جمهوری اسلامی ایران
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

مبانی طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه ها و آبراهه‌ها

نشریه شماره ۴۱۷

معاونت نظارت راهبردی
دفتر نظام فنی اجرایی

http://tec.mporg.ir

سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری
معاونت آبخیزداری
دفتر طرح ریزی و هماهنگی

http://www.Fer.org.ir

۱۳۸۷

بسمه تعالی

ریاست جمهوری
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	شماره : ۱۰۰/۴۳۷۳۹
	تاریخ : ۱۳۸۷/۵/۱۲

موضوع :
مبانی طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی ، موضوع ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ٤٢٣٣٩/ت ٣٣٤٩٧هـ ، مورخ ١٣٨٥/٤/٢٠ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۴۱۷ دفتر نظام فنی اجرایی، با عنوان «**مبانی طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها**» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده کنند و در صورتی که روش‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنمای بهتری در اختیار داشته باشند، رعایت مفاد این بخشنامه الزامی نیست.

عوامل یاد شده باید نسخه‌ای از دستورالعمل‌ها، روش‌ها یا راهنماهای جایگزین را به دفتر نظام فنی اجرایی ارسال کنند.

امیرمنصور برقعی
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

467938

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- *شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.*

۲- *ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.*

۳- *در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.*

٤- *نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.*

کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی‌علی‌شاه، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱، دفتر نظام فنی اجرایی

Email: tsb.dta@mporg.ir **web: http://tec.mporg.ir/**

پیشگفتار

رودخانه‌ها و آبراهه‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی و یا دخالت‌های انسان دچار فرسایش بستر، فرسایش کناره‌ها و جابه‌جایی عرضی می‌شوند. فرسایش رودخانه‌ای به نوبه خود موجب بروز خطرات و خسارات عدیده‌ای برای اراضی مجاور رودخانه‌ها و مستحدثات ساحلی می‌شود، به‌طوریکه سالانه میلیون‌ها تن از خاک‌های با ارزش اراضی حاشیه رودخانه‌ها دچار فرسایش شده و علاوه بر هدر رفتن خاک با ارزش، موجب از بین رفتن زمین‌های کشاورزی و پرشدن مخازن سدها و کاهش عمر مفید آنها و همچنین ایجاد مشکلات زیادی در بهره برداری از تأسیسات آبگیری و انتقال آب می‌شود.

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل مختلف پیدایش، مطالعات توجیهی، طراحی تفصیلی، اجرا، راه‌اندازی، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌ها و پروژه‌ها موجب ساماندهی عرصه، کاهش هزینه‌ها و نیز مانع بهره‌برداری بی‌رویه از منابع می‌شود.

بر همین اساس و با توجه به ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مربوطه و نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ ت ۳۳۴۹۷ ه مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰هیات محترم وزیران) ، تهیه دستورالعمل و ضوابط طراحی، اجرا و نگهداری طرح‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و مسیل‌ها را مد نظر قرار داد و با اعلام نیاز دستگاه اجرایی (معاونت آبخیزداری)، دفتر طرح‌ریزی و هماهنگی آبخیزداری، که مجری طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی در سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور است، با همکاری و هماهنگی دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری که مسئولیت تهیه و تدوین ضوابط را برعهده دارد نسبت به تهیه **مبانی طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها**، در راستای برنامه تدوین ضوابط و معیارهای فنی آبخیزداری و منابع طبیعی اقدام نمود.

این نشریه به عنوان راهنمایی برای معرفی روش‌های مهار فرسایش و تثبیت رودخانه‌ها، بیان اصول طراحی سازه‌های کنترل فرسایش و شرایط احداث آنها، ارائه شده است. در این نشریه همچنین توصیه‌هایی عمومی برای اجرا و نگهداری این سازه‌ها بیان شده‌است.

متن اولیه با محوریت و هدایت معاونت آبخیزداری و توسط مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری تهیه و سپس در جلسات کارشناسی توسط کار گروه فنی نهایی شد.

معاونت نظارت راهبردی رییس جمهور بدین‌وسیله از کلیه عزیزانی که در تهیه این نشریه همکاری داشته‌اند و رهنمودها و حمایت‌های ایشان در به ثمر رسیدن نشریه حاضر موثر بوده است، سپاسگزاری و قدردانی می‌نماید.

امید است متخصصان و کارشناسان با ابراز نظرات خود در خصوص این نشریه ما را در اصلاحات بعدی یاری فرمایند.

معاون نظارت راهبردی

۱۳۸۷

مبانی طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها
نشریه شماره ۴۱۷

تهیه کننده

آقای دکتر مجتبی صانعی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب خیزداری
آقای مهندس سید احمد حسینی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب خیزداری
آقای مهندس مسعود ساجدی سابق، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب خیزداری

کمیته علمی- فنی

آقای دکتر مهدی حبیبی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری
آقای دکتر علی سلاجقه، دانشکده منابع طبیعی کرج

داور

آقای دکتر محمد حسین مهدیان، سرپرست تیم داوری

کمیته بررسی و تصویب نهایی

الف) معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری
آقای مهندس علیرضا دولتشاهی، معاون دفتر نظام فنی اجرایی
آقای مهندس خشایار اسفندیاری، رییس گروه آب و کشاورزی دفتر نظام فنی اجرایی
خانم مهندس مهتاب معلمی، کارشناس

ب) سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری
آقای مهندس علیرضا بنی‌هاشمی، مدیرکل دفتر طرح‌ریزی و هماهنگی آبخیزداری و مجری طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی آبخیزداری و منابع طبیعی
آقای مهندس محمد عقیقی، رییس گروه ضوابط و استانداردهای سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
پیشگفتار	۱
۱- تعاریف و تقسیم بندی رودخانه	۸
۱-۱- مقدمه	۸
۱-۲- الگوی رودخانه	۸
۱-۳- پایداری کانال	۹
۱-۴- هندسه و هیدرولیک رودخانه	۱۰
۱-۵- فرسایش	۱۲
۱-۵-۱- عوامل موثر در فرسایش آبی	۱۲
۱-۵-۲- انواع فرسایش آبی	۱۴
۱-۵-۳- عوامل موثر بر فرسایش در رودخانه	۱۷
۱-۶- روش تثبیت و بسترسازی یک پارچه رودخانه	۱۸
۱-۶-۱- اهداف حفاظت و تثبیت دیواره های رودخانه	۱۸
۱-۶-۲- عوامل موثر در طرح حفاظت و تثبیت دیوارهای رودخانه	۱۸
۲- معرفی روش‌های مهار فرسایش و تثبیت رودخانه‌ها	۲۱
۲-۱- مقدمه	۲۱
۲-۲- روش‌های حفاظت سواحل رودخانه‌ها بر اساس عملکرد سازه‌ها	۲۱
۲-۳- روش‌های حفاظت رودخانه بر اساس نوع مصالح پوششی	۲۳
۲-۴- ویژگی‌های سازه‌های تثبیت رودخانه	۲۴
۲-۵- آب شستگی	۲۴
۳- اصول طراحی سازه‌های مهار فرسایش در رودخانه	۲۷
۳-۱- سازه‌های مهار فرسایش کناری	۲۷
۳-۱-۱- مقدمه	۲۷
۳-۱-۲- آب‌شکن	۲۷
۳-۱-۲-۱- پارامترهای مهم درطراحی آبشکن‌ها	۳۰
۳-۱-۲-۲- روش طراحی آبشکن‌ها	۴۱
۳-۱-۲-۳- چند توصیه اجرایی	۴۳
۳-۱-۳- روش‌های مستقیم حفاظت دیواره(پوشش‌ها)	۴۳
۳-۱-۳-۱- پوشش انعطاف‌پذیر و پوشش صلب	۴۴
۳-۱-۳-۲- ساختمان پوشش	۴۶
۳-۱-۳-۳- روش طراحی	۴۸

۳-۱-۳-۴-طراحی لایهٔ آرمور	۴۹
۳-۱-۳-۵- طراحی لایهٔ تحتانی	۵۱
۳-۱-۳-۶-پوشش سنگ‌ریزه‌ای	۵۶
۳-۱-۳-۷-دیگر پوشش‌های سنگی	۵۹
۳-۱-۳-۸-پوشش بتنی مفصل‌دار	۶۴
۳-۱-۳-۹- پوشش کیسه‌ای	۶۵
۳-۱-۳-۱۰-پوشش آسفالت	۶۵
۳-۱-۴-دیوارهای وزنی	۶۶
۳-۱-۴-۱- طراحی دیوارهای وزنی	۶۶
۳-۱-۴-۲- مصالح مورد استفاده در دیوارهای وزنی	۷۱
۳-۲- سازه‌های مهار فرسایش بستر رودخانه	۷۲
۳-۲-۱- تثبیت بستر رودخانه	۷۲
۳-۲-۱-۱- تثبیت بستر رودخانه‌ها توسط شیب‌شکن	۷۳
۳-۲-۱-۲- مبانی حاکم بر پدیده فرسایش بستر	۷۴
۳-۲-۱-۳- روش‌های کنترل فرسایش در رودخانه	۷۷
۳-۲-۱-۴- طرح بندهای متوالی	۸۰
۳-۲-۱-۵- شیب شکن قائم	۸۸
۳-۲-۱-۶- شیب شکن Sogreah	۹۱
۳-۲-۱-۷- شیب شکن مایل	۹۲
۳-۲-۱-۸- شیب شکن لوله‌ای	۹۶
۴- دستورالعمل‌ها و توصیه‌ها	۹۸
۴-۱- مقدمه	۹۸
۴-۲- نکات عمومی در اجرای سازه‌ها	۹۸
۴-۳- نکات عمومی در نگهداری سازه‌ها	۱۰۰
منابع مورد استفاده	۱۰۲

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل(۱)- طرح شماتیک ازیک آب‌شکن جاذب	۲۹
شکل(۲)- طرح شماتیک ازیک آب‌شکن دافع	۲۹
شکل(۳)- پلان انواع آب‌شکن بر اساس شکل دماغه	۳۰
شکل(۴)- نمایش پارامترهای عرض کنترل شده رودخانه(B)، طول آب‌شکن(L) وفاصله آب‌شکن‌ها(S)	۳۴
شکل(۵)- انواع‌شیب تاج آب‌شکن	۳۷
شکل(۶)- مقطع مؤثر دماغه آب‌شکن	۳۸
شکل(۷)- زاویه ورودی به پیچ یا زاویه حمله آب به دیواره‌ها (α)	۴۱
شکل (۸) - نمونه‌ای از یک سازه انعطاف‌پذیر و جزییات فنی آن برای حفاظت کناره‌ها	۴۵
شکل (۹)- مواردی از سازه‌های صلب مورد استفاده در تثبیت بستر و کناره‌های رودخانه	۴۶
شکل (۱۰)- اجزاء یک پوشش به صورت شماتیک	۴۷
شکل (۱۱)- تأثیر نفوذپذیری لایه‌ی آرمور بر روی نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر پوشش	۵۰
شکل (۱۲)- تأثیر شکل لایه آرمور بر روی نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر پوشش	۵۰
شکل (۱۳)- فاکتور کاهش نفوذپذیری در الیاف ژئوتکستایل موج‌دار	۵۳
شکل (۱۴)- نحوه‌ی قرارگیری ژئوتکستایل در کناره‌ی حفاظت شده رودخانه	۵۵
شکل (۱۵)- پوشش سنگ‌چین دستی	۵۹
شکل(۱۶)- درز و حفرات بین پوشش صلب	۶۰
شکل (۱۷)- ضخامت تشک گابیونی	۶۱
شکل (۱۸)- پوشش تشک گابیونی	۶۴
شکل (۱۹)- پوشش گابیون لوله‌ای	۶۴
شکل (۲۰)- دیاگرام ساده شده نیروها برای خاک غیر چسبنده	۶۷
شکل(۲۱)- سیمای دیوارهای وزنی و گرادیان تراوش آب	۶۸
شکل (۲۲)- اشکال تخریب دیوارهای کانال	۷۰
شکل(۲۳)- دیوارهای گابیونی	۷۱
شکل(۲۴)- فرم عمومی کاهش عرض مقطع در مسیر رودخانه با مقطع اصلی و سیلاب‌دشت	۷۴
شکل (۲۵)- نمایش چگونگی عکس‌العمل رودخانه در قبال کاهش عرض مقطع	۷۶
شکل (۲۶)- متوسط اندازه سنگ‌های مورد نیاز برای تثبیت بستر به ازاء مقادیر مختلف سرعت جریان	۷۸
شکل(۲۷)- اندازه سنگ‌های مورد استفاده در پوشش‌های حفاظتی بر حسب متوسط سرعت جریان	۷۹
شکل (۲۸)- منحنی دانه‌بندی پیشنهادی برای لایه آرمور	۷۹
شکل (۲۹)- رابطه بین تنش برشی و دانه‌بندی سنگ‌های تشکیل دهنده لایه آرمور	۸۰
شکل (۳۰)- حفاظت بستر در مقابل فرسایش ناشی از ایجاد کانال میانبر با استفاده از پوشش حفاظتی (لایه آرمور)	۸۱

شکل (۳۱)- پارامترهای مشخصه دراپ وحوضچه آرامش ۸۳
شکل (۳۲)- دیاگرام پیش بینی نوع حوضچه آرامش درشیب شکن‌ها ۸۵
شکل (۳۳)- دیواره‌های سپری بالادست و پایین‌دست در شیب‌شکن‌ها ۸۶
شکل (۳۴)- منحنی تغییرات V_s نسبت به قطرمعادل D_e یاوزن سنگ w ۸۷
شکل (۳۵)- شیب‌شکن قائم بدون موانع ۸۸
شکل (۳۶) ـ تنظیم پرش هیدرولیکی به‌وسیله گودال ۸۹
شکل (۳۷)- ابعاد بلوک‌های بتنی و حوضچه آرامش در شیب‌شکن قائم با موانع ۹۰
شکل (۳۸)- شیب‌شکن Sogreah ۹۴
شکل (۳۹)- شیب‌شکن مایل مستطیلی مؤسسه USBR ۹۵
شکل (۴۰)- شیب‌شکن لوله‌ای نوع ۱ ۹۶
شکل (۴۱)- انتهای شیب‌شکن لوله‌ای نوع ۲ ۹۷

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱) خواص فیزیکی رس	۱۱
جدول (۲)- ضریب حداکثر عمق آبراهه	۱۲
جدول (۳)- نسبت های پیشنهادی برای مقادیر S/L و S/B توسط بعضی منابع	۳۴
جدول (۴)- شاخص قطر سنگ و ضخامت تشک گابیونی	۶۱
جدول (۵)- ضخامت روکش تورسنگ در ارتباط با سرعت جریان	۶۳
جدول (۶)- حداقل مقادیر نسبت خزش وزنی، CW	۶۸
جدول (۷) ابعاد شیب شکن مایل مستطیلی	۹۳

فصل اول
تعاریف و تقسیم‌بندی رودخانه

۱- ۱- مقدمه

مهندسی رودخانه علمی است که هدف آن استفاده حداکثر از رودخانه‌ها برای رفع نیازهای اقتصادی و ارتباطی و به حداقل رساندن خطرات و زیان‌های ناشی از آن‌ها می‌باشد. علی‌رغم سابقه طولانی استفاده انسان از رودخانه، مهندسی رودخانه به‌صورت کلاسیک سابقه چندانی نداشته و نسبت به سایر زمینه‌های علمی؛ ناشناخته و جوان‌تر است و به همین دلیل انجام مطالعات بیشتر در این زمینه، لازم به نظر می‌رسد.

۱-۲- الگوی رودخانه

مطالعه الگو یا شکل پلان یک رودخانه برای حفاظت آن از اثرات جانبی دخالت بشر در رودخانه یا حریم آن، از قبیل عملیات پل‌سازی، ضروری می‌باشد. سه گروه الگو برای رودخانه وجود دارد: مستقیم، شریانی و پیچانرودی

- *رودخانه‌های مستقیم*

رودخانه‌هایی را گویند که طول آن‌ها حدود ده برابر عرض آبراهه مستقیم باشند. رودخانه‌ای که مستقیم است معمولاً از لحاظ استاتیکی نیز پایدار می‌باشد،(Farraday, R. V. Charlton, F. G. 1983).

- *رودخانه‌های شریانی*

این رودخانه‌ها معمولاً ناپایدار بوده و می‌توانند مقادیر زیادی از رسوب را حمل کنند که در نتیجه در دامنه‌های طولی کوتاه ته‌نشینی رسوب و با افزایش شیب انتقال رسوب بیشتر را می‌دهد. تل‌های ته‌نشین شده اغلب بزرگتر شده و جریان را منحرف می‌کنند و باعث تغییر محل موقعیت آبراهه می‌شوند. رودخانه‌های شریانی سواحل خود را فرسایش می‌دهند، آب‌شستگی بستر و شکل هندسی آن‌ها متناسب با دبی، شیب دره، و رسوب ورودی از بالادست می‌باشد. این رودخانه‌ها دارای دشت سیلابی در کناره آبراهه هستند و گاهی جریان از سواحل و کناره‌ها سرریز کرده و در عرض دشت سیلابی پخش می‌شود.

- *رودخانه‌های پیچانرودی*

این رودخانه‌ها بسیار متداولند، و به‌ندرت دارای الگوی با قاعده سینوسی هستند. این رودخانه‌ها معمولاً از لحاظ دینامیکی پایدار هستند. نوسانات مقطع آنها تقریباً حول یک موقعیت متوسط از الگوی جریان حرکت کرده و به پایین دست پیشرفت می‌کند. طول موج پیچانرود رودخانه‌های آبرفتی حدود ۶ برابر عرض کانال است در حالی که شعاع پیچانرود می‌تواند تا ۱۷ برابر عرض آبراهه باشد. هنگامی که رودخانه شریانی باشد، نسبت‌ها به ترتیب ۱۱ و ۲۷ هستند، (Farraday, R.V. Charlton, F 1983). روابط تجربی برای تخمین طول موج پیچانرود و پهنای آن در بستر رودخانه‌های ماسه‌ای و شنی وجود دارند. نرخ مهاجرت پیچانرود در دامنه وسیعی تغییر می‌کند و راهنمای معتبری جهت تخمین این نرخ وجود ندارد. معادلات زیر برای تخمین طول و پهنای پیچانرود به‌کار می‌رود،(Ackers, P. and Charlton, F. G. (1970 و Inglis,C.C. (1947):

$L_m=65Q_b^{0.5}$

$B_m=2.86L_m$ (رودخانه با دشت سیلابی)

(رودخانه‌های شریانی) $B_m=2.2L_m$

که درآن: Lm طول موج پیچانرود (متر)

Qb ظرفیت غالب رودخانه (مترمکعب بر ثانیه)

Bm پهنای پیچانرود (متر) است.

رودخانه‌های پیچانرودی رفتاری مشابه دارند، اما توپوگرافی نقش بزرگتری در آبراهه و هندسه آن ایفا می‌کند. چنین رودخانه‌هایی معمولاً باریک‌تر و عمیق‌تر از نوع شریانی هستند و به‌ندرت از کناره‌ها سرریز می‌شوند. عرض کمربند پیچانرود معمولاً از عرض کانال رودخانه شریانی بزرگتر است. رسوب همراه جریان در هر دو نوع رودخانه بصورت بار معلق و بار بستر انتقال می‌یابد.

بارمعلق، مصالح ریزدانه موجود در آب است که بیشتر آن‌ها مصالح فرسایش یافته از حوضه آبریز است. این مواد همراه با جریان‌های روگذر به رودخانه وارد می‌شود. دانه‌های درشت‌تر بار معلق به‌طور وسیعی از بستر رودخانه مشتق شده و هنگامی که سرعت جریان کاهش می‌یابد و ظرفیت برای حمل رسوب نقصان پیدا می‌کند، رسوب‌گذاری می‌شوند. بار بستر، در مقایسه با بار معلق، مواد درشت‌دانه‌تری هستند که در طول بستر حرکت داده می‌شوند و تقریباً به‌طور مداوم با بستر بر خورد می‌کند.

۱-۳- پایداری کانال

رودخانه‌ها بر حسب پایداری به دو دسته کلی پایدار و ناپایدار طبقه‌بندی می‌شوند. رودخانه‌های پایدار خود شامل دو نوع رودخانه‌های پایدار استاتیکی و دینامیکی هستند:

- *رودخانه‌های پایدار استاتیکی*

این مرحله در رودخانه هنگامی است که نیروی جریان آب برای آبشستگی بستر، فرسایش کناری یا حتی انتقال مقادیر ویژه رسوب در بار معلق یا بار بستر کافی نیست. مرزهای کانال رودخانه ساکن و بی‌حرکت است و مانند مرزهای صلب در طی سال‌های متمادی در آبراهه می‌باشد. هر چند تداخل الگوی جریان، ممکن است باعث تغییرات موضعی در هندسه آبراهه شود.

- *رودخانه‌های پایدار دینامیکی*

این رودخانه‌ها معمولاً به‌طور مستمر فعال هستند، آب‌شستگی و ته‌نشینی مواد در بستر، فرسایش و ته‌نشینی مواد در کناره‌ها و انتقال مقادیر ویژه رسوب از آن‌جمله هستند. هر چند این‌ها تغییر کوتاه مدتی در شکل آبراهه در حین تغییرات پیش‌رونده می‌دهد، اما معمولاً در محدوده شرایط متوسط تغییر می‌کند. جابه‌جایی الگوی کانال باعث فرسایش پیش‌رونده‌ای مانند الگوی حرکت به سمت پایین است. تزاحم با الگوی جریان در چنین رودخانه‌هایی باعث تغییرات موضعی هندسه کانال می‌شود.

- *رودخانه‌های ناپایدار*

این رودخانه‌ها معمولاً مقادیر بسیار زیادی از رسوب را انتقال می‌دهند، و دارای آب‌شستگی مداوم و رسوب‌گذاری مواد و فرسایش کناری هستند. تل‌های رسوب‌گذاری شده جریان را منحرف می‌کند، باعث می‌شود کانال‌ها، شکل، موقعیت و الگوی پیش‌رونده خود را تغییر دهند. رفتار چنین رودخانه‌هایی معمولاً غیرقابل پیش‌بینی است و کنترل رودخانه مشکل است. راه‌کارهای چاره‌ساز مشمول برنامه‌ریزی مدیریت حوضه، کنترل پوشش و فرسایش حوضه، ساخت تله‌های رسوبی در نواحی بالاتر رودخانه و کنترل دخالت‌های بشری می‌باشد.

۱-٤- هندسه و هیدرولیک رودخانه‌ها

هندسه یک رودخانه شامل عرض رودخانه، عمق، شکل سطح مقطع، شیب و راستای آن است. این موارد بستگی به چند عامل دبی، مشخصات بستر و مصالح کناری، مقدار رسوب حمل شده توسط رودخانه و توانایی انتقال رسوب موجود از منابع بالادست دارد. روش رضایت بخشی از محاسبه تغییرات هندسه رودخانه وجود ندارد که بتواند برای تمامی رودخانه‌ها قابل استفاده باشد. آنچه موجود است چند روش تجربی و نیمه تجربی تحلیلی می‌باشد. هر کدام از آن‌ها محدود به رودخانه با مشخصه‌های منحصر به‌فرد خود است. تنها هدف و منظور این نوشتار خلاصه و چکیده‌ای از روش‌های مهم‌تر به‌منظور محاسبه هندسه رودخانه‌های پایدار استاتیکی و پایدار دینامیکی می‌باشد. معادلات بیان شده در زیر تنها می‌تواند راهنمایی برای محاسبات هندسی و هیدرولیکی باشد.

- *رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای*

معادلات زیر از کارهای Blench (1969) اقتباس شده است:

$$B=14Q^{0.5}D_{50}^{0.25}F_s^{-0.5}$$

$$V=0.38q^{0.67}D_{50}^{-0.17}$$

که درآن:

B عرض متوسط آبراهه (متر)

y عمق متوسط جریان (متر)

Q دبی تعادلی که چنین آبراهه‌ای تولید می‌کند به‌طوری‌که رودخانه تحت فرسایش و رسوبگذاری نباشد، اغلب فرض می‌شود که جریان در آبراهه‌های آبرفتی برای تخمین هندسه آبراهه تحت شرایط سیلابی لبه پر باشد (مترمکعب بر ثانیه)

q دبی در واحد عرض=Q/B (مترمکعب بر ثانیه در واحد طول)

V سرعت جریان (متر بر ثانیه)، D_{50} اندازه متوسط مصالح بستر (متر)

F_s ضریب کناره برای تشریح سفتی و سختی کناره‌ها (لوم و ماسه‌ای $F_s=0.1$ و لوم سیلت رسی $F_s=0.2$، کناره‌های چسبنده $F_s=0.3$).

- *رودخانه‌های با بستر شنی*

معادلات زیر توسط Kellerhals (1967) اقتباس شده است.

$$B=3.26Q^{0.5}$$

$$y=0.47q^{0.8}D_{90}^{-0.12}$$

که درآن:

B,y,Q,q مطابق تعاریف مذکور

D_{90} اندازه مواد بستر است (متر)، به‌طوری‌که ۹۰٪ ذرات از آن کوچک‌تر باشند.

- *رودخانه‌های با بستر چسبنده*

مقاومت به آب‌شستگی یک بستر چسبنده اساساً ناشی از وزن غوطه‌وری ذرات است. مقاومت مصالح چسبنده، هر چند بسیار پیچیده است ولی بستگی به مشخصات سطح فیزیکی- شیمیایی، دانسیته و مقدار آب دارد. تنها روش خوب و معتبر در تخمین آبشستگی، اندازه‌گیری خواص خاک و محاسبات آزمایش‌های مدل در آزمایشگاه است. جدول شماره (۱-۱) راهنمایی برای کمک در تخمین عمق متوسط جریان در آبراهه با بستر چسبنده است، بر اساس توضیح انواع و طبقه‌بندی مصالح بستر و ضریب تخلخل، نسبت حجم حفره‌ها به حجم مصالح جامد در یک توده خاک تعریف شده است. در جدول (۱-۱) فرض شده است که وزن مخصوص ذرات ۲/۶۴ بوده و بستگی به نسبت تخلخل به صورت زیر تعریف می‌شود:

چگالی خشک توده = $\rho s/(e+1)$

چگالی اشباع توده = $\rho(s+e)/(e+1)$

که درآن:

ρ چگالی جرم آب،

s وزن مخصوص ذرات خاک،

e نسبت تخلخل جسم خاک است.

عمق جریان در یک آبراهه، با فرض آن‌که آب‌شستگی به عمقی که تنش برشی روی بستر معادل با تنش برشی بحرانی گرفته شود محاسبه می‌شود(Farraday, R. V. Charlton, F. G. 1983)، بنابراین:

$$y=51.4n^{0.86}q^{0.86}\tau_c^{-0.43} \qquad (۱۰-۲)$$

که درآن:

y عمق متوسط جریان (متر)،

n ضریب زبری در معادله مانینگ،

q دبی در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه در واحد طول)،

τ_c تنش برشی (نیوتن بر مترمربع) می‌باشد.

جدول شماره ۱- خواص فیزیکی رس، (Farraday, R. V. Charlton, F. G. 1983)

نسبت تخلخل	۲-۱/۲	۱/۲-۰/٦	۰/٦-۰/۳	۰/۳-۰/۲
وزن مخصوص خشک (Kg/m^3)	۱۲۰۰-۸۰۰	۱۲۰۰-۱٦٥۰	۱٦٥۰-۲۰۳۰	۲۲۱۰-۲۰۳۰
وزن مخصوص اشباع (Kg/m^3)	۱۷٤۰-۱٥٥۰	۱۷٤۰-۲۰۳۰	۲۰۳۰-۲۲۷۰	۲۲۷۰-۲۳۷۰
نوع خاک	تنش مالشی بحرانی (N/m^2)			
رس ماسه ای	۱/۹	۷/٥	۱٥/۷	۳۰/۲
رس سنگین	۱/٥	٦/۷	۱٤/٦	۲۷/۰
رس	۱/۲	٥/۹	۱۳/٥	۲٥/٤
رس سبک	۱/۰	٤/٦	۱۰/۲	۱٦/۸

- *حداکثر عمق آبراهه*

معادلات پیش گفته شده جهت تخمین عمق متوسط جریان،y، پذیرفته شده‌اند. حداکثر عمق آبراهه ممکن است با استفاده از ضرایب تجربی در عمق متوسط حاصل شوند. این ضرایب به Lacey (1958) نسبت داده می‌شوند و در جدول(۱-۲) آورده

شده‌اند، Neill (1973) پیشنهاد کرده است که ضریب ۱/۲۵ برای کانال‌های مستقیم در رودخانه‌های آبرفتی، جایی که ریگ روان روی بستر حرکت می‌کند، باید به ۱/۵ افزایش یابد.

جدول شماره ۲ - ضریب برای حداکثر عمق آبراهه، (Farraday, R. V. Charlton, F. G. 1983)

ضریب	موقعیت
۱/۲۵	آبراهه مستقیم
۱/۵	پیچ و خم متوسط
۱/۷۵	پیچ و خم جدی
۲/۰	برگشت ناگهانی راست گوشه

۱-۵- فرسایش

کلمه فرسایش که در انگلیسی و فرانسه به آن اروژن و اروزیون[1] می‌گویند از ریشه لاتین ارودری[2] به معنی ساییدگی است و عبارت است از ساییده شدن سطح زمین. به‌طور کلی فرسایش به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن ذرات از بستر اصلی خود جداشده و به‌کمک یک عامل انتقال دهنده به مکانی دیگر حمل می‌شود. در صورتی‌که عامل جداکننده ذرات از بستر و انتقال آن‌ها آب باشد به آن فرسایش آبی گفته می‌شود.

۱-۵-۱- عوامل موثر در فرسایش آبی

- *عوامل اقلیمی*

در بین عوامل اقلیمی باران، تگرگ، برف، یخبندان، دما و باد می‌توانند از عوامل موثر در ظهور فرسایش آبی باشند.

- *فرسایش‌پذیری خاک*

بنا بر تعریف فرسایش‌پذیری خاک مقاومت خاک در برابر جدا شدن و انتقال ذرات است. محققان متعددی سال‌های متمادی سعی کرده‌اند بین میزان فرسایش‌پذیری خاک و خصوصیات مختلف آن ارتباطی برقرار سازند. خصوصیاتی از خاک که در فرسایش‌پذیری آن موثرند عبارتند از: سرعت نفوذ، ظرفیت کل آب خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک، بافت خاک، ساختمان خاک و کلوئیدهای خاک.

- هر چه سرعت نفوذ در خاک بیشتر باشد میزان روان آب و در نتیجه فرسایش خاک کمتر خواهد بود. بنابراین یکی از روش‌های جلوگیری از فرسایش افزایش نفوذپذیری است.
- هر چه ظرفیت کل آب در خاک بیشتر باشد مقدار بیشتری آب باران جذب می‌کند و در نتیجه مقدار آبدوی و فرسایش کمتر خواهد بود. مقدار این ظرفیت بر حسب بافت خاک تغییر می‌کند. خاک‌هایی که در آن‌ها تخلخل بیشتر است ظرفیت ذخیره آن‌ها بیشتر می‌باشد.
- هر چه ظرفیت نگهداری آب در خاکی بیشتر باشد مقدار آبدوی و در نتیجه فرسایش کمتر خواهد بود. میزان این ظرفیت در خاک‌های شنی حدود ۹ درصد، در خاک‌های بافت متوسط حدود ۱۸ درصد و در خاک‌های رسی حدود ۳۶ درصد است.

---

[1]- Erosion
[2]- Eroderi

- هر چه مقدار سیلت خاک بیشتر باشد فرسایش‌پذیری آن افزایش می‌یابد. زیرا سیلت چسبندگی ندارد. باید در نظر داشت که خاک‌های سیلتی معمولاً خوب دانه‌بندی می‌شوند، ولی در اثر مرطوب شدن خاک‌دانه‌ها به‌سهولت شکسته و ذرات سیلت جدا و منتقل می‌شود.
- ساختمان خاک از نظر مقاومت در برابر عوامل فرساینده به دو نوع تقسیم می‌شود ساختمان پراکنده و ساختمان تجمعی. در ساختمان پراکنده پیوندی بین ذرات خاک وجود ندارد و ذرات از هم جدا هستند، ولی در ساختمان تجمعی ذرات خاک بهم پیوسته‌اند. عواملی که در اندازه و ثبات خاک‌دانه‌ها و در نتیجه در کاهش فرسایش موثرند عبارتند از: بافت خاک، نوع یون‌ها در کمپلکس، کاتیون‌های تبادلی، نوع کانی‌های رسی، مواد آلی و نوع مواد شیمیایی.
- عامل دیگر که در فرسایش‌پذیری خاک موثر است نوع کلوئیدهای خاک است، نوع کلوئیدهای خاک به دلیل تاثیرشان در نفوذپذیری، در فرسایش‌پذیری خاک موثرند. هر چه کلوئیدهای خاک در اثر جذب رطوبت بیشتر متورم شود از قطر خلل و فرج مابین آنها بیشتر کاسته می‌شود. به این دلیل است که آبدوی حاصل در خاک‌های کاملاً رسی مرکب از رس‌های آماس‌پذیر بیشتر خواهد بود. البته خاک‌های حاوی کلوئیدهای هیدروفیل (آبدوست) نیز با جذب آب میزان آبدوی را کاهش داده، فرسایش را محدود می‌سازند.

- *شیب زمین*

خصوصیاتی از شیب که در فرسایش خاک دخالت دارند عبارتند از: درجه، طول، شکل و جهت شیب.

- در صورت یکسان بودن سایر شرایط شیب‌های تند (البته تا حدی از درجه شیب) فرسایش بیشتری ایجاد می‌کنند.
- طول شیب عبارت است از فاصله نقطه شروع آبدوی تا نقطه‌ای که در آن آب به یک نهر طبیعی یا مصنوعی مانند نهر تراس یا آب برگردان و غیره وارد می‌شود. تاثیر طول شیب در مقدار آبدوی و فرسایش خاک بر حسب نفوذپذیری خاک تغییر می‌کند و تاثیر آن در خاک‌هایی که قابل نفوذ هستند کمتر است. در شیب‌های کوتاه آب تجمع پیدا نمی‌کند، و در شیب‌های طولانی آب متمرکز شده و می‌تواند عوارض خطی را به‌وجود آورد.
- شکل شیب در نوع فرسایش نیز تأثیر دارد. در شیب‌های محدب و مستقیم فقط فرسایش سطحی صورت می‌گیرد در حالی که شیب‌های مقعر معمولاً آب را در کف آبراهه متمرکز می‌سازند و در نتیجه فرسایش خطی به‌وجود خواهد آمد.
- جهت شیب اثر غیرمستقیمی در آبدوی و فرسایش دارد. شیب‌های هم درجه ولی با جهت‌های متفاوت یک منطقه معمولاً به‌طور یکسان با خطر فرسایش روبرو نیستند، شیب‌های آفتابگیر معمولاً نسبت به شیب‌های سایه‌گیر فرسایش بیشتری ایجاد می‌کنند.

- *پوشش گیاهی*

یک خاک پوشیده از گیاهان متراکم حداکثر مقاومت را در برابر جریان آب دارد، پوشش گیاهی به روش‌های مختلف فرسایش را کاهش می‌دهد.

- *مدیریت نحوه بهره‌برداری از اراضی*

مدیریت خوب، فرسایش را محدود می‌سازد، بهترین مدیریت استفاده حداکثر از زمین برای تولید محصول، بدون ایجاد فرسایش می‌باشد، در واقع فرسایش تحت تأثیر مدیریت خاک و مدیریت زراعی است.

۱-۵-۲- انواع فرسایش آبی

بنابر نظر زاخار[1] فرسایش ناشی از باران شامل فرسایش سطحی و فرسایش زیرزمینی است، رفاهی (۱۳۷۵). فرسایش سطحی شامل فرسایش بارانی، فرسایش صفحه‌ای یا ورقه‌ای، فرسایش بین شیاری، فرسایش شیاری، فرسایش خندقی و فرسایش بدلند است. فرسایش زیرزمینی فرسایشی است که در آن شکل‌های فرسایش دیده نمی‌شود مانند فرسایش درونی یا عمودی، فرسایش تونلی، فرسایش حاصل‌خیزی و فرسایش شبه کارستی. از آنجا که هر نوع فرسایش مرحله‌ای از نوع دیگر فرسایش است، به عبارت دیگر ظهور هر نوع فرسایش به ایجاد و ظهور نوع دیگر فرسایش کمک می‌کند، ممکن است در یک واحد اراضی اشکال مختلف فرسایش وجود داشته باشد.

- فرسایش بارانی

یا فرسایش پرتابی در اثر برخورد قطرات باران به سطح خاک به‌وجود می‌آید.

- *فرسایش ورقه‌ای یا صفحه‌ای*

ممکن است در اثر آبدوی حاصل از باران و یا ذوب برف به‌وجود آید. در به‌وجود آمدن این نوع فرسایش دو عامل بیشترین تأثیر را دارد: اول فقدان پوشش گیاهی کافی برای جلوگیری از انرژی جنبشی قطرات باران و دوم وقوع رگبارهای شدید در فصول خشک. علائم فرسایش ورقه‌ای عبارتند از:

- وجود لکه‌هایی به رنگ روشن که در اثر فرسایش لایه سطحی خاک ظاهر می‌شود.
- وجود سنگریزه و قلوه‌سنگ‌ها در روی سطح خاک.
- لخت شدن پای درختان و ظاهر شدن ریشه آنها در باغ‌ها و مناطق درختکاری شده و یکدست نبودن پوشش گیاهی و گیاهان کشت شده در مزرعه

- *فرسایش بین شیاری*

فرسایش سطح زمین بین شیارها را فرسایش بین شیاری نامند. این فرسایش در واقع نوعی از فرسایش ورقه‌ای است.

- *فرسایش شیاری*

هنگامی که آب در شیبی از قسمت بالا به سمت پایین حرکت می کند به‌تدریج در فرورفتگی‌های سطح زمین جمع می‌شود. پس از اینکه فرورفتگی‌های خاک از آب پر شد، آب از لبه پایین فرورفتگی با حجم زیادی جریان پیدا می‌کند و آبراهه‌هایی در زمین به‌وجود می‌آورد. این آبراهه‌های ایجاد شده را در صورتی فرسایش شیاری می‌گویند که با انجام عملیات کشت و زرع معمولی از بین بروند.

- *فرسایش خندقی*

این فرسایش را فرسایش گودالی یا آبکند نیز می‌گویند. خندق آبراهه‌ای است که جریان‌های موقت آب در هنگام بارندگی از آن می‌گذرد و مقدار بسیار زیادی از رسوب را در خود حمل می‌کند.

[1] - Zachar

- *فرسایش سیلابی*

در این نوع فرسایش، باران‌های معمولی، فرورفتگی‌ها، مخازن آب، دریاچه‌ها و برکه‌ها را پر کرده و خاک را اشباع می‌کند، اگر به دنبال آن باران شدیدی ریزش کند تقریباً تمامی آب جاری شده و سرانجام از دره کوه‌ها به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. در این نوع فرسایش آب قدرت فرسایندگی زیادی دارد و معمولاً مواد درشت‌دانه را در قسمت‌های فوقانی و مواد ریز را به ترتیب ابعادشان در قسمت‌های پایین قرار می‌دهد.

- *فرسایش بدلند*

این فرسایش را فرسایش هزار دره‌ای نیز گویند. این فرسایش معمولاً در زمین‌هایی رخ می دهد که حساسیت آن به فرسایش فوق‌العاده زیاد است. فرسایش بدلند در واقع مرحله گسترده فرسایش آبراهه ای است، بدین معنی که هرگاه تعداد آبراهه‌ها در هر کیلومترمربع از زمین بیش از ۷۰ عدد باشد یا طول آن‌ها در هر کیلومترمربع زمین بیش از ۱۰ کیلومتر باشد، فرسایش آبراهه‌ای به فرسایش بدلند تبدیل می‌شود، رفاهی (۱۳۷۵).

- *فرسایش کنار رودخانه‌ای*

این نوع فرسایش معمولاً در دیواره‌های نهرها و رودخانه‌ها انجام می‌گیرد. در این نوع فرسایش قسمت‌های خارجی خمیدگی‌ها به‌شدت فرسایش می‌یابند، زیرا نیروی برشی آب در آن‌جا زیاد است. عمل این فرسایش متفاوت با انواع دیگر فرسایش است. فرسایش در امتداد کناره‌ها و بستر نهرهای دائمی همواره فعال است، در حالی که انواع دیگر فرسایش فقط در حین بارندگی و یا کمی پس از شروع آن فعال هستند.

عواملی که به وقوع این فرسایش کمک می‌کنند عبارتند از:

– سرعت زیاد جریان آب

– تر و خشک شدن متناوب خاک دیواره‌ها که آن‌ها را مستعد فرسایش می‌نماید.

– یخ‌بستن و آب‌شدن متناوب که سبب خردشدن خاک دیواره‌ها شده آن‌ها را به فرسایش حساس می‌کند.

– وجود تنه درختان، ریشه‌ها و سایر اجسامی که آب حین طغیان با خود حمل کرده، پس از نشست طغیان در وسط رودخانه قرار می‌گیرد. به مرور زمان در پشت آن‌ها رسوباتی جمع شده، جزایری را به‌وجود می آورند. این جزایر جهت جریان آب را تغییر داده و ممکن است به سمت دیواره ها هدایت کنند که در این‌صورت دیواره‌ها فرسوده می‌شوند.

– در مناطق سردسیر تکه‌های یخ در زمستان به کناره دیواره‌ها برخورد کرده، آنها را فرسوده می‌سازد. به همین دلیل دوره شدید فرسایش در این مناطق معمولاً در فصل زمستان است.

– آبدوی حاصل در حواشی نهر به داخل نهر جریان یافته، به‌صورت آبشارهای کوچکی به داخل نهر می‌ریزد. وجود این آبشارها به تخریب دیواره‌ها منجر می‌شود.

این نوع فرسایش شدیداً تحت تأثیر میزان بار رسوب است. بدین معنی که اگر به وسیله روش‌های حفاظت خاک یا احداث سد مخزنی در بالادست، ورود مواد مخصوصاً مواد درشت‌دانه به رودخانه کم شود و یا اصلاً وارد نشود، ممکن است کناره‌ها و بستر نهر شدیداً فرسوده شود، به‌ویژه اگر خاک آن فرسایش‌پذیر باشد.

فرسایش کنار رودخانه‌ای به طرق زیر خسارت وارد می‌سازد:

– کناره‌ها را فرسوده و مواد را به پشت مخازن منتقل می‌کند و یا سبب انسداد نهرهای آبیاری می‌شود.

– زمین‌های اطراف رودخانه را از بین می‌برد.

برای کنترل فرسایش کنار رودخانه‌ای علاوه بر روش‌های مکانیکی که به آن‌ها اشاره خواهد شد، پوشش گیاهی طبیعی امتداد حواشی رودخانه را بصورت دست‌نخورده باقی می‌گذارند تا سرعت جریان آب از اطراف به داخل رودخانه کم شده و سبب تخریب کناره‌ها نشود.

- *فرسایش تونلی*

به این فرسایش آبراهه‌ای زیرزمینی نیز می‌گویند. فرسایشی است که در آن خاک تحت‌الارض فرسوده شده و از محیط خارج می‌شود در حالی که خاک سطح‌الارض در جای خود باقی می‌ماند. این نوع فرسایش هنگامی رخ می‌دهد که یک لایه خاک حساس نفوذ پذیر، زیر یک لایه غیرقابل نفوذ یا با قابلیت نفوذ کم واقع شده باشد.

- *فرسایش توده‌ای*

این فرسایش عبارت است از حرکت حجم عظیمی از توده‌های خاک یا سنگ یا مجموع آن‌ها به طرف پایین شیب، در اثر نیروی ثقل. این فرسایش در مواقعی رخ می‌دهد که نیروی حاصل از وزن مواد بیش از نیروی مقاومت ناشی از نیروی برشی خاک باشد. عوامل مختلفی مانند باران، برف و بهمن در ایجاد فرسایش توده‌ای موثرند.

- *فرسایش پاسنگی یا ستونی*

این فرسایش هنگامی رخ می‌دهد که سنگ‌های تخت موجود در محیط یا ریشه گیاهان، خاک فرسایش‌پذیر زیر خود را از برخورد ضربه قطرات باران محافظت نمایند. این نوع فرسایش از نظر تخریبی اهمیتی ندارد بلکه اهمیت آن بیشتر از این جهت است که پاسنگ‌ها می‌توانند به عنوان شاخص بکار رفته، ضخامت تقریبی خاک فرسایش یافته را نشان می‌دهند.

- *فرسایش درونی یا فرسایش عمودی*

این نوع فرسایش که بیشتر در زمین‌های مسطح اتفاق می‌افتد، عبارت است از شسته شدن تدریجی مواد کلوئیدی خاک از لایه نفوذپذیر سطحی به طرف پایین.

- *فرسایش شبه کارستی یا شیمیایی*

در نتیجه این فرسایش که در اثر عوامل شیمیایی به‌وجود می‌آید حفره‌هایی در زمین ایجاد می‌شود. این فرسایش در مواردی رخ می‌دهد که تشکیلات دارای حلالیت بالایی باشند، در این‌صورت توده خاک در آب حل شده، به‌صورت حفره در می‌آید.

- *فرسایش گل‌خرابی*

فرسایشی است که از برخورد قطرات باران با سطح خاک و تخریب خاک‌دانه‌ها و جدا ساختن آن‌ها به‌وجود می‌آید. این تخریب یک تخریب فیزیکی است و در آن شستشوی خاک و انتقال ذرات رخ نمی‌دهد. در هرحال در اثر این فرسایش حاصل‌خیزی خاک کم می‌شود.

- *فرسایش حاصل‌خیزی*

عبارت است از خارج شدن مواد غذایی خاک به‌وسیله عمل فرسایش و آبدوی. یعنی فرسایش و آبدوی با از بین بردن ذرات ریز خاک، مواد غذایی موجود در آن‌ها را نیز با خود می‌برد.

- *فرسایش ساحلی*

سواحل در اثر برخورد امواج فرسوده می‌شوند، نحوه عمل فرسایش در سواحل مختلف متفاوت است. در سواحل سنگی از سویی امواج مرتباً به پای ساحل برخورد کرده و به‌تدریج سبب شستشوی آن می‌گردد و از سوی دیگر عوامل جوی، به‌ویـژه یخبنـدان در سنگ‌ها شکاف‌هایی به‌وجود می‌آورند. این عمل فرسایش و برده‌شدن مواد به طرف دریا به این ترتیب ادامه می‌یابد و ساحل بتدریج به عقب می‌رود. در سواحل قلوه‌سنگی، شنی و ماسه‌ای فرسایش ساحلی خیلی سریع‌تر از سواحل سنگی رخ می‌دهد.

- *فرسایش ناشی از عملیات شخم و شیار*

این فرسایش در اثر شخم و شیار و برگرداندن خاک به طرف پایین‌دست شیب حاصل می‌شود. در واقع در زمین‌هایی که میزان شیب آنها بیشتر از ۲۵٪ است امکان برگرداندن خاک به طرف بالادست زمین وجود ندارد بنابراین خاک همواره به طرف پـایین دست شیب منتقل می‌گردد.

۱-۵-۳- عوامل مؤثر بر فرسایش در رودخانه

به نقل از تلوری (۱۳۷۴)، (Bramley and Hemphill 1989) عوامل موثر در فرسایش و تخریب دیواره‌های حفاظت نشـده از سـه دسته عوامل، فرایندهای ریخت‌شناسی[1]، دخالت بشر[2] و فرسایش موضعی[3] ناشی می‌شود.

منظور از فرایندهای ریخت شناسی، مجموعه عواملی است که در رسیدن رودخانه به یک تعادل پویا دخالـت دارنـد و عمـدتاً شـامل فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی است که در تقابل با ویژگی‌هـای زمـین شناسـی، ژئومرفولـوژی و پوشـش گیـاهی مـوثر می‌باشند. به‌طورکلی عوامل موثر بر فرسایش در رودخانه را می‌توان به سه گروه عمده زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف) **عوامل فیزیکی**: این عوامل عبارتند از شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر، ویژگی‌های هندسی و مصالح دیواره‌هـا و بسـتر و دخالت انسان با ایجاد سازه در کناره‌ها و بستر رودخانه نظیر احداث پل و آب‌شکن

ب) **عوامل شیمیایی**: ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌خصوص در مورد خاک‌های ریزدانه رسی و همچنین تأثیر کیفیت شـیمیایی آب از نظر قدرت اسیدیته آن در حل مواد چسبنده ذرات می‌باشند. به علت کندی سرعت زهکشی، اثر این عوامـل در مقایسـه بـا عوامـل دیگر به‌خصوص در مورد خاک‌هایی که قابلیت زهکشی مناسبی دارند ناچیز می‌باشد.

