جمهوری اسلامی ایران

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای

نشریه شماره ۵۱۶

معاونت نظارت راهبردی

دفترنظام فنی اجرایی

http://tec.mporg.ir

وزارت نیرو

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا

http://seso.moe.org.ir

۱۳۸۸

بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	**شماره:**	۱۰۰/۱۱۵۰۵۴
	تاریخ:	۱۳۸۸/۱۲/۸

موضوع: راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن رودخانه‌ای

به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ٤۲۳۳۹/ت۳۳٤۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/٤/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۱۶ دفتر نظام فنی اجرایی، با عنوان «راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای» 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.

ابراهیم عزیزی

658478

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبـردی ریـیس جمهـور، بـا اسـتفاده از نظـر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کـشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنـی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایـراد و اشـکال فنـی 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.

۴- 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 صفی علی‌شاه – مرکز تلفن ۳۳۲۷۱ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی

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

پیشگفتار

رودخانه پدیده‌ای فعال است که دائما بستر و کناره‌های خود را دستخوش تغییر قرار داده و همین امر سبب می‌شود که مسیر رودخانه در طول زمان دچار تحولات اساسی شود. علاوه بر این پاره‌ای از فعالیت‌های بشر نظیر بهره برداری از مصالح رودخانه‌ای و اصلاح مسیر رودخانه موجب جابه‌جایی مسیر رودخانه‌ها خواهد شد.

ضرورت بهره‌برداری مستقیم انسان از رودخانه و سرمایه‌های طبیعی و احداثی در دو بال آن و نیز ضرورت حفاظت پایدار سامانه حیاتی رودخانه برای آینده سبب گردیده تا مساله کنترل و مهار رودخانه‌ها و تعیین حدود و حریم آن مورد توجه قرار گیرد.

امروزه روش‌ها و تکنیک‌های مختلف ساماندهی رودخانه توسعه یافته است. یکی از این روشها احداث آبشکن‌های رودخانه‌ای است.

آبشکن‌های رودخانه‌ای، از سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه به‌شمار می‌آیند. آبشکن‌ها سازه‌های متقاطع یا عرضی هستند که از دیواره رودخانه به سمت محور جریان توسعه یافته و سبب انحراف و هدایت جریان از کناره‌ها به سمت محور مرکزی راستای رودخانه می‌گردند که به صورت منفرد یا به صورت یک سری متوالی، در یک و یا در دو سمت رودخانه احداث می‌گردند.

با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی آب و آبفا، تهیه نشریه " راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای" را با هماهنگی دفتر نظام فنی اجرایی معاونت نظارت راهبردی رییس جمهور در دستور کار قرار داد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی اجرایی کشور به معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (دفتر نظام فنی اجرایی) ارسال نمود که پس از بررسی، بر اساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی اجرایی کشور (مصوب شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید.

راهنمای حاضر که با هدف طراحی و جانمایی اصول فنی ، مراحل ساخت و مدیریت کارکرد ، بهره برداری و نگهداری از آبشکن‌ها تهیه شده است می‌تواند برای کارشناسان واحد مهندسی رودخانه در سازمان‌های آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، آبخیزداری و به عنوان دستورالعمل فنی برای شرکت‌های مهندسین مشاور و پیمانکاران ، مورد استفاده قرار گیرد.

بدین وسیله معاونت نظارت راهبردی رییس جمهور از تلاش و جدیت مدیر کل محترم دفتر نظام فنی اجرایی، سرکار خانم مهندس بهناز پورسید و کارشناسان این دفتر و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای محمد حاج‌رسولیها و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون آنان را آرزومند می‌باشد.

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

معاون نظارت راهبردی

زمستان ۱۳۸۸

ترکیب اعضای تهیه‌کننده، کمیته و ناظران تخصصی

این راهنما در **معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه با مسوولیت آقای دکتر مهدی یاسی** و همکاری افراد زیر تهیه شده است.

اسامی این افراد به‌ترتیب حروف الفبا به شرح زیر می‌باشد:

آقای محمود بینا	دانشگاه شهید چمران اهواز	دکترای سازه‌های هیدرولیکی
آقای محمود جوان	دانشگاه شیراز	دکترای مهندسی آب و هیدرولیک
آقای ناصر طالب بیدختی	دانشگاه شیراز	دکترای مهندسی رودخانه
آقای مهدی یاسی	دانشگاه ارومیه	دکترای مهندسی رودخانه

گروه نظارت که مسوولیت نظارت تخصصی بر تدوین این راهنما را به عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

آقای محمود افسوس	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق‌لیسانس‌مهندسی هیدرولیک
آقای حسین شریفی‌منش	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس تاسیسات آبیاری
آقای مسعود قدسیان	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای هیدرولیک
خانم کیاندخت کباری	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور- وزارت نیرو	لیسانس مهندسی راه و ساختمان

اعضای کمیته تخصصی مهندسی رودخانه و سواحل دفتر طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشورکه بررسی و تایید راهنمای حاضر را برعهده داشته‌اند به‌ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

آقای محمود افسوس	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق‌لیسانس مهندسی هیدرولیک
آقای محمدابراهیم بنی‌حبیب	دانشگاه تهران	دکترای عمران
آقای محمدحسن چیتی	شرکت ساز آب‌پردازان	فوق‌لیسانس سازه‌های آبی
خانم نرگس دشتی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور – وزارت نیرو	لیسانس مهندسی آبیاری
آقای شکور سلطانی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	دکترای مهندسی آب
آقای علی فاخر	دانشگاه تهران	دکترای عمران
آقای حسام فولادفر	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس مهندسی هیدرولیک
آقای جبار وطن فدا	وزارت نیرو	فوق‌لیسانس سازه‌های هیدرولیکی

همکاران معاونت نظارت راهبردی:

آقای علیرضا دولتشاهی	دفتر نظام فنی اجرایی	لیسانس مهندسی کشاورزی
خانم فرزانه آقارمضانعلی	دفتر نظام فنی اجرایی	فوق لیسانس مهندسی صنایع
خانم ساناز سرافراز	دفتر نظام فنی اجرایی	فوق لیسانس مهندسی منابع آب

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول - کلیات	**۱**
۱-۱- مقدمه	۳
۱-۲- هدف	۴
۱-۳- دامنه کاربرد	۴
فصل دوم – ساماندهی رودخانه	**۵**
۲-۱- کلیات	۷
۲-۲- مفهوم ساماندهی رودخانه	۷
۲-۳- اهداف مطالعات ساماندهی رودخانه	۷
۲-۴- روش‌های عمومی ساماندهی رودخانه	۹
۲-۵- اصلاح مسیر رودخانه	۱۲
۲-۵-۱- راهکارهای اصلاح مسیر رودخانه	۱۴
۲-۵-۲- راهنمای اصلاح مسیر رودخانه	۱۴
۲-۶- روش‌های تثبیت و حفاظت دیواره‌های رودخانه	۲۰
۲-۶-۱- مشخصات و مکانیزم کارکرد روش‌های مختلف	۲۰
۲-۶-۲- انتخاب روش‌های حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه	۲۵
فصل سوم - آبشکن‌های رودخانه‌ای	**۲۹**
۳-۱- تعریف آبشکن رودخانه‌ای	۳۱
۳-۲- اهداف کاربرد آبشکن‌ها	۳۶
۳-۳- انواع آبشکن‌ها	۳۷
۳-۳-۱- مصالح و روش ساخت آبشکن	۳۷
۳-۳-۲- استغراق آبشکن	۴۰
۳-۳-۳- تاثیر آبشکن بر جریان رودخانه	۴۱
۳-۳-۴- شکل ظاهری آبشکن	۴۲
۳-۳-۵- طول آبشکن	۴۳
۳-۴- مکانیزم کارکرد آبشکن‌ها	۴۵
۳-۴-۱- ساختار جریان و توپوگرافی بستر پیرامون یک آبشکن منفرد	۴۶
۳-۴-۲- ساختار جریان و توپوگرافی بستر در محدوده تاثیر سری آبشکن‌ها	۴۷

