 + 0.0051vd^{1/3}$$

$$f = 0.61 + 0.04vd^{1/3}$$



به منظور ثابت ماندن ارتفاع دیواره ها، عرض مقطع را تغییر می دهند. بنابراین بسیاری از تنگ شدگی ها به علت ثابت ماندن ارتفاع دیواره سرریز شوت می باشد.

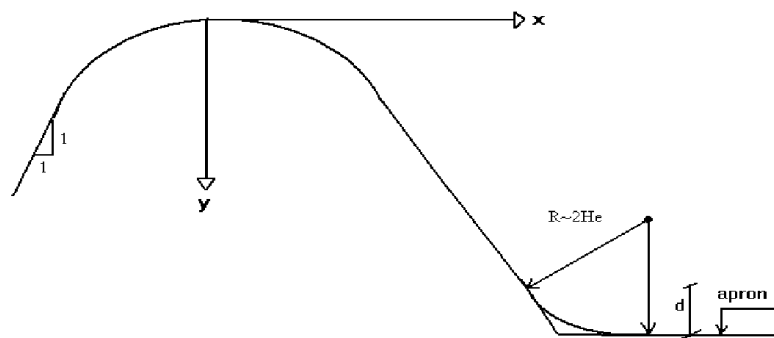
۴. **سازه پایانه (Terminal Structure):** این قسمت شامل حوضچه آرامش یا پرتابه های جامی شکل می باشد. در صورتی که بستر پائین دست قوی و سنگی باشد، استفاده از پرتابه اقتصادی تر خواهد بود. اما در صورت مقاوم نبودن بستر، استفاده از حوضچه آرامش بهترین گزینه است. امواج تداخلی ایجاد شده در اثر تغییرات ناگهانی تبدیلات، دو نقش منفی دارند:

(۱) امواج تداخلی موجب تجمع عمق آب در دیواره ها می گردد. بنابراین ارتفاع آب در کناره ها از freeboard طراحی بیشتر می باشد.

(۲) امواج عرضی موجب توزیع غیر یکنواخت سرعت در مقطع می گردد. پس در صورت کاربرد حوضچه های آرامش، این حوضچه ها عملکرد خوبی نخواهند داشت.

پس هر گونه تبدیلی که استفاده می شود، نباید با تغییرات شدیدی همراه باشد. پس در صورت تغییر شیب، باید از یکسری تبدیلات و قوس های مقر یا محدب استفاده شود.

سرریز شوت یک اوجی متعارف است و دارای دو منحنی پائین دست و بالادست می باشد (شکل ۲-۲۳).



شکل ۲-۲۳

به منظور تعیین معادله منحنی پائین دست با تعیین نسبت $\frac{\omega}{H}$ ، می توان از جدول زیر کمک گرفت:

		معادله پروفیل پائین دست $(\frac{d}{s})$
۰	≥ 1	$x^{1/78} = 1/825 He^{1/78}$
۰/۰۸	۱-۰/۵۸	$x^{1/75} = 1/864 He^{1/75}$



۰/۱۲	۰/۵۸-۰/۳	$x^{1/747} = 1/90.5 \text{He}^{0/747}$
------	----------	--

به منظور کنترل تراز apron و جلوگیری از اثر استغراق از رابطه زیر استفاده می شود:

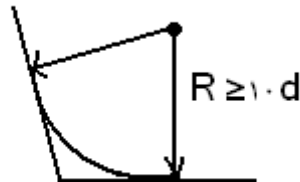
$$\frac{hd+d}{\text{He}} \geq 1/7$$

معمولاً عمق آب در شوت را یکنواخت در نظر می گیرند. مطابق جدول زیر پروفیل آب در طول کانال شوت بدست می آید:

$\frac{x}{\text{He}}$	$\frac{y}{\text{He}}$		
	$\frac{Hv}{\text{He}} = ۰$	$\frac{Hv}{\text{He}} = ۰/۰۸$	$\frac{Hv}{\text{He}} = ۰/۱۲$
۰	۰	۰	۰
-۰/۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴
-۰/۰۶	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۵
-۰/۱	۰/۰۱۰۳	۰/۰۱۰۱	۰/۰۰۹۹
-۰/۱۲	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۴۷
-۰/۱۴	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۰۸	۰/۰۱۹۹
-۰/۱۵	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۵	۰/۰۲۳۱
-۰/۱۶	۰/۰۲۷۵	۰/۰۲۷۰	۰/۰۲۶۵
-۰/۱۷۵	۰/۰۳۳۳	۰/۰۳۲۸	۰/۰۳۲۵
-۰/۱۹	۰/۰۳۹۹	۰/۰۳۹۵	۰/۰۳۹۰
-۰/۱۹۵	۰/۰۴۲۴	۰/۰۴۲۰	—
-۰/۲	۰/۰۴۵۰	—	—

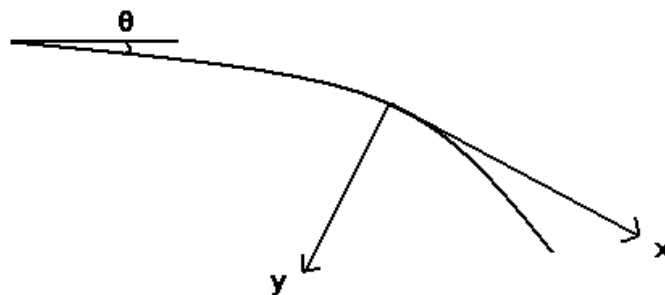
۲-۲۸- طراحی منحنی های قائم شوت

منحنی مقعر (در شیب های تندتر به تند) / concave curve



شکل ۲-۲۴

منحنی محدب (در شیب های تند به تندتر) / convex curve



شکل ۲-۲۵

منحنی محدب یک سهمی با معادله زیر است:

$$y = x \tan \theta + \frac{x^2}{K \left[4(d + hv) \cos^2 \theta \right]}$$

در رابطه فوق به ترتیب θ ، K و $(d + hv)$ به ترتیب شیب بالادست، ضریب ثابت بزرگتر مساوی با ۱/۵ و انرژی مخصوص می باشد.

رابطه افت انرژی در طول کانال دسترسی مطابق زیر می باشد:



$$h_f = S_f \times L = \frac{n^2 v^2 L}{R^{\frac{4}{3}}}$$

۲-۲۹- مشکلات سرریز شوت

(۱) ایجاد امواج تداخلی به سبب اریبی وارد شدن جریان به درون شوت

(۲) حفره زایی/کاویتاسیون (cavitation): اگر منحنی تغییرات تدریجی نباشد و پروفیل جریان بر سطح سد منطبق نباشد، فشار منفی ایجاد می شود. نواحی کم فشار به علت تبدیلات شدید و شیب های افقی تند ایجاد می گردد. در این نواحی حباب هایی (bubbles) ایجاد می شوند. حباب ها در مناطق پرفشار می ترکند و باعث ایجاد ضربه شدید در سطح بدنه می شود. در نتیجه سازه دچار فرسایش می گردد. این پدیده یا لرزش و صدا همراه است که به مرور زمان سازه را دچار تخریب می کند.

به منظور جلوگیری از مشکلات فوق سه راهکار وجود دارد:

- ۱- سرعت آب زیاد نباشد. اگر سرعت آب از ۱۵-۱۰ متر بر ثانیه کمتر باشد، خطری وجود ندارد اما اگر از ۲۰ متر بر ثانیه بیشتر شود، کاویتاسیون جدی تلقی می گردد.
- ۲- در محل هایی که فشار منفی باشد، هوادهی یا تهویه صورت می گیرد. میزان هوادهی ۸-۶ درصد حجم است.

بسیاری از سدهای متوسط و بزرگ دنیا با سرعت های جریان بیش از ۱۰ متر بر ثانیه و حتی تا ۴۵ متر بر ثانیه سر و کار دارند. هنگامی که سرعت جریان نزدیک به ۱۰ الی ۱۵ متر بر ثانیه برسد، پدیده کاویتاسیون متحمل خواهد بود. یک برجستگی کوچک در درز اجرایی یا ناهمواری در سطح بتن ممکن است باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون شود و منجر به خرابی در سطح پائین دست گردد. لذا برای کاهش اثرات آن کف بتنی باید از مقاومت بالا برخوردار بوده و سطح آن تا حد امکان صیقلی باشد. اما موثرترین روش برای کاهش یا از بین بردن اثرات کاویتاسیون استفاده از تهویه (Aeration) است.