ج) **عوامل هیدرولیکی**: جریان آب در مقطع اصلی بستر رودخانه از عوامل اصلی فرسایش و تخریب دیواره‌ها به شمار مـی‌آیـد کـه شدت تأثیر این عوامل بستگی به دبی جریان، سرعت، عمق، شیب، غلظت بار رسـوبی کـف و بـار معلـق، دانسـیته و گرانـروی آب و ویژگی‌های مواد بستر دارد. در صورتی‌که تنش برشی مؤثر بر جداره و بستر از تنش برشی بحرانی آن بیشتر باشد، اولاً جریـان اقـدام به شستن و حمل مواد تشکیل‌دهنده جداره نموده و ثانیاً با شسته شدن بستر، ارتفاع و شـیب دیـواره افـزایش یافتـه و دیـواره در اثـر نیروهای ثقلی تخریب شده و ریزش می‌نماید.

[1] - Morphological Processes
[2] - Man Induced Erosion
[3] - Localized Erosion

۱-٦- روش‌های تثبیت و بسترسازی یکپارچه رودخانه

تثبیت رودخانه وحفاظت دیواره‌ها از مسائل پیچیده مهندسی رودخانه است که از جنبه‌های علمی، فنی، اقتصادی و زیباشناسی هنوز مورد بحث بوده و به‌علت تأثیر پارامترهای مختلف، تاکنون ضوابط ومعیارهای معین و مشخصی، به‌منظور انتخاب و طراحی بهترین روش وگزینه، به ثبت نرسیده است (Shen,1984).

در دهه اخیر روش‌های کنترل و مهار رودخانه وتثبیت حریم آن در بازه‌های بحرانی مورد ارزیابی فنی و اقتصادی قرار گرفته است. براین اساس و با توجه به دانش کنونی، کارهای رودخانه‌ای عموماً غیر اقتصادی برآورد شده، به‌طوری‌که هزینه روش‌های حفاظت رودخانه به‌طورکلی بیشتر از منافع حاصل از آن، برآورد شده است. به همین دلیل تلاش‌های حاضر جهت دست‌یابی به گزینه‌های حفاظتی کم هزینه، مورد بررسی و ارزیابی می‌باشد.

۱-٦-۱- اهداف حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه

اهداف اقدامات حفاظتی و تثبیت دیواره‌های رودخانه را می‌توان به‌شرح زیر خلاصه کرد:

الف- جلوگیری از فرسایش دیواره‌ها و تخریب اراضی حاشیه رودخانه و نقض مالکیت اراضی.

ب- جلوگیری از خسارات ناشی از پیشروی رودخانه به سمت راه‌ها، تخریب پل‌ها و خطوط انتقال نیرو.

ج- ممانعت از تخریب تأسیسات آبی و شبکه بهره‌برداری از رودخانه.

د- کنترل سیلاب و کاهش خطر سیل گرفتگی اراضی دشت آبرفتی رودخانه.

ه- حفاظت‌های موضعی وجلوگیری از تخریب متناوب دیواره رودخانه.

و- تأمین شرایط لازم برای سهولت کشتی‌رانی.

۱-٦-۲- عوامل مؤثر در طرح حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه

شواهد نشان می‌دهد روش‌ها و سازه‌هایی که به‌طور موضعی و بدون توجه به ضوابط و اصول راهنمای طرح اصلاح مسیر و تثبیت دیواره‌ها بکار رفته‌اند، عموماً آسیب‌پذیر بوده و خیلی سریع تأثیر خود را از دست می‌دهند. موفقیت این‌گونه طرح‌ها بستگی به رعایت دو اصل مهم دارد: ابتدا آنکه در انتخاب راستای رودخانه، سعی شود ازیک الگوی کلی در یک بازه طولانی تر تبعیت شود و دوم آنکه خصوصیات مارپیچی، شیب، ابعاد هندسی مقاطع و بیلان دبی و رسوب رودخانه در طول بازه اصلاح شده، تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد.

به منظور حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه عوامل موثر ذیل باید در طراحی مد نظر قرار گیرند:

- **راستای رودخانه**

تنظیم راستا و امتداد دیواره‌ها نسبت به یک محور مناسب ضروری می‌باشد. در این صورت رودخانه در مسیری متشکل از یک سری پیچ‌های ملایم و معکوس با انحناء زیاد و صاف شکل داده شود به‌طوری‌که خطوط جریان به سهولت و بدون توسعه جریان ثانویه و گردابی از یک پیچ به پیچ پایین‌دست هدایت گردد. (Klingeman and Bradley,1976), (Peterson,1986).

در انتخاب راستای رودخانه، گاهی شرایط محدودکننده‌ای نظیر راه، کانال و ... وجود دارد که به ناچار حریم راه و کانال، یک مرز کنترل در طراحی مسیر خواهد بود. موقعیت خاص روستا، اراضی کشاورزی، باغات و یا دیگر تأسیسات را نیز از دیگر عوامل کنترل باید دانست.

- **انحنای رودخانه**

به‌طورکلی شعاع انحناء باید در حد متوسط شعاع انحناء در پیچ‌های مختلف و پایدار رودخانه باشد. زیرا هرچه پیچ تندتر باشد، عمق دیواره خارجی افزایش یافته و امکان تخریب سازه‌های حفاظتی بیشتر می‌شود. از جنبه اقتصادی نیز رابطه میان شعاع انحنا با عمق ماکزیمم دیواره خارجی، براساس هزینه ساخت و نگهداری سازه‌های حفاظتی بررسی شده و شعاع انحنا بهینه محاسبه می‌شود. طرح پیچ‌های تند، تنها در شرایط خاص نظیر حضور جاده، کانال و یا شرایط پایدار دیواره و بستر مجاز بوده و در این صورت نیز اقدامات حفاظتی بیشتری مورد نیاز خواهد بود. از طرف دیگر شعاع انحناء خیلی زیاد نیز مطلوب نمی‌باشد. ماکزیمم شعاع انحنا برای رودخانه‌های نیمه کوهستانی و بالادست حوزه ۴۸۰۰ متر و برای رودخانه‌های سیلاب‌دشتی، ۷۲۰۰ متر پیشنهاد شده است. به‌منظورکشتی‌رانی نیز حداقل شعاع انحنا ۲۵۰۰ مترتوصیه شده است (Peterson,1986).

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شعاع انحنا پیچ (r)، ضریبی از عرض رودخانه (W) است.

Leopold and Wolman در ۱۹۵۷ گزارش کردندکه نسبت r/w رودخانه‌ها عموماً بین ۱/۵ تا ۴/۳ است وگرچه این نسبت از ۱/۵ تا ۱۰ نیز مشاهده می‌شود، ولی تمایل طبیعی اکثر رودخانه‌ها دست‌یابی به نسبت (r/w =۲-۳) است. و متوسط r/w برای شرایط تعادل رودخانه حدود ۳ توصیه شده است (Chang, 1985, 1986).

حدفاصل بین دو پیچ متوالی نباید به حدی باشد که یک بازه مستقیم و طولانی ایجاد گردد. طول مطلوب در این قسمت در حدود ۲ تا ۴ برابر عرض آن پیشنهاد شده است. بر این اساس طول موج مارپیچ رودخانه (λ) حدود ۷ تا ۱۱ برابر عرض مقطع پر رودخانه (w) مناسب تشخیص داده شده است (Henderson, 1966).

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهدکه برای حصول شرایط فوق حداقل زاویه پیچ (θ)، باید در حد ۵۰ درجه باشد.

در مورد رودخانه‌های شریانی و بستر شنی که راستای طبیعی نسبتاً مستقیمی دارند حفاظت کناره‌ها در دو سمت رودخانه همراه با بهسازی و پاکسازی بستر انجام می‌گیرد. در حالی‌که در رودخانه‌های مارپیچی سازه‌های اصلی حفاظتی عموماً تنها در محدوده دیواره خارجی پیچ به‌کار رفته و در دیواره داخلی و نیز مسیر مستقیم حدفاصل پیچ‌ها اقدامات ضعیف‌تری مورد نیاز است. (Shen 1984).

- **پاکسازی و بهسازی بستر**

تجمع مواد زائد، نخاله و آشغال و تنه درختانی که در جریان سیل به‌جای می‌مانند، باعث آشفتگی موضعی جریان به‌خصوص در کناره‌های رودخانه می‌شود. پاکسازی این مواد باعث بهبود شرایط جریان، کاهش مقاومت جریان و افزایش ظرفیت انتقال می‌گردد. لای‌روبی و حذف بارهای رسوبی و مواد زائد، سطح مقطع مؤثر را افزایش داده و سبب هموارشدن بستر می‌گردد، همبستگی میزان تخریب در دیواره‌های خارجی و رسوب‌گذاری در دیواره داخلی پیچ نشان می‌دهد که حذف و برداشت بارهای نقطه‌ای از محدوده دیواره داخلی پیچ‌ها و پاکسازی درختان در این بخش، راه حلی برای افزایش عرض و سطح مقطع مؤثر و کاهش سرعت و تنش برشی در محدوده دیواره خارجی خواهد بود.

انجام شرایط بهسازی بستر هر چند سال یک بار و به‌خصوص بعد از وقوع سیل‌های بزرگ لازم می‌باشد. در رودخانه‌های شریانی برداشت بارها و جزایر رسوبی و پاکسازی پوشش گیاهی و درختچه‌ای، سبب هموارسازی بستر و پایداری جریان خواهد شد (Simon,1971). این بهسازی در صورتی‌که از طریق آب‌شستگی بستر تأمین نشود، از طریق اجرای عملیات مکانیکی ضرورت خواهد داشت. در بازه‌هایی از رودخانه که پتانسیل زیاد بارکف سبب انباشتگی مواد شنی و ماسه‌ای می‌شود برداشت مصالح تحت شرایطی مجاز است، ولی قبلاً باید اثرات منفی آن بررسی و مطالعه شده و در صورت بروز مشکلات، اقدامات کنترل رودخانه‌ای انجام گیرد.

انتخاب نهایی روش‌ها و سازه‌های حفاظتی به عوامل زیر بستگی دارد.

۱- بررسی پایداری رودخانه در بازه مورد نظر و انتخاب راستا وهندسه هیدرولیکی مناسب.

۲- تشخیص نوع رودخانه وخصوصیات هیدرولیکی رژیم دبی و رسوب آن.
۳- بررسی عوامل و ساز وکار تخریب وگسیختگی دیواره‌ها.
۴- مصالح موجود در منطقه، امکانات فنی وتخصصی وکارگاهی.
۵- ارزیابی اقتصادی گزینه‌های مختلف انتخاب روش مناسب، تابعی از تجربه و قضاوت مهندسی خواهد بود. شرایط هیدرولیکی و روند فرسایشی از نقطه‌ای به نقطه دیگر متغیر است و این به‌دلیل اختلاف در مشخصات متفاوت رودخانه‌ها شامل شرایط جریان، مواد بستر، کرانه و هندسه آبراهه‌ها می‌باشد. حتی در شرایط یکسان هیدرولیکی و فرسایشی، نیز روش منفردی که به‌طور یکسان قابل کاربرد باشد وجود ندارد. به‌عنوان مثال، محدودیت‌های اقتصادی و حقوقی شامل وجود مواد ساختمانی و ماشین‌آلات می‌تواند در انتخاب تکنیک مناسب، تأثیر داشته باشد. پارامترهای مختلف درگیر این مسئله و پیچیدگی جریان، مهندسین را به استفاده از تکنیک‌های تجربی و تئوریکی در طراحی این‌گونه تأسیسات حفاظتی سوق داده است.

فصل دوم
معرفی روش‌های مهار فرسایش و تثبیت رودخانه‌ها

۲-۱- مقدمه

در طرح‌های کنترل فرسایش، تعیین دامنه، ترتیب و ترکیب مطالعات پایه و همچنین تبیین مبانی طراحی مستلزم توجه فراگیر به مجموعه عوامل رودخانه‌ای و ویژگی‌های رفتاری خاک و به‌خصوص ارتباط و اثرات متقابل آنها با یکدیگر بوده و پیش‌بینی عکس‌العمل رودخانه در قبال اقدامات کنترلی را طلب می‌کند. در این ارتباط نقش رفتار هیدرولیکی رودخانه از دیدگاه تبیین مبانی طراحی با توجه به تاثیر مستقیم آن در فعل و انفعالات مرفولوژیک و ساختاری سازه‌ای و بالاخص پیش‌بینی عملکرد طرح‌های کنترل فرسایش از اهمیت خاصی برخوردار است. مفاهیمی چون دبی غالب، سیل طراحی، عرض تعادلی، ظرفیت انتقال و غیره از جمله مبانی طراحی مهم و زیر بنایی در حیطه هیدرولیک جریان تلقی می‌شوند که عملکرد مطلوب، استحکام و پایداری سیستم‌های کنترل فرسایش عموماً در گرو بهره‌گیری منطقی و کارشناسانه از فرایندهای هیدرولیکی و چگونگی ترکیب و تلفیق آنها با عوامل زمین‌ساختی، ژئوتکنیکی، مرفولوژیکی و سایر پارامترهای تاثیر گذار در طرح سیستم‌های کنترل فرسایش است. (بهادری ۱۳۷۴).

۲-۲- روش‌های حفاظت سواحل رودخانه‌ها بر اساس عملکرد سازه‌ها

روش‌های حفاظت سواحل از دیدگاه عملکرد سازه‌ها به دو گروه کلی ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند.

الف- روش‌های حفاظت مستقیم[1] (جریان اصلی همواره با کناره‌های رودخانه در تماس می‌باشد)، استفاده از سازه‌های طولی نظیر دیواره‌های ساحلی، سنگ ریزی و غیره.

ب- روش‌های غیرمستقیم[2] (جریان اصلی از کناره‌ها دور نگهداشته می‌شود)، مانند استفاده از سازه‌های عرضی نظیر آب‌شکن و غیره.

- ***روش‌های حفاظت مستقیم***

در این روش‌ها با احداث سازه‌هایی که مستقیماً روی ساحل یا بستر رودخانه اجرا می‌شوند از فرسایش و آبشستگی دیواره‌ها و بستر جلوگیری به‌عمل می‌آید. استفاده از روکش‌ها عمومی‌ترین شکل این‌گونه روش‌ها است و کارایی آنها بستگی مستقیم به مقاومت مصالح آن روی شیب دیواره دارد. روکش‌های نفوذپذیر به منظور سهولت بخشیدن به تراوش آب از دیواره و جلوگیری از شسته‌شدن ذرات‌ریز مصالح تشکیل‌دهندهٔ آن توصیه می شوند، استفاده از یک لایه فیلتر مناسب در بین دیوارهٔ طبیعی و لایهٔ روکش لازم به‌نظر می‌رسد.

نفوذپذیری سازه‌های روکش سبب می‌شود تا در زمان سیلاب و افزایش سطح آب، به تدریج با جذب رسوبات در دیواره تزریق شده و پایداری آن را افزایش دهد (Peterson ،1986) به‌طور کلی روکش‌های ساختمانی انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر مناسب‌تر بوده زیرا به تدریج با جذب رسوبات قابلیت تثبیت طبیعی و گیاهی را پیدا می‌کنند. برخی از این روکش‌ها عبارتند از:

الف) روکش سنگریزه‌ای:

با استفاده از سنگ‌های دانه‌بندی شده و پخش آن‌ها بر روی دیواره از اثر مستقیم جریان بر دیواره طبیعی جلوگیری به عمل می‌آید.

---

[1] - Direct Methods
[2]- Indirect Methods

ب) روکش توری‌سنگی[1] :

در صورتی‌که سنگ با دانه‌بندی مطلوب در دسترس نباشد می‌توان از سنگ‌های کوچک نیز استفاده کرد که در این صورت جهت افزایش پایداری سنگ‌ها از سبدهای تورسیمی استفاده می‌گردد. توری‌سنگ‌ها در روکش با ضخامت کم به کار برده می‌شوند و ضخامت آنها معمولاً کمتر از ۳۰ سانتی‌متر است. این روش برای جریان با سرعت‌های ۲/۴ تا ۴/۵ متر بر ثانیه مناسب بوده و برای پیچ‌هایی با شعاع انحنای بیش از ۲۵۰ متر مؤثر هستند.

ج) روکش بتنی مفصل‌دار:

روکش بتنی صلب علاوه بر هزینه زیاد و پیچیدگی فنی، تخریب‌پذیر است. در این روش روکش بتنی بصورت بالشتک‌های بتنی مفصل‌دار بوده که علاوه بر تأمین پایداری دیواره، قابلیت انعطاف و نفوذپذیری دارد. این روش برای رودخانه‌های بزرگ و سرعت‌های زیاد مناسب است.

د) روکش کیسه‌ای:

در این روش معمولاً کیسه‌هایی از جنس کنف یا کرباس را با مخلوطی از خاک و سیمان، ماسه و سیمان و یا فقط با خاک پر کرده و به شکل مناسبی روی شیب دیواره می‌چینند.

ه) روکش آسفالتی:

وقتی مصالح مناسب از قبیل شن و ماسه و همچنین مواد نفتی (قیر) در دسترس باشد، از روکش آسفالتی برای حفاظت سطح دیواره در بالاتر از سطح متوسط کم آبی استفاده می‌شود. این نوع روکش نفوذناپذیر بوده و انعطاف‌پذیری کمی دارد که از معایب این روش می‌باشند.

و) پوشش گیاهی

پوشش‌های گیاهی به دو گروه گیاه علفی و بوته‌ای، و درختچه‌ها و درختان تقسیم می‌شوند پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های حفاظت سواحل شناخته شده است و تنها روشی است که قابلیت ترمیم طبیعی و بازسازی خود را دارد. نقش این پوشش گیاهی به گونه‌ای است که گروهی عدم وجود آن‌را بر روی یک دیواره، نشانه فرسایش‌پذیری آن می‌دانند.

پوشش گیاهی با بالا بردن ویژگی های مناسب خاک دیواره باعث تقلیل فرسایش آنها شده و از طرفی با افزایش زبری کانال سبب کاهش سرعت و در نتیجه کاهش تنش برشی جریان می‌شود و همچنین درختچه‌هایی که عمق ریشه آنها زیاد است از لغزش دیواره‌ها جلوگیری می‌کنند.

- ***روش‌های حفاظت غیرمستقیم***

در این روش با ساخت سازه‌هایی باعث انحراف خطوط جریان از دیواره‌های فرسایش‌پذیر شده و قابلیت رسوب‌گذاری جریان افزایش می‌یابد. برخی از این روش‌ها عبارتند از:

الف) روش شبکه‌ای[2] :

این سازه‌ها معمولاً از یک یا دو ردیف شمع کوبیده شده تشکیل شده‌اند که بوسیله شبکه‌ای از جنس توری بهم متصل می‌گردند.

---

[1]- Gabion Mattress
[2]- Fence

ب) آب‌شکن‌های پره‌ای[1] :

این آبشکن‌ها سازه‌های کوتاهی هستند که با زاویه کمی نسبت به امتداد جریان، در رودخانه و در چند ردیف قرار می‌گیرند. ارتفاع آنها بالاتر از سطح متوسط آب ولی کمتر از آب‌شکن‌های معمولی است.

ج) دیواره‌های خاکریز طولی[2] :

این سازه‌ها از سرریز شدن سیلاب در داخل دشت سیلابی جلوگیری می‌کنند و باعث می‌شوند جریان در کانال‌های اصلی حرکت کند. ولی این دیواره‌ها در مقابل جریان‌های سیلابی قابلیت فرسایش دارند و ممکن است بخش وسیعی از زمین‌های مجاور را اشغال کنند.

د) آب‌شکن‌ها:

این سازه‌ها دیواره‌های عرضی هستند که در کناره ساحل رودخانه ساخته شده و با دور کردن جریان از ساحل و متمرکز کردن آن در وسط به حفاظت دیواره‌ها کمک می‌کنند. آب‌شکن ها به دو صورت نفوذپذیر و نفوذناپذیر ساخته می‌شوند. نفوذپذیری آب‌شکن موجب میرا شدن سرعت جریان گردیده و ته‌نشینی رسوبات را تسهیل می‌نماید. ولی آب‌شکن‌های نفوذناپذیر باعث دفع جریان یا تغییر جهت جریان می‌شوند.

آب‌شکن‌های نفوذپذیر به علت نداشتن بدنه صلب، آسیب‌پذیری کمتری نسبت به تغییر شکل محدود دارند. هم‌چنین به علت عدم تغییر شکل ناگهانی خطوط جریان؛ جریان‌های گردابی[3] با شدت کمتری از آب‌شکن‌های نفوذناپذیر به‌وجود می‌آید ودر نتیجه آب‌شستگی موضعی محدودتر خواهد بود ولی آب‌شکن‌های نفوذناپذیر مقاومت کافی در مقابل نیروهای ناگهانی اعمالی از سوی اجسام خارجی مانند یخ‌های شناور، کنده‌های چوب و ... ندارند.

۲-۳- روش‌های حفاظت رودخانه بر اساس نوع مصالح پوششی

تقسیم‌بندی زیر بر اساس نوع مصالح پوششی صورت پذیرفته است.

الف) روش ساختمانی:

در این روش با استفاده از مصالح ساختمانی و بنایی، انواع سازه‌های مقاوم نظیر روکش‌ها، سازه‌های هدایت (نظیر آبشکن‌ها) و یا سازه‌های تثبیت بستر، ساخته و اجرا می‌گردد. این سازه‌ها عمدتاً نیاز به مصالح و امکانات فنی نسبتاً زیادی دارند و بجز در شرایطی که عوامل فرسایش‌دهنده دیواره‌ها و بستر شدید باشند پیشنهاد نمی‌شوند.

ب) روش طبیعی:

در این روش با استفاده از امکانات طبیعی نظیر پوشش گیاهی مناسب اقدام به حفاظت سطح دیواره‌ها و تثبیت طبیعی مسیر جریان می‌شود. این روش اگرچه از نظر اقتصادی برتری ویژه‌ای نسبت به روش‌های ساختمانی دارد ولی معمولاً عمر مفید کوتاه آنها مستلزم حفاظت و نگهداری پیوسته است.

ج) روش طبیعی- ساختمانی[4]:

این روش تلفیقی از دو روش بالا است که به‌علت قابلیت تطبیق آن با شرایط مختلف، امروزه اقتصادی‌تر و در عین‌حال مؤثرتر از روش‌های دیگر است. به طور مثال در سازه‌های روکش دیواره رودخانه تا سطح جریان کم آبی با روش ساختمانی و در حد بالاتر از آن توسط پوشش گیاهی محافظت می‌شود.

---

[1]- Vane Dike
[2] - Longitudinal Dikes Levees
[3]- Vortex
[4] - Bio Technical Method

۲-٤- ویژگی های سازه‌های تثبیت رودخانه

سازه‌های تثبیت رودخانه بر حسب نوع مصالح دارای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی زیر هستند:

- انعطاف‌پذیر یا صلب[1]
- آبگذر یا غیرقابل نفوذ[2]
- موقت یا دائمی

به‌طور کلی سازه‌های انعطاف‌پذیر عملکرد مناسب‌تری نسبت به سازه‌های صلب دارند. این سازه‌ها به‌علت ویژگی شکل‌پذیرشان قدرت تحمل تغییر شکل‌های بیشتری را نسبت به سازه‌های صلب دارند. این تغییر شکل‌ها می‌توانند ناشی از نشست ناهمگون پی سازه در اثر پدیدهٔ زیرشویی[3] و یا آب‌شستگی موضعی[4] باشند. همچنین سازه‌های انعطاف‌پذیر در صورت تخریب جزئی قابلیت ترمیم و بازسازی مجدد دارند.

نفوذپذیری سازه‌های آبگذر به آنها در مقایسه با سازه‌های غیر قابل نفوذ برتری ویژه‌ای از نظر هیدرولیکی می‌دهد چرا که این سازه با عبور آب از داخل خود سبب کاهش فشار جریان در وجه بالادست خود شده و همچنین با کاهش سرعت جریان موجب افزایش ته‌نشینی رسوبات شده و عملاً سبب تثبیت بیولوژیکی بستر و دیواره‌ها می‌شود.

۲-۵- آب‌شستگی

در این مبحث سعی بر آنست تا علاوه بر شناخت اجمالی پدیدهٔ آبشستگی و بررسی عوامل مؤثر بر آن، نسبت به انتخاب پارامترهای مهم‌تر جهت انجام مطالعات در زمینهٔ آبشستگی موضعی اقدام شود. تغییر ویژگی‌های جریان در یک رودخانه در حال تعادل سبب تغییر ویژگی‌های بستر جهت نیل به حالت تعادل جدید شده، به‌طوری‌که عموماً تراز بستر چه به‌صورت رسوبگذاری و چه به‌صورت آب‌شستگی سعی در رسیدن به این حالت تعادل دارد. پدیده آب‌شستگی در هر کجا افزایش سرعت روی دهد به‌وقوع می‌پیوندد. این افزایش سرعت می‌تواند ناشی از کاهش سطح مقطع جریان (چه در صورت تنگ‌شدگی مقطع و چه در حالت بالا آمدن کف در جریان‌های زیر بحرانی)، افزایش دبی عبوری از مقطع و کاهش زبری بستر یا افزایش شیب بستر باشد.

- ***آبشستگی عمومی***

ایجاد تنگ‌شدگی و کاهش عرض جریان یکی از دلایل مهم بروز آب‌شستگی در مقطع متعادل می‌باشد. اکثر سازه‌هایی که در مسیر رودخانه ساخته می‌شوند موجب تنگ‌شدگی مقطع و در نتیجه آب‌شستگی در بستر رودخانه می‌شوند. مثلاً می‌توان به ساخت پایه پل‌ها و آب‌شکن‌ها اشاره کرد که مستقیماً سبب تنگ‌شدگی جریان شده و آب‌شستگی را نتیجه می‌دهد. برخی از سازه‌ها به طور غیر مستقیم سبب بروز آب‌شستگی می‌شوند. به‌عنوان مثال می‌توان از پوشش هایی نام برد که برای جلوگیری از فرسایش سواحل رودخانه بر روی آنها ساخته شده و با افزایش مقاومت کناره‌ها سبب می‌شوند که در حالت پرآبی رودخانه جهت رسیدن به تعادل بیشتر به کندن بستر خود پرداخته و در نتیجه آب‌شستگی بیشتری روی دهد.

اعمال تنگ‌شدگی در مقطع عملاً با کاهش سطح جریان موجب افزایش سرعت و در نتیجه افزایش تنش‌برشی اعمالی به کف بستر می‌شود. این انرژی صرف کندن و حمل رسوبات بستر بصورت بار کف شده و پدیدهٔ آب‌شستگی عمومی رخ می‌دهد. این آب‌شستگی تا هنگامی ادامه می‌یابد که میزان تنش برشی اعمالی به کف کمتر از میزان تنش برشی بحرانی بستر شود. در این صورت روند افزایش عمق ناشی از آب‌شستگی متوقف شده و مقطع به حالت تعادل جدید می‌رسد.

---

[1] - Flexible or Rigid
[2] - Permeable or Impermeable
[3] - Piping
[4] - Local Scouring

- **آب‌شستگی موضعی**

به علت برخورد جریان با موانعی نظیر آب‌شکن یا پایه‌های پل جهت جریان تغییر یافته و به علت اختلاف فشار هیدرواستاتیکی در بالادست و پایین‌دست مانع، یک سری جریان‌های گردابی پیرامون آن به‌وجود می‌آیند که عامل اصلی ایجاد آب‌شستگی موضعی در اطراف مانع مزبور هستند. آب‌شستگی که در پای آب‌شکن‌ها به‌وجود می‌آید اغلب شبیه آب‌شستگی موضعی ایجاد شده در پایه‌های پل است. و تنها تفاوت این دو آب‌شستگی ناشی از تفاوت شکل آب‌شکن‌ها با پایه پل‌ها است.

در مطالعات مربوط به آب‌شستگی عمومی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع معمولاً از جریان غیر یکنواختی که در ناحیهٔ تبدیل مقطع معمولی به مقطع تنگ‌شده به‌وجود می‌آید چشم‌پوشی شده و فقط جریان یکنواختی را در مقاطع بالادست و پایین‌دست ناحیهٔ تبدیل در نظر می‌گیرند. اما در تنگ‌شدگی موضعی، تنها جریانی که بر میزان آب‌شستگی موضعی مؤثر است، همان جریان غیریکنواختی است که در اطراف عامل تنگ‌کننده ایجاد می‌شود، و معمولاً یک جریان سه‌بعدی بسیار پیچیده است که با جریان دو بعدی موجود در اطراف بدنهٔ آب‌شکن و مقطع تنگ‌شده متفاوت است. جریانی که به عامل تنگ‌کننده نزدیک می‌شود؛ به داخل چالهٔ ناشی از آب‌شستگی شیرجه رفته و موجب تشکیل گرداب های نعل اسبی و جریان های مارپیچ در داخل چالهٔ آب‌شستگی شده و سپس از انتهای چاله خارج و با بخشی از جریان که تحت اثر تنگ‌شدگی قرار نگرفته است مخلوط شده و به پایین‌دست هدایت می‌شود. سرعت‌ها و تنش های برشی موضعی ناشی از جریان‌های گردابی مهم‌ترین عواملی هستند که موجب گسترش آب‌شستگی موضعی در پای مقطع تنگ‌شده می‌شوند.

- **آب‌شستگی موضعی در دماغه آب‌شکن‌ها**

به‌علت تمرکز جریان در مقطع تنگ‌شده و تلاطم و آشفتگی جریان در اطراف سازهٔ آب‌شکن معمولاً در اطراف مقطع تنگ‌شده، آب‌شستگی به‌وجود می‌آید. در مورد یک آب‌شکن منفرد که به صورت عمود بر امتداد جریان ساخته شده است می‌توان دریافت که بیشترین آبشستگی در دماغهٔ آن به‌وجود می‌آید. این آب‌شستگی بیشینه اساساً از تراکم جریان در مقطع تنگ شده و ایجاد جریان‌های گردابی در آب‌شکن رخ می‌دهد.

در اثر برخورد جریان با آب‌شکن که به عنوان مانعی در مقابل آن عمل می‌کند. خطوط جریان در نزدیکی آن تغییر جهت داده و موجب ایجاد جریان‌های گردابی در وجه بالای سازه می‌گردد. این جریان های گردابی در امتدادی که تقریباً عمود بر امتداد سازه آب‌شکن می‌باشد به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند. آشفتگی جریان و همچنین ایجاد سرعت‌های موضعی ناشی از این جریان‌های گردابی عامل اصلی ایجاد آب‌شستگی در پای آب‌شکن‌ها است.

معمولاً مقدار آب‌شستگی موضعی به‌خصوص در مواقع سیلابی، بسیار بیشتر از میزان آب‌شستگی عمومی بستر است و این آبشستگی عامل اصلی تخریب بسیاری از آب‌شکن‌ها در مقابل اثر جریان است. به همین دلیل تخمین میزان این آب‌شستگی بیشینه در طراحی سازه آب‌شکن‌ها حائز اهمیت فراوان بوده و مهندس طراح به منظور تأمین محافظت کافی از سازه در مقابل اثر فرسایشی جریان و هم‌چنین تخمین عمقی که شالوده سازه باید در آن عمق ساخته شود تا از اثرات ناشی از فرسایش بستر در امان بماند احتیاج به تخمین معقولی از میزان عمق آب‌شستگی بیشینه در اطراف آب‌شکن دارد.

- **پارامترهای موثر بر پدیدهٔ آب شستگی موضعی**

از نقطه‌نظر تئوری، مسئله آب‌شستگی موضعی در دماغه آب‌شکن‌ها، مشابه حالت آب‌شستگی در پایهٔ پل‌ها است. در واقع تأثیر سه‌بعدی الگوی جریان بر آب‌شستگی در دهانهٔ آب‌شکن‌ها از پیچیدگی خاص برخوردار است؛ که لازم است با یک سری فرضیات ساده کننده روابطی منطقی جهت تخمین مقدار فرسایش و آب‌شستگی موضعی ارائه نمود.

برای دستیابی به این مهم ابتدا پارامترهایی که بر پدیدهٔ آب‌شستگی مؤثر هستند را شناسایی و سپس با انتخاب مهم‌ترین آن‌ها و چشم‌پوشی از سایر پارامترهایی که معمولاً اثر چندانی بر پدیدهٔ مزبور ندارند، به برقراری رابطه‌ای بین میزان آب‌شستگی و پارامترهای مزبور اقدام نمود.

Garde در سال ۱۹۶۱ این پارامترها را به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

۱- پارامترهایی که وضعیت کانال و سازه آب‌شکن را نشان می‌دهد:
B: عرض کانال (با فرض کانال مستطیلی)
L: طول آب‌شکن
θ: زاویه تمایل آب‌شکن
S: شیب کانال

۲- پارامترهایی که ویژگی‌های جریان را توصیف می‌کنند:
V: سرعت متوسط
ds: عمق آب‌شستگی بیشینه

۳- پارامترهایی که ویژگی‌های سیال را توصیف می‌کند:
ρ: جرم ویژه آب
$\Delta\gamma$: اختلاف وزن ویژه آب و هوا
μ: ویسکوزیته دینامیکی

٤- پارامترهایی که ویژگی‌های رسوب را توصیف می‌کنند:
d_{50}: قطر متوسط ذرات رسوب
$\Delta\gamma s$: اختلاف وزن ویژه رسوب با آب (با فرض رسوب کروی)

سرعت سقوط ذره ω، و تنش برشی بحرانی τ_c را نیز می‌توان در این گروه‌ها جای داد.
محققین مختلف بسته به دیدگاه خود از مسئله آب‌شستگی، معمولاً برخی از پارامترهای پیش گفته را مؤثر دانسته و نسبت به تعیین ارتباطی بین پدیدهٔ آب‌شستگی با پارامتر انتخابی خویش اقدام نموده‌اند. روابط ارائه شده برای تخمین عمق آب‌شستگی دماغه آبشکن در بخش طراحی ارائه خواهد شد.

فصل سوم
اصول طراحی سازه‌های مهار فرسایش در رودخانه

۳-۱- سازه‌های مهار فرسایش کناری

۳-۱-۱- مقدمه

دراین فصل درخصوص مباحث مربوط به کاربرد سازه‌های کنترل‌کننده فرسایش درکناره‌های رودخانه صحبت خواهدشد. یکی از روش‌های غیرمستقیم و معمول درکنترل فرسایش کناری و حفاظت کناره‌های رودخانه‌ها استفاده از اپی یا آبشکن می‌باشد. در این روش یک سری آبشکن به‌طور متوالی و زاویه‌دار با مسیر جریان رودخانه ساخته می‌شوند. این آب‌شکن‌ها از یک سمت به ساحل رودخانه متصل شده و تا مسافتی در داخل بستر رودخانه به جلو می‌آیند. این سازه‌ها برخطوط جریان تاثیر گذاشته و باعث تغییر در الگوی جریان رودخانه و انحراف جریان از دیواره‌های فرسایش‌پذیر به وسط رودخانه شده و کناره‌ها را از خطر فرسایش محافظت می‌نمایند. باایجاد ناحیه سکون در بین دو آبشکن وکاهش سرعت جریان از شدت برخورد آن با دیواره‌ها کاسته و درحقیقت قابلیت رسوب‌گذاری جریان را در ساحل رودخانه افزایش می‌دهند.

آبشکن‌ها سازه‌های عرضی یا در واقع دیواره‌های متقاطعی هستندکه به کناره رودخانه متصل شده وگاهی به‌صورت یک سری متوالی و گاهی به‌صورت منفرد باعث انحراف آب از محل کناره‌ها می‌شوند. وعمدتاً درحفاظت دیواره‌های خارجی پیچ‌ها، طرح‌های اصلاح مسیر وکاهش عرض رودخانه بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

آبشکن‌ها معمولاً از جنس سنگ، پاره‌سنگ، شن، خاک، مصالح سنگریزه‌ای، توری‌سنگ و الوار (چوبی یا فلزی) با زاویه مشخص نسبت به کناره رودخانه از طرف ساحل به سمت مرکز جریان، ساخته می‌شوند و باعث دور شدن جریان از بازه بحرانی و نیز موجب تنگ شدگی موضعی در داخل جریان می‌شوند. عملکرد مثبت این سازه‌ها از یک سو به ویژگی‌های طبیعی رودخانه و از سوی دیگر به رعایت نکات فنی در حین طراحی و احداث سازه بستگی دارد.

۳-۱-۲- آبشکن

آبشکن‌ها از لحاظ ساختار، شکل ظاهر، و نحوه تأثیرگذاری برجریان رودخانه دارای انواع متعددی هستند. معمولاً آبشکن‌ها را بر مبنای چهار ویژگی زیر طبقه‌بندی می‌کنند:

۱- از نظر مصالح ساختمانی
۲- موقعیت تاج آبشکن
۳- زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به جریان
٤- شکل دماغه آبشکن

الف- انواع آبشکن از نظر مصالح ساختمانی

آبشکن‌ها براساس مصالح ساخت به انواع نفوذپذیر و غیر قابل‌نفوذ، طبقه‌بندی می‌شوند،که هر دونوع جزء سازه‌های حفاظتی قرارمی‌گیرند. ویژگی‌های هر یک از این نوع آب‌شکن‌ها عبارت است از:

آبشکن‌های نفوذپذیر عمدتا جریان را کند می‌سازند در صورتی‌که آبشکن‌های غیر قابل نفوذ غالباً جریان را از ساحل آسیب پذیر رودخانه منحرف می‌کنند. آبشکن‌های نفوذ ناپذیر شرایط مساعد برای پاک‌سازی مسیر از انباشته‌های رسوبی در رودخانه‌های با بار بستر زیاد (نظیر رودخانه‌های شریانی) را ایجاد می‌نمایند. آبشکن‌های نفوذ پذیر بیشتر در رودخانه‌های آبرفتی با رسوبات معلق بالا کاربرد دارند، و عبور آب از خلل و فرج بدنه آبشکن، باعث کاهش فشار آب در سمت بالادست آبشکن می‌شود.

آب‌شکن‌های نفوذپذیر سازگاری خوبی با شرایط استغراق دارند و برخلاف آب‌شکن‌های نفوذ ناپذیر، اختلال شدیدی درالگوی جریان ایجاد نمی‌کنند. درآب‌شکن‌های نفوذپذیر جریان‌های گردابی به‌گونه‌ای که درآب‌شکن‌های صلب متداول است، مشاهده نمی‌گردند. آب‌شکن‌های نفوذپذیر به‌دلیل نداشتن بدنه صلب در مقابل تغییر شکل‌های محدود به صورت انعطاف پذیر عمل می‌کنند، اما در برابر نیروهای بزرگ مقاوم نیستند و در مواردی در مقابل فشارهای ناشی از تجمع شاخ و برگ و سایر اشیا شناور که بالاخص در مواقع سیلابی توسط جریان آب به دیواره آب‌شکن‌ها هجوم می‌آورد، آسیب‌پذیر می‌شوند. زیرا با مسدود شدن فضای بین شمع‌ها، فشار وارده برسازه آب‌شکن افزایش یافته و موجبات تخریب آن را فراهم می‌آورد. آب‌شکن‌های نفوذ پذیر اغلب ازجنس نی، الوارچوبی و یا شمع‌های ساخته شده از بتن مسلح بوده و در مواردی از لوله‌های فولادی ساخته می‌شوند، در حالی که آب‌شکن‌های غیر قابل نفوذ ازمصالح سنگی نظیر لاشه‌سنگ، قلوه سنگ و یا قطعات توری سنگ(گابیون) ساخته می‌شوند.

آب‌شکن‌های غیرقابل نفوذ یا صلب عمدتاً برای محافظت مقاطعی از دیواره‌های فرسایش پذیر و هدایت رودخانه در یک مسیرمناسب بکار گرفته می‌شوند بطوریکه در این حالت رسوبات بین آبشکن‌ها انباشته می‌شود. لذا به‌دلیل تغییرات سریع الگوی جریان، در دماغه این نوع از آبشکن‌ها فرسایش به وقوع می‌پیوندد، بطوری‌که تنش‌های حاصل از افزایش سرعت و وقوع جریانهای چرخشی منجر به تشکیل گودال آبشستگی در دماغه آبشکن می‌شودد و استحکام سازه را به مخاطره می‌اندازد. در جهت تثبیت سواحل این نوع آبشکن‌ها سریع تر عمل می‌کنند. درردخانه‌های با بستر سخت و یا سنگی، آبشکن‌های غیرقابل نفوذ، دارای مقاومت بیشتری بوده و به همین نسبت میزان عمق آبشستگی دردماغه آبشکن کاهش می یابد.

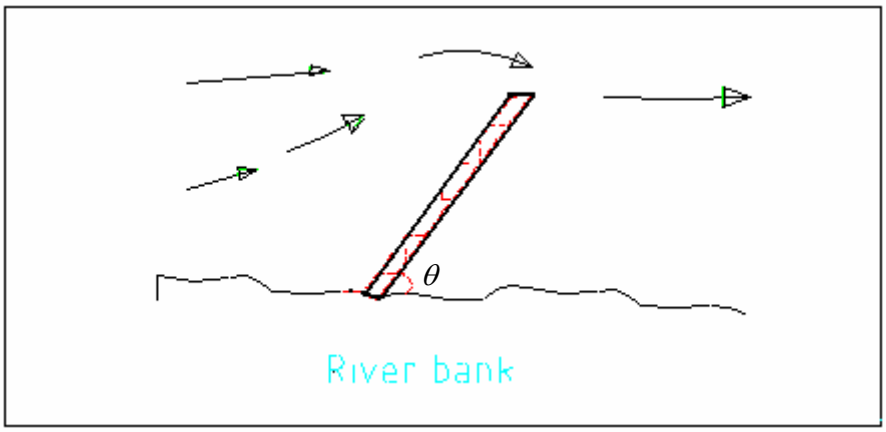
ب- انواع آبشکن از نظر موقعیت تاج

آبشکن‌ها بر اساس موقعیت تاج به دو نوع مستغرق و غیر مستغرق تقسیم می‌شوند. چنین تقسیم‌بندی عموما به شرایط طراحی مربوط می‌شود. دراغلب موارد، آبشکن‌های صلب (غیر قابل نفوذ) برای شرایط غیرمستغرق طراحی و ساخته می‌شوند، زیرا در شرایط مستغرق این آبشکن‌ها مستعد فرسایش شدید در طول بدنه هستند.

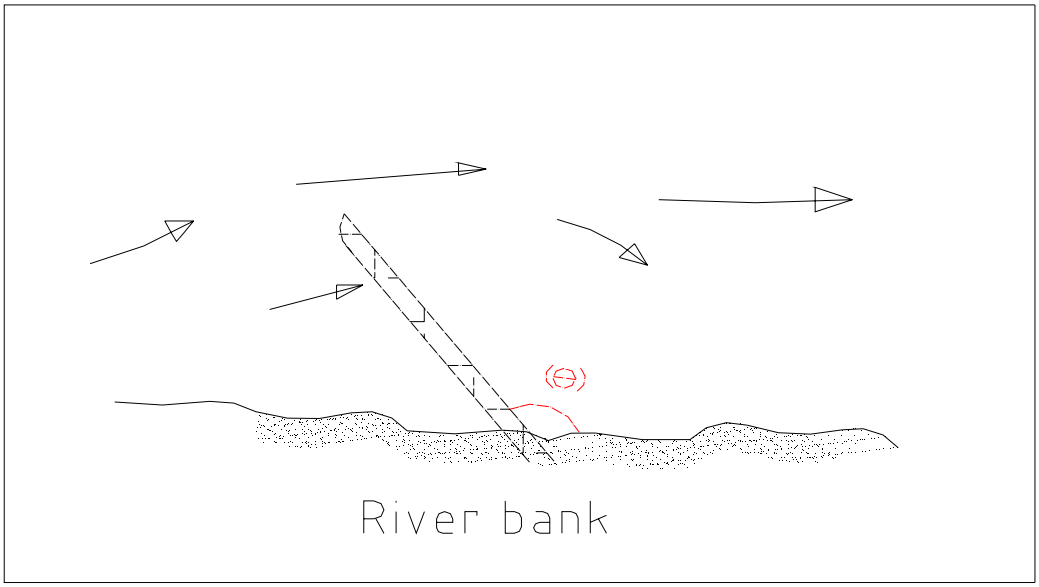
ج- انواع آبشکن از نظر زاویه قرارگیری نسبت به جریان

آبشکن‌ها براساس تاثیرشان بر روی جریان رودخانه ممکن است به آبشکن‌های جاذب یا دافع تقسیم بندی شوند. آبشکن‌های رو به پایین‌دست (جاذب)، جریان را به‌سمت خود جذب می‌کند و به‌منظور تأمین جریان آب عمیق و آبگیری از نزدیکی ساحل رودخانه ساخته می‌شوند. همچنین این آبشکن‌ها باعث انقباض کمتری در جریان شده و در نتیجه فرسایش کمتری نیز در دماغه خود ایجاد می‌کنند. به‌علاوه دراین نوع آبشکن، ساحل مقابل از انحراف جریان حاصل از سازه، متاثر نمی‌شود. در صورتی که آبشکن‌های رو به بالادست (دافع) برای حفاظت از دیواره ساحلی تحت اثر جریان‌های آب با ارتفاع بیشتر مؤثر هستند.

هم‌چنین درآبشکن‌های دافع عمل به تله انداختن بار بستر درحدفاصل بین آبشکن‌ها و هدایت جریان به سمت مرکز آبراهه، بهتر صورت گرفته و در نتیجه از فرسایش دیواره نیز جلوگیری می‌شود. شکل (۱) طرح شماتیک از یک آبشکن جاذب یا آبشکنی که به سمت پایین دست جریان رودخانه تمایل دارد را نمایش می دهد. شکل (۲) طرح شماتیک از یک آبشکن‌دافع یا آبشکنی که به سمت بالادست جریان رودخانه تمایل دارد را نمایش می‌دهد.



شکل(۱)- طرح شماتیک از یک آبشکن جاذب



شکل(۲)- طرح شماتیک از یک آبشکن دافع

د- انواع آبشکن از نظر شکل دماغه

بر اساس شکل دماغه نیز آبشکن‌ها به‌صورت‌های مستقیم، سرسپری، سرکج، چوگانی وچوگانی معکوس تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل آبشکن‌ها نیز در عملکرد فرسایش و رسوب‌گذاری و پیامدهای حاصل از آن موثر است. شکل شماره(۳)، انواع آبشکن بر اساس شکل دماغه را نمایش می دهد**[5]**.

- آبشکن مستقیم با راستا و زاویه ۹۰ درجه نسبت به دیواره قرارگرفته و دماغه انتهایی آن جهت حفاظت در مقابل آبشستگی موضعی به‌صورت دایره‌ای است. معمولاً برای کاهش فرسایش موضعی و جلوگیری از گسترش گودال فرسایشی در این آبشکن‌ها، قسمت دماغه آن به شکل پهن تری اجرا می‌گردد. در این خصوص سه حالت مشخص شامل آبشکن مستقیم با دماغه پهن(معمولاً دایره‌ای)، با دماغه سرسپری، و با دماغه سرکج وجود دارد.

در چندین مورد از کاربرد نوع آبشکن سرسپری، ملاحظه شده که دماغه دچار شکستگی شده و باعث بروز فرسایش زیادی در نزدیک دیواره شده و جزیره‌ای در وسط رودخانه نیز ایجاد نموده است. رسوبگذاری در میدان آبشکن‌های سرکج در مقایسه با انواع دیگر، نقش موثرتری داشته و میزان آبشستگی موضعی آنها نیزکمتر است. به‌علاوه حفاظت کناره‌ها توسط این آبشکن‌ها به‌خوبی صورت می‌گیرد و گسترش گودال فرسایشی در دماغه آن نیز خفیف تر است. زاویه سرکج انتهایی آن کمتر از ۱۰ درجه توصیه می‌شود و طول آنها حدود (۶۵-۴۵) درصد فاصله آبشکن‌ها توصیه می‌شود.