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۴-۳- ساختار جریان در محدوده تاثیر آبشکن‌های مستغرق	۵۰
۳-۵- ارزیابی کاربرد آبشکن‌ها	۵۰
۳-۵-۱- مزایای کاربرد آبشکن‌ها	۵۰
۳-۵-۲- معایب و محدودیت‌های کاربرد آبشکن‌ها	۵۱
فصل چهارم - اثرهای ریخت‌شناسی احداث آبشکن‌ها	**۵۳**
۴-۱- کلیات	۵۵
۴-۲- تاثیرات ریخت‌شناسی احداث آبشکن‌ها روی رودخانه	۵۵
۴-۲-۱- تاثیرات متقابل ریخت‌شناسی بین آبشکن‌های احداث شده و رودخانه	۵۶
۴-۳- روش‌های ارزیابی تاثیرات ریخت‌شناسی	۵۶
۴-۳-۱- روش‌های کیفی ارزیابی	۵۷
۴-۳-۲- روش‌های کمی ارزیابی	۶۳
فصل پنجم - مبانی جانمایی و طراحی آبشکن‌ها	**۷۱**
۵-۱- کلیات	۷۳
۵-۲- اطلاعات مورد نیاز	۷۳
۵-۲-۱- جمع‌آوری اطلاعات موجود	۷۳
۵-۲-۲- برداشت اطلاعات و مطالعات صحرایی	۷۴
۵-۲-۳- تجزیه و تحلیل اطلاعات	۷۸
۵-۳- مطالعات پایه و تخصصی	۷۸
۵-۴- تبیین اهداف ساماندهی	۷۹
۵-۵- تعیین جریان‌های شاخص	۷۹
۵-۶- طرح اصلاح مسیر بازه رودخانه	۸۰
۵-۷- ارزیابی تناسب کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه	۸۰
۵-۸- طراحی وجانمایی آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه	۸۱
۵-۸-۱- طرح مقدماتی آبشکن‌ها	۸۱
۵-۸-۲- طرح توجیهی آبشکن‌ها	۸۵
۵-۸-۳- ارزیابی و بهینه‌سازی طرح آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه	۸۵
۵-۸-۴- طرح نهایی آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه	۸۶
۵-۹- زمان‌بندی اجرای طرح	۸۷

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۵-۱۰- متره و برآورد	۸۷
۵-۱۱- طرح و برنامه اجرا و ساخت سامانه آبشکن‌ها	۸۸
۵-۱۲- طرح پایش آبشکن‌ها	۸۸
۵-۱۳- طرح بهره‌برداری و نگهداری از آبشکن‌ها	۸۹
فصل ششم - طراحی آبشکن‌ها	**۹۱**
۶-۱- کلیات	۹۳
۶-۲- عوامل و ضوابط طراحی آبشکن‌ها	۹۳
۶-۲-۱- شکل ظاهری آبشکن در پلان	۹۳
۶-۲-۲- امتداد آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان	۹۵
۶-۲-۳- ریشه آبشکن	۹۷
۶-۲-۴- طول و فاصله آبشکن‌ها	۹۸
۶-۲-۵- آرایش آبشکن‌ها	۱۰۵
۶-۲-۶- تراز تاج آبشکن	۱۰۶
۶-۲-۷- مقطع آبشکن	۱۱۰
۶-۲-۸- آبشستگی	۱۱۲
۶-۲-۹- طرح سازه آبشکن	۱۲۳
۶-۳- حفاظت ساحل بالا و حریم رودخانه	۱۵۸
۶-۳-۱- عوامل بیرونی و راهکارهای حفاظت ساحل بالا	۱۵۹
۶-۳-۲- مدیریت حفاظت سطح دیواره رودخانه	۱۵۹
۶-۳-۳- مدیریت حفاظت اراضی ساحلی و حریم	۱۵۹
فصل هفتم - اصول فنی و مراحل ساخت آبشکن‌ها	**۱۶۱**
۷-۱- کلیات	۱۶۳
۷-۲- نیروی انسانی فنی	۱۶۴
۷-۳- راه‌های دسترسی، احداث و تجهیز کارگاه	۱۶۴
۷-۳-۱- راه دسترسی به رودخانه	۱۶۴
۷-۳-۲- محل احداث کارگاه	۱۶۵
۷-۳-۳- تجهیزات کارگاه	۱۶۵
۷-۴- منابع قرضه	۱۶۸

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۷-۴-۱- نوع و محل تامین مصالح قرضه	۱۶۸
۷-۴-۲- کنترل کیفیت منابع قرضه	۱۶۹
۷-۵- ملاحظات زیست محیطی	۱۶۹
۷-۵-۱- جلوگیری از آلودگی آب	۱۶۹
۷-۵-۲- جلوگیری از آسیب به زیست بوم	۱۶۹
۷-۵-۳- زمان‌بندی اجرا	۱۷۰
۷-۵-۴- محدودیت ترافیک و جلوگیری از آلودگی صوتی	۱۷۰
۷-۶- آماده‌سازی بستر کار در رودخانه	۱۷۰
۷-۶-۱- روش‌های ساخت با انحراف آب رودخانه	۱۷۰
۷-۶-۲- روش‌های ساخت بدون انحراف آب رودخانه	۱۷۴
۷-۷- الگوی ساخت آبشکن‌ها	۱۷۷
۷-۷-۱- ساخت اولین ردیف آبشکن‌ها	۱۷۷
۷-۷-۲- الگوی ساخت یک در میان	۱۷۸
۷-۷-۳- الگوی ساخت زیگزاگی	۱۷۸
۷-۷-۴- الگوی ساخت مختلط	۱۷۸
۷-۸- مراحل ساخت آبشکن‌ها	۱۸۰
۷-۸-۱- حفاری بستر آبشکن	۱۸۰
۷-۸-۲- اجرای آبشکن	۱۸۱
۷-۹- پاکسازی و بهسازی بستر رودخانه	۱۸۲
۷-۱۰- حفاظت دیواره بالا و حریم رودخانه	۱۸۲
۷-۱۱- پایش در مرحله ساخت	۱۸۳
۷-۱۱-۱- رعایت موارد فنی و اجرایی، و پیمان خصوصی	۱۸۳
۷-۱۱-۲- کنترل دانه‌بندی و تراکم مصالح بدنه، فیلتر و روکش آبشکن و روش اجرا	۱۸۳
۷-۱۱-۳- کنترل نشست بدنه آبشکن‌ها	۱۸۳
۷-۱۱-۴- کنترل پایداری شیب آبشکن	۱۸۳
۷-۱۱-۵- کنترل آبشستگی	۱۸۳
۷-۱۲- تدوین برنامه اجرا	۱۸۴

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل هشتم - مدیریت کارکرد و نگهداری آبشکن‌ها	**۱۸۵**
۸-۱- کلیات	۱۸۷
۸-۲- آسیب‌ها و خطرات احتمالی	۱۸۷
۸-۲-۱- بستر اصلی رودخانه	۱۸۷
۸-۲-۲- دیواره رودخانه	۱۸۹
۸-۲-۳- سامانه آبشکن‌ها	۱۸۹
۸-۲-۴- ساختار سازه‌ای آبشکن‌ها	۱۹۱
۸-۳- پایش سامانه آبشکن‌ها	۱۹۲
۸-۳-۱- جمع‌آوری اطلاعات رودخانه قبل از طرح ساماندهی	۱۹۳
۸-۳-۲- بررسی میدانی بازه ساماندهی شده	۱۹۳
۸-۳-۳- نصب وسایل اندازه‌گیری	۱۹۳
۸-۳-۴- نقشه‌برداری تناوبی	۱۹۳
۸-۳-۵- بررسی الگوی جریان در مجرای اصلی رودخانه	۱۹۴
۸-۳-۶- ارزیابی پایداری بازه اصلاح شده	۱۹۴
۸-۳-۷- ارزیابی پایداری سازه آبشکن	۱۹۵
۸-۳-۸- ارزیابی کارایی آبشکن‌ها	۱۹۵
۸-۳-۹- ارزیابی دیواره و حریم رودخانه	۱۹۵
۸-۳-۱۰- بررسی شرایط زیست بوم رودخانه	۱۹۶
۸-۴- بهره‌برداری و نگهداری از آبشکن‌ها	۱۹۶
۸-۴-۱- پاکسازی موانع	۱۹۶
۸-۴-۲- بهسازی بستر	۱۹۶
۸-۴-۳- ترمیم و بازسازی موضعی	۱۹۷
۸-۴-۴- بهسازی طرح آبشکن‌ها	۱۹۷
۸-۴-۵- ارزیابی خصوصیات جریان و توپوگرافی بستر	۱۹۹
۸-۴-۶- کارهای اضطراری	۱۹۹
۸-۵- مدیریت استقرار پوشش گیاهی	۱۹۹
۸-۵-۱- تسهیل رسوب‌گذاری در میدان آبشکن‌ها	۱۹۹
۸-۵-۲- حفاظت تاج آبشکن	۲۰۰