وجود زائده ها (Δ) در طول کانال شوت تاثیر گذار می باشند. با افزایش میزان Δ ، سرعت آب افزایش می یابد و احتمال وقوع کاویتاسیون بیشتر می شود. منحنی $V-\Delta$ در پله های مثبت و منفی متفاوت می باشد. پله مثبت پتانسیل کاویتاسیون بالاتری نسبت به پله منفی دارد و حالت بدتری خواهد داشت (شکل ۲-۲۶).



(۱) پله مثبت (۲) پله منفی

شکل ۲-۲۶

کاویتاسیون عبارت است از تشکیل منطقه حفره بخار آب (cavity) که در اثر کاهش فشارهای موضعی تا حد فشار بخار آب در روی سطح سرریز به علت ناهموازی ممکن است جریان آب به دلیل سرعت بالا دچار کاهش فشار گردد. این عامل باعث تشکیل حفره ها یا مناطقی از بخار آب شود. خرابی حاصل از کاویتاسیون روی سرریز هنگامی رخ می دهد که این حباب ها به سمت پائین دست حرکت کند و به طور ناگهانی در مناطق پرفشار بترکد. آب اطراف به سرعت به سمت آن ها حرکت می کند تا فضای حباب ها را پر کند که به علت سرعت بالای آن ها با یکدیگر مومتم زیادی ایجاد می کند که این به نوبه خود باعث افزایش فشار موضعی به طور بسیار قابل ملاحظه می گردد.

معیار کنترل کاویتاسیون / عدد کاویتاسیون (cavity index \ cavity number):

این معیار مطابق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\sigma C < \frac{P - P_v}{\rho V^2}$$

در رابطه بالا P , P_v , ρ و V به ترتیب فشار مطلق، فشار بخار آب، چگالی و سرعت آب می باشد. در ایستگاه های مختلفی از شوت این عدد محاسبه می گردد. هرچه عدد کاویتاسیون بیشتر باشد، خطر کاویتاسیون کمتر می شود. در صورتی که σC از ۰/۲ بیشتر گردد، کاویتاسیون رخ می دهد. بنابراین یکی از دلایل کم و زیاد کردن عرض کانال، تغییر سرعت است تا کاویتاسیون رخ ندهد. پس سرعت کنترل کننده خواهد بود. برای تعیین پتانسیل کاویتاسیون، عدد کاویتاسیون در نقاط مختلف شوت محاسبه می شود. محلی هایی که عدد کاویتاسیون در آن ها کمتر از مقدار بحرانی باشد، تعیین می شوند. حداقل عدد کاویتاسیون لزوماً هنگام دبی ماکزیمم ایجاد نمی شود. جهت کاهش پتانسیل کاویتاسیون شکل پروفیل شوت باید طوری طراحی گردد که فشار موضعی افزایش و در نتیجه عدد کاویتاسیون افزایش یابد. چنانچه تغییرات شکل هندسی شوت



در کاهش پتانسیل کاویتاسیون موثر واقع نشد، از موثرترین و اقتصادی ترین روش به نام روش تهویه استفاده می شود (Aeration). آزمایشات و مشاهدات نشان می دهد که اگر در نزدیکی سطح بتن حدود ۸-۶ درصد هوا دمیده شود، ناهمواری ها سبب کاویتاسیون نخواهد شد.

مثال) یک پروفیل مناسب برای سرریز شوت با اطلاعات زیر طراحی کنید.

تراز کف کانال ورودی ۱۹۲ مترو تراز تاج سرریز ۲۰۰ متر است. تراز آب پائین دست مرتبط با دبی ۵۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه برابر با ۱۰۳ متر و طول سرریز شامل ۵ دهانه و هر کدام با عرض نمایان ۱۰ متر می باشد. ضخامت هر پایه سرریز ۳ متر فرض شود. اطلاعات دیگر را به طور منطقی فرض کنید.