براساس آخرین تحقیقات صورت گرفته به منظور بررسی آبشستگی سه شکل دماغه آبشکن(مستقیم، سرکج و سر سپری)، مناسبترین حالت و کمترین میزان آبشستگی دماغه مربوط به آبشکن سرکج بوده است. سایر بررسی‌ها نشان می‌دهد که در آبشکن‌های چوگانی، گسترش چاله فرسایشی در دماغه، در مقایسه با آبشکن‌های سرسپری از وسعت بیشتری برخوردار است و به لحاظ تشدید فرسایش در دماغه چندان مورد توجه نیست.

شکل(۳)- پلان انواع آبشکن بر اساس شکل دماغه

۳-۱-۲-۱- پارامترهای مهم درطراحی آبشکن‌ها

به‌طورکلی طراحی آبشکن‌ها تابعی از فاکتورهای زیر است:

۱- خصوصیات هیدرولیکی جریان نظیر عمق و سرعت جریان.

۲- خصوصیات بار رسوبی جریان رودخانه.

۳- پارامترهای مسیر رودخانه نظیر شیب رودخانه، مشخصات هندسی مقطع جریان و خصوصیات مصالح بستر (رس، سیلت، شن، سنگریزه، قلوه سنگ، سنگ وتخته سنگ).

۴- سایر عوامل: جریان‌های واریزه‌ای درطول سیلاب، خسارات ناشی از یخبندان، مصالح قابل دسترسی جهت ساخت اپی.

با در نظر گرفتن عوامل مذکور یکی از روشهای طراحی انتخاب می‌شود و طراح باید تصمیم بگیرد که:

۱- از نظرمصالح ساختمانی چه نوع آبشکنی باید ساخته شود.

۲- تعیین زاویه آبشکن‌ها نسبت به جریان.

۳- طول و ارتفاع آبشکن چقدر باید باشد.

۴- انتخاب تعداد و فاصله بهینه بین آبشکن‌ها.

۵- تعیین شکل آبشکن (در پلان).

۶- راه کارهای حفاظت آبشکن در مقابل آبشستگی دماغه.

۷- تعیین فرسایش قابل انتظار به منظور حفاظت مناسب وکافی بستر.
۸- تعیین وضعیت رسوب‌گذاری درحد فاصل یا در میدان آبشکن‌ها.

بطورکلی عوامل مهم در طراحی آبشکن پارامترهای شکل و پلان، زاویه آبشکن نسبت بـه دیـواره (θ)، طـول آبشـکن (L)، فاصـله آبشکن‌ها (S)، ارتفاع تاج، شکل مقطع، مصالح ساختمانی و عمق آبشستگی مورد انتظار هستند که در ادامه درخصوص هریک از آنهـا به اختصار توضیح داده می‌شود:

- ***زاویه آبشکن با دیواره رودخانه (θ)***

راستای دیواره آبشکن نسبت به کناره رودخانه می‌تواند به‌صورت عمود برکناره، متمایل به بالادست و یـا متمایـل بـه پـایین دست باشد. آبشکن‌های متمایل به پایین‌دست تنگ‌شدگی کمتری را در جریان ایجـاد کـرده و در نتیجـه میـزان آبشسـتگی کمتری را سبب می‌گردند. در صورتیکه آبشکن‌های متمایل به بالادست علاوه بر انحراف بیشـتر جریـان، طـول بیشـتری از ساحل را حفاظت می‌نمایند.

ریچارسون و همکاران (۱۹۷۵) برای بازه‌های مستقیم، زاویه آب‌شکن‌ها (θ) را ۹۰ درجه و در محل پیچ‌هـا جهـت سـهولت عبور جریان این زاویه را ترجیحاً ۸۰ تا ۹۰ درجه پیشنهاد می‌کنند.

بطورکلی به‌منظور انحراف جریان و با هدف رسوب‌گذاری وایجاد کناره ساحلی جدید، لازم است زاویه θ بـیش از ۹۰ درجـه باشد(ترجیحاً ۱۰۰تا۱۱۰ درجه). ولی در شرایطی که بهبود شرایط رودخانه به منظور کشتی‌رانی و یا آبگیری از پـایین دسـت مدنظر باشد، بهتر است θ کوچکتر از ۹۰ درجه باشد(آبشکن‌های جاذب).

چارلتون در ۱۹۸۲ برای رودخانه‌هایی با بستر شنی و دارای شیب زیاد، آبشکن‌های عمود بر دیواره یا کمی متمایل بـه پـایین دست ($\theta \leq ۹۰$) را توصیه نموده است [۲۵].

- ***فاصله آبشکن‌ها***

فواصل بین آبشکن‌ها باید به نحوی باشدکه اثر متقابل بین آبشکن‌ها، جریان را از ساحل دور نموده و جریان بین دو آبشکن را تضعیف نماید، و بدین ترتیب شرایط ترسیب رسوبات در حد فاصل دو آبشکن را فراهم نماید. چنانچه این فاصله بـیش از حد لازم انتخاب شود این احتمال وجود دارد که جریان رودخانه وارد میدان آبشکن شده و موجبـات فرسـایش کنـاره‌هـا را فراهم آورد و به‌علاوه این امر ایمنی آبشکن‌های پایین‌دست را نیز به مخاطره می‌اندازد و مانع تشکیل لایه رسوبی یکپارچه درفضای بین آبشکن‌ها می‌شود. معمولاً فاصله بین آبشکن‌ها بستگی به‌عرض رودخانه، طول آبشکن، سرعت جریان، زاویـه انحراف آبشکن نسبت به جریان و هدف پروژه دارد. بطور عمده طول دیواره محافظت شده توسط آبشکن‌ها، معـادل طـول ناحیه استقرار گرداب است. فاصله بین آبشکن‌ها(S)، تابعی ازطول قائم آبشکن(L)، راستای رودخانه (انحنای نسـبی: r/W) و نیز شکل مقطع آبشکن می‌باشد.

معمولا فاصله متوسط بین آبشکن‌ها بسته به معیارهای زیر متغیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- هدف از اجرای آبشکن
۲- میزان سرمایه موجود
۳- خصوصیات جریان
۴- شرایط لیتولوژیکی و مورفولوژیکی

در رودخانه‌هایی با بستر شنی و همچنین آبراهه‌های تنگ و باریک فاصله آب‌شکن‌ها باید در مقایسه با آبراهه‌های عـریض کمتر باشد. نقش هدایت جریان توسط آب‌شکن در صورتی به بهترین وجه ممکن انجـام مـی‌شـود کـه بـین هـر جفـت از آب‌شکن‌ها یک گرداب کوچک قوی ایجاد شود.

معمولاً فاصله آبشکن‌ها به‌صورت ضریبی از طول آن‌ها بیان می‌شود. نسبت فاصله بین آبشکن‌ها تأثیر مهمی بر پایداری آبشکن و طول حفاظت شده در ساحل کناری دارد. پایداری یک گرداب بیضی شکل که بتواند محیط مطمئنی را برای ته‌نشینی و ترسیب رسوبات ایجاد کند بستگی به ضریب زیری دارد، که از این ضریب می‌توان به‌عنوان یک راهنمای کنترل فاصله استفاده نمود [5]:

$$a = \frac{2gS}{c^2 h}$$

$$S < \frac{ac^2 h}{2g}$$

که درآن:

c: ضریب شزی برابر با $c = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}$ ، واز آن‌جایی‌که در بسترهای عریض R=h می‌باشد، درنتیجه خواهیم داشت:

$$S < \frac{ah^{\frac{4}{3}}}{2gn^2}$$

که درآن:

s فاصله آبشکن‌ها از یکدیگر (متر)، h عمق آب برای دبی متوسط در محدوده موردنظر (متر)، n ضریب مانینگ، g شتاب ثقل و a ضریبی است که مقدار آن برای تأمین شرایط ایجاد یک جریان چرخشی قوی در پشت آب‌شکن، که رسوب‌گذاری و تثبیت طبیعی دیواره را به‌دنبال داشته باشد برابر ۰/۶ گزارش شده است.

گارد و چاندرا (۱۹۶۹) نشان دادند که طول حفاظت شده یا فاصله بین آبشکن‌ها بستگی بسیار کمی به زاویه آبشکن(θ) دارد ولی شعاع انحنا عامل مهمی می‌باشد. بطوریکه در مسیرهای مستقیم با شعاع انحنا (r/w) زیاد، فاصله آبشکن‌ها در حدود ۵ برابر طول آبشکن و در پیچ‌ها حدود ۱ تا ۲ برابر طول آبشکن توصیه شده است.

راجاراتنام و نواچوکو (۱۹۸۳) نشان دادندکه شکل مقطع آبشکن تأثیر مهمی روی طول حفاظت شده دیواره دارد. بطوریکه برای یک‌آبشکن با مقطع قائم و تیغه‌ای نازک، این فاصله ۱۲ برابر طول آبشکن می باشد در حالیکه برای مقطع نیمه استوانه‌ای (یا تقریبا ذوزنقه‌ای) معادل ۵ برابر طول آبشکن توصیه شده است.

ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) طول حفاظت شده در یک مسیر نسبتا مستقیم را ۷ تا۱۱ برابر طول قائم آبشکن توصیه کرده‌است [به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

چارلتون (۱۹۸۲) و پترسن (۱۹۸۶) اظهار نمودندکه آبشکن‌های طویل ممکن است علاوه بر آبشستگی زیاد، باعث حمله جریان به دیواره‌های مقابل گردند، و فاصله زیاد بین آبشکن‌ها نیز ممکن است روند مارپیچی شدن رودخانه را توسعه بخشد[۲۵].

باندرانت (۱۹۷۵) فاصله بین آبشکن‌ها را به‌صورت ضریبی از طول قائم آبشکن بیان نموده است. بدین صورت که فاصله آبشکن‌ها برابر است باحاصل ضرب متوسط طول دو آبشکن متوالی و نسبت طول به فاصله اپی.

محققین مختلف دیگری نیز براساس نتایج تجربی حاصله، نسبت فاصله به طول آبشکن (S/L) را به صورت‌های مختلفی پیشنهاد نموده‌اند [به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) فاصله آبشکن‌ها را حداقل ۳-۴ برابر و حداکثر ۱۲-۱۰ برابر طول قائم آبشکن گزارش نموده‌اند. چارلتون (۱۹۸۲) برای مسیرهای مستقیم فاصله آب‌شکن‌ها را حداکثر ۴ الی ۴/۵ برابر طول قائم آبشکن پیشنهاد می‌کند[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

فرانکو (۱۹۶۷) معادله زیر را جهت محاسبه حداکثر فاصله آبشکن‌ها ارائه نموده است که توسط چارلتون (۱۹۸۲) و کینوری و موواریش (۱۹۸۴) نیز گزارش شده است[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

$$S = a\frac{h^{4/3}}{2gn^2}$$

که درآن:

S: فاصله ماکزیمم آبشکن‌ها (متر)

h: عمق متوسط جریان (متر)

g: ثابت شتاب ثقل(متر بر مجذور ثانیه)

n : ضریب زبری مانینگ مقطع

a : ضریب ثابت کوچکتر از واحد

بطوریکه برای تأمین شرایط جهت ایجاد یک جریان چرخشی قوی در پشت آبشکن (که معمولاً رسوبگذاری و تثبیت طبیعی دیواره را به‌دنبال دارد) مقدار a =۰/۶ گزارش شده است.

کینوری و موواریش (۱۹۸۴) برای حفاظت مناسب دیواره‌ها، فاصله آبشکن‌ها را ۵-۱برابر طول آنها توصیه نموده‌اند[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

پترسن(۱۹۸۶) فاصله موثر را ۶-۱/۵ برابر طول قائم آبشکن بالا دست می‌داند که برای هدف کشتیرانی این فاصله ۲-۱/۵ برابر و برای حفاظت دیواره‌ها ۶-۲ برابر خواهد بود[به نقل از حسینی و همکاران ۱۳۸۱].

معمولاً فاصله آبشکن‌های نفوذ پذیر بیشتر از انواع غیر قابل نفوذ است.

براساس آخرین نتایج حاصله از مطالعات عباسی و همکاران (۱۳۷۵) برای آبشکن‌های گابیونی با زاویه عمود بر جریان و در مسیر مستقیم رودخانه مشخص شد که درآبشکن‌های مستقیم و سرکج نسبت فاصله به طول برابر ۳ و برای آبشکن‌های سرسپری مقدار۴ برای این نسبت مناسب است.

شایان ذکراست در قسمت قوس رودخانه‌ها، هر چه پیچ تندتر باشد امکان تخریب سازه‌های حفاظتی بیشتر بوده و ارتفاع دیواره خارجی نیز افزایش می‌یابد. از جنبه اقتصادی بین شعاع انحنا با ارتفاع ماکزیمم دیواره خارجی و فاصله آب شکن‌ها روابطی وجود دارد. بطوریکه بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شعاع انحنا پیچ (R) ضریبی از عرض رودخانه (W) می باشد. بر پایه بررسی‌های بعمل آمده نسبت $\frac{R}{W}$ رودخانه (ضریب سینوسیته) عموما بین ۱/۵تا۴/۳ است اگر چه این نسبت از ۱/۵ تا ۱۰ نیز مشاهده می‌شود ولی تمایل طبیعی اکثر رودخانه‌ها دستیابی به نسبت ۲ تا ۴ است. ومتوسط این مقدار برای شرایط تعادل رودخانه حدود ۲/۷ می‌باشد.

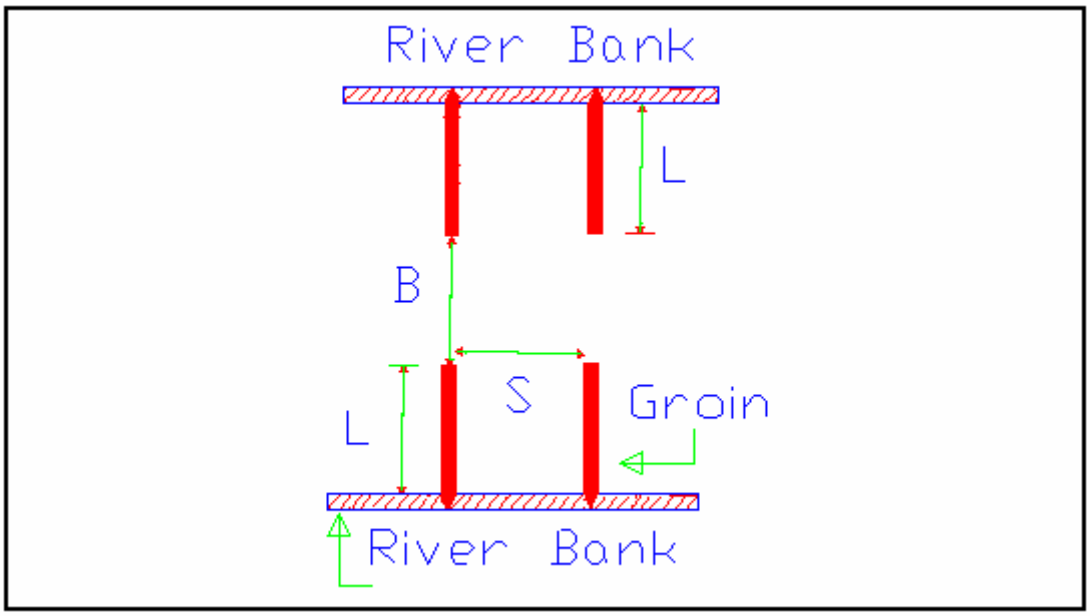
- ***طول آبشکن‌ها***

طول آبشکن‌ها به موقعیت و شرایط خاص هر رودخانه نظیر عرض مقطع، انحنای پیچ رودخانه و سن رودخانه بستگی دارد و در حال‌حاضر هیچ قاعده‌ای که بتوان بر اساس آن طول آبشکن را کاملا مشخص و فرموله نمود وجود ندارد. طراحی دقیق طول، شکل و زاویه در نهایت با استفاده از آزمایشهای مدل سازی ریاضی و فیزیکی انجام می‌شود.

طول آبشکن‌ها در عملکرد رفتاری آنها از نظر فرسایش و رسوبگذاری موثر است. براساس تحقیقات صورت گرفته در دانشگاه دلف هلند نسبت فاصله آبشکن به طول آن کمتر از ۲ مناسب تشخیص داده شده است، و از اینرو انتخاب آبشکن‌های کوتاه چندان مطلوب نمی باشد، زیرا باعث افزایش نسبت مذکور می‌شود.

ممک و ولوسنی نیز سه پارامتر عرض کنترل شده رودخانه(B)، طول آبشکن(L) و فاصله آبشکن‌ها(S) را متناسب و برابر یکدیگر متصور شده‌اند (شکل شماره۴) [به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

$$S \cong B \cong L$$



شکل(٤)- نمایش پارامترهای عرض کنترل شده رودخانه(B)، طول آبشکن(L) وفاصله آبشکن‌ها(S) براساس توصیه‌های ممک و ولوسنی

درجدول شماره ۳ نیز نسبت‌های پیشنهادی برای مقادیرS/L و S/B توسط بعضی منابع ارائه شده است.

جدول شماره ۳- نسبت‌های پیشنهادی برای مقادیر S/L و S/B توسط منابع مختلف[به نقل ازحسینی وهمکاران ۱۳۸۱]

ردیف	مرجع	نسبت پیشنهادشده		نوع ساحل رودخانه	ملاحظات
		S/L	S/B		
۱	سازمان ملل	۱	--	قوس خارجی	کاربردهای عمومی
۲	(گروه اقتصادی۱۹۵۳)	۲-۲/۵	--	قوس داخلی	کاربردهای عمومی
۳	جوگلکار(۱۹۷۱)	۲-۲/۵	--	--	آبشکن دافع
٤	ممک(۱۹۵٦)	۲-۳	۱	--	--
٥	جانسن وهمکاران(۱۹۷۹)	--	۱-۲	--	--
٦	مزاآلوارز(۱۹۸۹)	٥/۱-٦/۳	--	مستقیم	آبشکن‌های شیب‌دار برای حفاظت ساحل
۷	--	۲/٥-٤	--	انحنادار	

طول متوسط آبشکن‌ها تابعی از وسعت الگوی ساماندهی می‌باشد و بطورکلی طول مناسب آبشکن باید کمتر از ۲۰ درصد عرض رودخانه و یا بزرگتر از ۱/۵ تا ۲ برابر عمق جریان باشد. در هر مقطع با توجه به عرض مفید آبراهه و شعاع انحنا جریان طول آبشکن‌ها مشخص می‌شود. این طول بسته به نوع آبشکن و محل احداث آن متغیر می‌باشد. به‌منظورکاهش سرعت جریان و ترسیب مواد رسوبی درمیدان آبشکن‌ها، لازم است سرعت جریان درمحدوده آبشکن V_n کمتر از سرعت آستانه حرکت مواد رسوبی یا سرعت بحرانی V_c برسد. این سرعت مطابق رابطه lathy shincov به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_c = 1.6\sqrt{gD}\,(\frac{h}{D})^{0.2}$$

که در آن:

V_c : سرعت آستانه حرکت مواد رسوبی یا سرعت بحرانی (متربرثانیه)

D: قطر متوسط دانه‌ها (متر)

h: عمق جریان آب(متر)

g: شتاب ثقل(متر بر مجذور ثانیه)

معمولاً برای تعیین V_c، قطر نظیر پنجاه درصد مواد تشکیل دهنده بستر و یا قطر هندسی دانه‌ها ملاک عمل قرار می‌گیرد.

علاوه برسرعت بحرانی، سرعت سقوط دانه‌ها در تحلیل رسوبگذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ازجمله معادلات ارائه شده برای تعیین سرعت سقوط دانه‌ها (V_S) رابطه اینشتن به‌صورت زیر می‌باشد[25]:

$$V_S = 0.66\sqrt{gD(G_S - 1)}$$

که درآن:

V_S سرعت سقوط دانه(متر بر ثانیه)، G_S چگالی دانه‌ها(که معمولاً برای دانه‌های غیرچسبنده برابر ۲/۶۵ است) و

g :شتاب ثقل(متربرمجذورثانیه) می باشد.

معمولاً طول آبشکن‌ها بستگی به فاصله آب‌شکن، شعاع انحنای بازه، سرعت جریان و هدف از ساخت آبشکن دارد. درکنار تمامی این عوامل هزینه‌های اجرایی و مسائل اقتصادی پروژه نیز مدنظر قرار می‌گیرد.

معمولاً طول هر آبشکن بر اساس عرض مسیر جدید کانال و فاصله دیواره ساحلی تا لبه مسیر جدید تعیین می‌شود. ولی این طول نباید کمتر از ۳ برابر عمق نرمال آب در لبه انتهایی آن باشد.

به‌منظور تعیین طول آبشکن‌ها، رعایت نسبت تنگ شدگی مقطع (نسبت B2-B1/B1)،که با استفاده از پروفیلهای عرضی جریان محاسبه و کنترل می‌شود قابل استفاده است. (B1 عرض رودخانه در مقطع طبیعی و B2 عرض رودخانه در مقطع تنگ شده).

براساس تحقیقات Miller در۱۹۸۳ برای آبشکن‌های نفوذپذیر(ازجنس الوار)، بیشترین طول حفاظت شده در ساحل رودخانه، زمانی حاصل می‌شود که طول آبشکن۰/۲۲ عرض رودخانه باشد.

در مورد آبشکن‌های سرکج، این طول را می‌توان ۴۵ تا ۶۵ درصد فاصله بین‌آبشکن‌ها در نظر گرفت. پترسن(۱۹۸۶) عقیده داردکه بطورکلی طول آب‌شکن‌های سرکج، متناسب با اهداف و شرایط رودخانه و با توجه به عرض مورد نظر و عمق آبشستگی مجاز انتخاب می‌شود ولی میزان تنگ‌شدگی عرض رودخانه، نباید بیش از ۳۰ درصد عرض اولیه رودخانه باشد.

- **ارتفاع آبشکن‌ها**

مهم‌ترین پارامتر موثر در تعیین رقوم تاج آبشکن‌ها، عمق جریان با دوره بازگشت مشخص در رودخانه است. ارتفاع آبشکن معادل ارتفاع جریان آب در دوره برگشت معینی به اضافه ارتفاع آزادی حدود نیم متر برای آبشکن‌های کوتاه و حدود یک متر برای آبشکن‌های بلند خواهد بود. به‌عبارت دیگر ارتفاع آبشکن از پروفیل طولی سطح آب پیروی می‌کند.
بطور معمول درساخت آبشکن‌ها با مصالح رودخانه‌ای و برای رودخانه‌های طبیعی، ارتفاع آبشکن‌ها برابر رقوم کرانه یا ساحل رودخانه درنظرگرفته می‌شود.
دراین زمینه با استفاده از فرمول زیر می‌توان ارتفاع آبشکن‌ها را نسبت به کف رودخانه برآورد نمود[25]:

$$d = 0.019 \frac{S^{(3/5)}}{I^{(3/10)}}$$

که در آن:
d ارتفاع آبشکن (متر)، S فاصله بین دو آبشکن (متر) و I شیب متوسط رودخانه در قسمت مورد مطالعه است.
بدیهی است ارتفاع آبشکن‌ها براساس فاصله آبشکن‌ها قابل تعدیل شدن است.
لازم به‌ذکر است که در مرز مشترک آبشکن‌ها وکرانه‌ها یا سواحلی که دیواره آن‌ها به‌صورت قائم می‌باشد، ترتیبی اتخاذ شود که دیواره‌ها شیب‌دار شوند و در مجاورت آنها حفاظت بهتری صورت گیرد تا جریان رودخانه در آنجا دور نزند.

در مورد محاسبه رقوم تاج سازه‌های تنظیمی آب، قطعیت‌های مناسبی وجود ندارد ولی به دلایل اقتصادی رقوم تاج تا حد ممکن باید پایین نگهداشته شود. این ارتفاع از رودخانه‌ای به رودخانه دیگر و از بازه‌ای به بازه دیگر بر اساس هدف پروژه فرق می‌کند. به هر حال در اغلب موارد تاج آبشکن نیاز به کاربرد سنگ‌چین حفاظتی[1] هم دارد که لازم است بالاتر از رقوم آب اجرا شود، که خود به‌خود سبب افزایش رقوم تاج می‌گردد. بطورکلی ماکزیمم رقوم سازه‌هایی که با هدف هدایت جریان رودخانه احداث می‌شوند بر اساس رقوم سیلاب دشت محاسبه می‌شود، و در ضمن ارتفاع تاج (برای اطمینان از توزیع پایدار آب) باید از رقوم متوسط آب رودخانه بالاتر باشد.

در رودخانه‌های مارپیچی حفاظت دیواره‌ها در مقطع اصلی و با توجه به سیل متوسط سالیانه (دبی مقطع پر) انجام می‌شود لذا در سیل‌های بزرگتر، آبشکن مستغرق خواهدشد.

در رودخانه‌های شریانی ارتفاع تاج آبشکن در حدود سطح مقطع پر سیلابی و عموما غیر مستغرق می باشد.
وقتی ازیک سری آبشکن متوالی استفاده می شود بهتر است ارتفاع تاج آنها یکسان و یا در جهت پایین دست به‌تدریج کاهش یابد. بطورکلی ارتفاع تاج آبشکن‌ها در طول رودخانه می‌تواند از پروفیل سطح آب پیروی کند.

- **شیب طولی تاج آبشکن‌ها**

اصولا طراحی این قسمت براساس میزان شدت حمله جریان به ساحل صورت می‌پذیرد.

تاج آبشکن ممکن است افقی یا تراز و یا از دیواره به سمت محور رودخانه شیبدار باشد. در حالت شیبدار سطح مقطع مؤثر جریان در دبی‌های بالا، بیشتر بوده و سطح بیشتری از آبشکن در مقابل جریان قرار می‌گیرد بطوریکه تحت چنین شرایطی سرعت جریان نیزکمتر می‌شود.

وقتی محدوده تغییرات دبی عبوری و سطح آب کم است، تاج افقی برای آبشکن مناسب‌تر است و بر عکس وقتی تغییرات زیادتر باشد بهتر است تاج آبشکن به‌طرف رودخانه دارای شیب باشد.

---

[1]- Pitching

طبق بررسی‌های صورت گرفته توسط Alvarez، آبشکن‌های با تاج شیبدار، برای حفاظت کناره‌ها درمقابل فرسایش مناسبتر هستند. به‌علاوه دراین آبشکن‌ها عمق چاله فرسایشی به مراتب کمتر بوده و سرعت رسوبگذاری درمیدان آبشکن درمقایسه با آبشکن‌های با تاج افقی زیادتر است.

به‌منظور متمرکزکردن و هدایت جریان به سمت داخل و وسط رودخانه شیب طولی تاج بین ۱-۴ درصد توصیه شده است، ولی این شیب بستگی به طول آبشکن و رقوم تاج و رقوم دیواره ساحلی نیز دارد. برای‌آبشکن‌های طویل متصل به دیواره ساحلی کوتاه شیب ملایم، و برای آبشکن‌های کوتاه (با طول کم) و یا دیواره ساحلی بلند شیب تندتری لازم است.

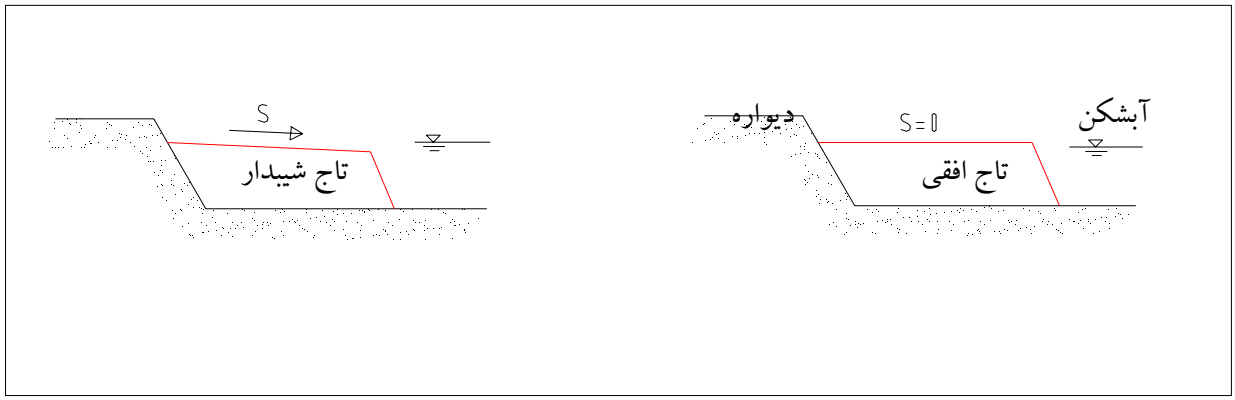
در مورد مقدار شیب طولی روی تاج نظرات متفاوتی ارائه شده است ولی اکثراً در مورد اصل لزوم شیب طولی متفق هستند، در زیر به برخی از این‌نظرات اشاره می‌شود.

به‌منظور جلوگیری از جمع شدن جریان در ریشه آبشکن، در هنگام جریان اضافی، پیشنهاد می شودکه تاج دیواره، شیبی در حدود ۱:۱۰ (افقی : عمودی) به طرف رودخانه داشته باشد.

به‌منظور حفاظت دیواره‌ها از فرسایش، Alvarez در ۱۹۸۹ شیب طولی تاج آبشکن‌ها را ۰/۱ تا ۰/۲۵ توصیه کرده است.

فرانکو (۱۹۶۷) در رودخانه‌هایی که تغییرات دبی و عمق جریان کم باشد آبشکن‌های افقی و تراز را مناسب‌تر دانسته، ولی هنگامیکه این تغییرات شدید باشد آبشکن‌های با تاج شیبدار که از نظر هیدرولیکی مناسب‌تر هستند ولی تاثیر آن‌ها در حفاظت دیواره کمتر است را توصیه کرده است[به نقل از حسینی و همکاران ۱۳۸۱].

انواع‌شیب تاج آبشکن به صورت شماتیک در شکل شماره(۴-۵) نمایش داده شده است.



شکل(۵)- انواع شیب تاج آبشکن

- ***شیب دامنه و دماغه آبشکن‌ها***

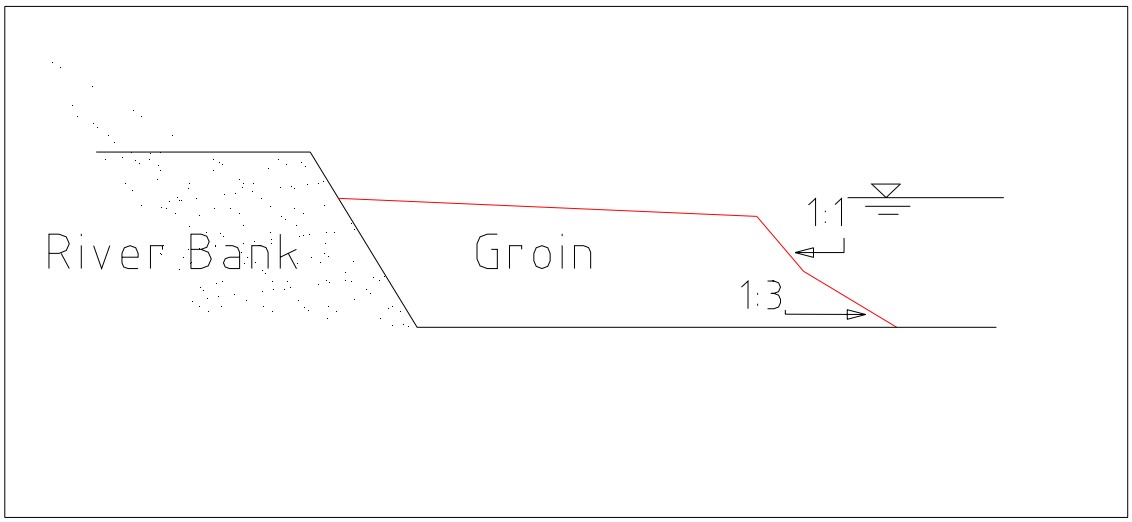
درمورد شیب عرضی دامنه‌های آب‌شکن با بدنه سنگ‌ریز نظرات مختلفی ارائه شده است، بعضی از این نظرات عبارتند از:

شیب دامنه‌های آبشکن بر اساس کیفیت خاک زیر آن، جریان آب زیرزمینی و نوع سنگ چینی روکش آن تعیین می‌شود. ولی معمولاً مقادیر زیر به‌عنوان راهنمای عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند:

قسمت تحت برخورد با جریان، با شیب (۱:۳/۵ تا ۱:۲/۵) و قسمت خشک با شیب تندتر (۱:۲/۵ تا ۱:۱/۵). شیب دامنه آبشکن‌ها را وقتی که از مصالح سنگین همچون سنگ استفاده می‌شود، می‌توان تندتر از حالتی که از مصالح ماسه یا مشابه آن استفاده می‌شود در نظر گرفت، ولی این شیب نباید از زاویه اصطکاک داخلی مصالح(Φ) بیشتر باشد.

با صرفنظر نمودن از تنش برشی ناشی از جریان در جهت افقی در مقابل وزن مصالح در جهت قائم، زاویه شیب باید از زاویه(Φ) کمتر باشد. از این مطلب استنباط می‌شود که ماکزیمم شیب بدنه می تواند (۳۰ تا۴۰) درجه یا (۱ به۱/۵) باشد[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

مقطع مؤثر دماغه آبشکن باید به سمت داخل رودخانه در حال افزایش باشد یعنی از شیب (۱:۱) تا (۳ : ۱) اضافه شود. این مطلب درشکل شماره (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل(٦)- مقطع مؤثر دماغه آبشکن

به منظورکاهش شدت فرسایش موضعی در دماغه آبشکن، معمولاً شیب کمتری به دماغه می‌دهند و به‌صورت دایره‌ای گسترده می‌شوند.

- ***عرض تاج آبشکن‌ها***

در رودخانه‌های مختلف عرض تاج آبشکن‌ها متفاوت است، بطوریکه بسته به طول رودخانه، شیب، عمق، نیروی کششی و نوع مصالح، مقدار آن به صورت تجربی تعیین می‌شود.

بطورکلی عرض تاج آبشکن حدود (۱-۶) متر در نظر گرفته می‌شود که با توجه به عرض ماشین‌آلات معمولاً ۳ متر مناسب می باشد.

- ***شکل مقطع عرضی آبشکن‌ها***

معمولاً جهت سهولت در اجرای آبشکن‌های با بدنه سنگی، مقطع عرضی آبشکن‌ها به‌صورت ذوزنقه‌ای شکل و شیب‌های آن طبق محاسبات مربوط به شیروانی خاکریزها اجرا می‌شود براین اساس شیب (۱ : ۱) تا (۱:۳) برای آن در نظر گرفته می‌شود.

- ***عمق ریشه آبشکن‌ها در داخل دیواره رودخانه***

اتصال آبشکن‌ها به دیواره ساحلی باید از طریق ادامه بدنه آبشکن به داخل دیواره ساحلی و نیز اجرای ساحل‌سازی به طول (۵۰ ـ ۲۰) متر در بالادست و پایین‌دست محور آبشکن انجام شود.

وطن‌فدا (۱۳۶۹) عمق ریشه آبشکن در داخل دیواره ساحل را در حدود۲ الی ۴ متر پیشنهاد نموده است.

- ***عرض پی در دماغه آبشکن‌ها***

با توجه به اینکه سر آبشکن‌ها بیشترین نیرو را از جهت جریان تحمل می‌کند و جریان آب با شدت زیاد به این قسمت از ساختمان آبشکن برخورد می‌کند، باعث بسترکنی در این قسمت نیز می شود و در نتیجه استحکام بخشیدن به این قسمت از آبشکن الزامی به‌نظر می‌رسد. عرض پی دردماغه آبشکن، متناسب با عرض تاج و شیب دامنه آبشکن تغییر می‌کند.

- ***عمق آبشستگی در اطراف آبشکن‌ها***

بر پایه تجربیات حاصله بیشترین تخریب‌ها از ناحیه دماغه متوجه آبشکن‌ها می‌شود، که عمده ترین دلایل تخریب در این قسمت شامل عدم محاسبه صحیح عمق فرسایش و عدم اتصال کامل دماغه با بستر است.

روش‌های مختلفی برای تخمین عمق آبشستگی نظیر روابط ارائه شده توسط گیل[1]، احمد، ریچاردسون، گارده(۱۹۹۳) وهمچنین روش لیسی وجود دارد که انتخاب صحیح آنها با توجه به شرایط هر رودخانه می‌تواند موثر وکارگشا باشد. استفاده از اغلب آنها مستلزم داشتن مشخصات هیدرولیکی نسبتا دقیق از رودخانه است. این معادلات علیرغم سادگی عمدتا متکی بر موارد تجربی هستند و از این رو نتایج حاصله می‌تواند مورد استفاده واقع شود.

از جمله معادلاتی که می‌توان از آن برای تخمین فرسایش موضعی استفاده کرد، رابطه زیر است، که توسط محافل کارشناسی هند معرفی شده است[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

$$D_{\max} = (\frac{Q}{f})^{\frac{1}{3}}$$

که درآن:

Q دبی (متر مکعب در ثانیه)، f فاکتور سیلت، D_{max} عمق ماکزیمم فرسایش موضعی (متر) می‌باشد.

گیل (۱۹۷۲) بر اساس تأثیر قطر رسوب و تفاوت بین آب صاف و آب محتوی بار کف آزمایشاتی را انجام داده است که نتایج آن به شرح ذیل ارائه می گردد[۵]:

۱- عمق آبشستگی در اطراف دماغه آبشکن بستگی به قطر مصالح بستر داشته و سرعت آبشستگی در مصالح ریزدانه به مراتب بیشتر از مصالح درشت دانه است.

۲- عمق آبشستگی تابعی از عمق جریان در بالادست آبشکن و مقطع تنگ شده است.

۳- بیشترین عمق فرسایش زمانی رخ می‌دهد که مصالح بستر در بالادست کانال درآستانه شسته شدن باشند[۸]:

$$(\frac{h_2}{h_1})\max = 8.375(\frac{D}{h_1})^{0.25}(\frac{B_1}{B_2})^{6.7}$$

که درآن:

D: قطر متوسط رسوبات کف

h_1: عمق اولیه جریان، h_2: عمق جریان در دماغه آبشکن بعد از آبشستگی (متر).

B_1: عرض کانال در مقطع طبیعی، B_2: عرض کانال در مقطع تنگ شده (متر).

معادله دیگری نیز توسط گیل به‌صورت زیر پیشنهاد شده است[۷]:

[1] - Gill

$$\left[\frac{h_1 + D_{\max}}{h_1}\right] = 8.4\left[\frac{D_{50}}{h_1}\right]^{0.25}\left[\frac{B_1}{B_2}\right]^{6/7}$$

در این زمینه رابطه‌ای نیز توسط ادارهٔ حفاظت خاک آمریکا به‌صورت زیر ارائه شده است[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱] :

$$\left[\frac{D_{\max}}{h_1}\right] = 4F_{r1}^{\frac{1}{3}}$$

که در آن:

h_1 عمق آب دربالادست آبشکن (متر)، D_{max} عمق ماکزیمم فرسایش موضعی (متر)، D_{50} قطر ۵۰ درصد دانه‌های بستر (متر)، B_1 (عرض اولیه رودخانه به متر)، B_2 (عرض ثانویه رودخانه به متر) و F_{r1} عدد فرود برای جریان پیش از آبشکن است.

ضمنا فاکتورسیلت(f)، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = 1.76\sqrt{D_{50}}$$

عباسی و همکاران (۱۳۷۶) نیز بر روی عمق آبشستگی دماغه آبشکن‌های توریسنگی آزمایشاتی انجام داده‌اند که نتایج آن به شرح ذیل ارائه شده است[7]:

۱- با افزایش نسبت S/L عمق آبشستگی دماغه نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تا میزان S/L=4 تدریجی و بوده و از S/L>4 افزایش ناگهانی می‌یابد (S فاصله بین دو آبشکن متوالی و L طول آبشکن است).

۲- در مقادیر S/L>3 جریان بین آبشکن‌ها به صورت مارپیچی در می‌آید، این مسئله در نسبت‌های تنگ‌شدگی بیشتر تشدید می‌شود.

۳- در مجموع نسبت S/L=3 برای آبشکن‌های توریسنگی در بازه‌های مستقیم مناسب است ولی این نسبت نباید بیشتر از ۴ انتخاب گردد.

٤- از مقایسه نتایج مربوط به عمق آبشستگی آبشکن‌های توریسنگی با فرمول ارائه شده برای آبشکن‌های صلب نتیجه می‌شود که میزان نفوذپذیری در آبشکن‌های توریسنگی قابل توجه بوده و عمق آبشستگی دماغه این آبشکن‌ها بطور محسوسی کمتر از آبشکن‌های صلب می‌باشد.

۵- با افزایش نسبت تنگ‌شدگی ((B1-B2)/B1)) مقدار عمق آبشستگی دماغه آبشکن افزایش می‌یابد (B2 عرض در مقطع تنگ‌شده و B1 عرض در مقطع طبیعی).

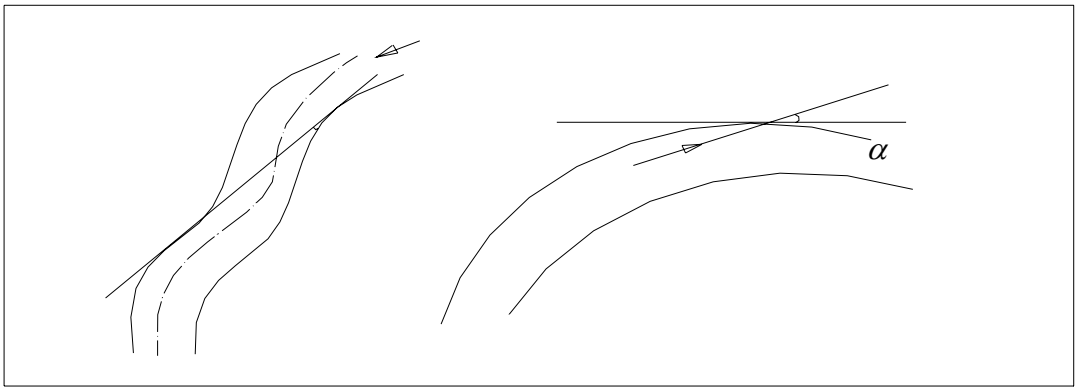
- ***موقعیت قرارگیری آبشکن در محل پیچ‌های رودخانه***

زاویه بین امتداد خط اصلی جریان با خط مماس به دیواره در محل پیچ رودخانه‌ها را، زاویه ورودی یا زاویه حمله آب (α) می‌نامند. ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) این زاویه را حد فاصل بین خط مماس بر دیواره خارجی دو پیچ متوالی با خط دیواره رودخانه در مسیر مستقیم تعریف کرده و آن را در حدود ۲۰ درجه پیشنهاد نموده‌اند. شکل شماره (۷) این مطلب را نشان می‌دهد.

باندرانت (۱۹۷۵) برای شرایط طبیعی و مطلوب، زاویه ورودی را کمتر از ۱۵ درجه پیشنهاد نموده و تنها در شرایطی که دیواره‌ها مستقیماً با سازه نوع روکشی حفاظت می‌گردند افزایش آن را تا ۲۵ درجه مجاز دانسته است و متذکر شده که اگر این زاویه بیش از ۳۰ درجه باشد اثرات تخریبی آن روی دیواره افزایش یافته وکاربرد سازه‌های مقاوم تر در این شرایط کاملاً غیر اقتصادی خواهد بود. و در صورتیکه این زاویه به حد ۴۵ درجه برسد تغییرات جهت جریان شدید شده و ناپایداری جریان را سبب می‌گردد تا تأثیر تلاطم و ناهنجاری در فاصله قابل ملاحظه‌ای در پایین‌دست و حتی روی پیچ‌های بعدی گسترش یابد.

شن (۱۹۸۴) برای شرایط حفاظت نشده دیواره‌ها، زاویه حمله آب را از ۱۰ درجه بیشتر توصیه نمی‌کند وحتی تأکید نموده است درشرایطی که دیواره‌ها با سازه روکشی محافظت می‌شوند این زاویه نباید از ۲۵ درجه بیشتر شود. شکل شماره (۷) زاویه حمله آب به دیواره را نشان می‌دهد[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱].

در صورت امکان محل شروع سازه‌های اصلاح مسیر و حفاظت دیواره نیز باید از محلی باشد که جریان موازی دیواره‌ها باشد و به تدریج و با زاویه کوچکی در راستای انحنای پیچ ادامه یابد (به‌عبارت دیگر از بالادست محل پیچ آغاز گردد). در این صورت محل شروع سازه‌ها باید طوری انتخاب شود که زاویه حمله آب کمتر از ۱۰ درجه بوده و تغییر راستای آن در محل پیچ در مقاطع مختلف و در جهت پایین‌دست نیز با رعایت زاویه انحراف حداکثر ۱۰ درجه باشد. مگر در شرایط کاربرد سازه‌های روکشی مقاوم، که دراین شرایط افزایش آن تا ۲۵ درجه نیز قابل قبول خواهد بود.



شکل(۷)- زاویه ورودی به پیچ یا زاویه حمله آب به دیواره‌ها (α)

۳-۱-۲-۲- روش طراحی آبشکن‌ها

امروزه بعداز چندین سال که از به‌وجود آمدن علم مهندسی رودخانه می‌گذرد، صاحب نظران به‌این نکته اذعان دارند، که جهت کنترل و ساماندهی رفتار رودخانه‌ها، به‌دلیل فعالیت زیاد و غیرقابل پیش‌بینی بودن رفتار آنها که عواملی مانند شدت جریان، قدرت جریان، سرعت جریان، دبی و شیب رودخانه در آن مؤثرند، باید از سازه‌هایی نظیرآبشکن که دارای انعطاف پذیری بیشتری بوده و درساخت آنها می توان از مصالح محلی استفاده نمود، و همچنین حداقل تغییر را در سیمای طبیعی رودخانه داشته باشد، استفاده نمود. به‌منظور طراحی این قبیل سازه‌ها لازم است مراحل زیر طی شود:

- ***تعیین عرض تعادلی[1] رودخانه***

به‌منظور اصلاح مسیر و احداث آبشکن در هر رودخانه، ابتدا باید عرض تعادلی رودخانه مشخص شود. باتوجه به اینکه طرح‌های ساماندهی رودخانه براساس استاندارد صنعت آب کشور عموما با دبی‌های با دوره بازگشت ۲۵ ساله اجرا می‌شود، بر این اساس ابتدا باید پروفیل‌های طولی جریان در رودخانه موردنظر محاسبه و مشخص گردد. برای این منظور از روابط هیدرولیکی و برنامه‌های کامپیوتری مختلفی که در این زمینه ارائه شده است می‌توان استفاده نمود.

در برخی از روابط دبی غالب رودخانه و در بعضی دیگر دبی مقطع پر و همچنین دبی با دوره بازگشت ۲ ساله که برابر متوسط سیل سالانه رودخانه است، به‌عنوان معیار استفاده می‌شود.

بطورکلی برای تعیین عرض تعادلی رودخانه از رابطه لیسی که به‌صورت زیر ارائه شده است می توان استفاده نمود[به نقل از حسینی وهمکاران ۱۳۸۱]:

---

[1]- عرض تعادلی عبارت است از عرض بهینه در بازه‌ای از رودخانه، که شرایط هیدرولیکی جریان و رسوب در دبی موردنظر ، به حالت تعادل باشد.

$$B = 2.77\ Q^{0.457} S^{-0.068}$$

که درآن:

B: عرض رودخانه برحسب متر

Q: دبی دوره طرح بر حسب مترمکعب بر ثانیه

S: شیب آبراهه (متربرمتر)

دراین زمینه روابط دیگری مانند روش Wargadalam نیزوجود دارد که برپایه تئوری شیلدز استوار می‌باشد[5].