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۸-۵-۳- تثبیت دیواره بالا و حریم رودخانه	۲۰۰
۸-۵-۴- ارزش زیست محیطی و زیباشناسی طرح	۲۰۰
فصل نهم - مدل‌های رودخانه‌ای	**۲۰۱**
۹-۱- کلیات	۲۰۳
۹-۲- مدل‌های فیزیکی رودخانه	۲۰۳
۹-۲-۱- مدل‌های تغییر فرم نیافته	۲۰۳
۹-۲-۲- مدل‌های تغییر فرم یافته	۲۰۴
۹-۲-۳- مدل‌های فیزیکی بستر ثابت	۲۰۴
۹-۲-۴- مدل‌های فیزیکی بستر متحرک	۲۰۶
۹-۳- مدل‌های ریاضی رودخانه‌ای	۲۰۸
۹-۳-۱- محاسن مدل‌های ریاضی	۲۰۸
۹-۳-۲- محدودیت‌های مدل‌های ریاضی	۲۰۸
منابع و مراجع	**۲۱۵**

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۲-۱- نمونه‌هایی از طرح اصلاح مسیر رودخانه‌ها	۱۳
شکل ۲-۲- مشخصات و ابعاد مارپیچ رودخانه	۱۹
شکل ۲-۳- طرح پیچ رودخانه	۱۹
شکل ۲-۴- زاویه ورودی به پیچ (α) یا زاویه حمله آب به دیواره‌ها یا زاویه انحراف	۲۰
شکل ۲-۵- نمایش سطوح مختلف دیواره رودخانه با تلفیق روش‌های طبیعی- سازه‌ای	۲۴
شکل ۳-۱- نمایش کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه‌ها	۳۲
شکل ۳-۲- نمایش ساختار عمومی یک آبشکن در پلان	۳۳
شکل ۳-۳- نمایش آبشکن نفوذناپذیر با مصالح رودخانه‌ای و روکش سنگ‌ریزه‌ای	۳۳
شکل ۳-۴- آبشکن‌های سنگ‌ریزه‌ای، رودخانه حله، استان بوشهر	۳۴
شکل ۳-۵- سیمای کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه	۳۵
شکل ۳-۶- نمایش کاربرد آبشکن‌های کوتاه و یا مستغرق	۳۶
شکل ۳-۷- آبشکن‌های نفوذ پذیر- سازه آرام کننده جریان	۳۹
شکل ۳-۸- ساختار عمومی دیواره‌های شمع کوب	۴۰
شکل ۳-۹- انواع آرایش آبشکن‌های جاذب، عمودی و دافع	۴۳
شکل ۳-۱۰- انواع شکل ظاهری آبشکن‌ها در پلان	۴۴
شکل ۳-۱۱- آبشکن‌های مستقیم با دماغه فارسی بر	۴۴
شکل ۳-۱۲- انواع شکل مقطع طولی و تاج آبشکن- افقی و یا شیب‌دار	۴۴
شکل ۳-۱۳- شکل پلکانی مقطع طولی آبشکن- نوع تورسنگی	۴۵
شکل ۳-۱۴- برخی از انواع شکل آبشکن‌ها در مقطع عرضی	۴۵
شکل ۳-۱۵- نمایش ساده جریان چرخشی پیرامون یک آبشکن- در بستر صاف، تخت	۴۶
شکل ۳-۱۶- ساختار جریان چرخشی پیرامون یک آبشکن	۴۶
شکل ۳-۱۷- ساختار جریان چرخشی در حد فاصل دو آبشکن متوالی در مدل یک بازه مستقیم از رودخانه وال در هلند	۴۷
شکل ۳-۱۸- انواع الگوی جریان در پلان و روند توسعه جریان چرخشی متناسب با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها در مدل یک پیچ رودخانه	۴۸
شکل ۳-۱۹- مقایسه الگوی جریان در میدان آبشکن‌ها	۴۹
شکل ۳-۲۰- تاثیر آرایش آبشکن‌ها بر نحوه توزیع جریان و رسوب‌گذاری پیرامون آبشکن‌ها	۴۹
شکل ۴-۱- تاثیر عبور شناور بر روی جریان در یک بازه اصلاح شده با آبشکن‌ها	۶۰
شکل ۴-۲- شرایط جریان در سه موقعیت گذر شناور (۱، ۲ و ۳) از مجاورت آبشکن‌ها	۶۰
شکل ۴-۳- تغییر فرم بستر (آبشستگی و رسوب‌گذاری) در پیرامون یک آبشکن	۶۸
شکل ۴-۴- تغییرات عمق آبشستگی در شرایط جریان آب صاف و جریان آب و رسوب	۶۸
شکل ۴-۵- تحول زمانی عمق آبشستگی موضعی (d_s) در امتداد دماغه یک آبشکن به‌طول b	۶۸

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۶-۱- پلان و سیمای برخی انواع آبشکن‌های تورسنگی	۹۵
شکل ۶-۲- آرایش آبشکن‌های جاذب، عمودی و دافع در پلان یک رودخانه	۹۶
شکل ۶-۳- نمایش مقطع طولی یک آبشکن	۹۸
شکل ۶-۴- نمایش قفل‌شدگی ریشه آبشکن در دیواره طبیعی رودخانه	۹۸
شکل ۶-۵- نمایش ابعاد طولی و زوایا در انواع آبشکن‌ها	۱۰۰
شکل ۶-۶- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها با کارکرد منفرد	۱۰۴
شکل ۶-۷- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها با کارکرد منفرد	۱۰۴
شکل ۶-۸- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها با کارکرد وابسته	۱۰۵
شکل ۶-۹- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها در پیچ	۱۰۵
شکل ۶-۱۰- بهینه‌سازی انتخاب سیلاب طراحی در ساماندهی رودخانه	۱۰۸
شکل ۶-۱۱- رابطه بده سیلاب یا ارتفاع سطح آب نظیر آن با میزان خسارات حاصل شده	۱۰۸
شکل ۶-۱۲- رابطه خسارت سیلاب با تناوب یا دوره برگشت سیل	۱۰۸
شکل ۶-۱۳- مقطع طولی و عرضی آبشکن با مصالح رودخانه‌ای و روکش سنگ‌ریزه‌ای	۱۱۲
شکل ۶-۱۴- شکل مقطع عرضی آبشکن با مصالح کیسه‌ای و شن و ماسه	۱۱۲
شکل ۶-۱۵- مقطع طولی و عرضی آبشکن همراه با سکوبندی در تراز معین سطح آب	۱۱۲
شکل ۶-۱۶- نمایش آبشستگی عمومی در یک بازه فشرده شده با آبشکن‌ها	۱۱۴
شکل ۶-۱۷- ضریب تصحیح عرض موثر (λ) برحسب نسبت فاصله به طول آبشکن‌ها (**S/L**)	۱۱۴
شکل ۶-۱۸- نمایش آبشستگی عمومی در بازه تنگ شده از یک رودخانه سیلابدشتی	۱۱۶
شکل ۶-۱۹- نمایش آبشستگی موضعی در پیرامون یک آبشکن	۱۱۷
شکل ۶-۲۱- انواع تورسنگ‌ها در کارهای رودخانه‌ای	۱۳۵
شکل ۶-۲۲- آرایش استقرار کیسه‌ها در ساخت آبشکن کیسه‌ای	۱۳۶
شکل ۶-۲۳- آبشکن کیسه‌ای در رودخانه قزل اوزن، زنجان‌رود	۱۳۶
شکل ۶-۲۴- آبشکن‌های کوتاه با مصالح طبیعی چوب و درختان	۱۳۷
شکل ۶-۲۵- آبشکن‌های کوتاه با مصالح طبیعی چوب و درختان	۱۳۷
شکل ۶-۲۶- الگوریتم برآورد اندازه شاخص سنگ‌ها از روش‌های مختلف جدول (۶-۷) (عوامل نمودار در پاورقی جدول ۶-۷ معرفی گردیده‌اند)	۱۴۴
شکل ۶-۲۷- منحنی دانه‌بندی سنگ‌ها در طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ها	۱۴۵
شکل ۶-۲۸- روکش‌های بتنی مفصل‌دار برای حفاظت پیوسته روکش و پنجه آبشکن	۱۴۷
شکل ۶-۲۹- نمونه ژئوتکستایل‌ها برای حفاظت پیوسته روکش و پنجه آبشکن	۱۴۸
شکل ۶-۳۰- روکش حفاظتی سطح دیواره آبشکن با تایرهای فرسوده ماشین	۱۴۹
شکل ۶-۳۱- نمونه‌هایی از انواع روش‌های حفاظت دیواره و پنجه	۱۵۱
شکل ۶-۳۲- مشخصات هندسی حفر ترانشه در پنجه آبشکن برای روش حفاظت سنگ‌ریزه‌ای	۱۵۳
شکل ۶-۳۳- حفاظت سنگ‌ریزه‌ای دامنه پنجه در پیرامون دماغه آبشکن مستقیم	۱۵۴
شکل ۶-۳۴- حفاظت سنگ‌ریزه‌ای دامنه پنجه در پیرامون دماغه آبشکن **T** شکل	۱۵۴