تعیین مصالح مورد استفاده در بدنه و روکش آبشکن‌ها

مصالح مورد استفاده در بدنه و هم‌چنین روکش محافظ آبشکن بستگی به نفوذپذیر یا نفوذناپذیر بودن سازه مربوطه دارد. در صورت نفوذناپذیر بودن از دیواره بتنی، سنگ و سیمان و صفحات فلزی و در حالت نفوذپذیر بودن از مصالح طبیعی شن و ماسه و قلوه‌سنگ در بدنه استفاده می‌شود و برای روکش آبشکن‌های نفوذپذیر می‌توان از مصالح مختلفی بهره گرفت از جمله:

- روکش سنگ‌ریزه‌ای که استفاده از فیلتر را ضروری می‌کند.
- روکش توری‌سنگ از نوع پلکانی یا روکش با ضخامت کم برای حفاظت شیب‌ها
- روکش بتنی مفصل‌دار که علاوه بر تامین حفاظ و پایداری، قابلیت انعطاف و نفوذپذیری دارد.
- روکش کیسه‌ای کنفی حاوی مخلوط (خاک- سیمان) و یا (ماسه- سیمان)
- روکش آسفالت
- روکش تایر ماشین
- استفاده تدریجی از پوشش گیاهی با توجه به افزایش تراکم پوشش باگذشت زمان تاحد ممکن هسته و بدنه آبشکن باید از مصالح بستر رودخانه ساخته شوند.

اصولا هدف از روکش و سنگ‌چینی، حفاظت از خاک لایه‌های زیرین در مقابل فرسایش است. که پایداری این لایه‌ها نیز در مقابل فرسایش باید تأمین شود. البته کارایی روکش‌ها بستگی به مقاومت مصالح آن روی شیب دیواره دارد ولی کلاً برای شرایط سرعت زیاد جریان و فرسایش‌پذیری شدید دیواره‌ها بسیار موثرند.

با توجه به این‌که احتمال فرسایش موضعی قوی در دماغه آبشکن‌ها وجود دارد، بنابراین اغلب محافظت بدنه و دماغه آبشکن توسط شبکه و یا پوشش خاصی لازم است.

- **کنترل پایداری آبشکن‌ها**

برای کاهش اثرات نامطلوب در عدم پایداری سازه‌ها معمولاً پایین‌دست آبشکن‌ها را با خاکریز شنی تقویت می‌نمایند تا پایداری سازه در اثر پدیده جریان‌های گردابی یا چرخشی افزایش یافته و از ایجاد حفره در پشت آبشکن‌ها جلوگیری شود. بدیهی است با تداوم جریان‌های چرخشی و بروز پدیده‌های فرسایشی، انجام این‌گونه اقدامات تدافعی نمی‌تواند به‌عنوان راه حل اساسی تلقی گردد مگر آنکه با اعمال دانه‌بندی اصولی در بدنه سازه‌ها نیز همراه باشد.

- **کنترل پوشش استفاده شده درخاکریزهای جانبی**

عدم وجود لایه پوشش مناسب طبعاً استهلاک و اضمحلال سریع خاکریزهای طولی کناره رودخانه را بالاخص در شرایط سیلابی به‌همراه خواهد داشت، بر این اساس رعایت و اجرای مناسب لایه پوشش توصیه می‌شود.

۳-۱-۲-۳-چند توصیه اجرایی

تجربه‌های موجود در کشورهای مختلف نشان می‌دهد که:

– اکثرا دامنه پایین‌دست آبشکن‌ها دچار مشکل می‌شوند، لذا حفاظت بیشتری درآن قسمت لازم است.
– وقتی آبشکن‌ها به صورت سری ساخته می‌شوند اولین آبشکن از طرف بالا دست باید خیلی محکم و با دقت اجرایی ساخته شود زیرا جذب رسوب و حمله جریان به‌طرف این آبشکن با شدت بیشتری انجام خواهد شد.
– در رودخانه‌های کوچک استفاده از آبشکن ضروری نبوده واصولاً مفید نخواهد بود ولی در شرایطی که استفاده از آبشکن به عنوان یکی ازگزینه‌های قابل طرح باشد در این صورت مزیت استفاده از این روش این است که حجم مصالح مصرفی برای احداث آبشکن‌ها نسبت به تاسیسات حفاظت طولی ساحل به مراتب کمتر خواهد بود. در رودخانه‌های با مواد بستر شنی ودرشت‌دانه، عمق آبشستگی در آبشکن‌های توری‌سنگی کمتر از آبشکن‌های شمع‌کوبی خواهد بود.

۳-۱-۳- روش‌های مستقیم حفاظت دیواره (پوشش‌ها)

پوشش عمومی‌ترین سیستم حفاظتی بر روی شیب خاک جدارهٔ رودخانه می‌باشدکه به منظور حفاظت و پایداری آن سطح در برابر فرسایش ناشی از تأثیرات جریان ایجاد می‌شود. کارآیی پوشش تنها بستگی به مقاومت مصالح آن داشته و برای شرایط سرعت زیاد جریان و فرسایش‌پذیری شدید دیواره‌ها مؤثر است معمولاً هرگاه حداقل شیب دیواره (۱/۵: ۱) یا زاویه شیب دیواره بین ۳۰ تا ۵۷ درجه باشد می‌توان از این سیستم استفاده نمود. در شرایطی که شیب دیواره خیلی زیاد است، لزوم احداث یک دیواره حائل کوتاه در پای دیواره جهت تعدیل شیب ضروری خواهد بود (کری ولیسر، ۱۹۸۲).
انواع مختلفی از محصولات پوشش موجود است و باید به شرایط کاربرد، دوام و اندازهٔ معادل زبری یا ضریب اصطکاک آن‌ها و حداکثر سرعت‌های مجاز ممکن توجه نمود.

برای مصالح طبیعی، سرعت‌های مجاز معمولاً دارای دامنه‌ای از ۰/۵ متر بر ثانیه برای ماسهٔ ریزدانه تا ۱/۵ متر بر ثانیه برای قلوه‌سنگ، ۱/۸۵ متر بر ثانیه برای رس سخت و ۰/۸ متر بر ثانیه برای انواع مختلف چمن (در شرایط مختلف خاک) است. کف‌بندی‌های پر شده از سنگ و مسلح با شبکه‌های توری چنانچه ضخامت آنها بیشتر از ۰/۳ متر باشد می‌توانند سرعت‌های بیشتر از ۵ متر در ثانیه را تحمل کنند. ضریب زبری مانینگ برای این نوع کف‌بندها می‌تواند از ۰/۰۱۶ (متناظر با اندازهٔ زبری در حدود ۳/۵ میلیمتر) برای مجرای پوشش شده با کف‌بند، تزریق شده، و ناتراوا شده توسط ملات ماسه قیری با سطحی صاف، تا ۰/۰۲۷ (میلیمتر K =۱۲۵) برای مجرای پوشش شده با توری‌سنگی که با سنگ خرده‌های درهم پر شده باشد، تغییر کند.
از دیگر عوامل مؤثر و مهم در خصوص مطالعات پایه و تبیین مبانی طراحی در طرح‌های کنترل فرسایش رودخانه‌ای توجه به نوع خاک و خصوصیات رفتاری آنهاست. خاک‌ها را از نظر ژنتیکی یا منشأ پیدایش می‌توان به دو گروه عمده آلی و معدنی تقسیم نمود. خاک‌های آلی عموماً از تجزیهٔ بقایای عناصر گیاهی حاصل می‌شوند. این خاک‌ها دارای قدرت جذب آب زیاد بوده و اغلب در اثر پدیده زه‌کشی و اعمال تنش‌های فشاری با کاهش حجم مواجه خواهد شد. همچنین خاک‌های آلی در مقابله با عوامل فرسایشی مقاومت چندانی نداشته و به لحاظ محدودیت تنش‌پذیری و سایر نارسایی‌های ژئومکانیکی در طرح‌های کنترل فرسایش لازم است تا عمق مناسبی با خاک‌های معدنی جایگزین گردند. خاک‌های معدنی خود به دو گروه بزرگ درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم می‌شوند.

خاک‌های درشت‌دانه شامل شن و ماسه و دارای نفوذ پذیری سرعت زهکشی نسبتا زیاد و عدم وجود جاذبه بین دانه‌ای است که از ویژگی‌های بارز آنها نفوذپذیری و سرعت زه‌کشی نسبتاً زیاد و عدم وجود جاذبه بین دانه‌ای است. برعکس خاک‌های ریزدانه نظیر رس و سیلت عموماً دارای جاذبه بین ذره‌ای بوده و درجه نفوذپذیری و سرعت زه‌کشی آن‌ها بسیار اندک است. این خصیصه اغلب عامل مهمی در رشد فشار منفذی بوده و معمولاً ناپایداری و ریزش توده خاک کناره‌ها در فرآیند فرسایش را موجب می‌شود. از آن‌جا که مواد تشکیل‌دهنده بستر و کناره‌ها عموماً به گروه خاک‌های معدنی تعلق دارند لذا آگاهی از ویژگی‌ها و خصوصیات رفتاری آن‌ها در مواجهه با پدیده‌های هیدرولیکی جریان و سایر کنش‌ها و واکنش‌های آبی و خاکی مرتبط با سازه‌های کنترل فرسایشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرسایش‌پذیری، تحکیم و تراکم‌پذیری، آماس‌پذیری، نفوذپذیری، مقاومت در مقابل بارهای استاتیکی و دینامیکی، لایه‌بندی، دانه‌بندی و بافت و ساختمان خاک از جمله ویژگی‌های مهم خاک‌هاست که در طراحی و تعیین ساختارهای فنی و سازه‌های کنترل و پیش‌بینی عملکرد آن‌ها و همچنین تجزیه و تحلیل فرایند فرسایش لازم است مورد توجه قرار گیرد.

درک این موضوع که هر نوع پوشش حفاظتی ساحل باید تا کف ادامه یابد و پی مناسب داشته باشد، اهمیت دارد. فیلتر ریزی کافی و متناسب با خاک زیرین، همچنین زه‌کشی با ظرفیت کافی نیز ضرورت دارد. وقتی از یک پوشش تراوا استفاده شده باشد، بدون آنکه هوا گرفتگی رخ دهد پوشش باید بتواند زه‌کشی مناسبی از شیب زیرین داشته باشد.

علاوه بر مطالعه رفتار هیدرولیکی و مورفولوژیکی رودخانه، توجه به نوع سازه‌های مورد استفاده در کنترل فرسایش رودخانه نیز دارای اهمیت است. برای مهار پدیده فرسایش می‌توان از سازه‌های انعطاف‌پذیر و یا صلب بهره‌جست. هر یک از این دو گروه سازه عکس‌العمل متفاوتی در برابر کنش‌های رودخانه از خود نشان می‌دهند.

۳-۱-۳-۱- پوشش انعطاف‌پذیر و پوشش صلب

سازه‌هایی نظیر گابیون، پوشش سنگی و سنگ‌ریزه انعطاف‌پذیری و پایداری بیشتری در مواجهه با عوارض ناشی از زیرکنی، فرسایش و گودافتادگی‌های موضعی و نشست تحکیمی خاک از خود نشان می‌دهند. در عین حال در ترکیب ساختاری آنها رعایت دقیق دانه‌بندی و لایه‌بندی مناسب و منطبق با طبیعت خاک بستر و کناره‌ها و متناسب با ویژگی‌های هیدرولیکی جریان از اهمیت خاصی برخوردار است. به‌علاوه بازبینی به‌موقع و تعمیر و نگهداری نقش مهمی در سلامت سازه‌های انعطاف‌پذیر داشته و کم توجهی به این امر استحکام و پایداری آنها را در مقابل عوامل فرسایشی به مخاطره انداخته و تخریب تدریجی سازه را موجب خواهد شد.

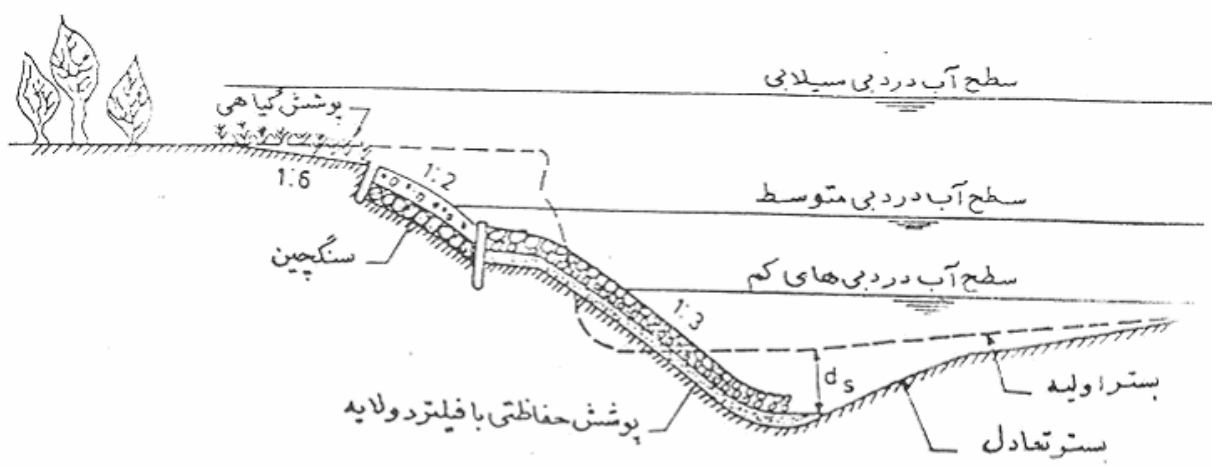
به‌منظور حفاظت پنجه لازم است پوشش تا عمق آبشستگی بستر[1] توسعه یابد. در صورتی‌که از سازه‌های با روکش انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود باید حداقل (۱/۵ تا ۲) برابر عمق آبشستگی در عرض بستر نیز گسترش یابد (کیون و همکاران[2]، ۱۹۷۷، چارلتون[3] ۱۹۸۲)

همچنین کاربرد فیلتر مناسب در زیر روکش‌های ساختمانی نفوذپذیر جهت سهولت تراوش آب از دیواره بدون خروج مواد ریزتر آن ضروری خواهد بود. نفوذپذیری سازه‌های روکش سبب می‌شود تا در زمان سیلاب و افزایش سطح آب، رسوبات به دیواره تزریق شده و پایداری را افزایش دهد (پترسن، ۱۹۸۶)

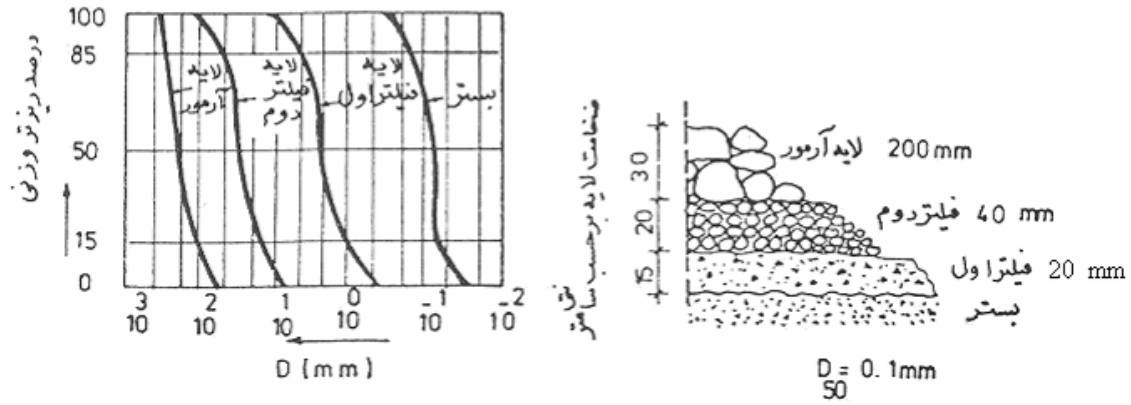
شکل (۸) نمونه‌ای از مشخصات پوشش حفاظتی با استفاده از روش سنگ‌چینی یا ریپ‌رپ به همراه جزئیات مربوط به دانه‌بندی مواد بستری و لایه‌بندی پوشش حفاظتی را به نمایش می‌گذارد.

---

[1] - Scour Depth
[2] - Keown, et.al
[3] - Charlton



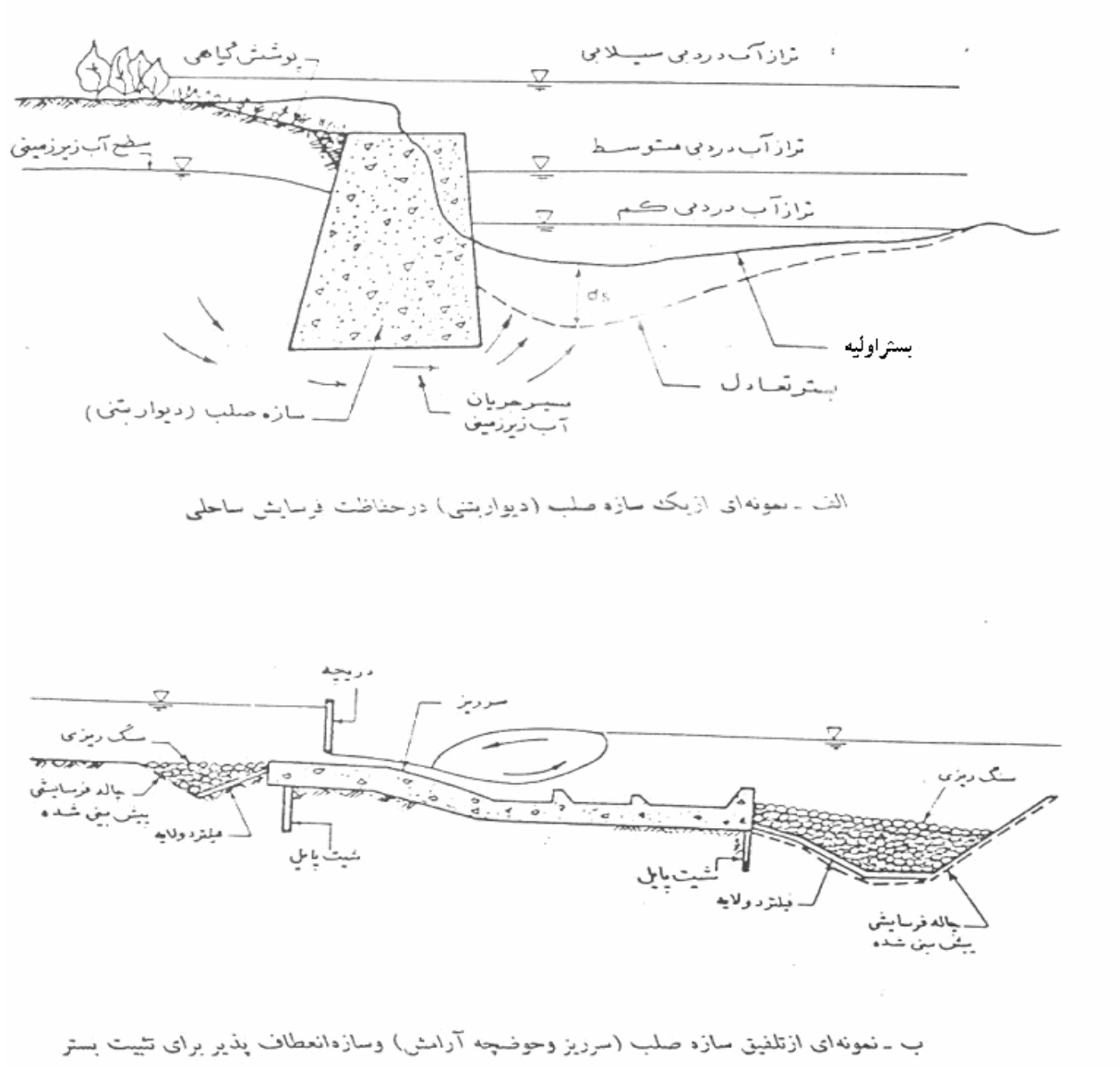
الف- مقطع پوشش حفاظتی سنگچین فیلتردار برای کنترل فرسایش کناره‌ها



ب- مشخصات دانه‌بندی بستر و لایه فیلتر و آرمور پوشش حفاظتی

شکل (۸)- نمونه‌ای از یک سازه انعطاف‌پذیر و جزییات فنی آن برای حفاظت کناره‌ها

از طرفی از مشخصه‌های بارز سازه‌های صلب، تنش‌پذیری بالنسبه زیاد آنها در برابر جریان‌های فرسایشی رودخانه است. به‌علاوه سازه‌های صلب از نظر ساختاری دارای استحکام خوبی بوده و از انسجام درونی بیشتری در مقایسه با سازه‌های انعطاف‌پذیر برخوردار هستند لکن در مواجهه با پدیده‌هایی چون زیرکنی، کف‌کنی و بطورکلی گودافتادگی‌های موضعی و نشست‌های ناشی از خصوصیات مکانیکی خاک اغلب دچار شکستگی و انفصال درونی شده و به اصطلاح آسیب‌پذیری و حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهند. از این رو در طراحی این سازه‌ها علاوه بر ملاحظات ساختاری، پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش و تحلیل دقیق رفتارهای مکانیکی خاک با توجه به نوع عوامل درون‌هیدرولیکی و برون‌هیدرولیکی از اهمیت زیادی برخورداراست. درشکل(۹) دو نمونه از سازه‌های صلب مورد استفاده در حفاظت و کنترل فرسایش کناره‌ها و بستر رودخانه به‌همراه بعضی از مشخصه‌های عمومی جریان نشان داده شده است.



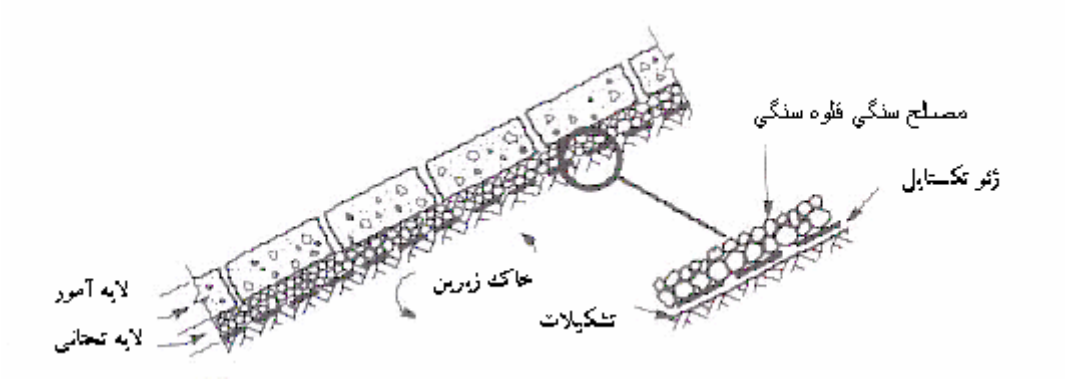
شکل (۹)- مواردی از سازه‌های صلب مورد استفاده در تثبیت بستر و کناره‌های رودخانه

بطورکلی روکش‌های ساختمانی نوع انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر مناسب‌تر هستند زیرا به‌تدریج با جذب رسوبات قابلیت تثبیت طبیعی و گیاهی را نیز فراهم می‌نمایند.

۳-۱-۳-۲- ساختمان پوشش

شیب جدارهٔ کانال رودخانه باید به اندازه‌ای باشد که در شرایط استاتیک جریان مقاومت داشته باشد و با استفاده از پوشش، مقاومت جداره در برابر نیروهای دینامیکی جریان نیز تأمین گردد. پوشش حفاظتی شامل لایهٔ آرمور، لایهٔ تحتانی و ژئوتکستایل[۱] می‌باشد که بر روی خاک شیب‌بندی شده قرار می‌گیرند (شکل ۱۰).

۱-Geotextile = زمین‌بافته



شکل (۱۰)- اجزای یک پوشش به صورت شماتیک

دوام پوشش همان طور که به کیفیت ساختمانی اجزاء آن بستگی دارد به طبیعت خاک زیرین آن وابسته است.

- ***لایهٔ آرمور***

لایهٔ آرمور موجب حفاظت جداره در برابر نیروهای فرسایندهٔ مستقیم جریانات، فعالیت موج یا دیگر عوامل خارجی مؤثر است. همچنین با ایجاد تنش طبیعی مثبت بر روی شکل خاک زیرین می‌تواند پایداری جداره را در برابر شکست‌های کم عمق نیز تضمین نماید.

دو نکتهٔ کلیدی مهندسی که در نگهداری لایهٔ آرمور در برابر جریانات و فعالیت امواج مؤثر است عبارتند از:

۱- نفوذپذیری- که تعیین‌کننده میزان حرکت آب بیرونی و فشار ناشی از جریانات یا امواج بوده و توسط خاک زیرین یا لایهٔ زیرین منتقل می‌شود.

۲- انعطاف‌پذیری- که قابلیت لایهٔ آرمور در برابر کوچکترین تغییرشکل‌های ناشی از نشست یا انتقال مواد لایه زیر است و در حفاظت مجموع پوشش حفاظتی نقش اساسی دارد.

- ***لایهٔ تحتانی***

این لایه شامل موادی است که بین لایهٔ آرمور و خاک زیرین شکل داده می‌شود و می‌تواند شامل مواد شنی، ژئوتکستایل یا ترکیبی از آنها باشد.

قسمت مهم فرآیند طراحی، معرفی صحیح تأثیرات بخصوصی است که از لایهٔ زیرین انتظار می‌رود. هرچند گاهی پوشش‌های حفاظتی در اثر انتقال بارهای بسیار زیاد بر لایهٔ آرمور شکسته می‌شوند اما اغلب شکست آنها در اثر تخریب لایهٔ زیرین است که عموماً در نتیجهٔ تجمع فعالیت نیروهای هیدرولیکی بر روی آن و عدم آمادگی کافی برای تحمل این نیروها رخ می‌دهد.

عواملی که لایهٔ زیرین در برقراری آن مؤثر است عبارتند از:

۱- به‌عنوان فیلتر عمل می‌کند تا از حرکت خاک در اثر عبور آب از داخل یا بیرون خاک زیرسطحی جلوگیری‌کند.
۲- به منظور زهکشی زیر لایه و خاک زیرین به موازات شیب پوشش
۳- به منظور حفاظت در برابر تغییر شکل ناشی از فرسایش توسط جریان سطحی روگذر به موازات شیب پوشش
۴- تنظیم سطح نامطلوب خاک و برقراری یک فوندانسیون مطلوب برای پوشش
۵- جداسازی لایهٔ آرمور و دیگر قسمت‌های لایه تحتانی از خاک زیرین
۶- ایجاد حفاظت ثانویه در حالتی که لایهٔ آرمور به هر دلیل از بین می‌رود
۷- اتلاف انرژی جریان عبوری از لایهٔ زیرین که توسط فعالیت جریان یا موج شدید به‌وجود می‌آید

- ***طبیعت نیروهای هیدرولیکی***

تأثیرات نشست‌پذیری نسبی

نگهداری پوشش حفاظتی ترکیبی، در برابر عوامل بیرونی امواج و جریانات یا در برابر حرکت تجمعی آب زیرزمینی، شدیداً به نیروهای هیدرولیکی مؤثر بر اجزای پوشش حفاظتی بستگی دارد.

قسمتی از انرژی آب با حرکت به داخل یا بیرون جداره و با عبور از لایهٔ آرمور یا زیرلایه تلف شده و این تلفات انرژی اغلب به نشست‌پذیری نسبی اجزای پوشش حفاظتی می‌انجامد.

تلاطم و نوسانات جریان

شرایط جریان در یک کانال می‌تواند متلاطم باشد. نوسانات سرعت جریان متلاطم در همهٔ جهات اتفاق می‌افتد. سطوح بالای تلاطم می‌تواند بر پایداری یک پوشش حفاظتی نشست پذیر طی نوسانات فشار در عرض لایهٔ آرمور مؤثر باشد. نوسانات سطح آب در رودخانه نیز موجب تغییر گرادیان فشار استاتیک خواهد بود.

- ***ضخامت لایهٔ پوشش***

ضخامت لایهٔ آرمور با توجه به دامنه تغییرات سطح آب و توزیع بار هیدرولیکی و تأثیر حفاظتی پوشش تعیین می‌شود و اغلب برای راحتی کار اندازه و نوع ساختمان مواد لایهٔ آرمور و لایهٔ زیرین را از پنجه تا تاج یکسان طراحی می‌کنند، ولی اطمینان از عملکرد پوشش لایهٔ حفاظتی در هر سطحی از آب برای مقاصد مورد نظر لازم و مقرون به صرفه خواهد بود.

برای مثال، در جایی که پوشش حفاظتی در برابر فعالیت موج عمل می‌کند، آرمور سنگین و لایهٔ تحتانی با ضخامت مناسب ضروری خواهد بود، اما در نواحی بالاتر (بالای ناحیهٔ اساسی حملات موج و جریان) می‌توان از ترکیب پوشش گیاهی و پوشش حفاظتی ضعیف‌تر بهره جست. (تعیین کننده حد تمایز منطقهٔ حملات موج و جریان)

۳-۱-۳-۳- روش طراحی

بسته به اینکه روش ترجیحی کدام باشد باید جزئیات طراحی و نقشه‌های مورد نیاز را تهیه نمود. در اینجا بطور خلاصه روش طراحی پوشش بیان می‌گردد. در طراحی پوشش قدمهای زیر برداشته خواهد شد:

- تعیین شرایط طرح (بارهای طرح، نوع حفاظت)
- انتخاب اولیه نوع پوشش
- بررسی پایداری ژئوتکنیکی ساحل
- بررسی پایداری خاک
- طراحی لایه پوششی رویین(آرمور)
- طراحی لایه تحتانی
- جزئیات تاج، پنجه و کرانه‌ها

جدا از خرابی و شکست سازه در اثر سرخوردن و یا فرسایش حاصل از نیروهای هیدرولیکی، اثرات تغییرشکل خاک زیرین باید مورد توجه قرار گیرد. تغییرشکل خاک زیرین در اثر شکست موضعی مقاومت خاک تحکیم یافته در درازمدت صورت می‌گیرد اکثر خاکها در سواحل رودخانه‌های ایران به استثنای خاکهای سیلتی ریز و خاکهای آلی دارای مقاومت تحمل وزن توزیع شده پوشش هستند. تحکیم خاک زیرین باعث نشست نامتجانس و نهایتاً باعث ایجاد حفره در زیرلایه آرمور و یا کاهش مقاومت خواهد شد مگر اینکه لایه آرمور دارای انعطاف‌پذیری مناسب برای تغییر شکل باشد. اگر خاک زیرین خیلی ضعیف باشد، یک پوشش سخت[1] که

[1]- Rigid

تشکیلات را توسط نیرو یا تاوه[1] به‌هم متصل نماید بکار گرفته خواهد شد. مدل‌های تحلیلی برای تعیین ابعاد پوشش‌ها تاکنون موفق نبوده است و طراحی بر اساس روابط تجربی که از مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی به‌دست آمده‌اند صورت می‌گیرد.

- ***ظرفیت تحمل خاک زیرین***

در بخشی کاملاً مجزا، پایداری خاک زیرین در برابر شکست به‌وسیله لغزش یا فرسایش ناشی از نیروهای هیدرولیکی و تأثیرات تغییر شکل خاک زیرین باید مورد ملاحظه قرار گیرد. تغییر شکل غیر قابل پذیرش می‌تواند ناشی از (۱) شکست تحمل موضعی خاک زیرین و یا (۲) نشست‌های ناخواسته کناره‌ها به‌دلیل تقویت لایهٔ زیرین خاک، طی یک دوره طولانی اتفاق بیافتد. بعضی از خاکهای سیلت ریز و خاکهای آلی (بخصوص پیت) دارای ظرفیت تحمل پایینی بوده و ممکن است در اثر وزن لایهٔ آرمور دچار نشست شوند. تقویت لایهٔ زیرین خاک حتی می‌تواند موجب نشست‌های ناخواسته کناره‌ها شده و موجب تهی سازی موضعی قسمت زیرین آرمور یا کاهش محدودهٔ تنش گردد. مگر اینکه لایهٔ آرمور انعطاف‌پذیر بوده و قابل تغییر شکل باشد.

۳-۱-۳-٤- طراحی لایهٔ آرمور

- ***انواع آرمور***

انواع ساختمان‌های زیر برای لایهٔ آرمور بکار رفته است:

۱- سنگ

(a) آرمور سنگ یا ریپ‌راپ، مخلوط درهم (به صورت تصادفی)

(b) سنگ‌های دست‌چین

(C) بنایی، تصادفی یا مرتب

(d) گابیون یا تشکل‌های سنگی با شبکه سیمی

۲- بتن

(a) بلوک‌های ساده، بلوک‌های درهم قفل شده

(b) بلوک‌های با کابل یا با ژئوتکستایل بسته شده

(C) قالب‌ریزی و ساختمانهای یکپارچه

(d) بتن محتوی نسوج پارچه‌ای

۳- ژئوتکستایل

(a) ترکیبات علفی- شبکه‌های چوبی، الیاف و حصیر

(b) حصیر بافی‌های سه بعدی

(C) الیاف دو بعدی

۴- آسفالت

(a) آسفالت سنگ‌ریزی شده و پر شده با ژئوتکستایل حصیری

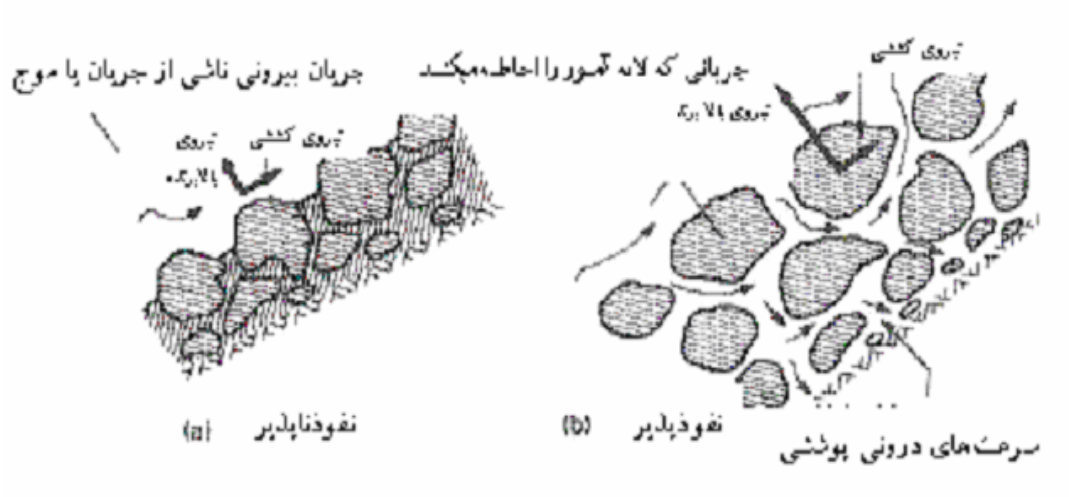
(b) آسفالت سنگ‌ریزی شده آزاد یا متراکم

[1]- Beam & Slab

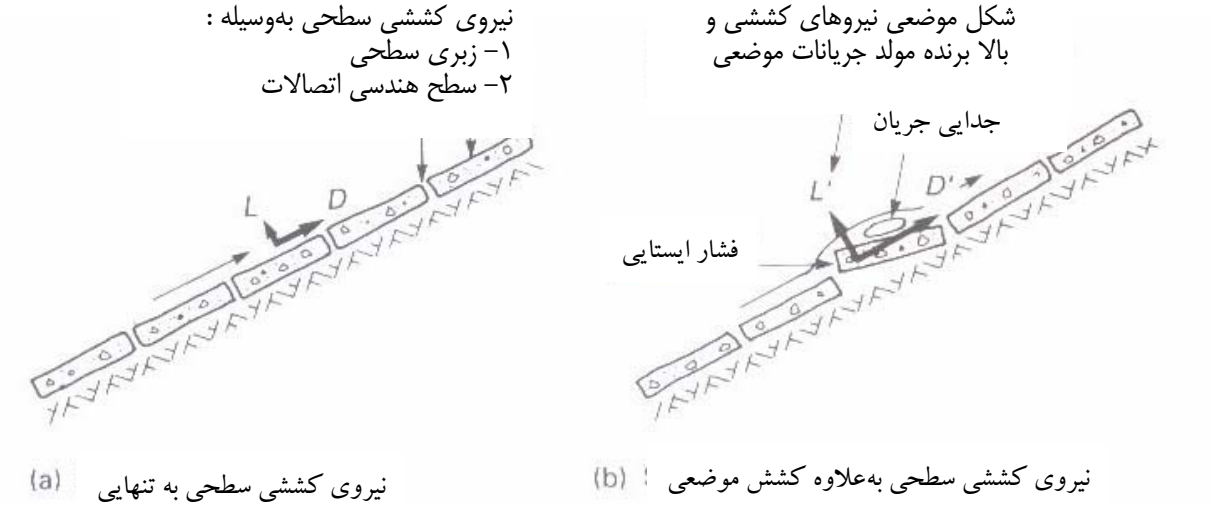
- **پایداری لایهٔ آرمور**

بارهای ناشی از عمل موج و جریان

نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از عملکرد جریان و موج بر روی لایهٔ آرمور متأثر از تعادل عناصر لایهٔ آرمور با هیدرولیک جریانی است که آن را احاطه کرده است. اگر لایهٔ آرمور نسبتاً نفوذ ناپذیر باشد، این جریان بطور قابل ملاحظه‌ای بیرونی می‌باشد. در این حالت، لایهٔ آرمور تحت تأثیر نیروهای پایدار ناشی از عمل موج، نوسانات فشار ناشی از تلاطم و نیروهای کششی ناشی از بالا و پایین آمدن موج یا جریان قرار می‌گیرد (شکل a–۱۱).
و اگر پوشش حفاظتی نسبتاً نفوذپذیر باشد (برای مثال ریپ‌راپ روی لایه زیرین به صورت هم اندازه) و جریان آب درون بدنه پوشش حفاظتی توسعه یابد (شکل b–۱۱)، در این صورت پتانسیل اتلاف انرژی در داخل پوشش حفاظتی وجود داشته و طراحی پوشش حفاظتی را بر روی لایه‌های زیرین مشکل‌تر خواهند نمود. و حتی می‌تواند بر پایداری لایه آرمور تأثیر معکوس بگذارد.



شکل (۱۱)- تأثیر نفوذپذیری لایهٔ آرمور بر روی نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر پوشش



شکل (۱۲)- تأثیر شکل لایه آرمور بر روی نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر پوشش

نتایج مدل‌های عددی (Bloavw et al 1989) نیز بیانگر آنست که اگر نفوذپذیری لایهٔ آرمور کاهش یابد و یا نفوذپذیری لایهٔ زیرین خاک کاهش یابد پایداری بلوک‌های حفاظتی افزایش می‌یابد.

روش طراحی موجود:

مدل‌های تحلیلی برای تعیین ابعاد پوشش هنوز برای اهداف طراحی عمومی توسعه نیافته است. در نتیجه عموماً طراحی بر اساس روابط تجربی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و تجربیات صحرایی و قضاوت مهندسی می‌باشد. معیار طراحی برای تعیین اندازهٔ آرمور در مقابل حملات جریان و امواج در قسمت‌هایی که مرتبط با انواع بخصوصی از پوشش است ارائه شده است. چنانچه شرایط موجود بارهای وارده نامتقارن و نامحدود باشد، طراحی محافظه‌کارانه‌تری به کار گرفته می‌شود.

فاکتورهای مؤثر در پایداری

پایداری لایهٔ آرمور در برابر بارهای هیدرولیکی ناشی از فعالیت موج، جریان، زهکش خاک زیرین یا حرکت آب زیرزمینی به همه یا بعضی از فاکتورهای زیر بستگی دارد:

۱- وزن و یا ابعاد قطعات لایهٔ آرمور؛ یا وزن واحد سطح آرمور یکپارچه.
۲- پشتیبانی حاصل از لایهٔ تحتانی یا خاک زیرین
۳- اصطکاک بین مرز قطعات لایهٔ آرمور و بین آرمور و لایهٔ زیرین یا شکل خاک زیرین
٤- نیروهای مؤثر در سطح پوشش
۵- شیب پوشش
٦- قفل شدن، درگیر شدن یا کابل‌بندی بین قطعات لایهٔ آرمور
۷- مقاومت برشی مکانیکی یا لنگر اندازی بین قطعات لایهٔ آرمور و خاک زیرین

با استفاده از ژئوتکستایل در لایهٔ تحتانی به‌ویژه بر روی شیب‌های تند، می‌توان از شکست لایهٔ آرمور به‌وسیله لغزش جلوگیری نمود. در یک تخمین اولیه برای پایداری در برابر لغزش، تحت شرایط آب ساکن و بدون بار اضافی رابطه زیر لازم است برقرار باشد:

$$tg\alpha \le \mu$$

α = زاویه شیب کناره μ = ضریب اصطکاک (بین آرمور، لایهٔ تحتانی و ژئوتکستایل)

ملاحظات مشابهی برای آرمور یا خاک زیرین که کمترین اصطکاک داخلی را داشته باشند بکار می‌رود.

۳-۱-۳-۵- طراحی لایهٔ تحتانی

مطالعات (Hewlett et al 1987., PIANC, 1987) نشان‌دهندهٔ این حقیقت است که اغلب شکست‌هایی که در پوشش رخ می‌دهد در نتیجه نگهداری نامناسب لایهٔ تحتانی می‌باشد و نه در اثر شکست مستقیم لایهٔ آرمور. هر چند هم‌اکنون ژئوتکستایل در سطح وسیعی به‌منظور فیلتراسیون، کنترل فرسایش و عوامل جدایش بکار می‌رود، مواد گرانولی هنوز دارای کاربرد عمومی در منظم‌سازی، اتلاف انرژی اضافی و اهداف ثانویهٔ حفاظت دارد. در بعضی مواقع ترکیبی از ژئوتکستایل و مواد گرانولی می‌تواند راه حل مؤثری تلقی گردد.

این موضوع تأکید می‌شود که ترکیب پوشش، زمانی مؤثر واقع خواهد شد که تماس خوب و محکمی بین لایهٔ تحتانی و خاک زیرین و لایهٔ آرمور برقرار شود. در این زمینه ممکن است برای جلوگیری از حرکت‌های موضعی خاک زیرین، از ژئوتکستایلی استفاده شود که دارای کمی انعطاف‌پذیری برای کشش و تغییر شکل باشد. الیاف بدون موج اغلب برای این منظور استفاده می‌شوند.

لازم است در شرایط طراحی به این توجه شود که جریان در طول پوشش و در راستای کانال، در روی شیب به سمت بالا و پایین و در جهت عمود بر شیب (به طرف درون و بیرون کناره) تأثیر گذار خواهد بود.

• طراحی فیلتر

وظیفه اصلی فیلتر جلوگیری از مهاجرت ذرات اولیه (عموماً خاک زیرین) می‌باشد به‌طوری که آب بدون اینکه تلفات انرژی قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، در عرض آن براحتی عبور نماید.

طراحی فیلتر مؤثر برای جریانهای ناپایدار بسیار مهم‌تر از جریان‌های دائمی است.

- فیلترهای ژئوتکستایل
- فیلترهای گرانولی

- فیلترهای ژئوتکستایل

درک کاملی از فرآیند فیزیکی، فیلتر نمودن توسط ژئوتکستایل موجود نمی‌باشد. اما به هر حال طراحی و نگهداری این فیلترها اصولاً به ویژگیهای خاک زیرین و ژئوتکستایل بستگی خواهد داشت.

الف) خاک

۱) ذرات خاک عموماً از الک خاصی عبور نمایند، ٪۲۱ وزن ذرات خاک از قطری که n درصد ذرات خاک زیرین (D_{nb}) راتشکیل می‌دهد،کوچکتر باشد.

۲) شاخص یکنواختی ($U= D_{60}/D_{10}$ شاخص یکنواختی)

۳) فشرده یا شل بودن خاک

۴) چسبنده یا غیرچسبنده بودن خاک

۵) نفوذپذیری خاک زیرین (k_b)، در جهت جریان

ب) ژئوتکستایل

۱- اندازه بازشدگی منافذ الیاف؛ n٪ منافذ کوچکتر از O_n باشد

۲- نوع الیاف ژئوتکستایل، موجدار یا بی موج

۳- نفوذپذیری ژئوتکستایل(ψ)

ویژگی‌های فیلتر ژئوتکستایل عموماً در نوع الیاف، اندازه منافذ و نفوذپذیری آن بیان می‌شود. برای شرایط جریان پایدار برای نگهداری خاک:

$$O_{90} < \lambda D_{90b}$$

که درآن:

O_{90} عبارت است از مقدار بازشدگی منافذ فیلتر، مقدار $\lambda = 1-2$ بسته به چگالی و یکنواختی خاک تغییر می‌کند و خاک‌های با یکنواختی بیش از ۵ برای ایجاد حالت خود فیلتره شدن بهتر عمل می‌کنند. PIANC (a ۱۹۸۷) مقدار حداقل ۰/۰۵ میلی‌متر را برای حداقل بازشدگی نیز پیشنهاد می‌کند. و بنابر توصیهٔ Ingold (۱۹۸۴) و Wittean , Heerten (۱۹۸۴) این بازشدگی از $0.3-0.5mm$ نباید تجاور کند.

در شرایط جریان ناپایدار برای نگهداری خاک زیرین:

$$O_{98} < D_{85b}$$

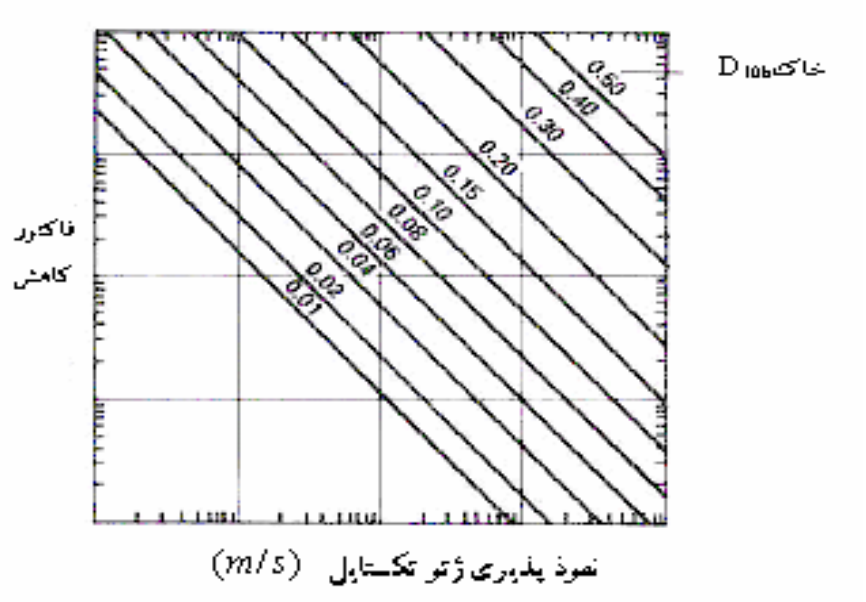
و در صورتی که خاک نیز غیر یکنواخت باشد برای نگهداری خاک زیرین:

$$O_{98} < D_{15b}$$

در صورتی که ناپایداری جریان بطور اتفاقی گاه‌گاهی رخ دهد این معیارها نادیده گرفته می‌شود.

نفوذپذیری ژئوتکستایل نیز لازم است برابر یا بزرگتر از میزان نفوذپذیری خاک زیرین باشد و یا می‌تواند بر اساس محدودیت مقدار قابل قبولی برای تلفات انرژی توسط این فیلتر طراحی شود.

هیرتن و وتیمن (۱۹۸۴) بر اساس یک روش تجربی رابطه‌ای بین η (فاکتور کاهش) و ψ (نفوذپذیری ژئوتکستایل بر حسب متر بر ثانیه) بدست آوردند (شکل ۱۳).



شکل (۱۳)- فاکتور کاهش نفوذپذیری در الیاف ژئوتکستایل موج‌دار

۱- برای الیاف بدون موج (سوراخ بزرگتر از ۲ میلی‌متر)n=0.02

۲- برای الیاف موج‌دار، فاکتور کاهش بستگی به نفوذپذیری ساخته شده و اندازهٔ ذرات خاک (D_{10b}) داردکه در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این معیار همچنین برای الیاف بدون موج نیز قابل کاربرد می‌باشد.

پس از تخمین فاکتور کاهش، نفوذپذیری ژئوتکستایل بدست آمده و با خاک زیرین مقایسه می‌گردد. PIANC (a ۱۹۸۷) فرض می‌کند که نرخ جریان عبوری در خاک و ژئوتکستایل برابر باشند در این صورت:

$$n\psi\Delta H = k_b i$$

که درآن:

ΔH: اندازه ارتفاع تلفات از طریق ژئوتکستایل

i=گرادیان‌هیدولیکی خاک

k_b= نفوذپذیری خاک در جهت جریان

ψ = نفوذپذیری ژئوتکستایل

فیلترهای گرانولی:

فیلترهای گرانولی در اندازه‌های بخصوصی بوده و در صورتی که ضرورت داشته باشد می‌توان بیش از یک لایه از آن را برای ایجاد فیلتر مناسب بکار گرفت. توجه به این نکته ضروری است که لایهٔ فیلتر باید دارای بافت یکنواختی باشد که ضمن وقوع عمل زهکشی ذرات ریزتر آن منتقل نشود.

برای خاک‌های نسبتاً یکنواخت (ضریب یکنواختی $u<5$) باید:

$$D_{50f} < 3 \text{ to } 5\, D_{50b}$$

که درآن:

D_{50f}: قطرمتوسط ذرات فیلتر

D_{50b}: قطرمتوسط خاک زیرین

برای خاک‌های با منحنی دانه‌بندی مناسب (u>10) لازم است:

$$D_{15f} < 3 \text{ to } 5\, D_{85b}$$

حد پایینی و بالا برای دو رابطهٔ فوق بستگی به نوع جریان دارد، بطوریکه در دو رابطه فوق درشرایط جریان غیر دائمی ازضریب ۳ و برای جریان‌های دائمی ازضریب ۵ استفاده می‌گردد.

اما برای کم کردن فاصلهٔ منحنی‌های دانه‌بندی فیلتر و خاک زیرین بهتر است رابطه ذیل رعایت گردد:

$$D_{50}\, f > 25 D_{50b}$$

در کلیه حالات فوق لازم است بطور تقریبی منحنی دانه‌بندی فیلتر به موازات منحنی دانه‌بندی خاک زیرین باشد. میزان نفوذپذیری خاک زیرین و فیلتر با اندازهٔ ذرات کوچکتر تعیین می‌شود. برای فیلتر نفوذپذیری بیشتری نسبت به خاک زیرین مورد نیاز می‌باشد.

$$D_{15\,f} < 5 D_{15b}$$

CUR-VB (۱۹۸۴) پیشنهاد می‌دهد که برای جلوگیری از بلوکه شدن، لازم است حداقل اندازهٔ ذرات ریز فیلتر، $D_{5\,f}$ بزرگتر از ۷۵ میکرومتر (۰/۰۷۵ میلی‌متر) باشد.

- ***زه‌کش***

زه‌کش مناسب می‌تواند شامل مصالح درشت‌دانه یا ژئوتکستایل با نفوذپذیری بالا باشد که به عنوان لایهٔ تحتانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای اطمینان از پایداری و عدم جابجایی ذرات در هنگام زهکشی لازم است:

$$D_{60\,f} \le 10 D_{10\,f}$$

ظرفیت هیدرولیکی زهکش باید به اندازه‌ای باشد که بتواند ضمن اتلاف مقدار قابل قبولی از انرژی، حداکثر جریان زهکشی را نیز از خود عبور دهد و این نیازمند تعیین ضخامت زهکش مصالح دانه‌ای است. طراح لازم است از برقراری ارتباط هیدرولیکی مناسب بین زهکش (قسمت زیرین پوشش) و قسمت بیرون کانال اطمینان حاصل کند تا از ایجاد حفرات یا بازشدگی در بدنهٔ لایهٔ آرمور جلوگیری شود.

- ***جلوگیری از فرسایش***

هنگامی که جهت جریان انتقالی در زیر زهکش (بر روی خاک زیرین) به موازات شیب جداره می‌باشد لازم است یا ذرات به اندازه‌ای باشند که در آستانهٔ حرکت قرار نگیرند و یا اینکه با لایه‌ای مثل ژئوتکستایل محافظت شوند. ژئوتکستایلی که برای جلوگیری از فرسایش بکار می‌رود دارای استحکام کمتری نسبت به ژئوتکستایلی است که برای فیلتر استفاده می‌شود.

- ***جدایی و نظم لایه‌ها***

وجود کلیه لایه‌ها در کنار یکدیگر با ضخامت و دانه‌بندی مناسب موجب می‌شود پوشش پایدار بماند.

- ***جابجایی ذرات خاک زیرین پایین شیب کناره***

در اثر ناپایداری گرادیان‌هیدرولیکی جریان، ذرات خاک زیرین پایین دست شیب کناره طی یک دورهٔ طولانی می‌تواند شسته شود. خاک‌های ریزدانه مثل سیلت، سیلت ماسه‌ای و ماسه‌ریز مستعد فرسایش هستند و معمولاً در اثر تغییر شکل موقعیت S شکل کناره به وقوع پیوسته که نهایتاً تخریب پوشش را به همراه دارد.

PIANC (۱۹۸۷ a) اظهار می‌دارد که خاک‌های ریزتر از ۰/۰۶ میلی‌متر که حداقل یکی از معیارهای ذیل را دارند می‌توانند مستعد فرسایش باشند:

۱- ضریب یکنواختی u<۱۵

۲- اندازه ۵۰٪ یا بیشتر ذرات در دامنه ۰/۰۲ تا ۰/۱ میلی‌متر باشد

۳- شاخص پلاستیسیته کمتر از ۰/۱۵

و روش‌های پیشنهادی به‌منظور جلوگیری از فرسایش توسط ایشان (PIANC) نیز عبارتند از:

۱- تخفیف تأثیر تغییرات گرادیان هیدرولیکی با استفاده از لایهٔ تحتانی دانه‌ای پیوسته با ضخامت حداقل ۱۰۰ میلی‌متر بین ژئوتکستایل و لایهٔ آرمور.

۲- پایدارسازی سطح خاک با استفاده از یک لایهٔ الیافی به ضخامت حداقل ۵ میلی‌متر در زیر ژئوتکستایل

در صورتی که پوشش از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار نباشد، پس از فرسایش اولیه، نرخ فرسایش ذرات به سرعت افزایش می‌یابد. به این دلیل ژئوتکستایل می‌بایست دارای مقدار وسعت نسبتاً کمی باشد.

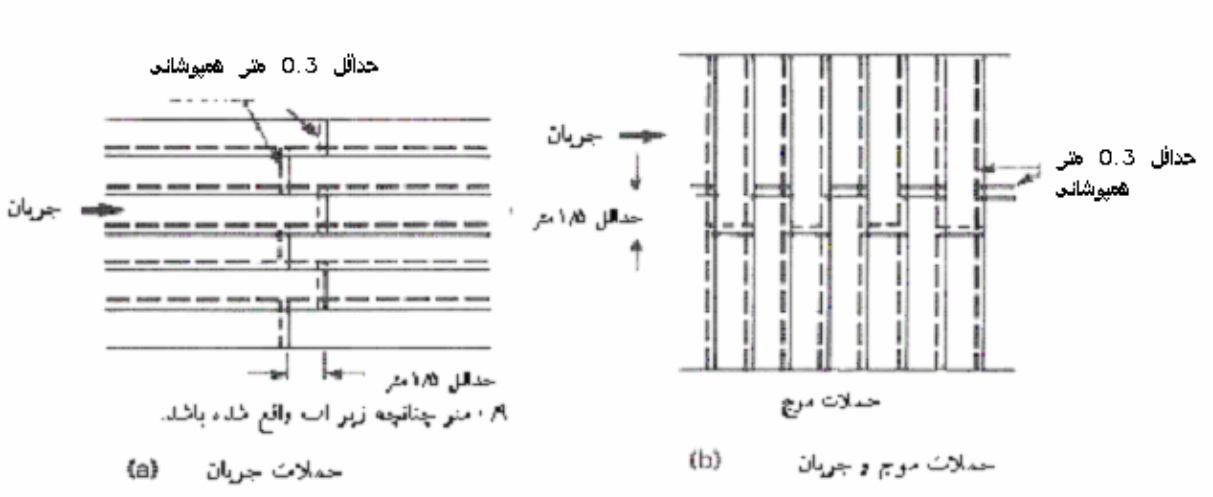
- ***اجزای ساختمانی***

نکات قابل توجه در بارهٔ اجزای ساختمانی عبارتند از:

۱- تماس کافی بین ژئوتکستایل و خاک زیرین برقرار شود.

۲- ژئوتکستایل در جهت تأثیر جریان غالب خوابانیده شده و با هم‌پوشانی کافی بر هم منطبق شوند.(شکل۱۴)

۳- نوارهای ژئوتکستایل به هم بسته یا دوخته می‌شوند.



شکل (۱٤)- نحوه قرارگیری ژئوتکستایل در کنارهٔ حفاظت شده رودخانه

۱- مصالح روی ژئوتکستایل بدون آنکه به این لایه آسیبی وارد کند ریخته شده و ژئوتکستایل نیز از استحکام و دوام کافی برخوردار باشد.

۲- مواد دانه‌ای روی ژئوتکستایل نباید دارای ضخامت کمتر از ۴/۵ میلی‌متر باشند. حداقل ضخامت لایهٔ شنی ۲ تا ۳ برابر حداکثر قطر ذرات آن باشد. در طراحی، استحکام موضعی و انعطاف‌پذیری هر دو مورد نظر می‌باشد.
۳- ریزش مواد دانه‌ای نباید موجب جدایی ذرات ریزدانه و درشت‌دانه شود.
۴- ضخامت هر قسمت به مصالح روی آن بستگی دارد به‌عبارتی وقتی سنگ صخره‌ای بر روی لایهٔ تحتانی دانه‌ای قرار می‌گیرد، ضخامت لایهٔ تحتانی نبایست کمتر از نصف اندازهٔ متوسط ذرات (D_{50}) مصالح رویین باشد

۳-۱-۳-۶- پوشش سنگریزه‌ای[1]

در این روش سنگ‌ها با دانه‌بندی معین روی شیب دیواره قرار گرفته و جهت آب‌شستگی احتمالی، ترانشه‌ای با عمق مناسب در پای دیواره حفر و با سنگ‌های درشت‌تر پر می‌گردد. شیب سنگ‌ریزی برای شرایط دست‌چینی حداقل(۱:۱/۵) و برای شرایط توده‌ای حداقل (۲:۱) می‌باشد (اداره راه کالیفرنیا[2] ۱۹۷۰).

جهت پیوستگی دانه‌بندی مواد دیواره با روکش سنگ‌ریزه‌ای، استقرار لایه فیلتر ضروری است که مشخصات و طراحی فیلتر توسط ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) و مهندسی امریکا (۱۹۷۸) گزارش شده توسط پترسون ۱۹۸۶ ارائه شده است. این روش برای شرایط مختلف رودخانه و سرعت‌های زیاد و همچنین در محدوده دیواره خارجی پیچ‌هایی با شعاع انحنای کمتر از ۱۰۰ یا ۱۵۰ متر یا حفاظت تأسیسات و نیز دیواره مقابل شاخه‌های فرعی ورودی مناسب و مؤثر می‌باشد (ریچاردسون و همکاران ۱۹۷۵ و گری ولیسر ۱۹۸۲ و کینوری و موواراش ۱۹۸۴).

این روش در شرایطی که سنگ با اندازه‌های مختلف و با خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مناسب فراهم باشد، اقتصادی‌تر بوده و بعلت انعطاف‌پذیری قابلیت ترمیم مجدد و نیز تثبیت طبیعی و گیاهی دارد. خصوصیات مصالح سنگی حداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در صورت اجبار از سنگ‌های گرد و قلوه‌ای بخصوص در محل ترانشه پنجه می‌توان استفاده کرد ولی اندازه سنگ‌ها درشت‌تر و زاویه قرارگیری شیب آن‌ها کمتر خواهد بود (پترسن ۱۹۸۶).

اندازه سنگ‌ها باید از توزیع یکنواخت و نرمالی برخوردار باشد و در عین حال از سنگ‌های بسیار درشت یا بسیار ریزدانه باید اجتناب نمود زیرا مانع از قفل شدن سنگ‌ها به یکدیگر شده و با افزایش سرعت باعث شستشوی سنگ‌های کوچکتر خواهد گردید. اندازه متوسط سنگ‌ها (D_{50}) بر اساس سرعت متوسط جریان و با روش تحلیل تنش برش بحرانی محاسبه می‌گردد. ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) و شن و وانگ[3] ۱۹۸۴ بر این اساس اندازه سنگ‌ها و دانه‌بندی مناسب آن را ارائه داده‌اند.

ضخامت سنگ‌ریزی بستگی به دانه‌بندی سنگ‌ها دارد. حداقل ضخامت سنگریزی ۳۰ سانتیمتر بوده و ترجیحاً باید دو لایه از ابعاد متوسط سنگ‌ها را در برگیرد. به‌عنوان معیار ضخامت روکش سنگ‌ریز ۱ تا ۱/۵ برابر اندازه سنگ ماکزیمم $T= (1\text{-}1.5)D_{max}$ و یا حداقل ۲ برابر اندازه متوسط سنگ‌ها ($T \geq 2D_{50}$) پیشنهاد شده است (اداره راه کالیفرنیا ۱۹۷۰ و مهندسی ارتش امریکا[4] ۱۹۸۱ و پترس ۱۹۸۶.

در شرایطی که نیروی موج یا عامل مواد جامد و شناور حضور دارند، ضخامت روکش حداقل ۱/۵ برابر اندازه ماکزیمم سنگ ($T \geq 1.5D_{max}$) و یا افزایش در حدود ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتر لازم خواهد داشت (گری ولیبر ۱۹۸۲ و مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۳

همچنین وقتی سنگ‌ریزی در زیر سطح متوسط آب انجام می‌گیرد ضخامت آن ۵۰ درصد افزایش می‌یابد (مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۳).

1- Riprap
2- State of California, Div of Highways
3- Kinori and Mevorach
4- U.S. Army corps of Engineers

- ***طراحی ریپ‌رپ Rip-Rap***

کلمه Rip-Rap به لایه جوشنی مواد سنگی که از معدن گرفته می‌شوند گفته می‌شود. کیفیت مهندسی ریپ‌رپ‌ها شامل آسان قراردهی آنها حتی در زیر آب، انعطاف‌پذیری، زبری هیدرولیکی بالا برای تلف کردن انرژی موج و جریان، نگهداری کم هزینه و مقاومت خوب آنها می‌باشد. اندازه استانداردی برای دانه‌بندی ریپ‌رپ موجود نیست اما بایستی شرایط زیر را دارا باشند.

$$\frac{W_{100}}{W_{50}} = 2 - 5$$

$$\frac{W_{85}}{W_{50}} = 1.7 - 3.3$$

$$\frac{W_{15}}{W_{50}} = 0.1 - 0.4$$

$$\frac{W_{85}}{W_{15}} = 4 - 12$$

زاویه اصطکاک ریپ‌رپ باید بین 35° to 42° و اندازه ضخامت لایه جوشنی ریپ‌رپ نبایستی از D_{50} 1.5 کمتر باشد و معمولاً 1.8 - D_{50} 20 انتخاب می‌گردد.

ریپ رپ بایستی دارای منحنی دانه‌بندی خوب و صافی باشد بطوری که ذرات کوچکتر از W_{15} موجب افزایش حجم خالی بین ذرات درشت صخره‌ای نگردد.

سنگ‌های گردگوشه نسبت به تیز گوشه از پایداری کمتری برخوردار بوده و بهترین شکل حالت بلوک مانند آن است. اغلب حداکثر ابعاد آن سه برابر کوچکترین آن است و از اشکال باریک و بلند باید پرهیز شود. هر چند که قرارگیری ریپ رپ توسط ماشین صورت می‌گیرد اما بهتر است پوشش خارجی را ذرات درشت‌تر تشکیل داده و قطر بلندتر بر روی شیب به طرف پایین‌دست قرار گیرد. اندازهٔ اسمی ذرات ریپ رپ به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{n50} = (\frac{W_{50}}{\gamma S})^{1/3}$$

که در آن:

S= چگالی ویژه سنگ

γ = وزن مخصوص آب

D_{n50} = قطر متوسط اسمی

ضخامت لایهٔ ریپ رپ نباید از γD_{n50} ۱/۵کمتر باشد و معمولاً بین ۱/۸ تا D_{n50} ۲ انتخاب می‌گردد.

- ***اندازهٔ ریپ رپ برای حملات جریان***

دو نکته دربارهٔ اندازهٔ ریپ رپ اهمیت می‌یابد اول آنکه اندازهٔ آنها به حدی باشد که با عبور جریان حرکت نکند دوم آنکه سرعت جریان عبوری از میان قطعات ریپ رپ به حدی برسد که موجب فرسایش در لایهٔ تحتانی یا خاک زیرین نگردد.

سطح صاف بهم چسبیده قطعات ریپ رپ پایدارتر از سطح زبر همراه با فاصله و بازشدگی است. اما در هر صورت نفوذپذیری لایه آرمور و باز بودن نسبی قطعات ضروری است.

همچنین زبری هیدرولیکی کنارهٔ محافظت شده نسبت به شرایط کنارهٔ طبیعی مجاور آن نباید کمتر باشد، در غیر این‌صورت در قسمت پایین‌دست بخش محافظت شده به دلیل افزایش سرعت موضعی جریان، احتمال وقوع فرسایش موضعی وجود خواهد داشت.

بر اساس رابطهٔ شیلدز

$$\psi_s = \frac{\tau_c}{\gamma(s-1)D}$$

ψ_s=آستانه حرکت مصالح زبری همچون گراول یا سنگ بطور تقریبی معادل ۰/۰۵ می‌باشد.

τ_c: تنش برشی بحرانی در بستر

فاکتور Ω_1 نیز نشان‌دهندهٔ کاهش پایداری ذرات روی شیب کناره می‌باشد که در نتیجه نیروی وزن رخ خواهد داد.

$$\Omega_1 = \frac{\tau_o}{\tau_c} = (1 - \frac{\sin^2 \propto}{\sin^2 \phi})$$

که درآن:

$\propto$: زاویه کنارهٔ کانال

ϕ: زاویهٔ اصطکاک ذرات

مقدار تنش برشی بحرانی روی کنارهٔ کانال در شرایط طبیعی از معادلهٔ زیر بدست می‌آید:

$$\tau_{\max} = \Omega_1 \times \psi_s \times \gamma(s-1)D_{n50}$$

(PIANC, 1987 a) و Pilarczyk (1984) رابطهٔ ذیل را برای محاسبهٔ اندازهٔ اسمی قطعات سنگی ریپ راپ ارائه نمودند:

$$\frac{D_{nso}}{d} = \left[\frac{\overline{V}_c}{E[g(s-1)\Omega_1\psi_s d]^{1/2}}\right]^{2.5}$$

که درآن:

E: ضریبی است که بستگی به درجهٔ تلاطم در کانال دارد. و برای تلاطم نرمال بین ۷ تا ۸ و برای تلاطم بالا همچون تلاطم در پیچ‌ها بین ۵ تا ۶ تغییر می‌کند.

$\overline{V}_c$: سرعت متوسط روی پنجه شیب کناره

d: عمق جریان در قسمت پنجه شیب

برای محاسبهٔ اندازهٔ اسمی ریپ رپ ابتدا مقداری به‌صورت آزمایشی برای آن فرض شده، زبری کانال نیز فرض می‌شود و متوسط سرعت جریان و عمق جریان محاسبه می‌گردد. (با استفاده از فرمول مانینگ یا رابطهٔ استریکلر (۱۹۲۳) $n = 0.041 D_{nso}^{1/6}$) سپس این مقادیر در رابطهٔ بالا قرار داده شده و اندازهٔ اسمی ذرات ریپ رپ بدست می‌آید این روش در جریان پایدار و کانال منظم به‌خوبی جواب داده و اندازهٔ اسمی ذرات پایدار ریپ رپ را بدست می‌آورد.

(Izbash, 1970) نیز رابطهٔ ذیل را برای پیش بینی ذرات پایدار ریپ رپ ارائه نمود:

$$D_{nso} = C\frac{V_c^{\,2}}{g(s-1)\Omega_1}$$

که درآن:

Vc: سرعت موضعی جریان در مجاورت یک ذره در آستانهٔ حرکت

مقادیر ضریب C بستگی به نوع جریان دارد. مقدار ۰/۳ برای تلاطم کم (جریان طبیعی رودخانه) ۰/۷ برای تلاطم زیاد (جریان‌های برگشتی ناشی از عبور قایق) و ۱/۳ برای جت‌ها (عبور دو قایق، به موازات هم یا بلافاصله پایین‌دست سازه کنترلی)

به صورت الگویی می‌توان مقادیر زیر را برای محاسبهٔ قطر ذرات ریپ رپ در نظر داشت:

۱- جریان تولید قایق، ۸/۵ m/s، تلاطم زیاد، D_{nso}=۰/۱۶m

۲- جریانهای رودخانه‌های آبرفتی، ۲m/s، تلاطم کم، D_{nso}=۰/۰۶m

۳- جریان‌های شدید رودخانه‌های آبرفتی، ۲ m/s، تلاطم کم، D_{nso}=۰/۲۱m

برای جلوگیری از فرسایش لایهٔ تحتانی نیز لازم است سرعت جریان مابین ذرات آرمور کاهش یابد. رگمون (۱۹۸۴) و آگوستینی (۱۹۸۵) رابطه مانینگ اصلاح شده را برای تخمین سرعت جریان میان مصالح آرمور یکنواخت پیشنهاد کردند:

$$V_b = \frac{1}{n_b}\left(\frac{D_{50}}{2}\right)^{2/3} s^{1/2}$$

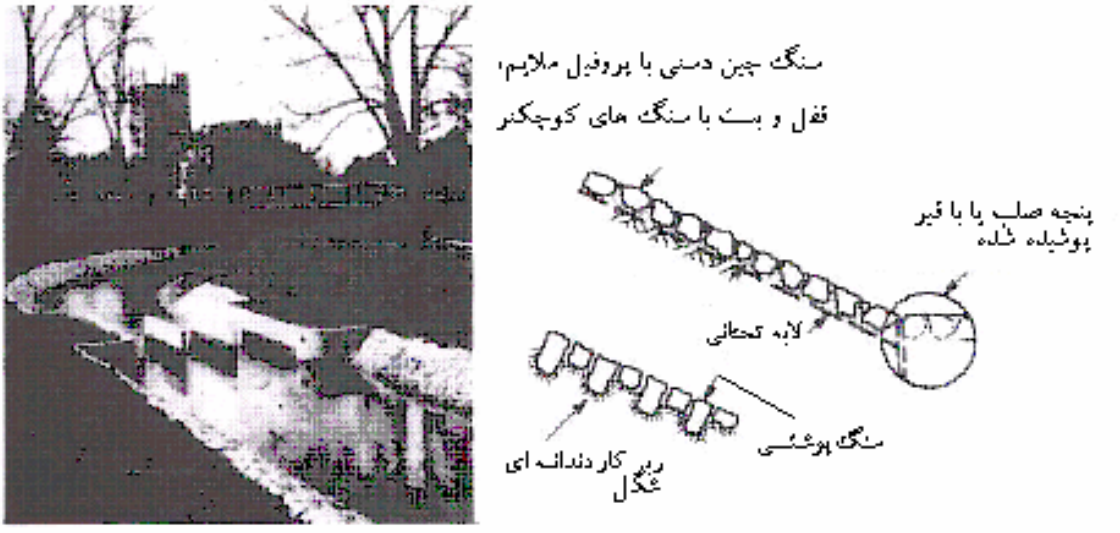
n_b: ضریب زبری مصالح (۰/۰۲ تا ۰/۰۲۵ ، ذرات درشت‌تر از شن)

۳-۱-۳-۷- دیگر پوشش‌های سنگی

- ***سنگ چین دستی***

این روش هر چند قدیمی است اما هنوز بکار می‌رود. سنگ‌چین در یک لایهٔ منفرد انجام شده به طوری که سطح مشهود رویین سطحی صاف و پهن می‌باشد. در این روش از سنگ‌های بخصوصی استفاده می‌شود. دو نمونهٔ آن سنگ فرش کنتیس و بازالت هستند که ابعاد (حدود ۲۲۵ میلی‌متر) و شکل مناسبی دارند.

این نوع سنگ‌ها بر روی خاک با نفوذپذیری کم مثل رس یا لایهٔ تحتانی مناسب خوابانیده می‌شوند. بدیهی است زیرسازی برای سنگ‌چین باید درست انجام شده باشد. فضای خالی بین تخته سنگ‌ها نیز با شن یا سنگ‌های تیز گوشه پر می‌شود. تخته‌سنگ‌ها بایستی کاملاً در کنار یکدیگر چیده شوند (اگر بر روی خاک زیرین مستقیماً گذاشته شود). در این روش مراقبت و نگهداری مدام، اصل اساسی در بهره‌برداری مناسب از این روش است. بکارگیری این روش، با استفاده از تخته سنگ‌های هم اندازه و یکنواخت، نسبت به کاربرد ریپ رپ، پایدارتر است. همچنین ضریب زبری نیز بدلیل سطح صاف این روش کمتر خواهد بود. در این روش، اگر چیدن به خوبی صورت گیرد اندازهٔ ذرات با ابعاد ۱۵٪ کوچکتر نیز جوابگو خواهد بود. برای چیدن تخته سنگها در قسمت استغراق ناگزیر، لازم است یا در هنگام کم آبی این کار صورت پذیرد و یا بند موقت در بالادست ساخته شود. در این روش پایدار سازی قسمت پنجه شیب با بکارگیری شکل ساختمانی مناسب ضروری است.



شکل ۱۵- پوشش سنگ‌چین دستی

- ***سنگ و سیمان و قیر***

بجای پر کردن فضای خالی بین تخته سنگهای چیده شده می‌توان از ملات سیمان یا آسفالت استفاده نمود. همچنین از مخلوط ریپ رپ و قیر معدنی نیز می‌توان استفاده نمود که این روش معمولاً در مهندسی سواحل برای حفاظت شیب‌های ملایم‌تر بکار می‌رود.

این روش باعث می‌شود که پوشش مثل یک لایهٔ یکپارچه عمل نماید.

به هر حال ملات ریزی سطحی (۳۰٪ سطح پوشش) می‌تواند مقدار اندازهٔ اسمی قطر سنگ‌ها را تا ۱۰٪ کاهش دهد و چنانچه سطح پوشش ملات تا ۶۰٪ افزایش یابد این قطر می‌تواند با ۴۰٪ کاهش قطر همراه باشد. در هر صورت بهتر است برای انتخاب اندازهٔ قطر سنگ‌ها جانب احتیاط را رعایت کرد. سطح ملات ریزی شده دارای زبری کمتری نسبت به سطح بدون ملات است و میزان زبری آن بستگی به چگونگی تلفیق ملات با سنگ‌ها دارد.

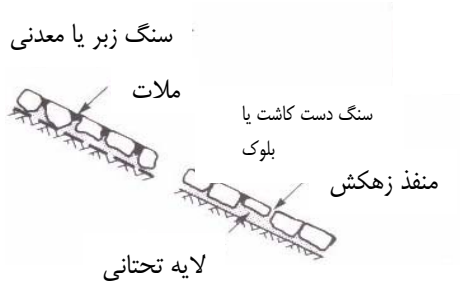
- ***ملات سنگ و آهک و قیر***

سنگ چینی همراه با ملات آهک اغلب برای قسمت‌های تبدیل ورودی و خروجی در کانال‌های کوچک بکار می‌رود. این روش کم‌هزینه بوده و کاربرد آن در مناطق شهری و نیمه روستایی نیز دارای جذابیت می‌باشد.

سنگ‌های همراه ملات یک سطح زبر را برای پوشش ایجاد می‌کند و معمولاً در کناره‌های کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرند و در جایی که ناگزیر شیب کناره لازم است زیاد باشد جایگزین ریپ رپ یا سنگ‌چینی خواهد شد.

پوشش صلب، نیازمند پی مناسب و یکدستی در قسمت پنجهٔ شیب است. هم‌چنین استفاده از میله‌های فلزی یا صفحات فلزی در قسمت پنجه شیب نیز مرسوم می‌باشد.

به دلیل آنکه این نوع پوشش نفوذناپذیر بوده و زه‌کشی آب از قسمت‌های درونی خاک به سمت رودخانه اغلب ضروری می‌باشد، ایجاد حفراتی در بین پوشش به منظور خروج آب داخل خاک اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. این موضوع در شکل (۱۶) نمایش داده شده است.



شکل۱۶- درز و حفره‌های بین پوشش صلب

- ***ملات سنگ و چسب آسفالت***

استفاده از چسب آسفالت و قیر معدنی از انعطاف‌پذیری بیشتری در پوشش نسبت به سیمان برخوردار است. قیر معدنی باید در محیط خشک ریخته شود اما چسب آسفالت در شرایط خیس و حتی غرقاب نیز دارای کاربرد می‌باشد.

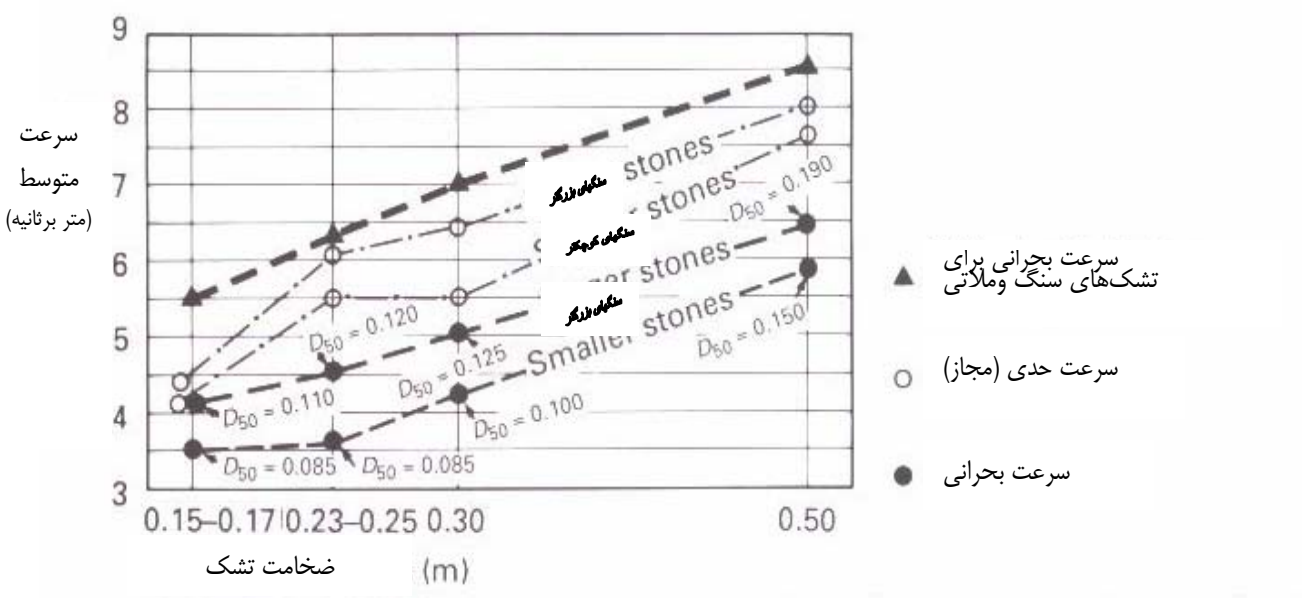
- ***پوشش توریسنگی (گابیونی)***

تشک‌های گابیونی به‌صورت گسترده‌ای برای حفاظت کناره مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این روش نسبت به پوشش سنگی و ریپ رپ باعث می‌شود قطر و ضخامت سنگ و لایهٔ سنگی کاهش یابد همچنین مزایایی چون استفاده از سنگ‌های طبیعی و قابل دسترس، انعطاف‌پذیری و مانند آن نیز در این روش وجود دارد. استفاده از سنگ‌های کوچکتر برای پوشش همچنین باعث می‌شود که سرعت جریان بین سنگ‌ها کمتر از سرعت جریان بین لایه آرمور باشد و این به معنای نیاز کمتر به مراقبت برای جلوگیری از فرسایش در این شیوه است و همچنین زبری هیدرولیکی نیز کمتر خواهد بود. استفاده از شبکهٔ تورسیمی باعث می‌شود که به‌منظور در آستانهٔ حرکت قرار گرفتن ذرات، به دو برابر تنش برشی نیاز باشد. البته جابجایی

ذرات کوچکتر تشک‌های گابیونی می‌تواند موجب تغییر شکل و موقعیت تشک گردد. بنابراین در این شرایط اطلاع از دو مقدار زیر در انجام طراحی مورد نیازاست:

۱) آستانه حرکت سنگ و ۲) حرکت اولیهٔ سنگ‌های رویین که موجب تغییر شکل تشک گابیونی می‌شود.

از لحاظ کنترل فرسایش، فاکتور محدود کننده آنست که در قسمت‌هایی از تشک که ضخامت آن کاسته می‌شود احتمال وقوع فرسایش موضعی برای خاک زیرین وجود دارد. عملاً یکنواخت نبودن سطح کار تغییر شکل یافته می‌تواند کارایی سازه را کاهش دهد. از طرفی افزایش قطر سنگ‌ها هزینه را افزایش خواهد داد لذا بسته‌بندی خوب گابیون در کلیه حالات بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۱۷- اطلاعات مربوط به اندازهٔ سنگ و ضخامت گابیون مورد نیاز برای سرعت متوسط جریان به منظور حفاظت بستر کانال

ضخامت تشک گابیونی نباید کمتر از D_{n50} ۱/۵ باشد. شاخص حداکثر قطر سنگ‌ها و ضخامت تشک گابیونی برای انواع تشک و جعبه‌ای در جدول ذیل آمده است:

جدول شماره ٤ - شاخص قطر سنگ و ضخامت تشک گابیونی

نوع گابیون اندازهٔ تورسیمی (mm)	ضخامت (m)	اندازهٔ سنگ دامنه (mm)	D_{so} (mm)
تشک‌ها	۰/۱۵–۰/۱۷	۷۰–۱۰۰	۸۵
۵۰×۷۰/۶۰×۸۰	۰/۲۰–۰/۲۳	۷۰–۱۵۰	۱۲۰
جعبه‌ای	۰/۲۵–۰/۳۰	۱۰۰–۱۶۰	۱۳۰
۸۰×۱۰۰/۱۰۰×۱۲۰	۰/۵۰	۱۲۰–۲۵۰	۱۹۰

تشک‌های گابیونی در برابر امواج ناشی از باد یا حرکت قایق نیز مقاومت مؤثری از خود نشان می‌دهند. (Brown, 1979) رابطهٔ تجربی ذیل را برای ضخامت تشک گابیونی در شیب‌های تندتر از ۱ به ۳/۵ ارائه می‌نماید:

$$t = \frac{H_i}{3(1-n_r)(S-1)\cot g\alpha}$$

که درآن:

t: ضخامت تشک گابیونی(متر) ، n_r: میزان تخلخل سنگ‌ها (۰/۴۰-۰/۱۵)

- **روکش توریسنگ[1]**

وقتی سنگ با اندازه‌های بزرگ و دانه‌بندی مناسب فراهم نباشد می‌توان از سنگ‌های کوچکتر و حتی قلوه‌ای نیز استفاده کرد. در این صورت برای افزایش پایداری و تأمین کشش لازم از سبدهای تورسیمی استفاده می‌گردد. از اینرو سازه گابیونی انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر خواهد بود و نیاز فیلتری آن محدودتر از روش سنگریز می‌باشد. این روش از سال ۱۹۶۰ در امریکا رواج یافته در حالیکه در اروپا و آسیا استفاده گسترده‌ای داشته است. (مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۱). سازه توریسنگ به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع پلکانی شکل که برای دیواره‌های حائل، آب‌شکن‌ها و یا کف‌بند و سرریزهاست و نوع روکش که با ضخامت کم برای حفاظت شیب‌های دیواره بکار می‌رود.

در نوع پلکانی، سبدهای تورسیمی[2] با ابعاد معمولی (۲×۱×۰/۵) متر در کنار هم قرار گرفته و بعد از پر شدن ازسنگ، باید به سدهای مجاور خود سیم‌پیچی شود. ماکزیمم اندازه چشمه توری‌ها ۴/۵ اینچ (یا حدود ۱۰ سانتی‌متر) است و اندازه سنگ‌ها، حداقل ۷/۵ سانتیمتر و حداکثر ۴۰ سانتیمتر بوده ولی اندازه‌های ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر مناسب تر هستند (گری ولیسر، ۱۹۸۲ و پترسن،۱۹۸۶) برای بهبود شرایط پی و انعطاف‌پذیری سازه پیشنهاد می‌شود که پیش‌بندی با طول حداقل ۲ متر و ضخامتی معادل ۱/۵ تا ۲ برابر عمق آب شستگی احتمالی منظور شود (اداره راه کالیفرنیا، ۱۹۷۰ و مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۱).

در صورتی‌که از دیواره توریسنگی حائل استفاده می‌شود لازم است پشت آن با مواد درشت‌دانه شنی با قابلیت زه‌کشی مناسب پر شود (گری ولیسر، ۱۹۸۲). در نوع روکش[3]، ضخامت تورسیمی معمولاً کمتر از ۳۰ سانتیمتر و ابعاد (۳-۲)×(۱)×(۰/۳-۰/۱۵) متر می‌باشد. (مک کافری، ۱۹۸۵ و پترسن ۱۹۸۶). در این روش ابتدا شیب دیواره حداقل (۱/۵: ۱) اصلاح شده و یک نوار تورسیمی روی شیب قرار گرفته و برای اطمینان از اینکه توریسنگ شکم ندهد در فواصل ۸۰ تا ۱۰۰ سانتیمتری سیم‌های اتصال با طول حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتر بیرون نگهداشته می‌شود. سپس سنگ‌ها را با تراکم مناسب ریخته و نوار توری رویین را پهن نموده و سیم‌های اتصال فوق را به‌خوبی و بطور متقاطع می‌پیچند. همچنین برای مهار کردن[4] روکش و جلوگیری از لغزش آن از میل‌های فولادی که به فواصلی و با عمق ۸۰ سانتی‌متر در سطح بالای دیواره کوبیده خواهد شد، استفاده می‌شود (کینوری و موارش، ۱۹۸۴). در صورت لزوم برای پیوستگی دانه‌بندی مواد دیواره با روکش کاربرد فیلتر اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. این روش برای سرعت‌های ماکزیمم ۲/۴ تا ۴/۵ متر مؤثر خواهد بود. (پترسن، ۱۹۸۶ و کینوری و موارش ۱۹۸۴). کمپانی مک کافری (۱۹۸۵). ضوابط طراحی انواع روکش‌های توریسنگی و نیز سازه‌های پلکانی و همچنین مراحل ساخت آن توسط کمپانی مک کافری (۱۹۸۵) ارائه شده است. مطابق این بررسی در شرایط یکسان ضخامت روکش توریسنگی حدود یک سوم تا یک چهارم روکش سنگریزه‌ای بوده و اقتصادی‌تر نیز خواهد بود. تورهای سیمی با ضخامت‌های (۵-۳) یا (۳-۲) میلیمتر و ابعاد چشمه (۸-۷) یا (۶-۵) سانتیمتر بوده و به‌منظور جلوگیری از زنگ‌زدگی و پوشیدگی پوشش گالوانیزه (روی) داشته و برای شرایطی که خطر خورندگی شیمیایی آب باشد علاوه بر پوشش گالوانیزه لزوم پوشش پلاستیکی (PVC) نیز خواهد بود.

به‌منظور حفاظت از آبشستگی احتمالی پنجه دیواره، روکش گابیونی با طولی بیش از دو برابر عمق آبشستگی احتمالی در عرض بستر و در کف گسترده خواهد شد در غیر این صورت لزوم حفاظت پنجه تا عمق ۱/۵ تا ۲ برابر آبشستگی ضروری خواهد بود. در خصوص شرایط استفاده از توریسنگ، ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) گزارش نموده‌اند که در رودخانه‌هایی که بار کف آنها شن و

1- Gabion Mattress
2- Basket
3- Mattress
4- Anchor

قلوه‌سنگ است خطر زنگ زدگی و خوردگی شیمیایی وجود دارد. جاجی و اسمارت[1] (۱۹۸۲) استفاده از توریسنگ را برای رودخانه‌های بستر شنی، بطورکلی توصیه نمی‌کنند. زیرا در جریان سیل و در اثر برخورد سنگ و مواد شناور و تنه درختان دچار پارگی و گسیختگی می‌شوند و با سایش مکانیکی مواد درشت‌دانه بار کف به‌تدریج پوشش گالوانیزه و پلاستیکی آن از بین می‌رود و علاوه بر آن روستاییان نیز سیمها را باز کرده و می‌برند. چارلتون (۱۹۸۲) برای محافظت پوشش توریسنگ در برابر خسارات ناشی از سایش و خطر پیچیدگی گیاهان و شاخه درختان در تورسیمی پیشنهاد می‌کند که از مواد پرکننده انعطاف‌پذیر نظیر آسفالت استفاده شود.

ملات

پایداری گابیون در ترکیب با ملات چسب آسفالت افزایش خواهد یافت که با کاهش نفوذپذیری، انعطاف‌پذیری و زبری هیدرولیکی همراه خواهد بود.

جدول شماره ۵ ضخامت روکش توریسنگ در ارتباط با سرعت جریان

ضخامت روکش (سانتیمتر)	اندازه سنگ‌ها (سانتیمتر)		سرعت بحرانی[2] (متر در ثانیه)	سرعت ماکزیمم[3] (متر در ثانیه)
	محدوده	متوسط (D_{50})		
۱۵-۱۷	۷-۱۰	۸/۵	۳/۵	٤/۲
	۷-۱۵	۱۱	٤/۲	٤/۵
	۷-۱۰	۸/۵	۳/٦	۵/۵
۲۳-۲۵	۷-۱۵	۱۲	٤/۵	٦/۱
	۷-۱۲	۱۰	٤/۲	۵/۵
۳۰	۱۰-۱۵	۱۲/۵	۵	٦/٤
	۱۰-۲۰	۱۵	۵/۸	۷/٦
۵۰	۱۲-۲۵	۱۹	٦/٤	۸

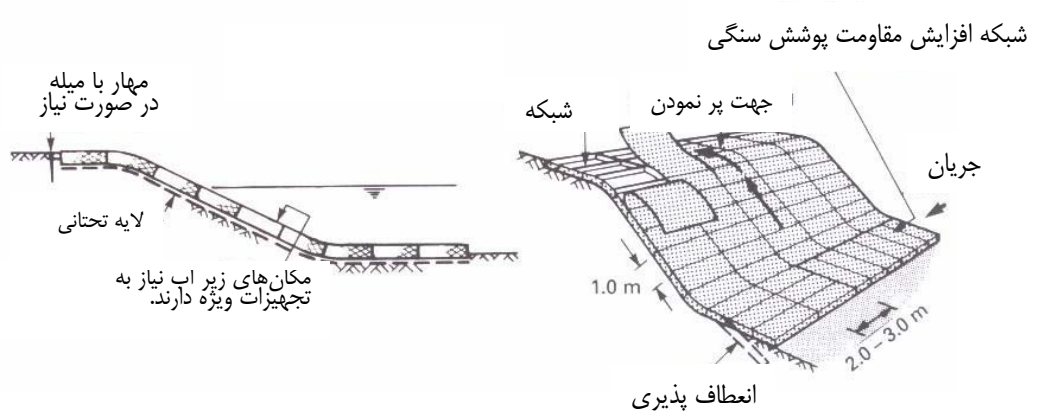
ساختمان سازهٔ گابیونی

تشک‌های گابیونی بر روی شیب‌هایی کمتر از ۱ به ۱/۵ از روی ساحل جداره (بالاتر از قسمتی که نیاز به محافظت دارد) تا قسمتی از کف مجاور کناره پوشش داده می‌شود. واحدهای تشک گابیونی قبل از پر شدن با سنگ به یکدیگر دوخته می‌شود.

1- Jaggi and Smart

۲- سرعت بحرانی عبارتست از سرعت متوسط در پایداری سنگهای ریزدانه درون روکش، در شرایط مطلوب

۳- سرعت ماکزیمم، حد نهایی پایداری روکش با تغییر فرم جزئی شیب دیواره با بستر روکش از (۱/۵: ۱) برای مواد چسبنده و معمولی تا (۲: ۱) برای مواد غیر چسبنده ماسه‌ای متغیر است.

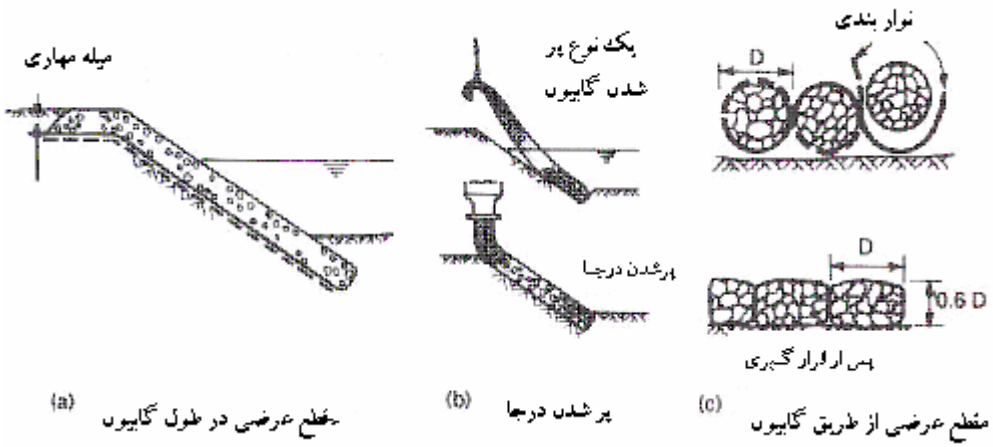


شکل (۱۸)- پوشش تشک گابیونی

اگر عمق جریان بیش از نیم متر باشدلازم است گابیون‌ها قبلاً سرهم‌بندی شده و توسط جرثقیل و یا لغزاندن جاگذاری شود. در صورتی‌که از الیاف ژئوتکستایل برای لایهٔ تحتانی گابیون استفاده شود بهتر است به‌جای پر کردن و جاگذاری تشک‌ها یا جعبه‌های گابیونی، آن‌ها را با این الیاف به‌هم متصل نمود.

گابیون لوله‌ای

این گابیون‌ها از گره‌های پلیمری بافته شده و می‌توان آن‌ها را بر روی شیب کناره خوابانید (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- پوشش گابیون لوله‌ای

این نوع پوشش توسط Hall (۱۹۸۴) شرح داده شده و کاربرد زیادی نداشته است.

۳-۱-۳-۸- پوشش بتنی مفصل‌دار

روکش بتنی صلب علاوه بر هزینه زیاد و پیچیدگی فنی، تخریب‌پذیر نیز هست. در این روش روکش بتنی به‌صورت بالشتک‌های بتنی مفصل‌دار بوده که علاوه بر تأمین حفاظ پایدار، قابلیت انعطاف و نفوذپذیری دارد. هر بالشتک[1] به‌صورت یک واحد

[1] - Slab

بتنی مسلح و پیش‌ساخته با ابعاد (۱۰۰×۳۵×۷/۵) سانتیمتر می‌باشد. هر واحد آن متشکل از بیست بالشتک با سطح کل (۱/۲×۷/۵) متر بوده که توسط کابل یا میل گردهای گالوانیزه و مقاوم به خوردگی به‌هم لولا می‌شوند. حد فاصل بالشتک‌ها حدود ۲/۵ سانتیمتر است که این درز باعث شستشو مواد و فرسایش دیواره می‌شود. از اینرو لبه‌های بالشتک را ترجیحاً گوشه‌دار و V شکل می‌سازند تا سطح درزها از ۱۰ درصد به ۱ درصد کاهش یابد (مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۱). به همین دلیل کاربرد لایه فیلتر زیر آن ضروری می‌باشد. برای حفاظت آبشستگی پنجه، روکش با طول حداقل ۲ برابر عمق آبشستگی احتمالی در عرض بستر گسترش می‌یابد. این روش برای شرایط سرعت‌های زیاد جریان و در رودخانه‌های بزرگ و دائمی مناسب بوده ولی برای رودخانه‌های کوچک توصیه نمی‌شود. زیرا هزینه آن زیاد و امکانات و تجهیزات پیچیده‌ای نیز می‌خواهد (ریچاردسون و همکاران ۱۹۷۵ و مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۱). پترسن (۱۹۸۶) این روش را تنها برای رودخانه‌های دائمی و بزرگ که عمق آن ۲۱ تا ۴۲ متر بوده و سرعت جریان بیش از ۲/۴ متر در ثانیه باشد و عمق آبشستگی تا ۵۰ درصد عمق مقطع پر گسترش می‌باشد، قابل توصیه می‌داند هر چند که نیازمند ارزیابی اقتصادی خواهد بود.