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۶-۳۵- نمایش دو راهکار مختلف حفاظت پنجه با تورسنگ	۱۵۵
شکل ۶-۳۶- استفاده از روکش تورسنگ به‌عنوان کف بند در پیرامون پنجه آبشکن	۱۵۵
شکل ۶-۳۷- نمونه پوش دانه‌بندی فیلتر شنی برای پایداری بستر روکش سنگ‌ریزه‌ای	۱۵۸
شکل ۶-۳۸- کاربرد فیلتر ژئوتکستایل زیر روکش سنگ‌ریزه‌ای جهت اجرا در شرایط پرآبی رودخانه	۱۵۸
شکل ۶-۳۹- نمایش سیمای طرح مدیریت و حفاظت ساحل و حریم رودخانه	۱۶۰
شکل ۷-۱- کاربرد دراگ لاین و شناور در ساخت آبشکن سنگ‌ریزه‌ای در رودخانه آرکانزاس	۱۶۷
شکل ۷-۲- کاربرد انواع شناور جهت حمل و تخلیه مصالح برای ساخت آبشکن‌ها	۱۶۷
شکل ۷-۳- روش‌های انحراف آب در بستر رودخانه برای ساخت آبشکن‌ها	۱۷۲
شکل ۷-۴- روش‌های انحراف موضعی رودخانه برای ساخت آبشکن‌ها	۱۷۳
شکل ۷-۵- انحراف موضعی رودخانه وال (هلند) از طریق یک آبراهه طبیعی برای ساخت آبشکن‌ها	۱۷۴
شکل ۷-۶- روش ساخت آبشکن‌ها بدون انحراف آب رودخانه به روش اسکله‌ریزی گام به گام	۱۷۶
شکل ۷-۷- سیمای ساخت و کارکرد آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه راین، هلند	۱۷۹
شکل ۷-۸- الگوهای ساخت آبشکن‌ها در رودخانه	۱۷۹
شکل ۸-۱- توسعه جریان حلزونی در بستر اصلی رودخانه بعد از احداث آبشکن‌ها	۱۸۸
شکل ۸-۲- توسعه جریان مارپیچی و بارهای رسوبی در بستر اصلی رودخانه بعد از احداث آبشکن‌ها	۱۸۹
شکل ۸-۳- تخریب دیواره رودخانه در پایین‌دست سامانه آبشکن‌ها	۱۹۰
شکل ۸-۴- توسعه مناسب رسوبات در پایین‌دست آبشکن C و ناکارایی آبشکن‌های D و E	۱۹۰
شکل ۸-۵- توسعه آبشستگی موضعی و تخریب پنجه آبشکن کیسه‌ای، رودخانه سرخس	۱۹۱
شکل ۸-۶- تخریب ریشه آبشکن در اثر انحراف سیلاب اسفند ۱۳۶۵، رودخانه حله، برازجان	۱۹۲
شکل ۸-۷- تغییرات بستر در بازه آبشکن‌ها براساس نقشه‌های توپوگرافی متناوب	۱۹۴

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۲-۱- راهکارهای اصلی در کنترل سیلاب و کاهش خطرات رودخانه‌ای	۱۰
جدول ۲-۲- راهنمای بهسازی بستر و سواحل رودخانه براساس هدف کنترل سیلاب	۱۰
جدول ۲-۳- راهکارهای ساماندهی رودخانه براساس اهداف خاص زیست محیطی	۱۱
جدول ۲-۴- راهنمای حفاظت دیواره‌های رودخانه با اهداف خاص زیست محیطی	۱۱
جدول ۲-۵- راهکارهای مدیریت سیلابدشت رودخانه با اهداف خاص زیست محیطی	۱۲
جدول ۲-۶- روش‌های حفاظت دیواره‌های رودخانه براساس عملکرد سازه حفاظتی	۲۶
جدول ۲-۷- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه براساس نوع و اندازه رودخانه	۲۶
جدول ۲-۸- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه براساس اندازه رودخانه و عوامل تخریب	۲۷
جدول ۴-۱- شرح کیفی عکس‌العمل رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای به تغییرات	۵۸
جدول ۴-۲- شرح کیفی عکس‌العمل رودخانه‌های با بستر شن و قلوه‌سنگ به تغییرات	۵۹
جدول ۵-۱- راهنمای تصمیم‌گیری و انتخاب گزینه برتر حفاظتی و گزینش آبشکن برتر در طرح ساماندهی بازه رودخانه	۸۳
جدول ۵-۲- راهنمای عمومی برنامه زمان‌بندی عملیات اجرایی ساخت آبشکن‌ها در رودخانه	۸۷
جدول ۶-۱- زاویه تمایل آبشکن (θ) با توجه به شکل (۶-۲)	۹۷
جدول ۶-۲- نسبت فاصله بین دو آبشکن متوالی	۱۰۳
جدول ۶-۳- ارتفاع موج (h_W) ناشی از کشتیرانی و یا باد	۱۰۹
جدول ۶-۴- مقادیر ضریب (a) در رابطه (۶-۱۴-الف)	۱۱۵
جدول ۶-۵- روابط برآورد عمق حداکثر آبشستگی موضعی در دماغه آبشکن‌های منفرد و مستقیم	۱۲۰
جدول ۶-۶- ضریب تصحیح شکل مقطع آبشکن (K_s) در محاسبه آبشستگی موضعی	۱۲۳
جدول ۶-۷- روش‌های برآورد اندازه سنگ‌ها برای طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ه	۱۴۲ا
جدول ۶-۸- توزیع اندازه سنگ‌ها در طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ها	۱۴۵
جدول ۶-۹- اندازه سنگ‌ریزه‌ها و ضخامت روکش تورسنگ بر حسب سرعت جریان	۱۴۵
جدول ۹-۱- معیارهای جریان متلاطم کامل در مجاری روباز	۲۰۵

فصل ۱

کلیات

۱-۱- مقدمه

رودخانه تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی دره رودخانه، خصوصیات مواد آبرفتی سیلابدشت رودخانه، مشخصات هیدرولوژیکی حوضه آبریز، شرایط هیدرولیکی جریان و نیز نحوه بهره‌برداری بشر از آن، تمایل طبیعی به دستیابی به تعادل پویا دارد. طبیعت تغییرپذیری برخی از عوامل فوق سبب می‌گردد تا رودخانه حتی در کوتاه مدت و در بازه‌های مختلف آن همواره در معرض تغییر و تحول باشد [۳۷].

تغییرات و جابجایی‌هایی که در اثر روند طبیعی یا توسعه طلبی هنجار و یا ناهنجار بشر در مسیر، راستا و هندسه رودخانه رخ می‌دهد، نتیجه منطقی واکنش سامانه رودخانه برای برقراری موازنه جدید می‌باشد. تغییرات رودخانه‌ای به‌صورت فرسایش و رسوب‌گذاری متناوب در بستر، تخریب و تعریض دیواره‌ها و سواحل، جابجایی الگوی مارپیچی و راستای جریان، تغییر فرم رودخانه (شریانی- مارپیچی- مستقیم)، میانبری و یا انحراف مسیر رخ می‌دهد. فرسایش و تخریب کناره‌های رودخانه و تغییر در کیفیت و کمیت جریان رودخانه‌ای، از مسایل مهم منابع آب و خاک بوده و از دیدگاه زیست محیطی نیز حایز اهمیت است. در اثر وقوع متناوب سیلاب‌ها هر ساله سطح قابل توجهی از اراضی حاصلخیز دشت آبرفتی به اشغال رودخانه در آمده و دچار آب گرفتگی و بروز خسارت می‌گردد [۱۲۸]. ضرورت بهره‌برداری مستقیم انسان از رودخانه و سرمایه‌های طبیعی و احداثی در دو بال آن و نیز ضرورت حفاظت پایدار سامانه حیاتی رودخانه برای آینده سبب گردیده تا مساله کنترل و مهار رودخانه‌ها و تعیین حدود و حریم آن مورد توجه قرار گیرد.

تا سال ۱۹۵۰، علم و فن حفاظت سواحل رودخانه‌ها به جز در موارد محدود پیشرفتی نداشت. اقدامات انجام شده اغلب به‌صورت حفاظت‌های موضعی در پیچ خارجی، بازه‌های فرسایشی و یا در محدوده تاسیسات آبی یا ساحلی بوده است. بروز خسارات گذشته و یا احتمال خسارات در آینده نزدیک انگیزه اصلی برای کنترل و حفاظت بازه رودخانه‌ای بوده است. بیش‌تر روش‌های حفاظتی، سازه‌ای بوده و در موارد محدودی از روش‌های طبیعی یا زیستی استفاده شده است [۷۰ و ۱۲۸]. در دهه‌های اخیر، روش‌ها و تکنیک‌های مختلف ساماندهی رودخانه توسعه یافته است.

در ایران تا سال۱۳۶۰، صنعت آب و نظام آموزش عالی کشور اصولا فاقد شناخت علم و فن«رودخانه» و «رودخانه‌داری» بود. اقدامات رودخانه‌ای عموما به‌صورت موضعی و در جهت حفاظت پل‌ها و تقاطع راه‌ها و یا حفاظت سازه‌های آبی و یا تاسیسات ساحلی بوده است. در دهه ۱۳۸۰، ساماندهی رودخانه‌های بزرگ داخلی و مرزی از اولویت‌ها بوده وگرایش مهندسان مشاور و پیمانکاران صنعت آب نیز به طرح‌های مهندسی رودخانه افزون گردیده است.

ساماندهی، اصلاح مسیر و حفاظت دیواره‌های رودخانه منحصر به استفاده از یک روش خاص در طول یک بازه و یا در دو سمت ساحلی رودخانه نیست بلکه متناسب با شرایط مختلف، تلفیقی از کاربرد روش‌های مختلف را شامل می‌گردد. حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه به‌طور کلی شامل دو روش مستقیم و غیرمستقیم (آرام کننده‌ها و انحراف دهنده‌ها) است. آبشکن‌های رودخانه‌ای[1] از نوع انحراف دهنده‌ها هستند [۱۰۲ و ۱۲۸]. در منابع موجود، مجموعه جامع و مستندی در خصوص سامانه آبشکن‌ها وجود ندارد.

1- River Groynes

کارایی اصلی آبشکن‌های رودخانه‌ای، انحراف جریان از کناره رودخانه و هدایت آن به‌سمت مجرای اصلی است. نتیجه انحراف جریان، توسعه یک ناحیه چرخشی با تلاطم شدید در پیرامون آبشکن است که به‌صورت گسترده‌تری در پایین‌دست آبشکن ظاهر می‌گردد. فرآیند هیدرولیکی این جریان، توسعه حفره آبشستگی در پیرامون آبشکن و ته نشست بار رسوبی در پایین‌دست و کناره رودخانه است. درحالی‌که آبشستگی یک خطر جدی برای سازه آبشکن و در نتیجه برای رودخانه محسوب می‌شود، پدیده رسوب‌گذاری در کناره پایین‌دست رودخانه راهکار طبیعی تثبیت دیواره‌های رودخانه در راستای مورد نظر خواهد بود[۱۴۷]. اهداف اصلی از کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه حفاظت دیواره‌های رودخانه، توسعه طبیعی کناره رودخانه در طرح اصلاح مسیر، حفاظت‌های خاص و موضعی سازه‌های جانبی، کشتیرانی و احیای «سامانه زیستابی رودخانه»[1] می‌باشد [۶۰، ۱۰۲، ۱۵۰].

۱-۲- هدف

هدف از تهیه این راهنما، ارائه دانش علمی و فنی در زمینه‌های طراحی، جانمایی، ساخت، مدیریت نگهداری و بهره‌برداری و نیز پیش‌بینی و ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها در رودخانه‌ها می‌باشد.

۱-۳- دامنه کاربرد

این راهنما برای استفاده در پروژه‌های ساماندهی مهندسی رودخانه تهیه شده و می‌تواند برای بررسی‌های حفاظت و تثبیت کناره‌ها، مهار فرسایش رودخانه‌ای، تشخیص روش‌های قابل استفاده و تعیین گزینه‌های حفاظت مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

1 - Eco-Hydro River System

فصل ۲

ساماندهی رودخانه

۲-۱- کلیات

در این فصل ابتدا مفهوم نوین ساماندهی رودخانه‌ها، اهداف و روش‌های عمومی ساماندهی تشریح می‌گردد سپس با توجه به کاربری آبشکن‌ها در اصلاح مسیر رودخانه‌ها، ضوابط عمومی و متغیرهای اصلی در طرح‌های اصلاح مسیر بررسی می‌گردد. در پایان، روش‌های تثبیت و حفاظت دیواره‌های رودخانه و مبانی انتخاب روش‌های مناسب به‌طور خلاصه ارائه می‌گردد.

۲-۲- مفهوم ساماندهی رودخانه

«ساماندهی رودخانه» عبارت از بهبود «سامانه رودخانه» در یک بازه معین (شامل مقطع اصلی و دو بال ساحلی رودخانه) با اهداف چند منظوره است. هدف اصلی بازیابی سیمای طبیعی رودخانه با تاکید بر احیای «سامانه زیستابی رودخانه» و تامین حیات مجدد گونه‌های شاخص گیاهی و جانوری رودخانه است. اهداف دیگر نظیر کنترل سیلاب، تثبیت کناره‌ها، کشتیرانی و غیره نیز می‌تواند مورد نظر باشد. در مجموعه این اهداف، ارزیابی رفتار رودخانه در شرایط طبیعی و موجود آن، و نیز عکسل‌العمل احتمالی رودخانه به تغییرات در «سامانه زیستابی رودخانه» مورد نظر قرار می‌گیرد.

در حقیقت، «ساماندهی رودخانه» کاربرد دانش علمی، فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیستی و زیباشناسی را در محیط طبیعی و دینامیکی رودخانه می طلبد [۴۳].