۳-۱-۳-۹- پوشش کیسه‌ای[1]

در این روش کیسه‌هایی از بافت کرباس یا کنف[2] از موادی نظیر: خاک، مخلوط خاک- سیمان[3]، ماسه با مخلوط ماسه- سیمان (بتنی)[4]، پر شده و به‌ترتیب خاصی روی شیب دیواره چیده می‌شوند. ابعاد کیسه‌ها معمولاً (۹۰×۴۵) سانتیمتر بوده و حجمی معادل ۰/۰۲۷ متر مکعب دارند. در چیدن کیسه‌ها باید حداقل ۱۵ سانتیمتر تطابق وجود داشته و مانند آجرچینی در هم قفل شوند. شیب دیواره و کارگذاری کیسه‌ها حداقل (۱/۵: ۱) و در حالت مطلوب (۲: ۱) می‌باشد. کیسه‌ها تا عمق آبشستگی و حداقل ۱/۵ متر زیر کف بستر چیده می‌شوند. کیسه‌ها باید کم حجم بوده و منظم چیده شوند تا سطح صافی را ایجاد نمایند (اداره راه کالیفرنیا، ۱۹۷۰ و پترسن ۱۹۸۶).

کیسه‌های کنفی به‌زودی پوسیده می‌شوند، بنابراین کیسه‌های حاوی خاک عمر کوتاهی داشته و متلاشی خواهند شد از اینرو تنها برای اهداف اضطراری نظیر کنترل سیلاب و حفاظت تأسیسات آبی از خطر سیل مفیدند. تنها کسیه‌هایی که از مخلوط خاک- سیمان یا شن و ماسه-سیمان (بتنی) پر شدند برای حفاظت دراز مدت دیواره‌ها توصیه می‌شوند (مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۱ و پترسن، ۱۹۸۶). هزینه ساخت روکش کیسه‌ای زیاد است و تنها در شرایطی که سنگ موجود نبوده ولی مصالح شن و ماسه رودخانه فراهم است، قابل طرح می‌باشد. در هر حال تکنیک کار آن ساده بوده و طراحی آن نیز مستقل از سرعت جریان می‌باشد. مخلوط خاک-سیمان، حاوی ۸ تا ۱۵ درصد سیمان پرتلند است (شن، ۱۹۸۴). جهت سهولت کار پیشنهاد می‌شود که اولاً ابعاد کیسه نصف شود تا قدرت حمل آن توسط یک نفر میسر باشد. و ثانیاً می‌توان خاک یا شن و ماسه را با سیمان بطور خشک در کیسه ریخته و پس از جاگذاری با آبپاش و یا جذب رطوبتی- بخصوص در شرایط زیر سطح آب- عمل گیرش در آن صورت گیرد (اداره راه کالیفرنیا، ۱۹۷۰).

۳-۱-۳-۱۰- پوشش آسفالت[1]

وقتی مصالح ماسه‌ای در رودخانه و نیز فرآیندهای نفتی و قیری موجود باشد از روکش آسفالت برای حفاظت سطح دیواره- در بالاتر از حد سطح متوسط کم آبی- استفاده می‌شود. که انعطاف‌پذیری کمی داشته و نفوذناپذیر می‌باشد. در این روش ماسه- آسفالت گرم با ضخامت ۱۲/۵ سانتیمتر روی شیب دیواره (۳: ۱) ریخته می‌شود. بستر آسفالت‌ریزی نیاز به فیلتر‌ریزی دارد. ضخامت زیاد فوق

---

[1] - Sack Revetment
[2] - Burlap Bags
[3] - Soil-Cement
[4] - Concrete Sack
1- Asphalt Mattress

به‌دلیل میزان فرسایش آسفالت است که نتایج نشان می‌دهد که شدت آن (۳-۱/۵) میلیمتر در سال می‌باشد. از اینرو و بعد از گذشت بیست سال، ضخامت مطلوب ۵ سانتیمتر را تأمین خواهد کرد.

این روش برای سرعت جریان بیش از ۲ متر در ثانیه مناسب نبوده و از معایب آن نفوذناپذیری سازه و اعمال نیروی تراوش آب بعد از وقوع سیلاب است مگر آنکه لوله‌های زهکشی یا درزهای تخلیه در آن پیش‌بینی شود (مهندسی ارتش امریکا، ۱۹۸۱).

۳-۱-٤- دیوارهای وزنی

در این فصل راجع به دیوارهای نگهدارندهٔ عمودی و طراحی آن که شامل سازه‌های وزنی و سازه‌های ستونی (از طریق شمع‌کوبی) می‌باشد بحث خواهد شد.

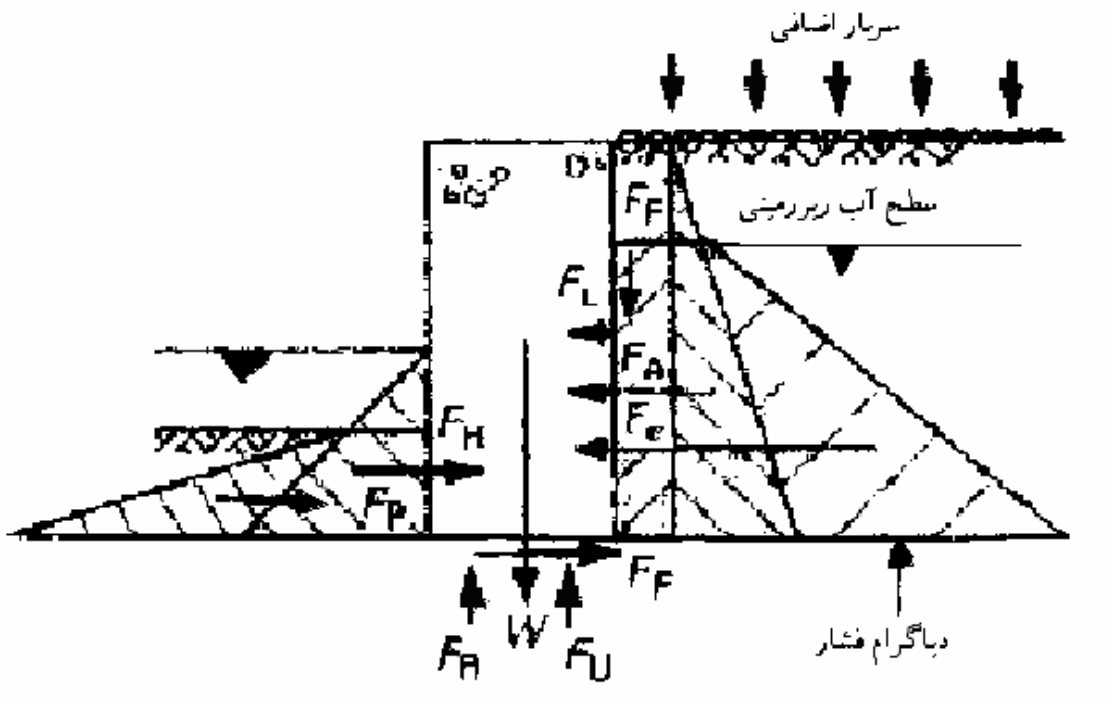
اصولاً کناره‌های رودخانه که دارای شیبی تندتر از زاویهٔ ایستایی خاک طبیعی باشد در درازمدت مستعد ریزش خواهد شد. کناره‌های تند رودخانه فقط در صورتی که دارای خاک چسبنده یا ترکیبی از خاک و سنگ با مقاومت فرسایشی بالا باشد می‌تواند بدون مسلح شدن در شرایط پایدار باقی بماند و در صورتی که شیب تند کناره رودخانه برای مدتی طولانی در معرض فرسایش باشد، لاجرم نیاز به محافظت فیزیکی خواهد داشت. در طراحی سازه‌های عمودی کنارهٔ رودخانه، علاوه بر تأثیر نیروهای فرسایشی درون کانال لازم است نیروهای فشاری آب زیرزمینی و خاک نیز لحاظ گردد زیرا نیروهای مؤثر خاک اغلب به مراتب بسیار بزرگتر از بارهای هیدرولیکی ناشی از فعالیت امواج و جریان هستند.

روند طراحی دیوارهای محافظ عمودی کنارهٔ رودخانه مشابه طراحی دیوارهای حفاظتی حائل بوده، با این تفاوت که شرایط سطح آب جریان کانال و آب زیرزمینی نیز کاملاً در این طراحی مد نظر قرار می‌گیرد. (رینولدز و استیدمن، ۱۹۸۱؛ پدفیلد و مایر، ۱۹۸۴؛ برتیش استیل، ۱۹۸۸).

۳-۱-٤-۱- طراحی دیوارهای وزنی

پایداری دیوارهای وزنی متکی به وزنشان و نیروهای مؤثر ناشی از اصطکاک سطح تماس خاک کناره رودخانه در یک دورهٔ طولانی مدت می‌باشد. وقتی بدنهٔ دیواره مسلح نشده باشد، ابعاد آن عموماً تحت شرایط بارهای نرمال وارده از طرف خاک بر روی دیواره متحمل هیچ نیروی کششی نمی‌شود و گاهی نوسانات نیروهای کششی محدودی از طرف آب در یک دوره زمانی طولانی دارای اهمیت است.

دیوارهای وزنی ممکن است، یکپارچه بوده مثلاً از بتن ساخته شده باشد یا به‌صورت ترکیبی از چند نوع مصالح باشد. دیوارهای آجری، دیوارهای سنگ و ملاتی و دیوارهای توریسنگی از این جمله می‌باشند. نیروهای وارده بر دیوار وزنی در شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۲۰- نیروهای مؤثر بر دیوار وزنی، دیاگرام ساده شده نیروها برای خاک غیرچسبنده

نیروهایی که بر واحد طول دیواره اثر می‌کنند عبارتند از:
وزن خود دیوار(w) ، نیروی اصطکاک (F_F) که اغلب از آن صرفنظر می‌شود، نیروی بازدارنده خاک (F_P)، نیروی سربار خاک (F_L)، نیروی فعال خاک (F_A)، نیروی هیدرواستاتیک (F_H)، نیروی بالابرنده(F_U)، عکس‌العمل فونداسیون (F_R).

•نیروهای مؤثر بر دیوار

برای خاک‌های چسبنده، نیروهای فشاری فعال و منفعل خاک اصلاح می‌شود اما اصول کلی آن مثل خاک‌های غیر چسبنده خواهد بود. روش‌هایی برای تخمین فشار خاک در کتب مرجع سازه‌ای و ژئوتکنیکی استاندارد ارائه شده است. لازم به ذکر است که می‌بایست:

۱. متناسب با نیروهای مقاومتی فشارهای هیدرواستاتیک به‌طور مناسبی در سطح دیواره توزیع شود. هرگونه اقدام به منظور کاهش فشار هیدرواستاتیک با تقویت سازه، موجب افزایش هزینهٔ طراحی خواهد شد.

۲. اصطکاک داخلی خاک (ϕ')مناسب باشد و افزایش آن موجب کاهش نیروهای وارده به دیواره خواهد شد.

بدیهی است تقلیل افت فشار هیدرو استاتیک پشت دیوار به منزله ایجاد زهکش آزاد مناسب در آن سطح می‌باشد. برای این منظور اغلب در پشت دیواره از مصالح درشت دانه استفاده می‌شود، لکن ذرات ریز بتن و زهکش ژئوتکستایل (و یا فیلتر ساندویچی) نمی‌تواند به عنوان یک جایگزین مورد استفاده قرار گیرد. لایهٔ زهکش آزاد لازم است ضخامت و نفوذپذیری مناسب، برای عبور آب به صورت عمودی در پشت دیواره داشته باشد بدون آنکه با تلفات انرژی زیادی مواجه شود. چنانچه مصالح خاک پشت دیواره مناسب باشد می‌توان به‌جای مواد درشت‌دانه از مصالح ضعیف‌تری که دارای اصطکاک داخلی کمتری باشند نیز استفاده نمود.

تخمین گرادیان تراوش آب با استفاده از نسبت خزش وزنی لین:

$$Cw = \frac{(B/3) + \Sigma t}{h}$$

که درآن:

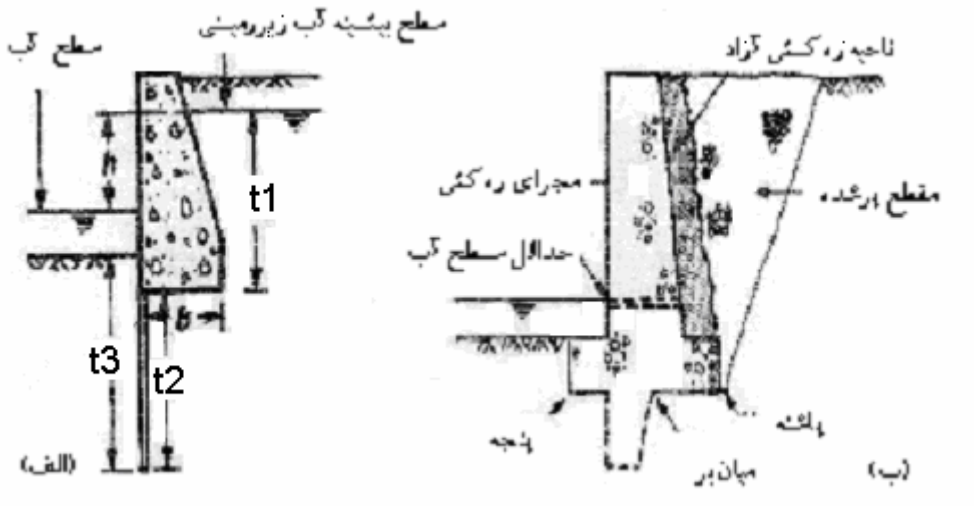
Cw : نسبت خزش وزنی لین ، B : فاصله افقی عبور جریان از زیر سازه t: فاصله عمودی عبور جریان از زیر سازه ، h: اختلاف ارتفاع سطح آب در طرفین سازه می‌باشد.

حداقل مقادیر نسبت خزش وزنی، Cw به قرار زیر می‌باشد:

جدول شماره ٦- حداقل مقادیر نسبت خزش وزنی، Cw

جنس	مقادیر خزش وزنی، Cw
ماسه خیلی ریز یا سیلت	۸/۵
ماسه متوسط	٦/۰
شن ریز	٤/۰
شن درشت شامل قلوه‌سنگ	۳/۰
رس متوسط	۳/۰
رس سخت	۱/۸

شیب‌های تندتر از 45° مانند دیواره‌های قائم در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲۱ - سیمای دیوارهای وزنی و گرادیان تراوش آب

هنگامی که دو دیوارهٔ عمودی سازه و کنارهٔ رودخانه مجاور یکدیگر قرار گیرند، کوتاه‌ترین مسیر تراوش از طریق خاک زیرین سازه رخ خواهد داد.

تعدیل توزیع زیر فشار بالا برنده با ایجاد دیوارهٔ آب‌بند مناسب که باعث کاهش گرادیان‌هیدرولیکی جریان تراوشی خواهد شد، برقرار می‌شود. این آب بند، پتانسیل شکست سازه از طریق آب‌شستگی زیر پی یا فرسایش موضعی جلوی سازه را نیز کاهش می‌دهد.

دیوارهٔ آب‌بند می‌تواند به صورت سپر فلزی بوده که در دیوار پایه شکل گرفته باشد، (شکل ۲۱ (الف)) و یا با گسترش خود دیوار ایجاد شده باشد، (شکل ۲۱ (ب)). در هر صورت آب‌بند موجب افزایش طول مسیر تراوش و در نتیجه کاهش گرادیان‌هیدورلیکی و همچنین کاهش سرعت تراوش خواهد شد. روش نسبت خزش وزنی لین (Lane, 1935;US Bureau of Reclamation, 1987) نیز اغلب گرادیان تراوش را برای انواع مختلف خاک به صورت مطمئن برآورد می‌کند. (Strphnson, 1979)

اشکال تخریب دیواره

تخریب دیواره عمودی کنارهٔ رودخانه می‌تواند در اثر لغزش افقی دیواره، مقاومت نامتقارن سطح زیر دیواره، لغزش توده‌ای خاک پشتیبان دیواره، واژگونی دیواره، وقوع آب شستگی زیر پی و یا آب شستگی موضعی جلوی دیواره رخ دهد. به طور خلاصه عوامل تخریب دیواره به شرح زیر ارائه می‌شود: (اشکال تخریب دیواره نیز در شکل (۲۲) ارائه شده است.)

۱. وقوع آب‌شستگی زیر پی و از بین رفتن مصالح پی و خاک پشتیبان پنجهٔ دیواره در اثر نشت آب و انتقال جریان از زیر سازه رخ داده که منجر به واژگونی دیواره خواهد شد. انتقال مصالح پشت دیواره از طریق روزنه‌های زهکش و شکاف‌های بین دیواره نیز می‌تواند موجب تشدید واژگونی شود.

۲. حرکات اضافی دیواره ناشی از ظرفیت مقاومت نامتقارن خاک فونداسیون زیر دیواره می‌باشد.

لغزش افقی در اثر از بین رفتن مقاومت جانبی، اغلب در اثر کاهش ضریب اصطکاک خاک زیرین یا عکس‌العمل انفعالی خاک به‌وجود می‌آید.

۳. واژگونی دیواره ناشی از حالت ضعیف یا نامناسب وزن دیواره و یا نیروهای مقاومتی خاک به‌وجود می‌آید.

٤. فرسایش شدید موضعی در پنجهٔ دیواره منجر به واژگونی می‌شود.

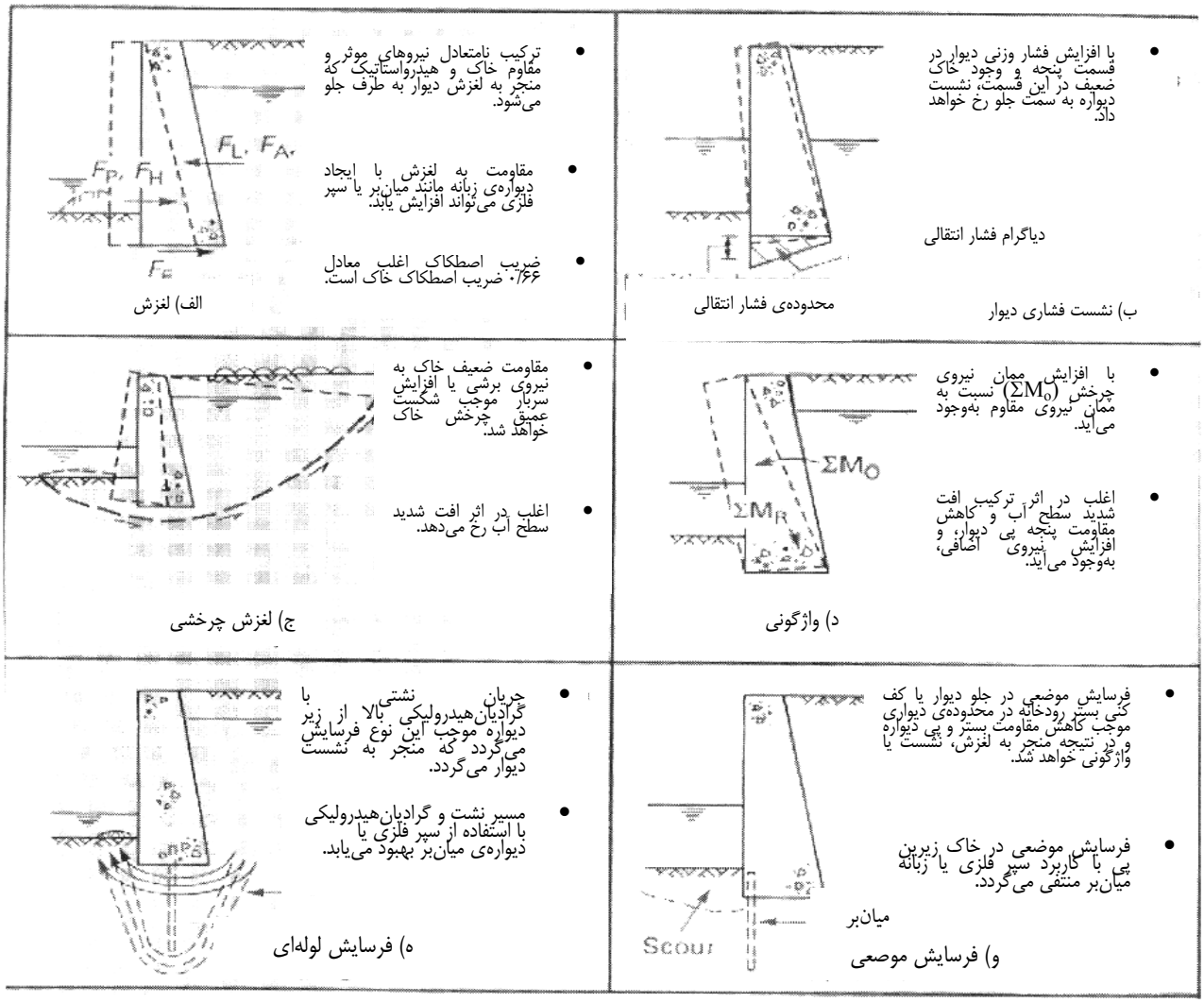
۵. شکست یا لغزش عمیق خاک پشتیبان دیواره منجر به تخریب و واژگونی دیوار خواهد شد.

٦. تخریب سازه در اثر افزایش تنش شکاف‌های پیشین دیواره با نشت آب از میان آهک و مصالح ترکیبی دیواره رخ می‌دهد.

برای جلوگیری از تخریب دیواره، باید از به وجود آمدن عوامل فوق جلوگیری شود.

- ***جزئیات اجرا***

اغلب برای اقتصادی نمودن اجرای طرح دیوار وزنی، سطح پیشین دیواره رودخانه را با ملات پوشش می‌دهند. در مواردی که در زیر دیوار از پردهٔ آب‌بند استفاده نشده باشد، بکارگیری دیوارهٔ زبانه مانند(شکل ۲۲) می‌تواند از لغزش جانبی دیواره جلوگیری کند. چنانچه خاک پی نیز ضعیف باشد وسعت بین پاشنه و پنجهٔ دیواره موجب توزیع فشار دیوار و پایداری آن می‌شود. زهکش‌هایی نیز بر روی این دیواره‌ها قرار می‌گیرد که معمولاً از لوله‌های پلاستیکی بوده و چنانچه مقطعی از پشت دیواره بطور صحیح فیلترگذاری شده و ابتدای لوله در پشت دیواره نیز با درپوش شبکه‌ای پوشیده شده باشد می‌تواند موجب تخلیهٔ آب مازاد پشت دیواره گردد.

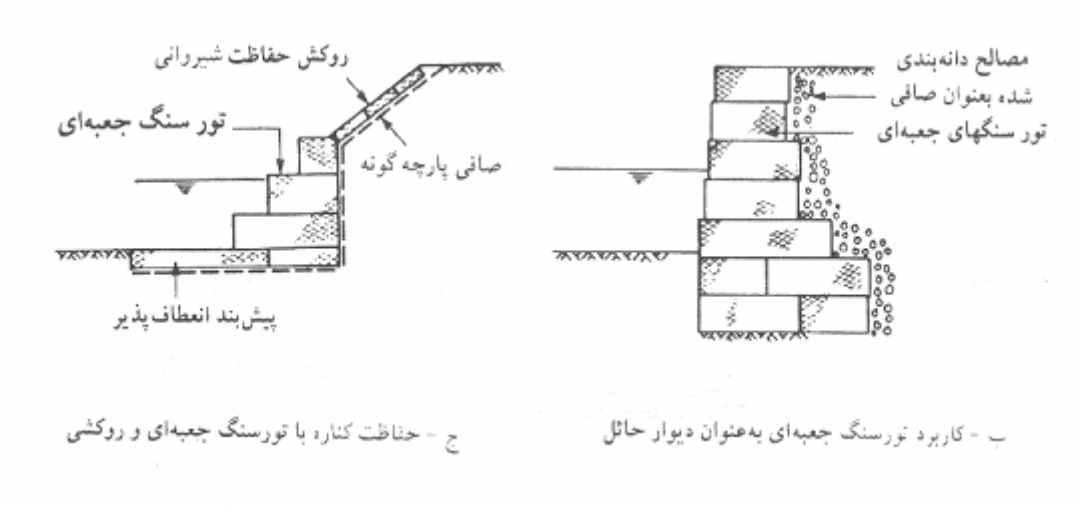


شکل ۲۲ – اشکال تخریب دیوارهای کانال

• ساخت دیوار گابیونی

دیوارهای وزنی را می‌توان با استفاده از سبدهای گابیونی که از سنگ پر شده‌اند، ساخت. با چسبیدن دیوارهای گابیونی به سطح دیوارهٔ خاکی می‌توان انتظار داشت که این دیواره به‌صورت دیوارهٔ ترکیبی عمل نماید که نسبت به تغییر زاویه دیوار تا حد معینی انعطاف‌پذیر خواهد بود و پس از ساخت می‌تواند شرایط پی را بهبود بخشد. دیوارهای انعطاف‌ناپذیر مثل دیوارهای بتنی نسبت به دیوارهای گابیونی از این جهت نامطلوب تلقی می‌شوند و به‌دلیل حرکات کوچک لایه‌های افقی خاک در اثر نشست و تحکیم دیوارهٔ با سطح پیشین عمودی آن توصیه نمی‌شود؛ حتی اگر سازه پایدار بماند، می‌تواند ظاهر دیواره را نامطلوب نشان دهد.

بنابراین پیشنهاد می‌شود دیواره‌های گابیونی با سطح پیشین با شیب ملایم (۱۰ به ۱) قرار گرفته و برای توسعهٔ سطح پی می‌توان از اشکال دیوارهای گابیونی با مقطع پلکانی (شکل۲۳) استفاده نمود.



شکل۲۳ - دیوارهای گابیونی

به‌طور طبیعی دیوارهای گابیونی به دلیل نفوذپذیری، مشکلات ناشی از تغییر فشار در عرض دیواره را ندارند اما با نشست لایه‌های خاک و نفوذ ذرات ریز خاک ممکن است مشکل تغییر فشار در عرض دیواره به‌وجود بیاید و چنانچه فیلتر نیز به‌صورت صحیح طراحی و اجرا شده باشد این مشکل نیز وجود نخواهد داشت. و البته چنانچه دانه‌بندی خاک پشت دیواره مشکلی نداشته باشد نیازی به تعبیه فیلتر نیز نخواهد بود. وضعیت فیلتر پشت دیواره به دانه‌بندی خاک کنارهٔ رودخانه و عرض دیوارهٔ گابیونی بستگی دارد و ذرات ریزتر در قسمت داخلی (مجاور خاک کناره) قرار خواهند گرفت. استفاده از ژئوتکستایل غیر مواج به دلیل اقتصادی بودن آن دارای کاربرد بیشتری نسبت به روشهای سنتی است. اغلب شرکت‌های سازندهٔ گابیون، توصیه‌هایی برای استفادهٔ صحیح آنها ارائه می‌کنند که با تجربهٔ کارهای مشابه قابل کاربرد خواهد بود. سازه‌های گابیونی به‌واسطهٔ تخلخل مصالح شان مکان مناسبی برای توسعهٔ پوشش گیاهی هستند. که با رشد گیاه می‌تواند انعطاف‌پذیری نشان دهد ولی درختان می‌توانند موجب تخریب این نوع سازه شوند که بسته به موقتی بودن سازهٔ گابیونی می‌تواند استفاده شود.

- ***بازسازی دیوارهای وزنی***

بازسازی دیوارهای وزنی، از ساخت مجدد دیواره رایج‌تر بوده و گاهی برای طراحی صحیح سازه و پی آن از آزمایش‌های مکانیک خاک شامل نمونه‌گیری، حفاری یا دیگر تکنیک‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. بازسازی نیازمند طراحی دقیق و مدیریت صحیح می‌باشد که اغلب با کسب تجربه در کار نیز همراه می‌باشد. مراقبت ویژه به منظور پایداری سازه نیازمند شناخت دقیق پارامترهای خاک پشت آن است و چنانچه این ویژگی‌ها نامشخص یا متنوع باشند، معمولاً آنالیز حساسیت خاک نیز انجام می‌شود تا محدودهٔ قابل اطمینان پارامترهایی نظیر اصطکاک خاک و دیواره به‌دست آید.

۳-۱-٤-۲- مصالح مورد استفاده در دیوارهای وزنی

طراحی دیوارهای محافظ عمودی می‌تواند مشابه استاندارد طراحی دیوارهای حائل (نگهدارنده) باشد با این تفاوت که مصالح مورد استفاده در این دیوارها به دلیل تماس با آب و محیط مرطوب دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. قسمت‌هایی از این دیواره همواره مستغرق خواهد بود و یا در یک دوره گاهی استغراق و گاهی آزاد و حتی گاهی تحت شرایط یخبندان خواهد بود. بنابراین مصالح این دیوارها باید به‌گونه‌ای باشد که طی گذشت زمان با کاهش کیفیت روبرو نشود.

- **مصالح مرسوم مورد استفاده**

بتن

در دیوارهای بتنی استفاده از سیمان مقاوم به سولفات توصیه می‌گردد، هرچند که خاک پشت دیواره، عاری از سولفات باشد. ولی هیچ تضمینی وجود ندارد که آب داخل کانال هیچگاه حاوی مواد جانشین نباشد.

دیوارهای بتنی در کنارهٔ رودخانه تحت شرایط مختلف ممکن است ایجاد شود مثلاً در یک فراز بند نیاز به تداوم جدا نمودن آب در پیکرهٔ آن هست و تحت شرایطی ممکن است به دلیل اضطرار زمانی یا شرایط خاص مکانی در اجرای دیوار ثقلی از دیوار آمادهٔ بتنی استفاده شود.

آجر

آجرهای مهندسی‌ساز از تراکم مناسب و رس مقاوم تشکیل شده که تا حدودی جاذب آب و مقاوم بوده و در ساخت دیوارهای ثقلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آجرها نسبت به آجرهای معمولی یا آجرهای نما به یخ‌زدگی بسیار مقاوم‌تر هستند. همچنین ضد سولفات بوده و تحت شرایط خیس‌شدگی طولانی مدت مقاومت نشان می‌دهند، به ویژه هنگامی که رس داخل آجرها دارای سولفات باشد (Curtin et al,1982).

سنگ

انواع مشخص سنگ با اندازه‌های مختلف به سرعت از طریق انفجار قابل حصول بوده و به‌واسطه آن که جزئی از طبیعت هستند، با محیط زیست کنارهٔ رودخانه نیز سازگار خواهد بود. فاکتورهای اقتصادی و دسترسی محلی، از عواملی هستند که انتخاب سنگ را محدود می‌سازند. عموماً محکم‌ترین سنگ‌ها آن‌هایی هستند که مقاومت بیشتری به هوازدگی داشته و از چگالی بالاتری برخوردار باشند. مصالح با تخلخل بیشتر و سبک‌تر که مستعد هوازدگی و فرسایش باشند برای ساحل‌سازی کنارهٔ رودخانه به‌کار نمی‌روند مگر آن‌که برای زمانی کوتاه مورد نیاز باشند. سنگ معمولاً در سازه‌های سنگ و ملاتی و تا سازه‌های توری‌سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ساروج

دوام ساروج نباید از دوام آجر یا سنگی که برای کنارهٔ رودخانه استفاده می‌گردد کمتر باشد. برای دیوارهای کنارهٔ رودخانه، مخلوطی از ملات قوی (۳: ۱ نسبت سیمان به ماسه) باید استفاده شود. این مخلوط، مقاومت در برابر سولفات را افزایش می‌دهد و به همان شدت جذب آب را به حداقل می‌رساند (Curtin et al.,1982).

۳-۲- سازه‌های مهارفرسایش بستر رودخانه

در رودخانه‌های جوان به دلیل شیب تندبستر وسرعت زیاد جریان، وازآنجاییکه هنوز بستر به حالت تعادل نرسیده، بستر رودخانه دچار فرسایش شده و مواد شسته شده به پایین دست رودخانه منتقل می‌شوند.

به منظور تثبیت موقعیت رودخانه و ایجاد شرایط مناسب برای هدایت جریانهای رودخانه‌ای لازم است بستر رودخانه‌ها حفاظت شوند. روشهای مختلفی برای تثبیت بستر رودخانه‌ها وجود دارد. دراین خصوص می‌توان به کاربرد لایه سنگ فرش، احداث کف بند و یا احداث شیب شکن اشاره نمود.

متداولترین راه حل تثبیت بستر رودخانه، احداث شیب شکن در طول بازه مورد نظر می باشد. این شیب شکن‌ها می تواند از جنس بتنی یا گابیونی ساخته شود. ارتفاع متوسط شیب شکن‌ها و فاصله آنها از یکدیگر پس از انجام مطالعات هیدرولیکی دقیق با توجه به شرایط و جنس خاک قابل طراحی است.

با توجه به شرایط جریان، شیب شکن‌ها را بر روی بستر رودخانه نیزمی‌توان احداث نمود، که با مرور زمان رسوبات بین این سدهای کوتاه ته نشین می شود و در نتیجه یک شیب ملایم در کف رودخانه ایجاد می نماید.

۳-۲-۱- تثبیت بستر رودخانه

رودخانه‌ها اغلب تحت تأثیرعوامل طبیعی و یا دخالت‌های انسانی دستخوش تغییرات مورفولوژیک می‌شوندکه فرسایش بستر یا کف‌کنی و گود افتادگی ممتد و مستمر از جمله موارد بارز آن تلقی می‌گردد.

حرکات تکتونیکی و دگرگونی‌های ژئومرفولوژیکی ناشی از آن را می‌توان در زمرهٔ عوامل طبیعی مؤثر در پدیدهٔ فرسایش بستر عنوان نمود. پایین افتادن تراز آب دریا و یا دریاچه‌ها نیز از دیگر عوامل طبیعی است که آغاز فرسایش بستر و گودافتادگی تدریجی در رودخانه‌های منتهی به دریا ودریاچه را سبب می‌شود.

انسان نیز با دخالت‌های خود تعادل موجود را بر هم زده و موجبات ناپایداری و تشدید بستر شویی را فراهم می‌آورد. احداث سد بر روی رودخانه و یا کاهش عرض مقطع، استخراج معادن شن وماسه و بطورکلی بسیاری از اقدامات مهندسی نظیر تثبیت کناره‌ها، ایجاد میان‌برها، احداث پل، استفاده از سیلابدشت و مسیر رودخانه برای جاده‌سازی و سایر فعالیت‌های عمرانی و عملیات ساماندهی هر یک به نوعی در فرآیند فرسایش و گودافتادگی بستر مؤثر می‌باشد.

آشفتگی ایجاد شده توسط سیلاب نیز می تواند سبب ایجاد گودالهایی عمیق در زیر جداره شود وکف کانال بالادست را متلاشی نماید.

۳-۲-۱-۱- تثبیت بستر رودخانه‌ها توسط شیب شکن:

چنانچه درطول مسیر موجود رودخانه شیب طبیعی بستر، ازشیب لازم و بهینه برای کف کانال بیشترباشد، به‌منظور انتقال آب از سطح بالاتر به پایین ترممکن است ازشیب شکن[1] ، استفاده شود.

احداث این سازه‌ها یکی ازروشهای متداول درکاهش و یا فرایند فرسایش وگودافتادگی بستر می‌باشد که باعث افزایش سطح آب وکاهش شیب انرژی و در نهایت تثبیت شیب بستردرحد معینی می‌گردد که نهایتا موجبات افت پتانسیل انتقال، و برقراری حالت تعادل موردنظر رافراهم می‌آورد. سایر سازه‌های متداول دراین خصوص عبارتند از: آستانه[2] و سرریز[3] ، که درادامه در مورد آنها توضیح داده خواهدشد.

شیب شکن‌ها معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: شیب شکن‌های قائم، شیب شکن‌های مایل وشیب شکن‌های لوله‌ای.

شیب شکن‌های قائم معمولاً برای اختلاف ارتفاع تا۱/۵ متر وشیب شکن‌های مایل ولوله‌ای برای اختلاف ارتفاع تا۵ متر بکارگرفته می‌شوند. برای اختلاف ارتفاع‌های بزرگتر ویا انتقال آب درفواصل نسبتا زیاد، از تنداب استفاده می‌شود.

استفاده از شیب شکن‌ها عمدتا در رودخانه‌های کوهستانی که دارای شیب تندی می‌باشند متداول است.

آستانه:

آستانه ازجمله سازه‌های متقاطعی می‌باشد که معمولاً همتراز با کف بستر رودخانه و به فواصل معینی احداث می‌گردد. این سازه‌ها عموما به صورت صلب (بتنی یا سنگ وسیمان) ویا انعطاف پذیر(مثل سازه‌های سنگی وگابیون) ساخته می شوند.

دراین نوع سازه‌ها استفاده از لایه فیلتر برای ایجاد پایداری وحفظ یکپارچگی آن ضروری است.

سرریز:

احداث سرریز ازدیگرروشهای تثبیت بستر می باشد که اغلب برای ایجاد شرایط هیدرولیکی مناسب دریک بازه نسبتا طولانی بکارگرفته می شود. شکل زیرنمونه‌ای از روش استفاده ازسرریز را برای افزایش سطح آب و مهارفرسایش بستر به منظور حفاظت از پل را نشان می دهد.

---

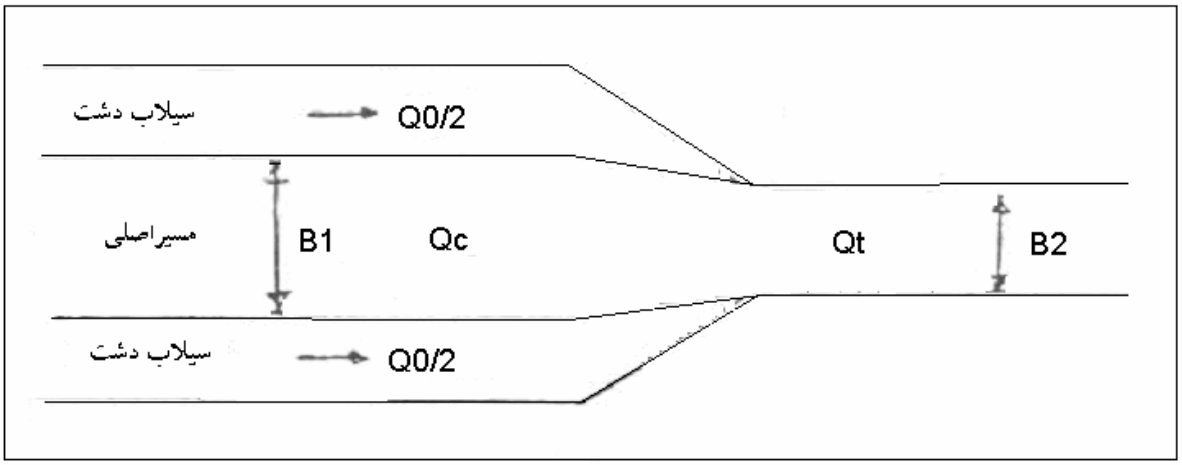
[1] - Drop
[2] - Sill
[3] - Weir

- **انواع شیب شکن یا دراپ:**
  - فلوم‌های جعبه‌ای (باکسی)
  - فلوم‌های لوله‌ای
  - دیواره‌های بتنی : ماکزیمم سرعت مجاز عبوری از روی این دراپ‌ها ۲ متربرثانیه می باشد.

۳-۲-۱-۲- مبانی حاکم برپدیده فرسایش بستر:

- **تنگ شدگی مقطع**

شکل(۲۴) حالت تنگ‌شدگی مقطع، در زمانیکه رودخانه از دو قسمت اصلی وسیلاب دشت تشکیل شده باشد را نشان می‌دهد.



شکل (۲٤)- فرم عمومی کاهش عرض مقطع در مسیر رودخانه با مقطع اصلی و سیلاب‌دشت

دوریس[1] ضمن ارائه تحلیلی از فرایند انتقال رسوب و عوارض هیدرولیکی ناشی از آن چگونگی گودافتادگی بستر را در یک بازه تنگ شده با استناد به معادله پتانسیل انتقال مایر- پیتر و مولر[2]، توسط روابط ذیل مشخص نموده است:

$$\frac{S_2}{S_1} = [\frac{B_2}{B_1}]^{1-3/b}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = [\frac{B_1}{B_2}]^{b-1/b}$$

که درآن:

b نمای معادله انتقال رسوب

S1 و S2 به ترتیب شیب اولیه وثانویه رودخانه

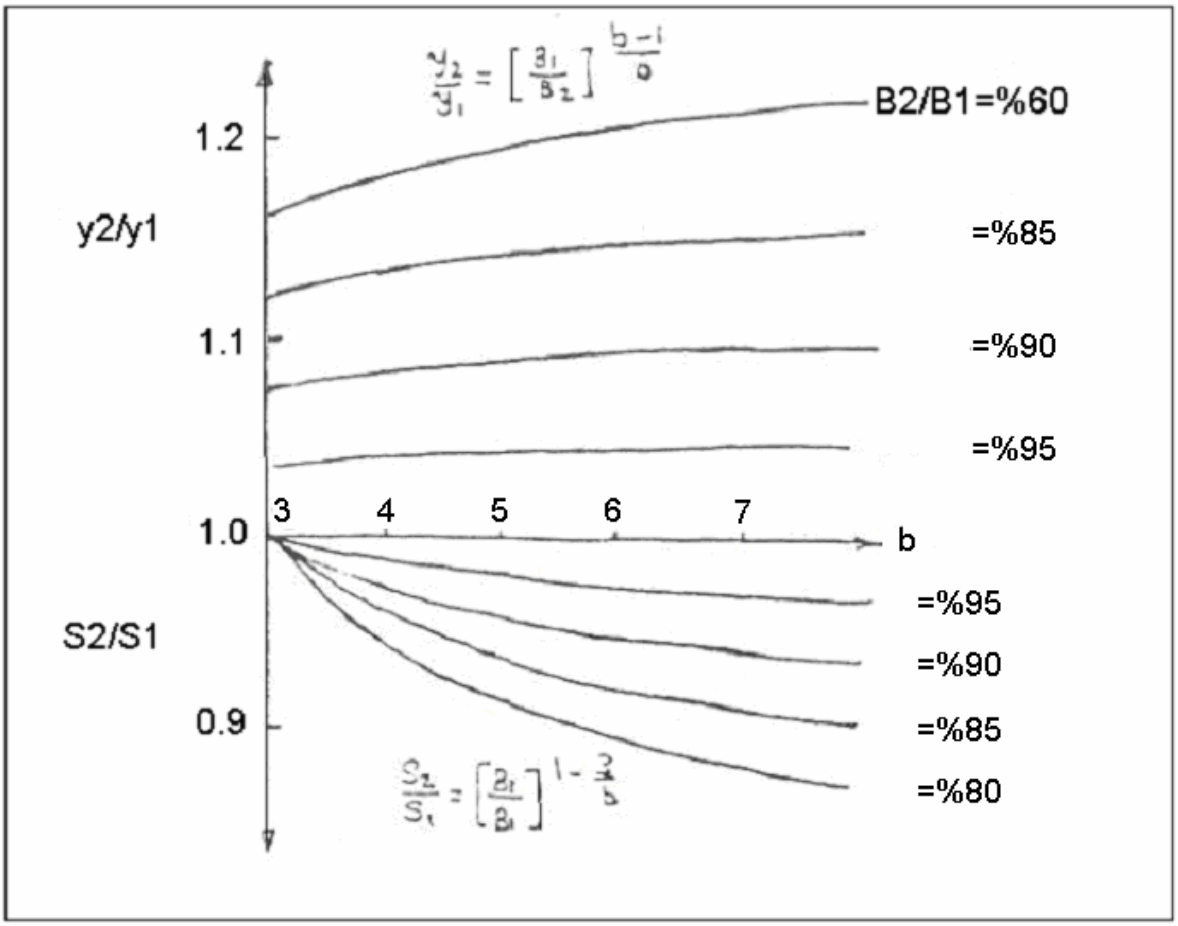
y1 و y2 به ترتیب عمق اولیه وثانویه

B1 و B2 به ترتیب عرض اولیه وثانویه.

در شکل (۲۵) مقادیر نسبت‌های $\frac{S_1}{S_2}$ و $\frac{Y_2}{Y_1}$ بر حسب b برای درصدهای مختلف کاهش عرض نشان داده شده است.

1- M de Dories
2- Meyer, Peter & Muller

ارزیابی میزان فرسایش ناشی از احداث سد با استناد به معادلات پتانسیل انتقال، امکان‌پذیر می‌باشد. در این حالت به دلیل کاهش تغذیه رسوبی رودخانه (بخصوص بار بستر)، کاهش شیب تا مرز رسیدن به حد تنش برشی بحرانی یا شیب نظیر دبی رسوبی صفر ممکن است پیش برود. در چنین شرایطی محاسبه ΔZ_b یا حداکثر گودافتادگی عمومی بستر در پای سد مد نظر می‌باشد که با تعیین شیب تعادل نهایی امکان‌پذیر می‌گردد.



شکل(۲۵)- نمایش چگونگی عکس‌العمل رودخانه در قبال کاهش عرض مقطع

چنانچه معادله تنش برشی بحرانی ، بر اساس منحنی شیلدز در نظر گرفته شود، آنگاه خواهیم داشت:

$$S_c = \frac{0.047(S_s - 1)D}{y}$$

و از معادله مانینگ نیز می‌توان نوشت:

$$y = (\frac{nq}{S_c^{1/2}})^{3/5}$$

از تلفیق دو معادله فوق ، شیب تعادل از رابطه ذیل حاصل می‌شود:

$$S_c = \frac{[0.047)(S_s - 1)(D)]^{1.428}}{(nq)^{6/7}}$$

در معادلات فوق S_c شیب تعادل، y عمق آب، q دبی در واحد عرض، n ضریب مانینگ و S_s چگالی دانه‌های تشکیل دهنده رسوبات بستر می‌باشد.

در بسیاری از مواقع با تشکیل لایه آرمور یا قشر حفاظتی فرایند فرسایش و گودافتادگی بستر به طور طبیعی متوقف می‌گردد. این حالت در بسترهایی که از مصالح شن و قلوه‌سنگ تشکیل شده‌اند امکان‌پذیر است و برای بسترهای ماسه‌ای عموماً توقف فرسایش منوط به برقراری شرایط تعادل نهایی است.

برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها یکی دیگراز عوامل عمدهٔ فرسایش و گودافتادگی بستر است. با تخلیه مصالح رودخانه میزان تغذیه طبیعی رسوب در بازه‌های پایین‌دست کاهش یافته و به تبع آن و در جهت برقراری تعادل بین خصوصیات هیدرولیکی و پتانسیل انتقال، شیب رودخانه رو به کاهش می‌گذارد. از طرفی در بازه‌های بالادست به دلیل افزایش سرعت جریان آب در محدوده نزدیک به نقاط برداشت، کف‌کنی و گودافتادگی بستر آغاز می‌شود.

دراین زمینه پیش‌بینی وضعیت بستر تعادلی، و ارزیابی میزان افت بستر ناشی از برداشت را می‌توان از معادلات انتقال رسوب و با توجه به حجم برداشت و میزان آورد رسوب رودخانه محقق ساخت.

در خصوص فرسایش ناشی از اصلاح مسیر و حذف مئآندرها می‌توان با توجه به ثابت بودن میزان تغذیه رسوبی رودخانه و با عنایت به اینکه مسیر تحولات درجهت بازیافت شرایط اولیه جریان و حفظ پتانسیل انتقال می‌باشد میزان گودافتادگی بستر را ارزیابی نمود.