۲-۳- اهداف مطالعات ساماندهی رودخانه

یک رودخانه معین (در گستره یک بازه ریخت‌شناسی معین) ممکن است با یک یا مجموعه‌ای از اهداف زیر تحت مطالعات ساماندهی قرار گیرد [۴۳ و ۴۵]:

- تجدید حیات و توسعه پایدار سامانه رودخانه: بازیافت شرایط طبیعی و کمپرسی‌های زیستی رودخانه، حذف و یا تعدیل تاثیرات ناهنجار بشر به‌ویژه در طی دو قرن گذشته
- بهسازی محیط زیستابی رودخانه اصلی: کاهش بار رسوبی به‌منظور کنترل مساله ته نشست مواد در نواحی پایین‌دست رودخانه و بهبود کیفیت آب، کنترل آلاینده‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی از منابع معین (فاضلاب شهری، صنعتی و پرورش ماهی) و منابع نامعین (زهکش‌ها و هرزآب کشاورزی) ورودی به رودخانه در حد ظرفیت پالایش طبیعی رودخانه، تامین جریان زیست محیطی رودخانه (حداقل جریان رودخانه جهت رفع نیازهای زیستابی) به‌منظور تامین ظرفیت خود پالایی (هوا گیری و تصفیه) و حفاظت زیستگاه آبزیان (ماهیان، ریز آبزیان جانوری و گیاهی)
- حفاظت حیات ساحلی رودخانه: نوار ساحلی رودخانه، به‌عنوان یک حریم طبیعی[1] بخشی از فضای سامانه حیاتی رودخانه محسوب می‌شود. گستره عرض این ناحیه در رودخانه‌های سیلابدشتی قابل توجه بوده و اغلب مرطوب و یا به‌صورت تالاب‌های فصلی یا باتلاق هستند. این ناحیه به‌صورت یک نوار حیاتی و زیستگاه طبیعی (برای جانوران زمینی، پرندگان، حشرات، گیاهان و گاهی گونه‌های منحصر به فرد) محسوب می‌شود.

1- River Riparian Zone

- اصلاح مسیر رودخانه: بهسازی و اصلاح فرم رودخانه، راستا، شیب، مقاومت بستر جریان و هندسه مقاطع عرضی به منظور افزایش ایمنی در برابر سیلاب، بهسازی ظرفیت انتقال رسوب، کاهش فرسایش دیواره‌ها، تامین قابلیت کشتیرانی، کاهش احتمال خطر یخزدگی سطح آب رودخانه
- حفاظت و یا تثبیت دیواره‌های رودخانه: در راستای طبیعی و موجود رودخانه یا در راستای اصلاح یافته
- حفاظت تاسیسات درون رودخانه‌ای: پل، خطوط حیاتی تقاطعی (خط انتقال آب، نفت، گاز، برق و غیره)، سازه‌های آبی (سدهای انحرافی، سیفون و غیره)
- جلوگیری از پیشروی جانبی رودخانه به نواحی ساحلی: تهدید و تخریب خطوط حیاتی (راه، مسیر انتقال نیرو، شبکه آب و گاز...)، مناطق مسکونی (شهری- روستایی) و تاسیسات مهم ساحلی (کارخانه، پالایشگاه، فرودگاه و غیره)
- کنترل مرزهای پیشروی سیلاب[1]: کاهش خطرات متناوب سیلاب در ساحل بالای رودخانه و یا سیلابدشت رودخانه
- حفاظت نواحی خاص از سیلاب دشت رودخانه: حفاظت موضع مورد تهدید (شهرک، روستا وتاسیسات) در برابر آسیب‌پذیری متناوب ناشی از گستره سیل بر روی سیلابدشت رودخانه
- کاربری رودخانه برای اهداف خاص: تامین راستا، عمق، عرض، و سرعت جریان مناسب جهت کشتیرانی، ماهیگیری و گردشگری، برای برداشت مصالح رودخانه‌ای، برای برداشت آب با روش ساخت سامانه پمپاژ از رودخانه، ساخت سدهای انحرافی، اصلاح شبکه‌های سنتی آبگیری مستقیم از رودخانه
- حفاظت، بهسازی و یا بازسازی بناهای تاریخی و مذهبی: در داخل رودخانه اصلی (پل‌های تاریخی، تاسیسات آبی قدیمی) و یا در ساحل بالای رودخانه (عمارات تاریخی، امامزاده‌ها و غیره)
- ارزیابی پایداری و یا عکس‌العمل رودخانه به تغییرات: در اثر ساخت سدهای مخزنی، در اثر کارهای مهندسی رودخانه و در اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای و غیره
- بهسازی رودخانه در محدوده شهری: موضوع رودخانه‌های شهری از جنبه‌های خاص زیر دارای اهمیت است
  - از نظر ایمنی شهر در مواقع سیلابی شامل: تامین ظرفیت انتقال سیل معین در طرح شهری، بهسازی نوار ساحلی و طرح خیابان ساحلی در دو بال رودخانه به‌عنوان بستر سیلاب بزرگ‌تر، بهسازی شبکه تخلیه زهکش شهری به رودخانه و یا احداث دریاچه های مصنوعی تاخیری در شبکه شهری
  - از نظر زیباسازی شامل: نمایش راستای مارپیچی رودخانه، هدایت جریان در یک مقطع اصلی، توسعه تلاطم سطحی بدون ایجاد نواحی چرخشی جریان و توسعه نوار سبز ساحلی
  - از نظر ایمنی گردشگران در نوار ساحلی شامل: اجتناب از دیواره‌سازی قائم و عمیق، احداث نرده‌های ایمنی و درعین حال دسترسی آسان به بستر رودخانه
  - از جنبه تفریحات سالم شامل: تامین قابلیت ماهیگیری، قایقرانی و غیره از طریق ایجاد عمق، سرعت و هواگیری و پالایش مناسب جریان
- تثبیت و حفاظت رودخانه‌های مشترک مرزی

1- Flood Encroachments

۲-۴- روش‌های عمومی ساماندهی رودخانه

طرح «ساماندهی رودخانه» به علت تاثیر متغیرهای فراوان تاکنون به ضوابط عمومی و خطوط اصلی معین و روشنی برای انتخاب و طراحی بهترین روش‌ها دست نیافته است [۶۰ و ۱۰۲]. رودخانه‌ها و بازه‌های مختلف آن از نظر رفتار عمومی، مکانیزم فرسایش و یا رسوب‌گذاری، پتانسیل طبیعی و مشکلات زیستی با یکدیگر متفاوت‌اند. از طرفی نحوه برخورد با رودخانه بستگی به اهداف، اهمیت اقتصادی و اجتماعی، ملاحظات زیست محیطی و امکانات طبیعی و فنی در منطقه طرح دارد. از این‌رو، طرح و روش‌های ساماندهی نیز لزوما متفاوت بوده و یک قالب مشخص و واحدی برای تمام رودخانه‌ها و در همه نواحی وجود ندارد. روش‌هایی که در بعضی مناطق یا کشورها موفق بوده، دلیل برتری و گزینش آن در شرایط دیگر نخواهد بود [۱۰۲ و ۱۲۸]. تبیین دقیق اهداف، مجموعه تجربیات علمی و فنی گزارش شده، اجماع دانش «زمین ریخت‌شناسی رودخانه، هیدرولوژی، هیدرولیک رودخانه (جریان آب و انتقال رسوب)، زیست‌شناسی (گیاهی- جانوری- آبزیان)، سازه‌ای و غیره»، همراه با مطالعات میدانی و صحرایی گسترده و قضاوت مهندسی، راهکار اصلی در گزینه‌یابی طرح‌های رودخانه‌ای می‌باشد. در حقیقت، ساماندهی رودخانه کاربرد دانش علمی، فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیستی و زیباشناسی را در محیط طبیعی و دینامیکی بازه رودخانه مورد نظر می‌طلبد. اهداف کنترل سیلاب و کاهش خطرات رودخانه‌ای برای مردم ساکن در نوار ساحلی رودخانه و نیازمندی‌های طبیعی و اجتماعی آنان، ممکن است که منجر به انتخاب یک و یا ترکیبی از چهار راهکار اصلی در جدول (۲-۱) گردد. در این میان، «بهسازی بستر»، «اصلاح مسیر رودخانه»، «مقاوم‌سازی دیواره‌های رودخانه» و گاه «کنترل شیب بستر رودخانه»، به ترتیب راهکارهای عمومی‌تر و مناسب‌تری برای کنترل فرسایش دیواره‌ها، خطر تغییرات رودخانه‌ای، و تهدید اراضی ساحلی و سیلابدشت رودخانه به‌شمار می‌آیند [۳۷ و ۱۰۲].

راهنمای اقدامات «بهسازی بستر و سواحل رودخانه» با هدف ایمنی سامانه رودخانه (از طریق افزایش ظرفیت انتقال جریان سیلاب، بهبود ظرفیت انتقال رسوب، کاهش فرسایش دیواره‌ها، و بهبود شرایط بهره‌برداری از رودخانه) در جدول (۲-۲) ارائه گردیده است. در این جدول، روش‌های مناسب فیزیکی و طبیعی در مدیریت پایدار سامانه رودخانه موجود (بستر اصلی دیواره‌های ساحل بالا و حریم رودخانه) معرفی گردیده است. پیوستگی نظام مدیریت و نگهداری رودخانه راه حل اساسی در کاهش خطرات رودخانه‌ای به شمار می‌آید [۳۷]. اهداف «زیست محیطی» و «حیات پایدار سامانه رودخانه» نیازمند ترکیبی از اقدامات مدیریتی و کاربرد روش‌های طبیعی و یا طبیعی- سازه‌ای در ساماندهی بازه گسترده‌تری از یک رودخانه است. جدول (۲-۳) راهکارهای ساماندهی رودخانه، جدول (۲-۴) راهنمای حفاظت دیواره‌های رودخانه و جدول (۲-۵) راهکارهای مناسب مدیریت سیلابدشت رودخانه را براساس اهداف خاص زیست محیطی ارائه می‌نماید [۱۰۴].

جدول ۲-۱- راهکارهای اصلی در کنترل سیلاب و کاهش خطرات رودخانه‌ای [۱۰۴]

راهکار اصلی	روش‌ها	ملاحظات
حذف عوامل تخریبی	احداث سد مخزنی یا مخازن تاخیری در بالادست	امکانات فنی و تخصصی بسیار می طلبد. هزینه زیاد می‌خواهد. در چارچوب اهداف چند منظوره قابل طرح است.
	انحراف مسیر رودخانه، انشعاب رودخانه، میانبری در پیچ رودخانه.	محدودیت طبیعی و اجتماعی دارد. توازن انرژی رودخانه باید حفظ گردد.
تضعیف نیروهای تخریبی	بهسازی بستر رودخانه، لایروبی، حذف جزایر رسوبی، حذف گیاهان در بستر رودخانه	باعث افزایش ظرفیت انتقال رودخانه و بهبود جریان می‌گردد.
	اصلاح مسیر رودخانه، تعدیل راستا، حذف پیچ‌های تند، کاهش شدت تغییرات مقاطع عرضی	سبب کاهش تلاطم و گرداب‌های موضعی جریان می‌گردد. نیاز به کاربرد روش‌های حفاظتی نیز دارد.
مقاوم‌سازی دیواره‌های رودخانه	حفاظت مستقیم دیواره‌ها	اصلاح شکل فیزیکی دیواره‌ها ایجاد روکش حفاظتی مناسب
	حفاظت غیرمستقیم – انحراف دهنده‌ها	انحراف و دورسازی حمله آب از دیواره‌ها ایجاد پتانسیل طبیعی تثبیت کناره‌ها
	حفاظت غیرمستقیم – آرام کننده‌ها	آرامش جریان، کاهش سرعت و تلاطم در کناره‌ها ایجاد پتانسیل طبیعی تثبیت کناره‌ها
کنترل بستر	تنظیم و تثبیت شیب بستر رودخانه	کاهش و کنترل شیب کف جلوگیری از گسترش آبشستگی جلوگیری از فرسایش و تخریب دیواره

جدول ۲-۲- راهنمای بهسازی بستر و سواحل رودخانه براساس هدف کنترل سیلاب [۷۹]

راهکار اصلی	موقعیت و نوع اقدامات				
	دیواره مستقیم	دیواره خارجی پیچ	دیواره داخلی پیچ	بستر رودخانه	ساحل بالای رودخانه
بهبود فیزیکی بستر	حذف موانع و نامنظمی اصلاح شیب تعریض مقطع لایروبی	حذف موانع و نامنظمی‌ها اصلاح شیب تعریض مقطع حذف بار نقطه‌ای لایروبی تعدیل انحنای پیچ	تعریض مقطع حذف بار نقطه‌ای برداشت و لایروبی	حذف بارهای رسوبی لایروبی	
مدیریت پوشش گیاهی	قطع درختان ضعیف حذف مواد جامد و آشغال کاشت گیاهان بازسازی پوشش گیاهی کنترل رشد گیاهی طرح آبشکن درختی	قطع درختان ضعیف حذف مواد جامد و آشغال کاشت گیاهان بازسازی پوشش گیاهی کنترل رشد گیاهی طرح آبشکن درختی	حذف پوشش گیاهی از بار رسوبی شبکه‌بندی با مصالح ترکه‌ای	قطع درختان حذف مواد جامد و آشغال حذف پوشش گیاهی از بارهای رسوبی	قطع درختان ضعیف کاشت گیاهان بازسازی پوشش گیاهی پوشش ترکه‌ای
مدیریت اراضی ساحلی		کنترل راه‌های دسترسی طرح هیدرولیکی سازه‌های مجاور تعیین بستر و حریم			ایجاد پوشش گیاهی کنترل آبیاری زهکشی دیواره‌ها بهبود راه دسترسی تعیین بستر و حریم

جدول ۲-۳- راهکارهای ساماندهی رودخانه براساس اهداف خاص زیست محیطی [۱۰۴]

اهداف	راهکارها
کاهش فرسایش بستر و دیواره‌ها	ایجاد راستای مارپیچی، احداث سازه‌های کنترل شیب، حفاظت سواحل، حفاظت بستر، پوشش آبراهه، ایجاد پوشش گیاهی یا نوار سبز روی دیواره و ساحل بالا
جلوگیری از رسوب‌گذاری در بستر	ایجاد آبراهه میانی با جریان کم یا متوسط، احیای پوشش گیاهی موجود، پاکسازی هدفمند مواضع خاص بستر از آشغال و موانع، ایجاد نوارهای سبز
جلوگیری از افت سطح آب زیرزمینی	احداث سازه‌های کنترل سطح آب، درختکاری، نگهداری و حفاظت پیچ‌های رودخانه
تامین جریان‌های کم عمق و با سرعت کم	ایجاد آبراهه میانی با جریان کم یا متوسط، و مسیل و آبراهه‌های انحرافی، ایجاد پشته و حوضچه در بستر، احداث سازه‌های زیستگاهی در مسیر رودخانه، سازه‌های کنترل سطح آب، و رسوب‌گیرها
حفظ کیفیت آب	پاکسازی هدفمند محیط رودخانه، ایجاد فشردگی در دیواره‌های اصلی رودخانه، ایجاد نوارهای سبز، ایجاد آبراهه میانی با جریان کم یا متوسط، و مسیل و آبراهه‌های انحرافی، انحراف جریان برای برداشت مصالح
حفاظت از زیستگاه آبزیان	پاکسازی هدفمند محیط رودخانه، احداث سازه‌های زیستگاهی در مسیر رودخانه، اصلاح دیواره‌های اصلی رودخانه، تامین راستای مارپیچی، ایجاد پشته و حوضچه در بستر، احداث بسترهای زیستی و گذرگاه ماهی، سازه‌های کنترل سطح آب، حفاظت از پیچ‌های رودخانه، ممنوعیت های فصلی در فعالیت های ساختمانی
جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی در نوار ساحلی رودخانه	پاکسازی هدفمند محیط رودخانه، اصلاح دیواره‌های اصلی رودخانه، درختکاری و ایجاد پوشش گیاهی، احیای پوشش گیاهی موجود، حفاظت از جزایری که در اثر میانبری پیچ‌ها ایجاد شده‌اند
ایجاد و نگهداری تنوع زیست ساحلی	مدیریت مجرای رودخانه، ایجاد پوشش گیاهی، ساماندهی مواد حاصل از لایروبی و یا برداشت مصالح
ایجاد تالاب‌ها	درختکاری در مناطق خاص، حفاظت از برکه های هلالی شکل حاصل از میانبری پیچ‌ها، جایابی مواد حاصل از لایروبی و یا برداشت مصالح
اصلاح و حفاظت از منظرگاه زیبای بستر رودخانه	ایجاد راستای مارپیچی، ایجاد پشته و حوضچه در بستر، اصلاح دیواره‌های اصلی رودخانه، احداث سازه‌های کنترل سطح آب، نمایش زیبایی‌های جریان آب، کاربرد مصالح تزیینی در دیواره‌های رودخانه
اصلاح و حفاظت از منظرگاه زیبای ساحلی رودخانه	پاکسازی هدفمند محیط رودخانه، اصلاح دیواره‌های اصلی رودخانه، ایجاد پوشش گیاهی، پخش مواد حاصل از لایروبی در امتداد خطوط تراز، نگهداری نوارهای سبز، زیباسازی سطوح بتنی، نمایش زیبایی‌های جریان آب
اصلاح و حفاظت از فرصت های تفریحی رودخانه	پاکسازی هدفمند محیط رودخانه، ایجاد آبراهه میانی با جریان کم یا متوسط، احداث سازه‌های کنترل سطح آب، حفاظت از برکه های هلالی شکل حاصل از میانبری پیچ‌ها