۳-۲-۱-۳- روش‌های کنترل فرسایش در بستر رودخانه

فرسایش بازه‌ای و یا عمومی و فراگیر در رودخانه‌ها را عموماً می‌توان توسط دو روش ذیل تحت کنترل درآورد:

۱- کنترل فرسایش با افزایش مقاومت بستر در مقابل نیروی برشی جریان

۲- کنترل فرسایش با کاهش پتانسیل انتقال و یا افزایش سطح آب

- **کنترل فرسایش با افزایش مقاومت بستر در مقابل نیروی برشی جریان**

این روش براصل افزایش نیروی مقاومت مواد تشکیل دهنده بستر متکی است. ایجاد لایه آرمور یا قشر حفاظتی با استفاده از سنگ و لاشه سنگ از جمله اقدامات متداول در این زمینه تلقی می‌شود.

با استناد به نتایج حاصل از مطالعات شیلدز قطر پایدار در بستر رودخانه را می‌توان از رابطه ذیل تعیین نمود:

$$\frac{yS}{(S_s-1)D}=0.03$$

$$D=20.2yS$$

که درآن:

D قطر متوسط سنگهای مورد استفاده در بستر به متر، y عمق جریان بر حسب متر، S شیب رودخانه و S_s چگالی سنگ‌ها می‌باشد که برابر با ۲/۶۵ فرض می شود.

ایزباش[1] رابطه ذیل را برای تعیین قطر پایداری سنگهای مورد استفاده در تثبیت بستر معرفی می‌نماید:

$$D=0.0418V^2$$

در این رابطه V سرعت جریان آب (m/sec) و D اندازه سنگها بر حسب متر می‌باشد.

همچنین رابطه ذیل توسط مینورد[2] برای پایداری سنگها در بستر عرضه شده است:

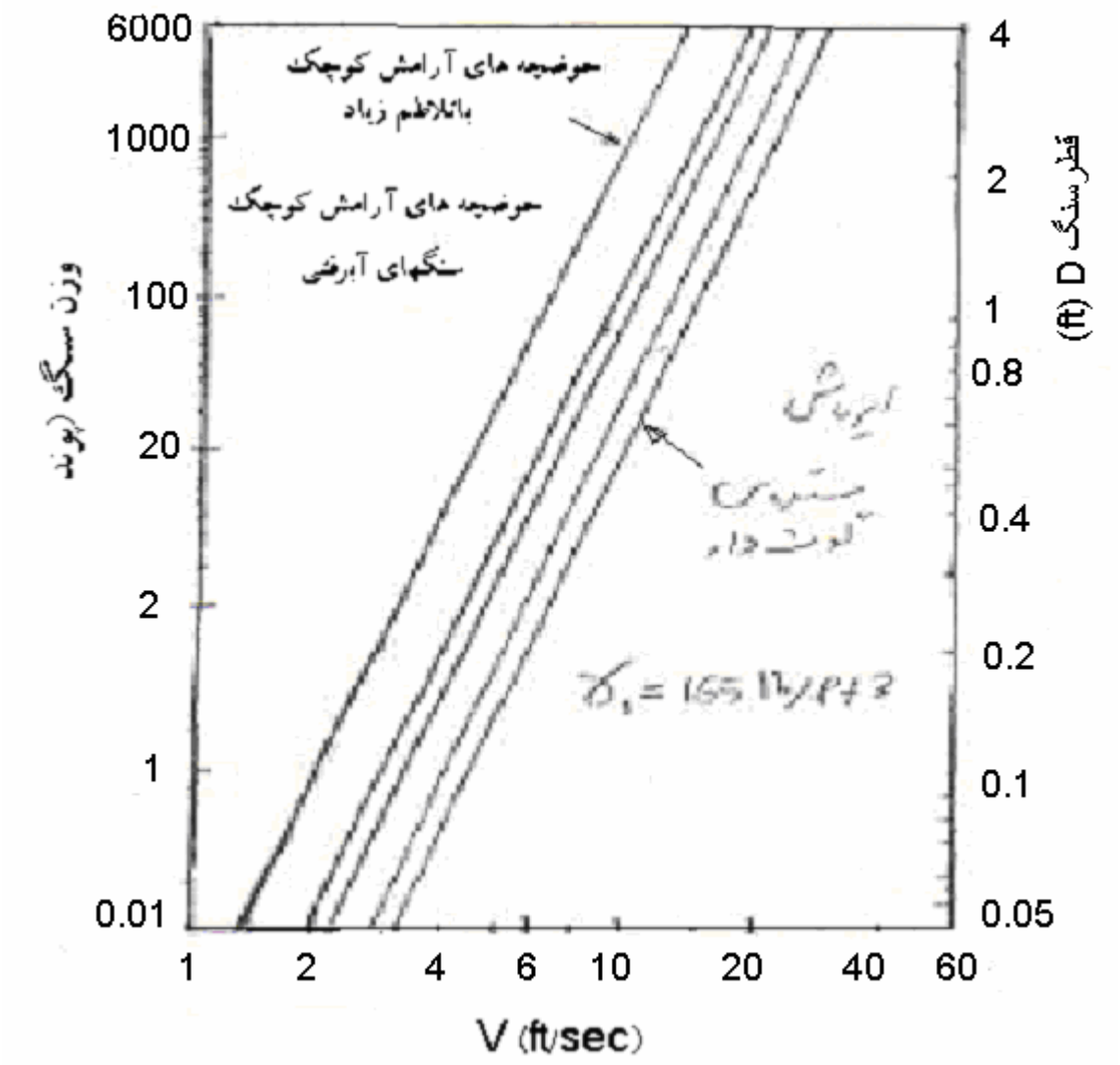
$$\frac{D_{50}}{y}=0.22Fr^3 \qquad Fr=\frac{V}{\sqrt{gy}}$$

در رابطه فوق V سرعت جریان آب (m/sec)، y عمق جریان (m)، Fr عدد فرود و D50 قطر نظیر ۵۰ درصد سنگهای تشکیل دهنده لایه آرمور می‌باشد (بر حسب m).

همچنین در شکل (۲۶) وزن سنگ‌ها بر حسب سرعت جریان آب آورده شده است.

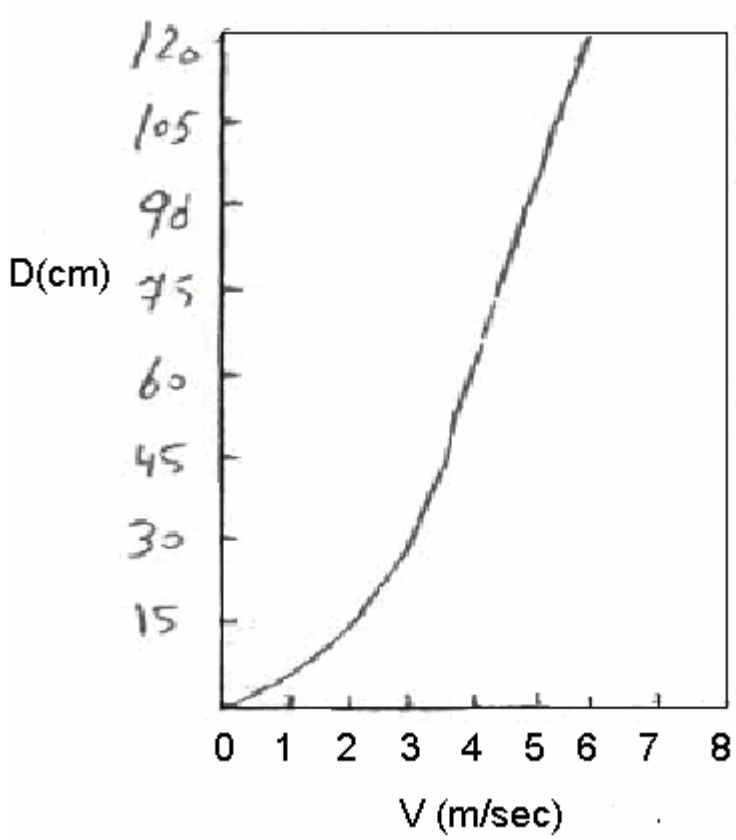
---

[1] - Isbash
[2] - Maynord



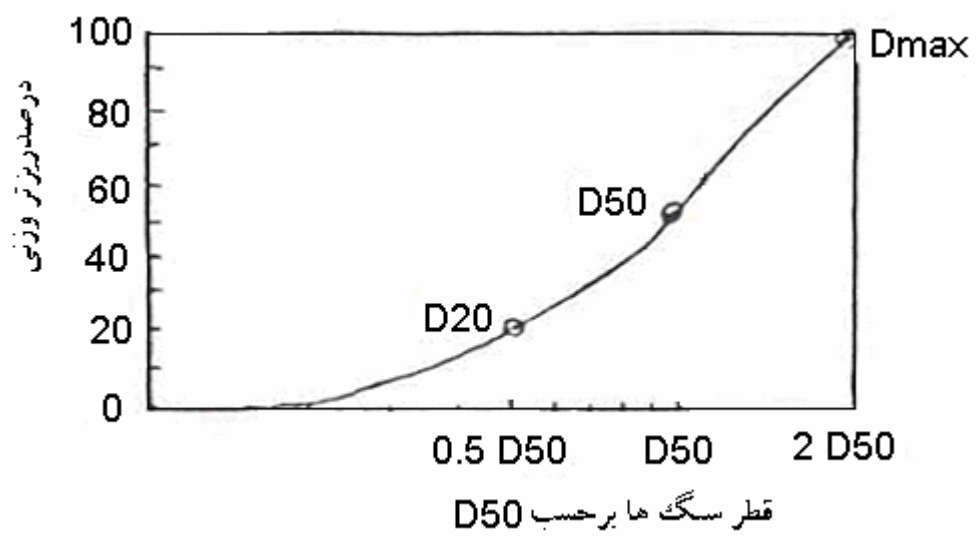
شکل (۲۶)- متوسط اندازه سنگهای مورد نیاز برای تثبیت بستر به ازاء مقادیر مختلف سرعت جریان

اداره عمران آمریکا (U.S.B.R) نیز برای پوشش‌های حفاظتی نمودار۲۷ را توصیه نموده است.



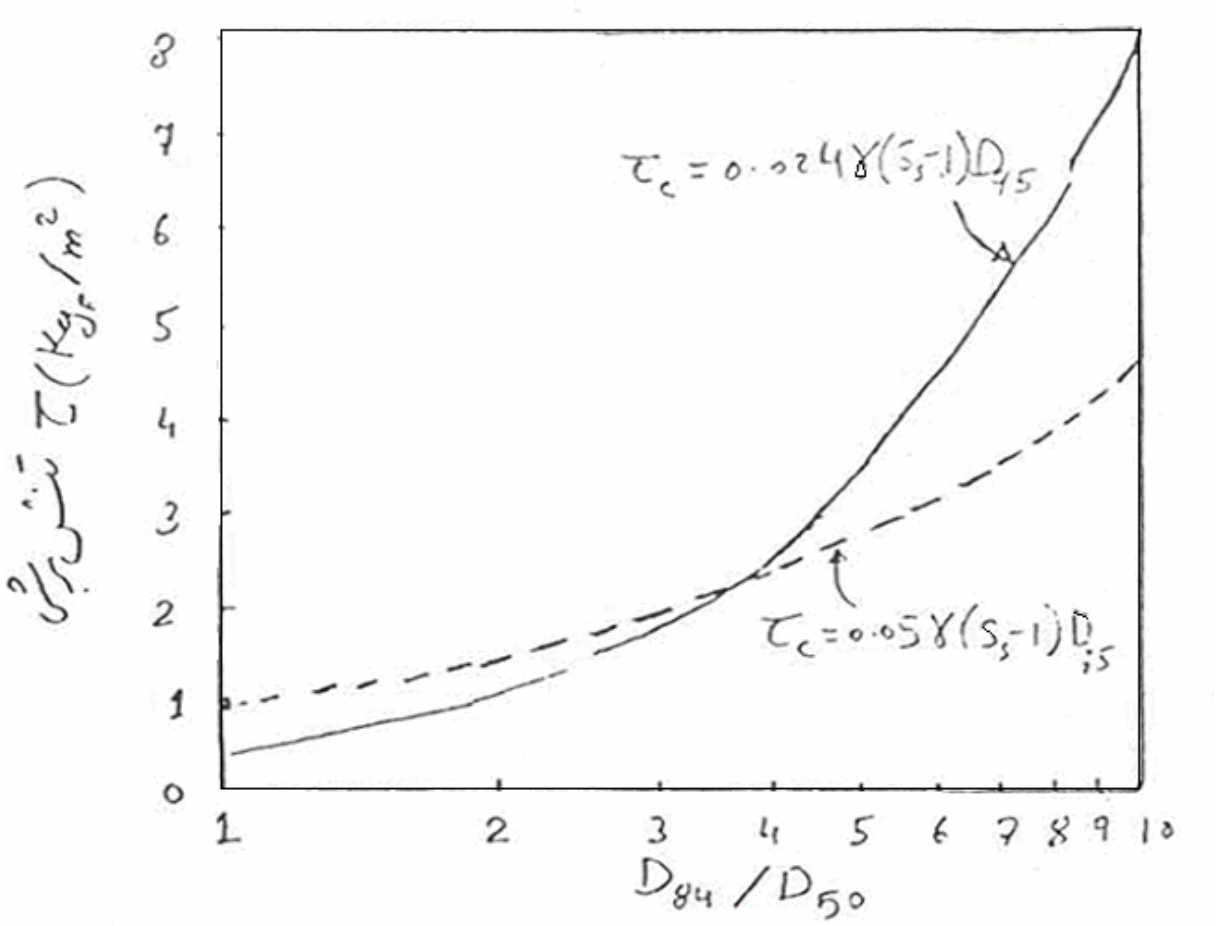
شکل(۲۷)- اندازه سنگ‌های مورد استفاده در پوشش‌های حفاظتی بر حسب متوسط سرعت جریان

برای تضمین پایداری سنگ‌ها در بستر رودخانه علاوه بر اندازه آنها رعایت ترکیب دانه‌بندی نیز الزامی است. در شکل(۴-۲۸) ترکیب دانه‌بندی سنگ‌های مورد استفاده در لایه آرمور ارائه شده است.



شکل ۲۸- منحنی دانه‌بندی پیشنهادی برای لایه آرمور

در مورد معیار پایداری سنگ‌های لایه آرمور، گسلر[1] گرافی ارائه داده است که نسبت D_{84}/D_{50} مواد تشکیل دهنده لایه آرمـور را به‌صورت تابعی از تنش برشی نشان می‌دهد. نمودار مزبور در شکل (۲۹) ترسیم شده است.



شکل (۲۹)- رابطه بین تنش برشی و دانه‌بندی سنگهای تشکیل دهنده لایه آرمور

در شکل (۳۰) نیزیک نمونه از روش تثبیت بستر با استفاده از لایه آرمور نشان داده شده است.

۳-۲-۱-٤- طرح بندهای متوالی

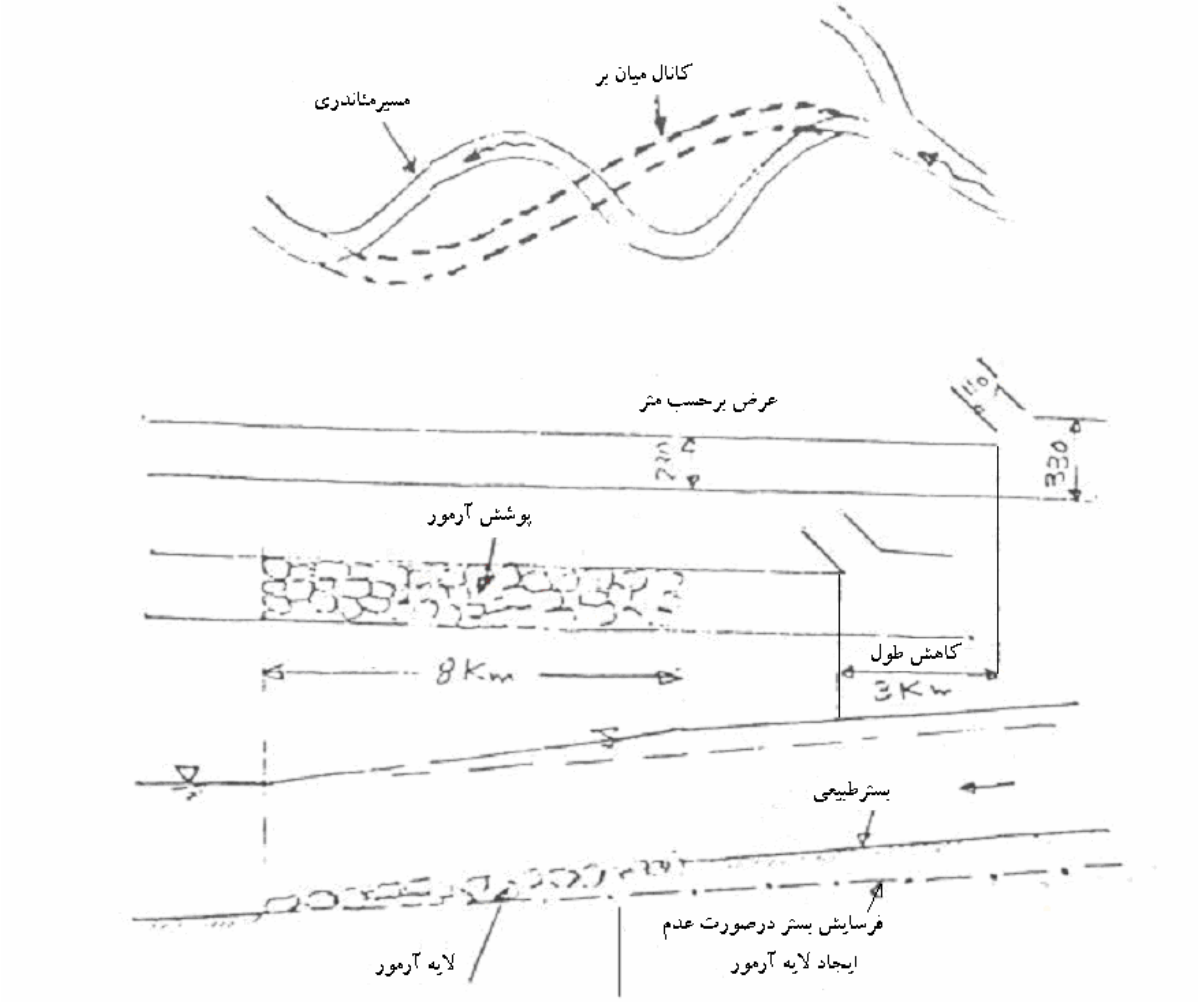
مؤثرترین و معمول‌ترین روش کنترل بار رسوبی و در نتیجه کنترل طغیان رودخانه‌ها و مسیل‌های واقـع در نـواحی کوهسـتانی وکوهپایه‌ای استفاده از بندهای متوالی است. بندها علاوه برکنترل مسیل‌ها، با بالا آوردن کف رودخانه، به‌واسطه عمل رسوبگذاری، از تخریب کناره‌ها نیز جلوگیری می‌نمایند. در هر رودخانه به منظورکنترل فرسایش، یک بند اصلی و چندین بند فرعی احداث مـی‌شـود. معمولاً بند اصلی در پایین‌ترین قسمت محدودهٔ موردنظر ساخته می‌شود و از استحکام بیشتری نسبت به سایر بندها برخوردار است.

در طرح بندهای متوالی توجه به مسائل مختلفی که در زیر مطرح می‌شود، بهینه‌سازی اقتصادی پروژه را تضمین می‌نماید:

- عمرمفید طرح، مقاومت در برابر فرسایش و تخریب و دوام بندها.
- مقاومت درمقابل بارها، نیروهای وارد بر بدنه و بررسی پایداری آنها.
- امکان تهیه مصالح به مقدار کافی وکیفیت مناسب.
- سهولت حمل، نصب و اجرای اجزاء مختلف طرح.

[1] - Gessler

- سرعت اجرای عملیات و کوتاه بودن مدت آن.
- بهینه‌سازی حجم عملیات و اقتصادی کردن پروژه.



شکل ۳۰- حفاظت بستر در مقابل فرسایش ناشی از ایجاد کانال میانبر با استفاده از پوشش حفاظتی (لایه آرمور)

- **فاصله بندها :**

فاصله بین بندها به شیب آبراهه، شیب حد و ارتفاع مؤثر بند بستگی دارد. فاصلهٔ بین بندها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d = \frac{H}{S - S_L}$$

که در آن:

d: فاصله بندها (m)

H: ارتفاع مؤثر بند، S شیب آبراهه و S_L شیب حد[۱]

بطورکلی احداث بند در گالی‌ها و آبراهه‌های شیبدار، باعث ایجاد سطوح هموار و در نتیجه تثبیت رسوب در پشت سازه شده و ضمن جلوگیری از انتقال رسوب به پایین‌دست، سبب کاهش سرعت آب و کنترل سیلاب می‌شود.

- **انواع بندها:**

بندها به انواع موقتی ودائمی تقسیم می‌شوند:

الف- بندهای موقتی:

بندهای موقتی معمولاً از مواد ارزان قیمت موجود در منطقه مانند شاخه‌های درختان، چوب، سنگ، پشته‌های خاکی، آجر و سایر مواد ساخته می‌شوند. هنگامی از این بندها استفاده می‌شود که استقرار پوشش گیاهی به دلایلی نظیر عدم وجود خاک مناسب برای رشد گیاه و شرایط نامناسب محیط، وجود نداشته باشد. در مواردی نیز که شرایط محیط برای رشد خوب گیاه مناسب است، برای کنترل فرسایش در نقاط بحرانی (مانند رأس خندق و بریدگی درخندق)، تا زمان رشد گیاه می‌توان از بندهای موقت استفاده کرد.

این بندها غالباً متخلخل و صرفاً به‌منظورکند کردن سرعت جریان آب و در نتیجه تشدید عمل رسوبگذاری ساخته می‌شوند، بندهای موقتی ممکن است از مصالح ساختمانی ساخته شوند که در این صورت غیر متخلخل می‌باشند.

بندهای موقتی بر حسب مواد به کار رفته در ساختمان آن دارای انواع مختلف هستند که عبارتند از بندهای چپری، چوبی، سنگی، توری سنگی، ملاتی، خاکی.

ب- بندهای دائمی:

هنگامی از این بندها استفاده می‌شود که بندهای موقتی برای کنترل کافی نباشند. ساخت آنها عموماً با استفاده از مصالح ساختمانی و سیمان می‌باشد و گرچه هزینه احداث آن بیشتر از بندهای موقتی است ولی هزینه حفظ و نگهداری آنها کمتر می‌باشد. بندهای دائمی ممکن است به صورت مستقیم و یا قوسی ساخته شوند.

به‌منظور ساماندهی رودخانه بر مبنای اطلاعات هیدرولیکی بدست آمده از اجرای مدل‌های کامپیوتری، سازه‌های مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدیهی است بجای استفاده از دراپ در هرآبراهه، به شرط داشتن شرایط لازم می‌توان از سازه‌هایی نظیر بند سنگی و ملاتی، بند گابیونی، سد چپری، سد خشکه‌چین و ... استفاده نمود.

بررسی میزان تنش برشی وسرعت مجاز درآبراهه، شرایط هیدرولیکی آن را برای عبور سیلابهای با دوره بازگشت مورد نظر نشان می‌دهد. فواصل بین بندها، باتوجه به پروفیل طولی و بر مبنای نوسانات شدید تنش برشی انتخاب می‌شود.

در مجموع با اعمال کلیه اقدامات پیش‌بینی شده می‌توان تا حد زیادی درصد اوج آبدهی سیلاب را کاهش و بدون ایجاد مشکل برای اراضی مجاور وکلیه مستحدثات رودخانه، سیلاب‌های با دوره بازگشت مورد نظر را عبور داد.

- **طراحی دراپ یا شیب شکن:**

به‌منظور طراحی دراپ در آبراهه‌ها از روش موسوم به شمارهٔ شیب شکن[۲] استفاده می‌شود. این روش بر مبنای آزمایشات انجام شده توسط (Rand, 1922) و با استفاده از آنالیز داده‌های آزمایشگاهی به شرح زیر ابداع شده است:

$$\frac{y_1}{d_z} = 0.54\left(\frac{y_c}{d_z}\right)^{1.275}$$

۱- شیب حد شیبی است که در آن‌هیچگونه حرکتی در مصالح بستر آبراهه مشاهده نمی‌شود.

2- Drop Number

$$\frac{y_1}{d_c} = 0.54(\frac{y_c}{d_z})^{0.275}$$
$$\frac{y_z}{d_z} = 1.66(\frac{y_c}{d_z})^{0.81}$$
$$\frac{L_{G1}}{d_z} = 4.3(\frac{y_c}{d_z})^{0.09}$$
$$L_t = 6.9(y_2 - y_1)$$

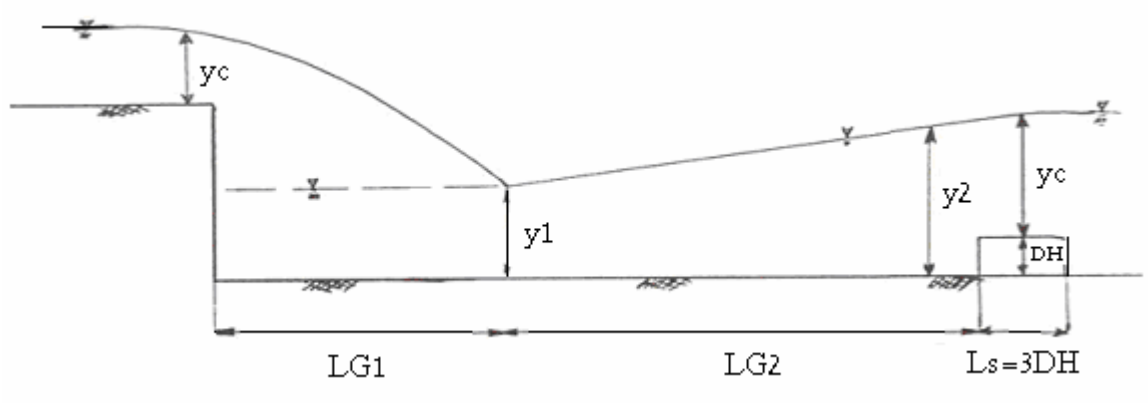
که در آنها:

y_c : عمق بحرانی (m)

Y_1: عمق قبل از پرش y_2: عمق بعد از پرش d_2: ارتفاع دراپ L_t: طول کل پرش

L_{G1}: فاصله محل برخورد پیشانی جریان با کف حوضچه نسبت به ابتدای دراپ.

کلیه پارامترهای فوق در شکل شماره (۴-۳۱) نشان داده شده است.



شکل (۳۱)- پارامترهای مشخصه دراپ وحوضچه آرامش

مراحل طراحی به‌شرح زیر می‌باشد:

۱- با استفاده از رابطه زیر مقدار y_c محاسبه می‌شود:

$$y_c = \left[\frac{(Q/b)^2}{g}\right]^{1/3}$$

۲- با استفاده از رابطه‌های قبل، مقدار $y_{1\,\text{محاسبه}}$ می‌گردد.

۳- با استفاده از رابطه ارائه شده در قبل، مقدار y_2 محاسبه می‌شود.

۴- با استفاده از رابطه ارائه شده قبلی، مقدار L_{G1} بدست می‌آید.

۵- مقدار پرش یا L_t محاسبه می‌شود.

۶- با استفاده از اختلاف بین سطح آب در پایین دست و مقدار y_2 مقدار DH محاسبه می‌گردد.

- **ملاحظات فنی درطراحی شیب شکن‌ها**

ازآنجاییکه شیب‌شکن‌های قائم و مایل شبیه سرریز در سدهای کوتاه عمل می کنند، بسیاری از مسائل هیدرولیکی و پایداری آنها، نظیراین سدها می باشد.

شیب‌شکن‌ها مسائل خاص خود را دارا می‌باشند. به‌عنوان مثال در نظرگرفتن سازه‌های تنظیمی یا کنترل جریان بر روی شیب‌شکن، به‌منظورآبگیری از بالادست و یا به حداقل رساندن پایین‌افتادگی سطح آب (که در جلوگیری از فرسایش کانالهای خاکی بالادست بسیار مهم است)، از اهمیت خاصی برخوردار است.

- **انتخاب حوضچه آرامش مناسب برای شیب شکن‌ها**

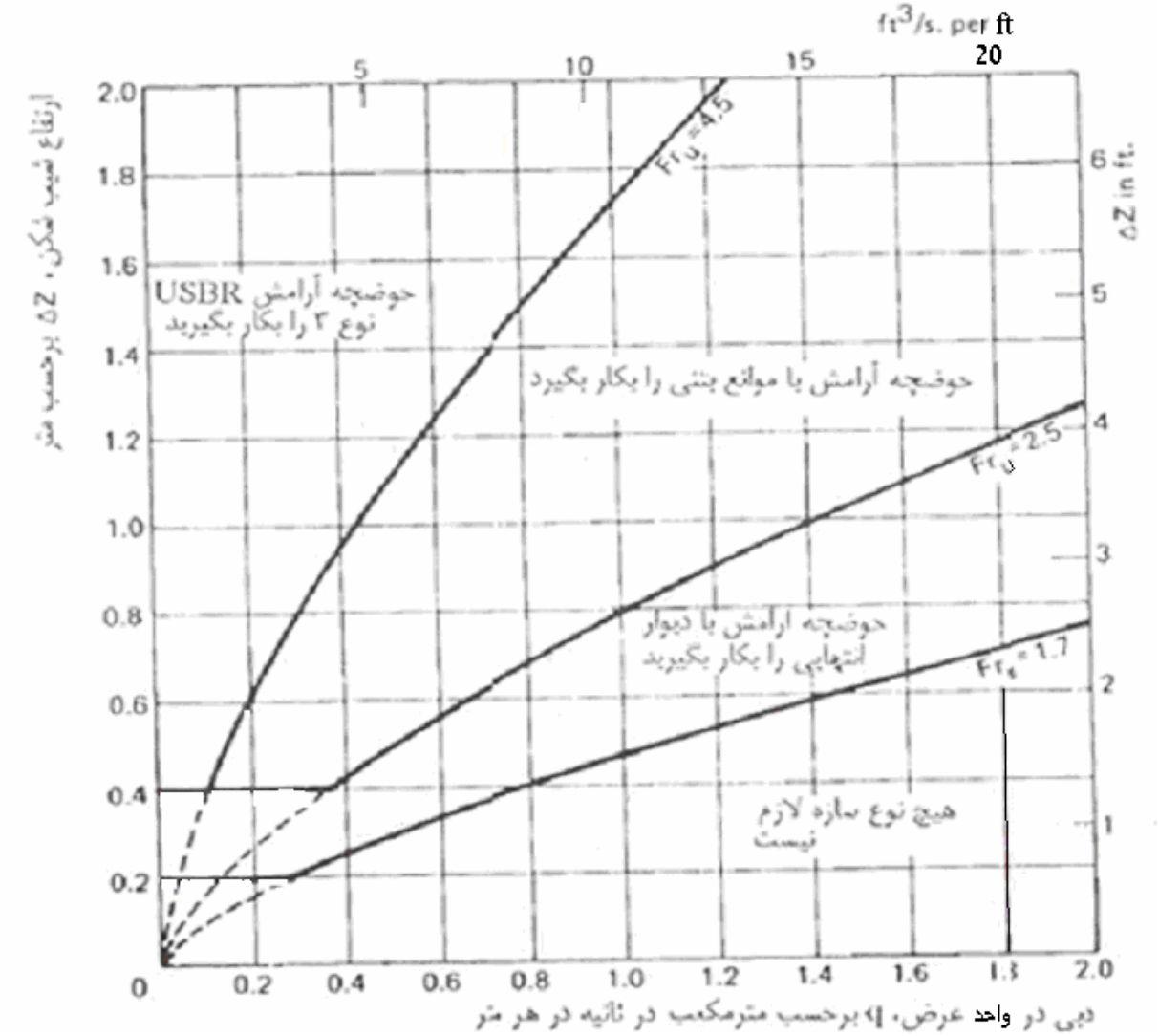
با توجه به اینکه عدد فرود در مقطع اولیه پرش (Fr_u)، میزان پایین افتادگی سطح آب (ΔZ)، و همچنین دبی در واحد عرض (q)، در انتخاب نوع حوضچه یا به‌عبارت دیگر نوع شیب‌شکن بسیار مؤثر می‌باشند، منحنی شکل(۳۲)که توسط Boos ارائه شده است می‌تواند راهنمای خوبی برای این منظور محسوب گردد.

از آنجایی‌که ساختمان مستهلک کننده انرژی برای دبی‌های کم و پایین افتادگی سطح آب کم، که دارای انرژی جنبشی مخرب بسیارکمی هستند، غیر عملی و غیر اقتصادی می‌باشد، در شکل (۳۲) برای ارتفاع شیب‌شکن (ΔZ) محدودیت‌های ۰/۲ و ۰/۴ متر در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر برای احتراز از فرسایش در اثر برخورد توده جریان بواسطه ریزش بر کف حوضچه آرامش، حداکثر میزان پایین افتادگی سطح آب (ΔH در شکل(۳۵) به ۱/۵ متر محدود می‌شود.

چنانچه کانالی بدون هیچ‌گونه سیستم کنترل سطح آب به‌وسیله شیب‌شکن به کانال دیگری وصل شود، با توجه به زیر بحرانی بودن جریان، منحنی از نوع M_2 در کانال بالادست تشکیل می‌گردد.

در صورتی‌که کانال بالادست از نوع خاکی باشد، پایین افتادگی سطح آب امکان فرسایش را در آن افزایش می‌دهد.

چنانچه در بالادست در فاصله نه چندان دور از شیب‌شکن، سازه‌های هیدرولیکی از قبیل آبگیر یا حوضچه آرامش موجود باشد در سیستم کنترل سطح آب آنها اختلالاتی به‌وجود خواهد آمد. بنابراین در صورتی که بتوان سیستمی ارائه نمودکه بتواند بازاء دبی‌های مختلف از پایین افتادن سطح آب جلوگیری نموده و در عین حال پس‌زدگی را نیز به‌وجود نیاورد، سیستم کنترل ایده‌آل خواهد بود.



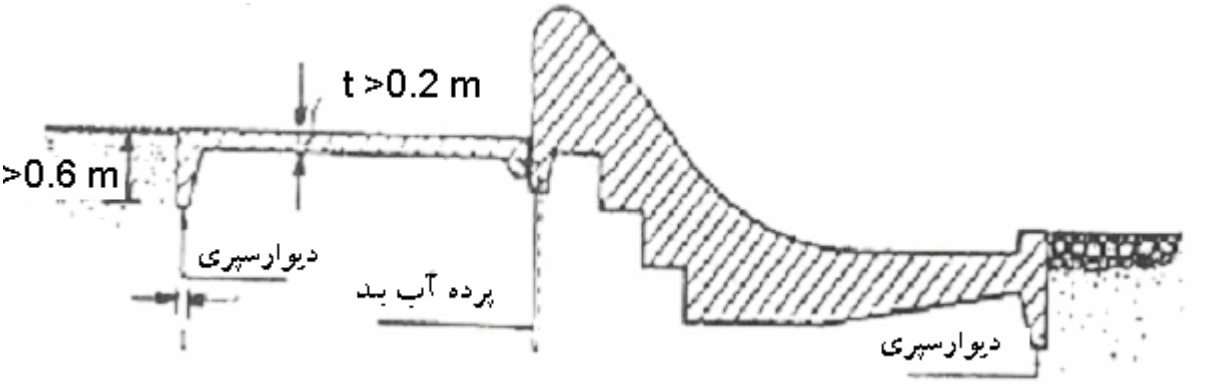
شکل۳۲- دیاگرام پیش بینی نوع حوضچه آرامش درشیب شکن‌ها

- **محاسبه ضخامت بتن در حوضچه آرامش شیب شکن و مسائل وابسته به آن**

برای تعیین ضخامت بتن در حوضچه آرامش شیب‌شکن، باید مطابق آنچه در مورد طراحی سدهای کوتاه روی پی‌های خاکی آمده است عمل شود. در حال حاضر برای این منظور روش Bligh یا Lane مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بایدتوجه داشت که تعیین ارتفاع دیوار سپری مناسب در پایین دست و در انتهای حوضچه آرامش شیب‌شکن از اهمیت خاصی برخوردار است. وجود سنگ‌چین در پایین‌دست حوضچه آرامش برای جلوگیری از جوشش خاک مؤثر است. شکل (۳۱) راهنمای خوبی در این مورد می‌باشد.

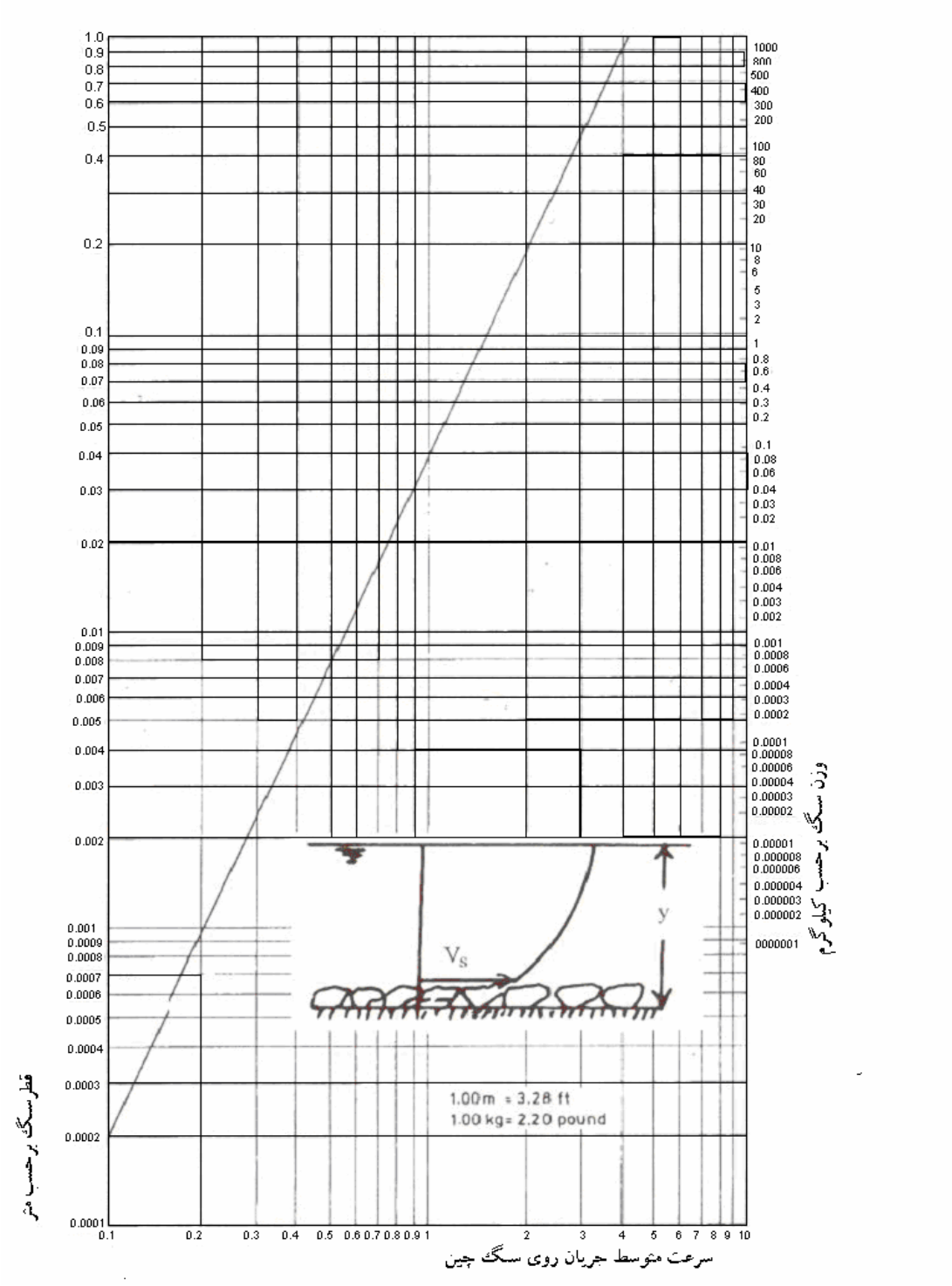
شیب‌شکن باید در مقابل واژگونی و لغزش پایدار باشد. محاسبات مربوط به پایداری آن مطابق مباحث سرریزها و سدها است.



شکل ۳۳- دیواره‌های سپری بالادست و پایین‌دست در شیب‌شکن‌ها

- **حفاظت خاک در پایین‌دست حوضچه آرامش**

چنانچه در پایین‌دست شیب شکن، کانال از نوع خاکی باشد، حفاظت بستر کانال در مقابل فرسایش مطرح می‌شود. حفاظت معمولاً به‌صورت سنگ‌چین در نظر گرفته می‌شود. طول ناحیه حفاظت شده را معمولاً ۴ برابر عمق آب در کانال در نظر می‌گیرند. ولی در هر حال این طول نباید کمتر از ۱/۵ متر اختیار شود. برای تعیین قطر سنگ‌ها می‌توان از شکل (۳۴) استفاده نمود.



شکل ۳٤- منحنی تغییرات V_s نسبت به قطرمعادل D_e یاوزن سنگ w

۳-۲-۱-۵- شیب شکن‌های قائم

درطراحی تمام شیب‌شکن‌های قائم، با توجه به حرکت توده جریان، باید مجرای هوا [1] نیزدر نظر گرفته شود.

- **شیب شکن قائم بدون مانع [2] درحوضچه آرامش**

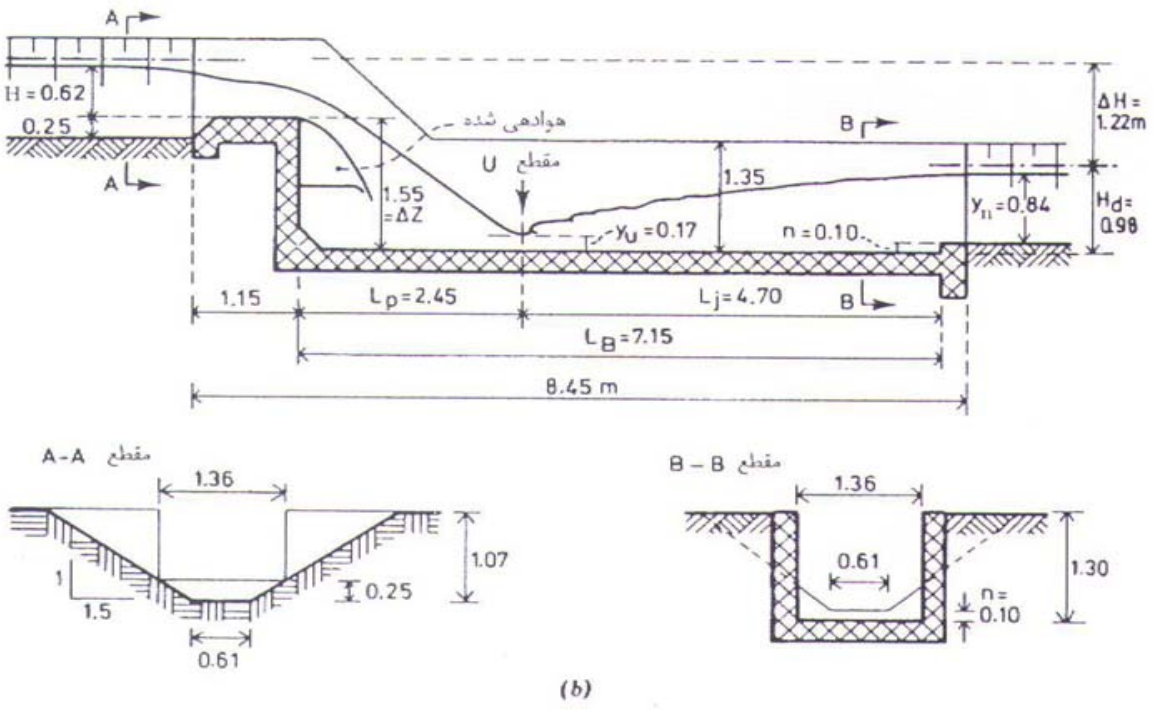
ازآنجاییکه در این نوع شیب‌شکن‌ها موانع بکار نمی‌رود و فقط یک دیوار سرتاسری در انتهای حوضچه آرامش در نظرگرفته می‌شود، طول حوضچه یا به‌عبارت دیگر طول پرش هیدرولیکی ایجاد شده در حوضچه زیاد است. بنابراین در موارد خاصی از این شیب‌شکن استفاده می‌شود طول مربوط به حوضچه از شکل شماره (۳۲) برآورد می‌شود. درشکل شماره (۳۵) نیز نمونه‌ای از شیب شکن قائم بدون موانع ملاحظه می شود.

محاسبات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم بدون موانع به‌صورت زیر انجام می‌گیرد:

الف- باراستاتیکی [3] (H)، بار دینامیکی [4] (H_a)،و بار مؤثر [5] (He) بر روی تاج سرریز محاسبه می‌شود.

ب- با توجه به بار خالص [6] (اختلاف خطوط انرژی در سراب و پایاب)، ΔH، ارتفاع شیب‌شکن، ΔZ، محاسبه می‌شود:

$$\Delta Z + He = \Delta H + (y_n + \frac{v^2}{2g}) + n$$



شکل ۳۵- شیب‌شکن قائم بدون موانع

رابطه (۵۰) را می‌توان با تقریب خوبی به‌صورت زیر نوشت:

$$\Delta Z + H = \Delta H + (y_n + n)$$

1- Aeration Groove
2- Vertical Drop Without Baffle Blocks
3- Static Head
4- Dynamic Head
5- Effective Head
6- Net Head

که در آن y_n عمق آب در کانال پایین‌دست و n ارتفاع گودال در انتهای حوضچه آرامش است.

ج- سرعت آب در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی، V_1، (V_u در شکل ۴-۳۵) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_u = \sqrt{2g\Delta Z}$$

د- عمق اولیه پرش هیدرولیکی با توجه به V_u بدست آمده، به دو صورت زیر محاسبه شده و مقادیر بدست آمده با هم مقایسه می‌گردند:

$$V_1 = V_u$$

$$y_1 = y_u = \frac{q}{V_u}$$

$$y_1 = \frac{y_b}{2}\left[\sqrt{1+8Fr_b^{\,2}} - 1\right]$$

دراین رابطه Fr_b عدد فرود جریان و y_b عمق جریان در پایین دست است.

ه- عدد شیب‌شکن[1] محاسبه می‌شود:

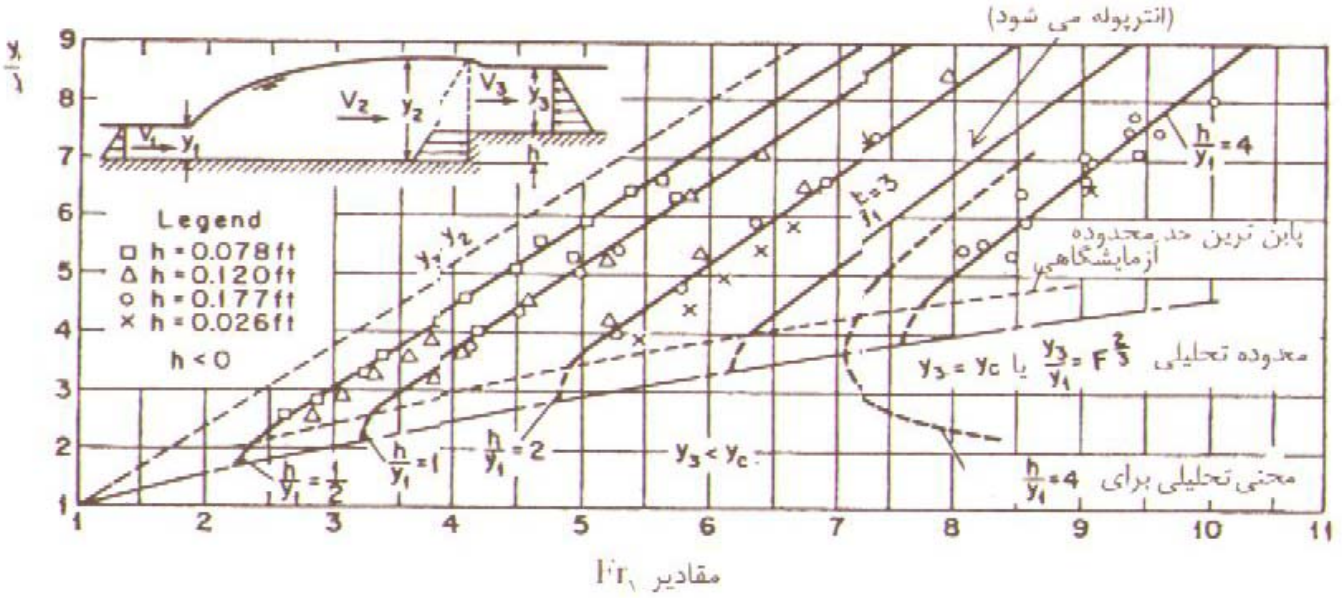
$$D_r = \frac{q^2}{g\Delta Z^3}$$

و- L_p و L_j محاسبه می‌شوند:

$$L_p = \left[4/3D_r^{0/27}\right] \times \Delta Z$$

$$L_j = 5yb = 5 \times (y_2 + n)$$

در رابطه اخیر ارتفاع گودال از شکل (۳۶) بدست می‌آید.



شکل ۳۶ ـ تنظیم پرش هیدرولیکی به‌وسیله گودال

ز- ارتفاع آزاد حوضچه را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

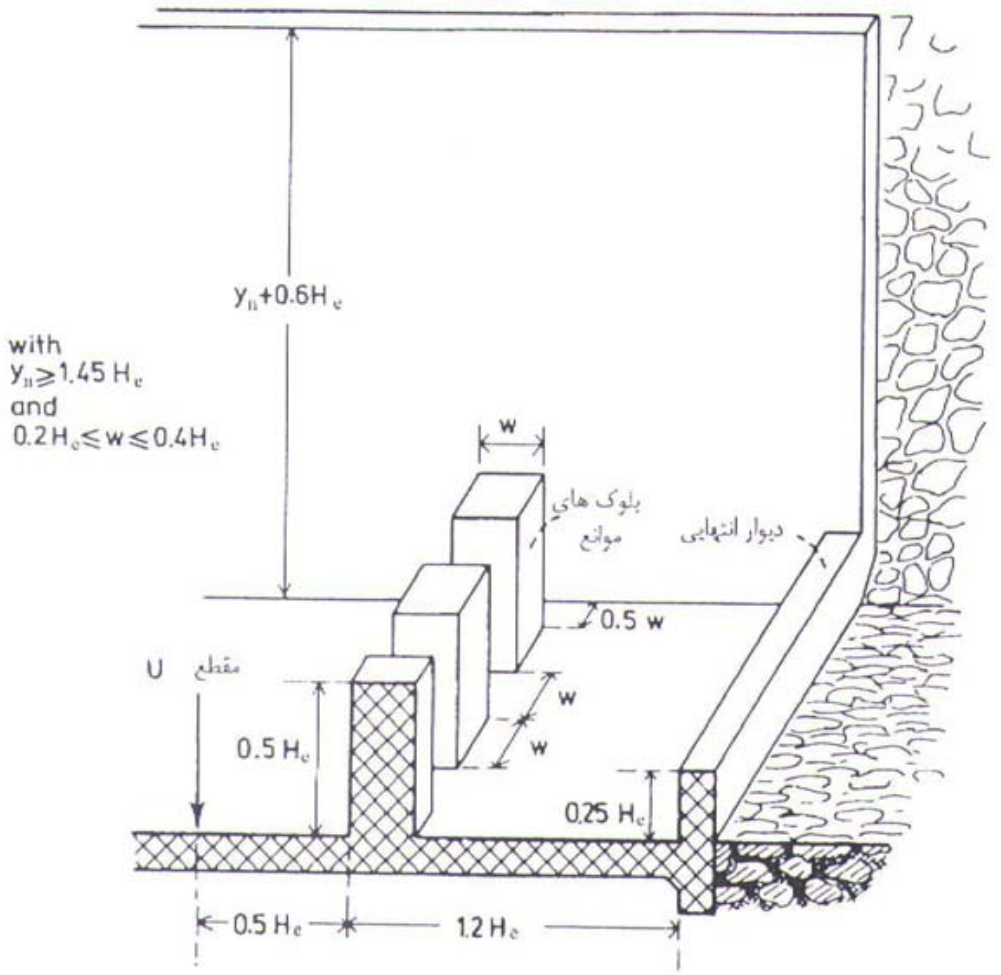
$$F_b = 0.6H_e$$

1- Drop Number

- **شیب‌شکن قائم با موانع[1] درحوضچه آرامش**

همانطورکه در بالا اشاره شده است، برای کاهش طول حوضچه آرامش ممکن است از شیب‌شکن قائم با موانع استفاده شود. یکی از معایب این حوضچه چسبیدن آشغال به بلوک‌های بتنی در حوضچه آرامش است که لازم است شیب‌شکن بطور مرتب از وجود آشغال پاک شود.

محاسبات هیدرولیکی این شیب‌شکن مانند شیب‌شکن بدون موانع است با این تفاوت که بعد از محاسبه L_p ابعاد حوضچه به‌صورت شکل(۳۷) در نظر گرفته می‌شود.



شکل۳۷ - ابعاد بلوک‌های بتنی و حوضچه آرامش در شیب‌شکن قائم با موانع

[1]- Vertical drop with baffle blocks

۳-۲-۱-٦- شیب‌شکن Sogreah

شرکت Sogreah در فرانسه شیب‌شکن ساده‌ای را طراحی نموده است که برای اختلاف ارتفاع تا ۷ متر و برای دبی تـا ۱ متـر مکعب بر ثانیه مناسب است. این شیب‌شکن برای کانالهای با عرض کف ۰/۲ تا ۱ متر و عمق آب ۰/۱ تا ۰/۷ متر توصیه می‌شود.

ابعاد شیب‌شکن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

۱- ارتفاع سرریز در بالادست،

$$P = y_1 - H$$

۲- دبی جریان،

$$Q = CL\sqrt{2g}H^{\frac{3}{2}}$$

در این رابطه، C=۰/۳۶ برای سرریز لبه تیز و C=۰/۴ برای سرریز لبه گرد با شعاع انحنای ۵ تا ۱۰ سانتیمتر است.

۳- طول تاج سرریز،

$$L = B_b - 0.1$$

که درآن:

B_b= عرض حوضچه آرامش می‌باشد.

۴- حوضچه آرامش مطابق استاندارد فرانسه باید حجم معینی داشته باشد. این حجم به‌صورت زیر است:

$$V = 6.7Q \times \Delta H$$

در اینجا ΔH =اختلاف سطح آب در سراب و پایاب است.

۵- عرض حوضچه آرامش، B_b،

$$\mathrm{B_b} = \frac{V}{\left[L_b(y_2 + d)\right]}$$

که در آن:

L_b= طول حوضچه آرامش،

d= ارتفاع دیوار بتنی در انتهای حوضچه آرامش،

Y_2= عمق آب در کانال پایین‌دست.

۶- ارتفاع دیوار بتنی در انتهای حوضچه آرامش m ۰/۳تا ۰/۱=d در نظر گرفته می‌شود.

۷- طول حوضچه آرامش،

$$L_b = 1.5\Delta H$$

طرح تیپیک این شیب شکن درشکل (۳۸) نشان داده شده است.

۳-۲-۱-۷- شیب‌شکن مایل[1]

مؤسسه USBR شیب‌شکن مایل با مقطع مستطیلی برای دبی از ۱/۴ تا ۲/۸ متر مکعب در ثانیه را پیشنهاد کرده است. بر اساس پیشنهاد این مؤسسه برای دبی‌های کمتر بهتر است از شیب‌شکن لوله‌ای استفاده شود. این شیب‌شکن برای اختلاف ارتفاع تا ۴/۵ متر قابل قبول است.

شیب‌شکن از تبدیل ورودی، ناحیه افقی ورودی، شیب مایل، حوضچه آرامش و تبدیل در انتهای سازه تشکیل شده است. تبدیل در ناحیه ورودی ممکن است خاکی باشدکه در اینصورت حفاظت آن در مقابل فرسایش امری ضروری می‌باشد. شیب‌شکن از بتن مسلح ساخته می‌شود و ابعاد آن در جدول شماره ۷ آمده است. مقطع کنترل سطح آب ممکن است به‌صورت مقطع کنترل ذوزنقه‌ای[1]، سرریز[2] یا به صورت دریچه کنترل[3] در نظر گرفته شود. در این شیب‌شکن‌ها معمولاً مقطع کنترل ذوزنقه‌ای بکار می‌رود. مقطع کنترل ذوزنقه‌ای باید به‌نحوی طراحی شود که بازاء ۲۰ درصد دبی طرح تا یک برابر دبی، سطح آب در بالادست پایین نیافتد. طرح این شیب‌شکن درشکل شماره (۳۹) نشان داده شده است.

طول L_o در شکل(۳۷) از جدول(۷) استخراج شده و طول L_f به‌صورت زیر بدست می‌آید:

$$L_f = 2.5 y_b$$

در اینجا y_b، عمق آب در حوضچه آرامش است. (جدول۷)

رقوم کف ناحیه افقی ورودی باید هم تراز یا کمی پایین‌تر از رقوم کف کانال بالادست باشد. برای بدست آوردن رقوم کف ناحیه افقی می‌بایست H_o از جدول یک استخراج شده و رقوم کف در فاصله H_o از سطح آب قرار بگیرد.

شیب کف قسمت مایل ۱ افقی به ۲ عمودی (m=۰/۵) و ملایم تر اختیار می‌شود ولی بهتر است m=۲ اختیار شود.

عرض در تمام طول سازه یکسان اختیار شده و به‌صورت تجربی در زیر ارائه شده است:

$$B = \frac{18.46\sqrt{Q}}{Q + 9.91}$$

در این رابطه،

Q= حداکثر دبی جریان بر حسب متر مکعب در ثانیه

B= عرض سازه بر حسب متر.

رابطه فوق برای دبی‌های بیشتر از ۱ متر مکعب بر ثانیه صادق است. برای دبی‌های کمتر، B از جدول(۷) برداشت می‌شود.

ابعاد حوضچه آرامش به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

- طول حوضچه آرامش حداقل مساوی $4y_b$ برای بهره‌برداری دائم و حداقل $3y_b$ برای عبور سیلابها در نظر گرفته می‌شود.
- فاصله بین ردیف‌های بلوک‌های بتنی L_1=۰/۸y_b در نظر گرفته می‌شود.
- ارتفاع آزاد در حوضچه آرامش برای اختلاف ارتفاع ΔZ =۱ m، ۰/۵ متر و برای ΔZ =۴/۵ m، ۰/۷ متر در نظر گرفته می‌شود.
- در حوضچه آرامش بلوک‌های بتنی با عرض ۰/۲ متر و در فواصل ۰/۲ متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. بلوک‌هایی که در ابتدای حوضچه قرار می‌گیرند افقی و با ارتفاع ۰/۲ متر ساخته می‌شوند. بلوک‌های بتنی که در وسط حوضچه قرار می‌گیرند، دارای ارتفاع از ۰/۲۵ تا ۰/۴ متر بسته به دبی و اختلاف ارتفاع ΔZ متغیرند. طول بلوک‌های بتنی در وسط حوضچه معمولاً ۱/۲ برابر ارتفاع آنها در نظر گرفته می‌شود.

1- Inclined Drop

[1] - Trapezoidal Control Notch

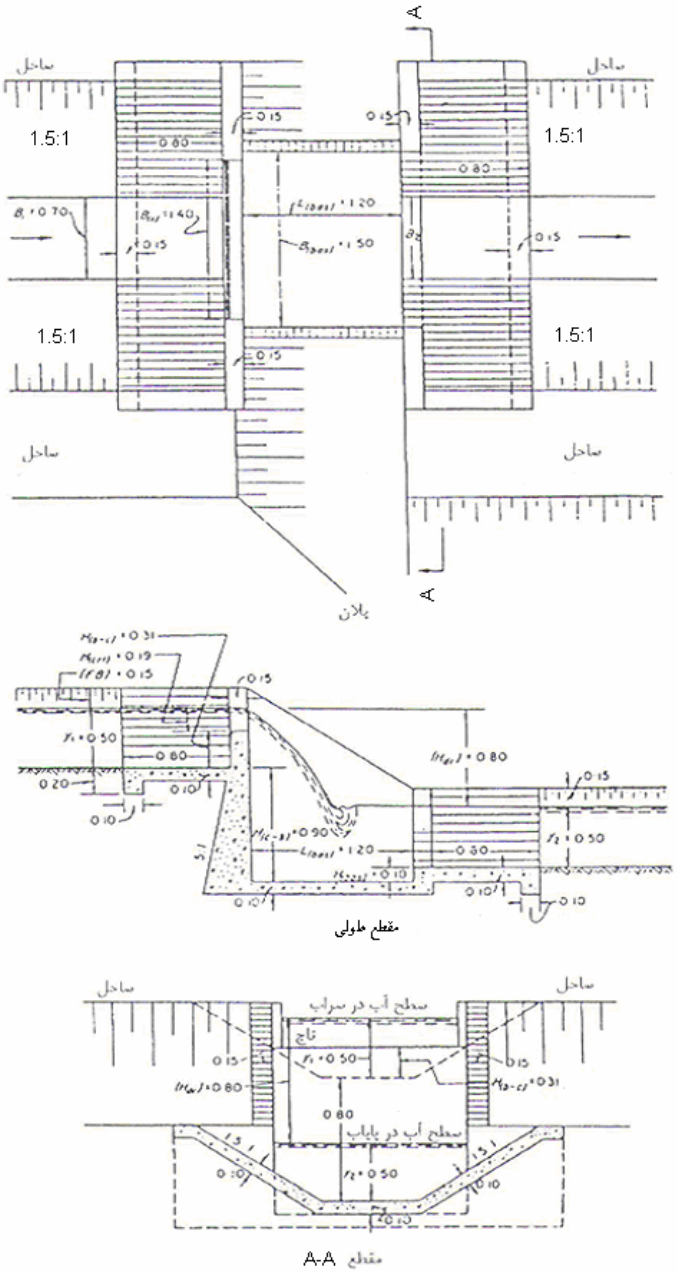
[2]- Weir

[3] - Control Gate

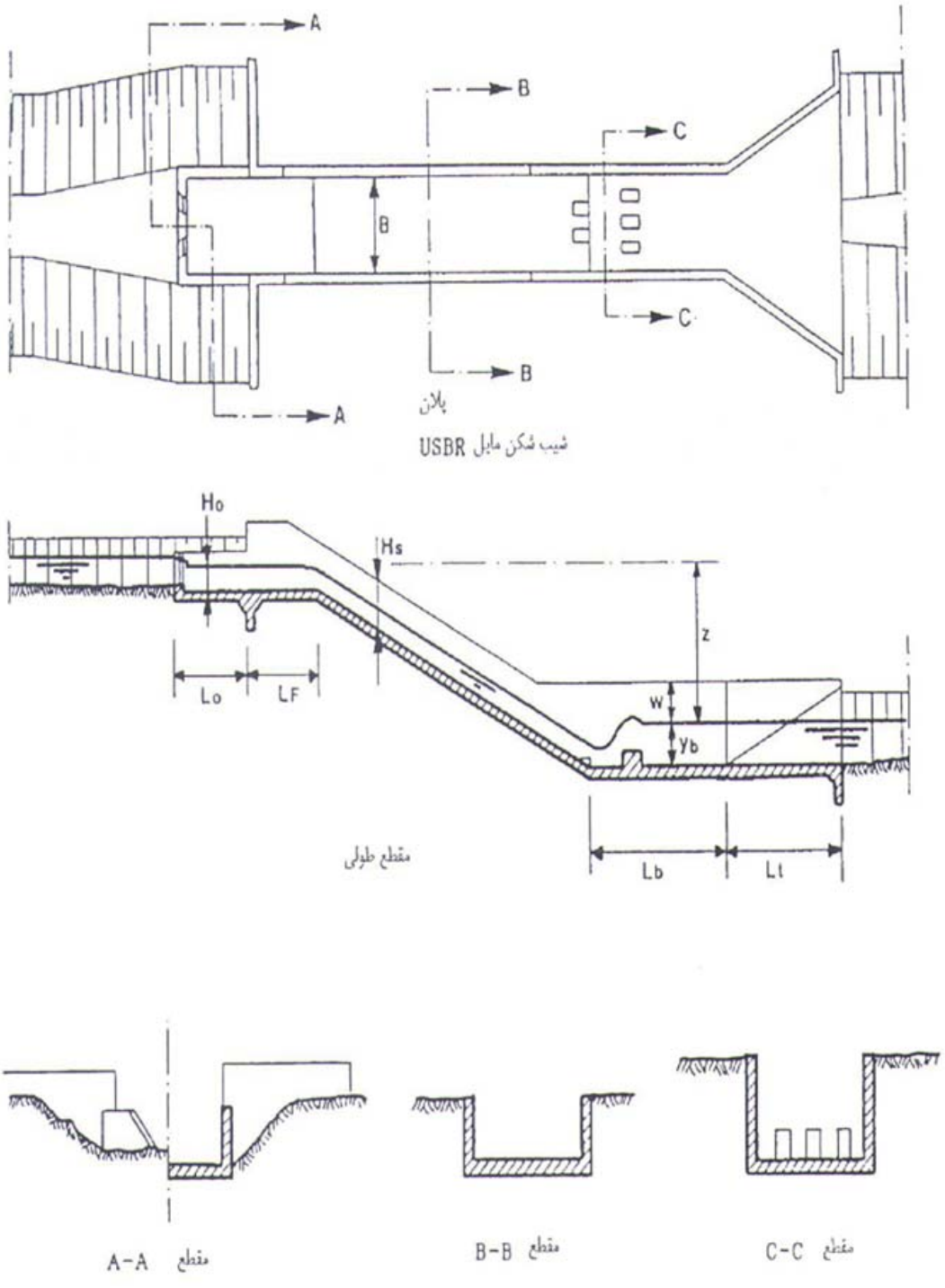
برای کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش رقوم کف حوضچه را در فاصله y_2+hv2 از خط انرژی در کانال پایین‌دست قرار می‌دهند. (hv_2= ارتفاع نظیر سرعت است). در چنین حالتی رقوم خط انرژی در کانال پایین‌دست در جهت اطمینان بر اساس کاهش ضریب زبری کانال در حدود ۲۰ درصد محاسبه می‌شود.

جدول (۷)- ابعاد شیب‌شکن مایل مستطیلی مندرج شکل(۳۹)

دبی طرح Q (m^3/sec)	عرض سازه B (m)	قسمت ورودی		ارتفاع شیب مایل H_s(m)	عمق آب در حوضچه آرامش، y_b (m)			طول تبدیل خروجی L_t (m)
		L_o (m)	H_o (m)		ΔZ = متر ۰/۹	ΔZ = متر ۳	ΔZ = متر ٤/٥	
۰/۱٥	۰/۹	۰/۷۹	۰/۳	۰/٥	۰/۳۹	۰/٥۱	۰/٥٦	۱/٥
۰/۳	۱/۱	۱/۰۹	۰/٤۱	۰/٦	۰/٥۲	۰/٦۷	۰/۷٤	۱/۸٥
۰/٤	۱/۲	۱/۰۹	۰/٥	۰/٦٥	۰/٦	۰/۷٥	۰/۸	۲/۱۰
۰/٥	۱/۳	۱/۲٥	۰/٥۳	۰/۷	۰/٦٥	۰/۸	۰/۹	۲/۳
۰/۷	۱/٥	۱/٤	۰/٦	۰/۷٥	۰/۷۰	۰/۹	۱/۰	۲/٤٥
۰/۹	۱/۷	۱/٥	۰/۷	۰/۸	۰/۷٥	۰/۹٥	۱/۰٥	۲/٦
۱/۱	۱/۸	۱/۷	۰/۷٥	۰/۸	۰/۸	۱/۰٥	۱/۱٥	۲/۷٥
۱/٤	۲/۰	۱/۷	۰/۸٤	۰/۸٥	۰/۸۸	۱/۱۱	۱/۲۲	۳/۰٥
۱/۷	۲/۱	۲/۰	۰/۹۲	۰/۸٥	۰/۹۳	۱/۱۹	۱/۳	۳/۰٥
۲/۰	۲/۲	۲/۰	۰/۹۹	۰/۹	۰/۹۸	۱/۲٥	۱/۳٥	۳/۳٥
۲/۲٥	۲/۳	۲/۰	۱/۰۷	۰/۹	۱/۰٥	۱/۳۲	۱/٤٥	۳/۳٥
۲/٥	۲/٤	۲/۳۱	۱/۱٤	۰/۹٥	۰/۰۸	۱/۳۷	۱/٤۹	۳/٦٥
۲/۸	۲/٥	۲/۳۱	۱/۲۲	۱/۰۰	۱/۱٥	۱/٤٥	۱/٥۷	۳/٦٥



شکل۳۸- شیب‌شکن Sogreah



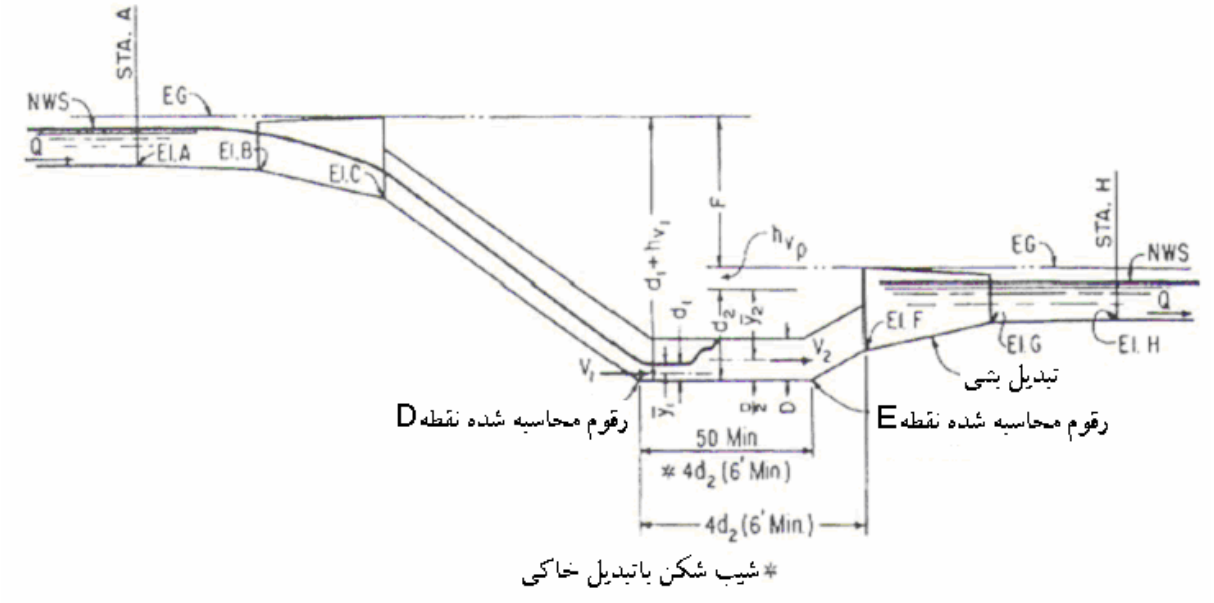
شکل ۳۹- شیب‌شکن مایل مستطیلی مؤسسه USBR

۳-۲-۱-۸- شیب‌شکن‌های لوله‌ای[1]

برای دبی‌های کمتر از ۱/۵ متر مکعب در ثانیه و اختلاف ارتفاع تا ۴/۵ متر از شیب‌شکن لوله‌ای می‌توان استفاده کرد.

شیب‌شکن‌های لوله‌ای دو نوع هستند:

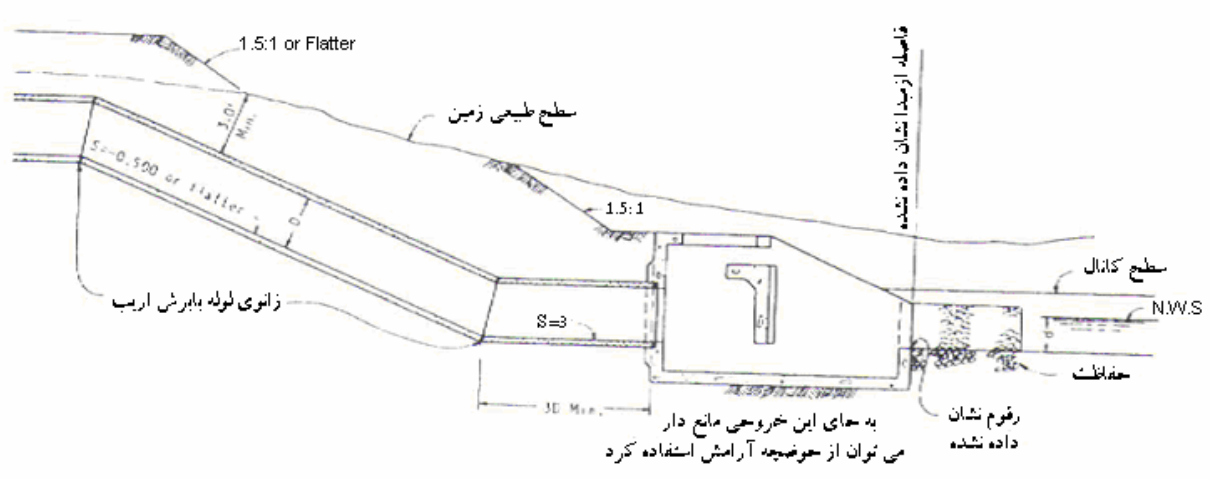
نوع۱- شیب‌شکن لوله‌ای نوع ۱ (شکل۴۰) از نظر ساخت ساده و اقتصادی می‌باشد. این نوع شیب‌شکن در جایی بکار گرفته می‌شود که امکان بسته شدن مجرا به‌وسیله آشغال و مواد معلق وجود ندارد. انتهای شیب‌شکن با شیب معکوس ساخته می‌شود. این شیب‌شکن با مقطع کنترل ذوزنقه‌ای به‌شکل سرریز یا دریچه، که در ابتدای سازه قرار می‌گیرد، همراه است.



شکل ۴۰- شیب‌شکن لوله‌ای نوع ۱

نوع ۲- چنانچه پیش‌بینی شود که در آب کانال انتقال مواد معلق و یا رسوبات وجود خواهد داشت، بهتر است که از شیب‌شکن نوع ۲ (شکل ۴۱) استفاده شود. انتهای شیب‌شکن لوله‌ای نوع ۲ معکوس نبوده و مواد معلق در آن جمع نمی‌شود.

1- Piped Drops



شکل ٤١- انتهای شیب‌شکن لوله‌ای نوع ۲

برای استهلاک انرژی مخرب، حوضچه آرامش یا تخلیه کننده با دیوار مانع[1] در نظر گرفته می‌شود. چنانچه امکان رشد گیاه در کانال فراهم باشد یا به‌هرنحوی مواد معلق در کانال جریان بیاید، بهتر است از حوضچه آرامش استفاده شود زیرا علف هرز ممکن است به دیوار مانع تخلیه کننده چسبیده و آن را مسدود نماید.

جنس لوله‌ای که برای شیب‌شکن بکار گرفته می‌شود معمولاً از نوع بتن پیش تنیده یا از نوع آزبست سیمان است.

1- Baffled Outlet

فصل چهارم
دستورالعمل‌ها و توصیه‌ها

٤-١- مقدمه

دوام و عملکرد سازه‌های کنترل فرسایش و رسوب در رودخانه بستگی به اجرای مناسب، نگهداری و مرمت مداوم آن‌ها دارد. از این‌رو توصیه‌های کلی برای اجرا و نگهداری این سازه‌ها ارائه می‌گردد.

۴-۲- نکات عمومی در اجرای سازه‌های کنترل فرسایش و رسوب در رودخانه

اغلب راه حل‌های آزمون و خطا در حل مسائل فرسایش کاربرد دارد ، اما این روش می‌تواند خیلی پر هزینه و گاهی بی نتیجه و دارای فرایندی زمان بر باشد. در اینجا چند نکته اساسی برای لحاظ این موضوع قبل از آغاز اجرای پروژه ارائه می‌شود.

- سعی شود دقیقاً آن‌چه در طی سال‌های قبل در طول ساحل رودخانه رخ داده و دارای تغییر است، تشخیص داده شود. بحث و گفتگو در مورد فوق با همسایه‌ها یا ساکنین بومی منطقه می‌تواند مفید باشد. این موضوع می‌تواند به تلاش برای پیش‌بینی روند تغییرات و حل مسائل آینده کمک کند.
- آیا پروژه‌ای که در حال برنامه‌ریزی آن هستید به مسائل جدیدی منجر می‌شود؟ آیا طرح‌هایی که ریخته‌اید کفایت می‌کند؟ برای مثال اگر انجام یک پروژه اندازه عرض کانال را تنگ کند، آیا می‌تواند باعث ایجاد سیلاب در بالادست گردد؟ همچنین، یک جریان جمع شده می‌تواند جریان سریع‌تری ایجاد کند، و این باعث مسائل فرسایشی بدتر در پایین دست شود. به‌یاد داشته باشید که حفاظت ساحل رودخانه اغلب نیازمند تلاشی قابل ملاحظه است، و اغلب نیازمند مصالح سنگی بزرگ است. توصیه‌های اولیه یا پیشنهادات آغازین نیازمند استفاده از کارشناسان مجرب می‌باشد بخصوص اگر در آغاز یک بازسازی بسیار گران و پیچیده هستید. از این‌که بر وظایفتان مسلط هستید، اطمینان پیدا کنید.
- اگر جریان رودخانه مقدار زیادی اشیاء شناور و آشغال حمل می‌کند یا دارای **قطعات یخ** در زمان ذوب شدگی در فصل بهار است، روش کنترلی انتخاب شده با این نوع آوردهای رودخانه‌ای ، **نباید خسارات دیده و به سادگی تخریب شود.**
- در تمام پروژه‌های حفاظت ساحل رودخانه‌ای **لازم است در طول ساحل از نقاط پایدار شروع و به نقاط پایدار پایان یابد.** این محل‌ها، نواحی هستند که تحت تاثیر فرسایش نبوده یا آن که نیروی اصلی جریان موازی با ساحل رودخانه است. ساختمان پروژه، از بالادست آغاز می‌شود و کار به سمت پایین دست با مصالح طبیعی مقاوم به فرسایش، شکل می‌گیرد.
- روشی‌که برای حفاظت ساحل، بکار می‌رود باید دارای سطح زبر یا ناهموارتر از کانال‌های طبیعی باشد، این امر سرعت جریان در مجاورت ساحل را آرام کرده و موجب کاهش تصادم‌های فرسایشی ناشی از مصالح رودخانه‌ای می‌شود.
- پیش‌بینی‌های لازم برای نگهداشت مستمر پروژه فراهم گردد. خسارت سیل و فرسایش باید در هر زمان برآورد گردد به عبارتی داشتن **دستورالعمل مناسب اجرای سریع بازسازی ضروری است.** نظارت مستمر و دوره‌ای بر پروژه نیز لازم است. این موضوع مخصوصاً تا کنترل ساحل پس از عبور سیلاب به سمت پایین تائید می‌شود. **اجرای تعمیرات اساسی قبل از وقوع سیلاب بعدی ضروری است.**

- اجرای سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه می‌بایست در زمان کم آبی صورت گیرد تا هزینه‌های انحراف آب در حین ساخت به حداقل برسد.
- برای نقطه شروع اجرای سازه‌ها باید موقعیت منابع قرضه و جهت حمل مصالح در نظر گرفته شود. به طور مثال در صورتی‌که مصالح از پایین دست به بالادست و در داخل آبراهه حمل می‌شود، نقطه شروع اجرای سازه‌ها باید از بالادست باشد.
- در انتخاب شیوه اجرا باید امکانات و استعدادهای محلی و منطقه‌ای طرح مد نظر قرار گیرد تا سبب صرفه جویی در هزینه‌های اجرایی گردد.
- لازم است کلیه علف‌ها، درختچه‌ها و شاخ و برگ و سنگ‌های موجود در بستر کار قبل از اجرای پوشش برداشته شود.
- قبل از اجرای پوشش سنگ‌ریز، لازم است بستر و دیواره‌ها با شیب طراحی شیب‌دهی شده و در صورت نیاز کوبیده شود.
- برای اجرای پوشش سنگ‌ریز از سنگ‌های مقاوم با دانه‌بندی مناسب استفاده گردد و در زیر لایه پوشش از فیلتر استفاده شده تا از فرسایش خاک زیرین جلوگیری گردد.
- برای اجرای پوشش سنگ‌ریز متناسب با قطر سنگ‌ها، مکان اجرای پروژه و امکانات قابل دسترس، مصالح پوشش با استفاده از دست یا بیل مکانیکی در لایه‌های مورد نظر چیده شوند به طوری که سنگ‌های کوچک‌تر، خلل و فرج سنگ‌های بزرگ‌تر را پر کنند. چیدن سنگ‌های کوچک در فضای خالی بین سنگ‌های بزرگ معمولاً با دست صورت می‌گیرد.
- در روی دیواره، چیدن سنگ‌ها باید از قسمت پنجه شروع شده و به طرف بالای دیواره ادامه یابد. باید دقت شود که لایه پوشش سنگ‌ریز لایه فیلتر را به خوبی بپوشاند. برای مرتب کردن سطح پوشش و متراکم کردن سنگ‌ها و کوبیدن آن‌ها روی دیواره، از بیل مکانیکی می‌توان استفاده کرد.
- در صورتی‌که پوشش سنگ‌ریز روی دیواره انجام شود، باید در جلوی پنجه شیب گودالی مطابق دستورالعمل حفر گردد و با سنگ‌های لایه پوشش پر شود تا پنجه را در مقابل فرسایش محافظت نماید. لایه فیلتر باید قسمت پنجه را نیز در بر بگیرد.
- لایه پوشش باید بلافاصله بعد از اجرای لایه فیلتر، اجرا شود.
- کف بندها باید در مقابل تاثیر سایش سنگ‌ها و مصالح حمل شده توسط جریان مقاومت کافی داشته باشند.
- پایداری پی (کف و دیواره‌ها) در رابطه با مقاومت، توان باربری و فرسایش می‌بایست مد نظر قرار گیرد.
- از آنجا که کف بندها اغلب همراه با سازه‌های کنترل فرسایش کناری ساخته می‌شوند، باید اتصال آنها با این سازه‌ها به‌خوبی صورت گیرد.
- کف بند باید به اندازه کافی از طرفین در داخل دیواره کناره ادامه داده شود تا اتصال بین کف بند و دیواره به‌خوبی بر قرار شود.
- در اجرای پوشش یک‌پارچه، تماس یک‌پارچه و پیوسته با خاک زیرین، مهم‌ترین نکته‌ای است که باید مد نظر قرار گیرد.
- سطح زیرین باید به‌خوبی صاف و شیب‌بندی شود تا پوشش روی سطح زمین قرار گیرد.
- اشیایی که از تماس با سطح زمین جلوگیری می‌کنند مانند قطعات چوبی و سنگ‌ها باید قبل از اجرا جمع‌آوری گردند.
- در روی شیب دیواره اجرای پوشش یک‌پارچه باید از بالای شیب شروع شده و به سمت پنجه ادامه پیدا کند. (در پوشش سنگ‌ریز اجرا از سمت پنجه به سمت بالای دیواره اجرا می‌شود.)
- چنانچه قرار باشد بذر پاشی در بین پوشش یک پارچه صورت گیرد، بهتر است قبل از اجرای پوشش بذر پاشی انجام شود.

٤-۳- نکات عمومی در نگهداری سازه‌های کنترل فرسایش و رسوب در رودخانه

اهمیت نگهداری کمتر از اهمیت طراحی و اجرای سازه‌های کنترل فرسایش و رسوب نیست. چه بسا سازه‌هایی که مناسب طراحی و اجرا شده‌اند ولی به دلیل اینکه برای نگهداری آن‌ها برنامه ریزی مناسب صورت نگرفته، بر اثر ایرادات جزئی که در مدت عملکرد سازه به وجود آمده، کارایی آن‌ها از دست رفته است. از این رو سازه‌های کنترل فرسایش و ساماندهی رودخانه باید به‌طور منظم و هر ساله و هم‌چنین بعد از هر سیلاب مورد بازرسی قرار گیرد و سازه‌های تخریب شده و یا فرسایش‌های موضعی ایجاد شده در اطراف سازه ترمیم شود. در اینجا توصیه‌های کلی برای نگهداری سازه های کنترل فرسایش و رسوب در رودخانه ارائه می‌شود.

با رعایت موارد ذیل فرسایش کناری رودخانه به حداقل می‌رسد:

- تا فاصله ۶ متری از ساحل، زراعت و دامپروری نشود. استفاده از پوشش گیاهی ثابت که ریشه‌های آن، پایدار کننده خاک است، از ریزش کناره‌ها جلوگیری کرده و حفاظت محدوده مورد نظر نیز تامین خواهد شد.
- سربار اضافی از کناره‌های ساحل دور نگه‌داشته شود. بدنه درختان مرده، آثار مخروبه و آوار، ساحل را از بین می‌برد و نباید نزدیک تر از ۶ متری ساحل ریخته شوند. هم‌چنین سعی شود تا از عملکرد ماشین‌آلات کشاورزی در این ناحیه اجتناب گردد. سربار اضافی در مجاورت کناره‌های رودخانه زمین آن‌را تضعیف کرده و باعث شکسته شدن ساحل و لغزیدن آن به سوی کانال جریان می‌گردد.
- حتی‌الامکان از چرای دام در کناره‌ها اجتناب شود. کمبود پوشش گیاهی و پایمال کردن زمین و فروریختن ساحل توسط دام، مشارکت جدی در فرسایش و مسائل آلودگی تلقی می‌گردد. هر گاه جریان آب رودخانه، منبع اصلی آب برای دام باشد، از حصارکشی استفاده شود تا ناحیه‌ای که دام می‌تواند به رودخانه برسد، محدود و یا کنترل شود. ترجیحاً محل آب‌خوری در ساحل شیب‌دار نباشد. معمولاً محل آب‌خوری دام در خم داخلی کانال در جایی‌که سرعت جریان آب آرام است، قرار می‌گیرد. حصارکشی در محدوده ۶ متری (بالادست) و یک مسیر مجاز به عرض ۱۵ متر جهت دسترسی به محل‌های آب‌خوری پیشنهاد می‌شود.
- وجود بار رسوبات، موانع، کنده درختان، توده‌های آشغال، رشد علف‌های هرز و دیگر گیاهان دربستر کانال، اغلب جریان را به‌سوی جریان کناری هدایت می‌کنند. بنابراین، هرگونه انسدادی در مسیر جریان باید از کانال جریان پاک‌سازی شود. معمولاً این موضوع اولین قدم در به‌عهده گرفتن حفاظت است و در بسیاری از حالات، فقط پیمایش و اقدام به پاک‌سازی مورد نیاز است. قابل توجه است که هرگونه انحراف یا اصلاح در مسیر رودخانه و به هر منظور، حتی با حضور مالک، نیازمند کسب مجوزهای اصلاحی است.
- انحراف رواناب سطحی یا زه‌کشی در مناطقی‌که پتانسیل فرسایش ساحلی وجود دارد، انجام شود. جریان سریع آب به پایین یک شیب تند باعث افزایش فرسایش خواهد شد. در محلی که رواناب می‌تواند به جریان رودخانه وارد می‌شود، با نصب یک کالورت یا آبشار کوچک (شیب شکن) انرژی را مستهلک کرده و سواحل آن را محافظت کنید.
- در محل‌هایی که تراوش آب از کرانه‌ها مشاهده می‌شود زه‌کشی‌های زیرزمینی نصب شود. رطوبت زیرین خاک یا زه‌کشی آب‌های زیرزمینی می‌تواند خاک را سست کرده و آن را حرکت دهد.
- گیاهان را در حالت و وضعیت شاداب نگهداری کنید و تا حد ممکن نوع، تنوع و تراکم پوشش گیاهی در طول ساحل جریان را کنترل کنید.
- برای جلوگیری از آسیب رساندن حیوانات، درختان آسیب پذیر حداقل ۱ متر بالاتر از سطح زمین با توری‌های سیمی بارپیچ محافظت شوند.

- باید برنامه منظم و دوره‌ای برای بازدید از سازه‌های کنترل فرسایش و رسوب در رودخانه تدوین و به اجرا گذاشته شود. خصوصاً در پایان فصل خشک و قبل از فرارسیدن فصل پرباران و هم‌چنین بعد از وقوع سیلاب‌های شدید نیز باید بازدید صورت گیرد و اقداماتی که برای نگهداری سازه‌ها لازم است، مشخص گردد.
- پس از بازدیدهای صورت گرفته و براساس برنامه‌ریزی انجام شده برای نگهداری، خرابی‌های ایجاد شده در سازه باید ترمیم شوند.
- درپوشش‌های سنگ‌ریز، جابه‌جایی سنگ‌ها، تخریب سنگ‌ها و یا تراوش از بین سنگ‌ها باید مد نظر قرار گرفته و خرابی‌های به‌وجود آمده بلافاصله ترمیم شوند.
- ریزش و جابجایی سنگ ها در حجم زیاد ممکن است ناشی از ناپایداری شیب و یا ناپایداری داخلی دیواره باشد لذا باید علت آن بررسی و عامل ایجاد کننده مشکل بر طرف گردد.
- در صورتی‌که رشد گیاهان در لابلای پوشش سنگ‌ریز باعث کاهش ظرفیت عبور جریان و سیل‌خیزی در رودخانه شود و یا اینکه موجب جابه‌جایی سنگ‌ها و ناپایداری آن‌ها گردد، باید نسبت به هرس یا حذف گیاهان اقدام نمود.
- در بازدیدها و در مرحله نگهداری از سازه‌های کنترل فرسایش و رسوب در رودخانه، ممکن است نیاز به بازنگری در طراحی سازه ضروری به نظر برسد که باید انجام شود.

منابع مورد استفاده:

۱- بهادری، ف. ۱۳۷۴. مطالعات پایه و تبیین مبانی طراحی روش‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها، کارگاه آموزشی تخصصی کنترل فرسایش در رودخانه‌ها، انجمن هیدرولیک ایران.

۲- تلوری، ع.ر.۱۳۷۴. عوامل مختلف فرسایش رودخانه‌ای و بررسی اجمالی چگونگی تاثیر آنها، کارگاه آموزشی تخصصی کنترل فرسایش در رودخانه‌ها، انجمن هیدرولیک ایران.

۳- جوان، م، طالب بیدختی،م و جواهری، پ. ۱۳۶۹. طرح آنالیز و اجرای سازه‌های توریسنگی، چاپ اول، معاونت امور آب جهاد سازندگی. دفتر مطالعات آب حاسب کرجی.

۴- حاجی‌بیگلو، م. ۱۳۷۰، برآورد رسوب از طریق فرمول‌های تجربی در حوزه سفیدرود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۵- حسینی، ا. حبیبی، م، صابری ،ا. ۱۳۸۱. ارزیابی فنی واقتصادی آبشکن های احداث شده درردخانه زنجانرود.گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.

۶- رفاهی، ح. ۱۳۷۵. فرسایش آبی و کنترل آن،دانشگاه تهران ، موسسه انتشارات و چاپ.

۷- شریفی‌منش، ح.، ۱۳۷۴. بررسی و مقایسه میزان آبشستگی اطراف آبشکن‌های باز با استفاده از مدل هیدرولیکی، پایان نامه‌کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی.

۸- عباسی، ع‌ا، حبیبی، م، و ساجدی‌سابق، م. ۱۳۷۵. بررسی تأثیر طول، فاصله و شکل آبشکن‌های گابیونی در حفاظت سواحل رودخانه‌ها – گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.

۹- عسگری، اع. ۱۳۷۴، بررسی تأثیر پارامتر نسبت فاصله به طول به عمق آبشستگی موضعی در سرآبشکن‌های توریسنگی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

۱۰- وطن فدا، ج. ۱۳۷۲. بررسی نسبت بهینه سطح باز به سطح کل آبشکن باز در مقابل جریان با استفاده از مدل هیدرولیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی.

۱۱- وطن‌فدا، ج. ۱۳۶۹ ، مقدمه‌ای بر اصول طراحی و مشخصات فنی آبشکن‌ها. مرکز تحقیقات آب جهاد.

۱۲- یاسی، م. ۱۳۶۷. اصلاح مسیر و حفاظت دیواره رودخانه‌های سیلابی با روش مناسب ساختمانی بیولوژیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز.

13- Ahmad, M. 1953, Experiments on Design and Behaviour of Spur Dikes. Proc. cong of IAHR.PP.145-159.

14- Blench, T. 1969, Mobile Bed Fluvialogy , University of Alberta Press, Edmonton,

15- Bruisers, H. N. C. Raudkivi, A. J. 1991. Scouring, A.A. Balkema, Rotterdam.pp143.

16- Charlton, F. G. (1982). River Stabilization and Training in Gravel-Bed Rivers, in Hey, R. D., Bathurst,J. C., Thorne, C. R. (Eds). Gravel-Bed Rivers: Fluvial Processes, Engineering and Management. John Wiley and Sons, Chichester.

17- Farrady R. V. Charlton F. G. 1983, Hydraulic factors in bridge design, Hydraulic Research station Limited, Wallingford, Oxford shire, London, England.

18- Garde, R.j, 1960 Study of Scour around Spur Dikes Journal of the Hydraulics Division, of the American Engineering. HY6.23-36.

19- Gill, Mohammad Akram. 1961, Erosion of Sand Beds Around Spur Journal of the Hydraulics Division, of the American so City of Civil Engineers, HY9, 1587-1601

20- Grissini, .M.M 1982, Hydraulic Structures, vol.2. Moscow.

21- Hemphill, R.W., Brambly, M.E. 1989. Protection of River and Canal Banks. pp. 109-119.

22- Inglis, C.C. (1947), Meanders and Their Bearing on River Training, Institution of Civil Engineers, Maritime and Waterways Engineering Division meeting.

23- Jansen P.ph. 1979. Principles of River Engineering. Pitman Publishing London.

24- Lacey, G. 1958. Flow in alluvial channels with sandy mobile beds. Proc. Inst. Civil Engrs.145-164, 219-251.
25- Lim .S. Y. and Chiew. Y. M. 1992 Effect of Sediments Gradation on Scour at Spur Dike. Proceeding of International on Hydraulic Research in Manure Laboratory .Wuhan. China.
26- Lim S. Y. and Tong, K. P. 1991 on Estimation of Maximum Scour around Spur Dike.
27- Miloradov.M, 1986, River Engineering Structures. International Course in Water Resource Eng. Belgrade.
28- Morisawa, M. 1968, Streams; their Dynamics and Morphology, McGraw-Hill Book co., New York.
29- Neil, C.R. 1973, Guide on Bridge Hydraulic, Roads and Transportation association of Canada, University of Toronto Press.
30- Petersen, M.S., 1986, River Engineering, N.J.
31- Przedwojski, B., 1995. River Training Technique Fundamentals, Design and Applications, A.A.BALKEMA.
32- Przedwojski, B. 1995, Bed Topography and Local Scour in River with Banks Protected by Groins. Journal of Hydraulics Research. Vol 33. No2.
33- Wang T.W. 1988 Channel Bed Degradation Caused by Construction 6th congress Asian and Regional Division International Association Hydraulic Research Kyoto. Japan, 285-292.

خواننده گرامی

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر چهارصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **http://tec.mporg.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

دفتر نظام فنی اجرایی

Islamic Republic of Iran
Vice presidency for strategic planning and supervision

Basic Design for Erosion Control in Streams and Channels Structures

No. 417

Office of Deputy for Strategic supervision
Bureau of Technical Execution Systems
http://tec.mporg.ir

Watershed Management Deputy
Planning & Coordination Bureau
http://Frw.org.ir

2009

این نشریه

"مبانی طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها" نام دارد و راهنمایی است برای طراحی و اجرای اقدامات سازه‌ای که با هدف کنترل فرسایش در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها انجام می‌گیرد.

در این نشریه ابتدا تعاریف مرتبط با موضوع و همچنین نحوه تقسیم بندی رودخانه‌ها ارائه شده است. در ادمه در مورد فرسایش در بستر و کناره رودخانه‌ها، عوامل موثر بر آن و روش‌های تثبیت بستر بحث و بررسی شده و اصول و روش طراحی سازه‌های تثبیت‌کننده کف و بستر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها معرفی شده است. در نهایت توصیه‌های مهم در رابطه با اجرا و نگهداری سازه‌های مربوط ارائه شده است.