جدول ۲-۴- راهنمای حفاظت دیواره‌های رودخانه با اهداف خاص زیست محیطی [۱۰۴]

اهداف	راهکارها
حفظ و بهبود ارزش زیستگاه‌های ساحل رودخانه	ایجاد روکش‌های مسلح، حفاظت پنجه دیواره، شیب‌دارکردن ساحل، احیای مجدد پوشش گیاهی، ایجاد پوشش گیاهی، مدیریت مجرای جریان (اصلاح مسیر آبراهه)، حصارکشی و ایجاد مناطق حفاظت شده، محدودیت رشد گیاهان شناور
تامین بستر مناسب و پایدار برای حیات بی مهرگان بزرگ (مار و...)	استفاده از روکش سنگ‌ریزه‌ای یا انباشت سنگی، تورسنگ، یا موانع سخت (آبشکن‌های کوتاه)
ایجاد و حفاظت زیستگاه ماهیان	ایجاد پوشش درختی، احداث دیواره‌ها با هسته خاکی، موانع سخت و آرام کننده‌های درختی
بهبود و نگهداری مناظر زیبای رودخانه	ایجاد پوشش گیاهی، کاربرد روش‌های طبیعی– سازه‌ای (روکش‌های ترکیبی، آبشکن‌ها با هسته خاکی، ایجاد تراس‌ها روی دیواره، ایجاد پوشش گیاهی بر روی روکش سنگ‌ریزه‌ای)، حصارکشی و ایجاد مناطق حفاظت شده، پاکسازی هدفمند
دسترسی به رودخانه برای حیات وحش و یا تفریحات	کاربرد روکش‌های طبیعی– سازه‌ای، حفاظت و بازسازی تراس‌های دیواره رودخانه، شیب‌دارکردن ساحل و پوشش مجدد گیاهی، تغییر مسیر آبراهه، ایجاد پوشش گیاهی بر روی روکش سنگ‌ریزه‌ای، مدیریت مجرای جریان (اصلاح مسیر آبراهه)

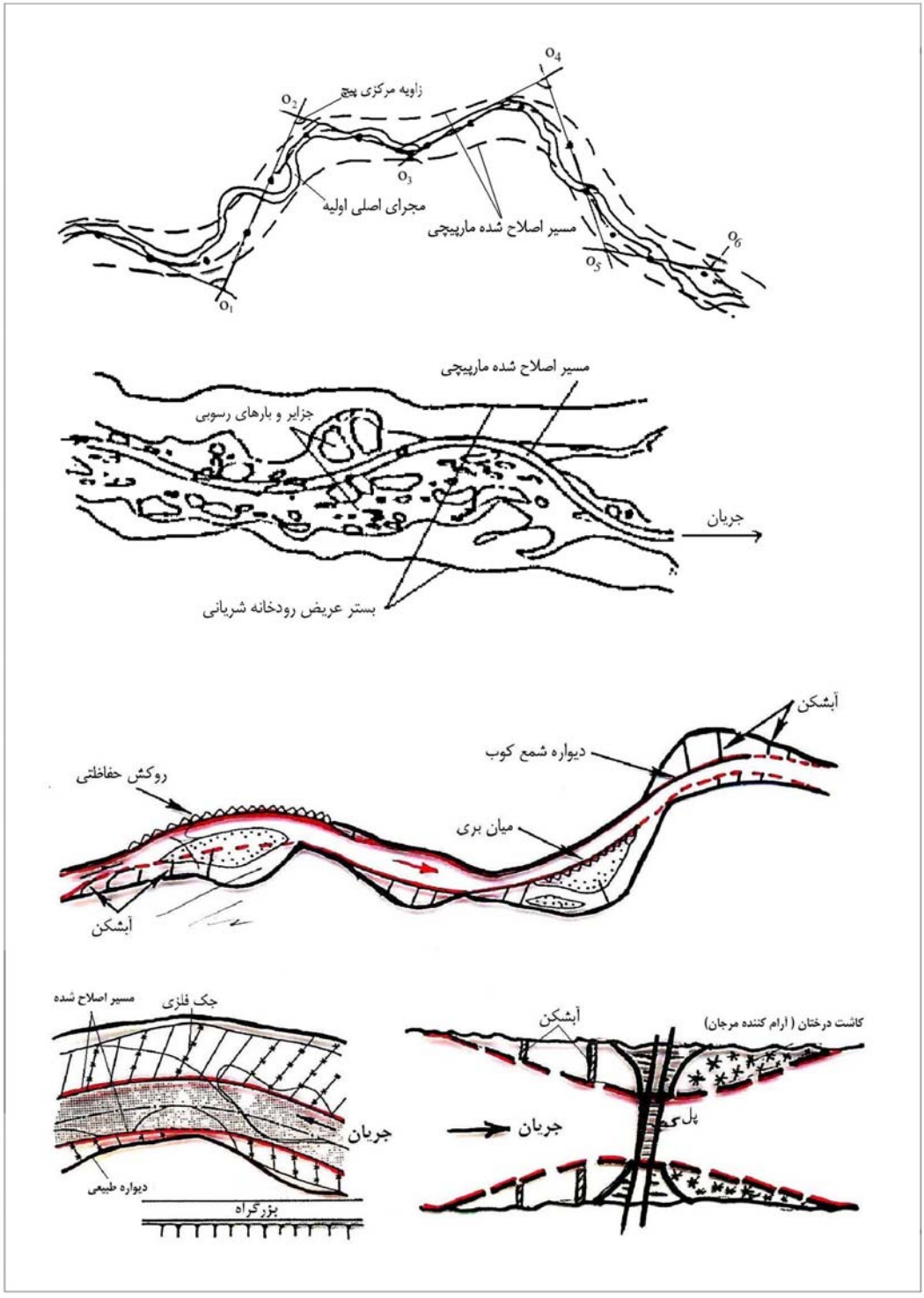
جدول ۲-۵- راهکارهای مدیریت سیلابدشت رودخانه با اهداف خاص زیست محیطی [۱۰۴]

اهداف	راهکارها
تامین زیستگاه ماهیان	طرح‌های ویژه برای گودبرداری و حوضچه‌های ذخیره، احداث سازه‌های کنترل سطح آب، ایجاد پناهگاه ماهیان در مناطق گودبرداری شده
حفاظت یا ایجاد تالاب‌ها	راهکارهای پیشگیرانه، طرح مناسب راستای خاکریزها به‌منظور افزایش اراضی حاشیه رودخانه، پاکسازی حداقل محیط، طراحی آبراه‌های زهکشی با ظرفیت بیش‌تر، ایجاد جزایر مصنوعی در گودال‌های برداشت مصالح و حوضچه‌های ذخیره، ایجاد پوشش گیاهی
حفاظت یا ایجاد زیستگاه‌ها در اراضی مشرف به دامنه سیلابدشت	راهکارهای پیشگیرانه، حفاظت از درختان، پاکسازی حداقل محیط، بازسازی خاکریزها، ایجاد پوشش گیاهی، نرده‌کشی با مصالح طبیعی، مدیریت و نگهداری مناطق با استفاده از پوشش گیاهان مناسب ایجاد پوشش گیاهی
تامین فرصت های تفریحی و گردشگری	طرح ویژه برای گودال‌های حاصل از برداشت مصالح و حوضچه‌های ذخیره، ایجاد راه و کوره راه‌ها، ایجاد مناظر طبیعی جذاب و دیدنی، احداث مکان‌های شیب‌دار جهت پیاده و سوار کردن قایق از اتومبیل، ایجاد مناطق قابل دسترسی برای ماهیگیری، ایجاد سواحل برای شنا
اصلاح و حفاظت مناظر زیبا	کاشت گیاهان زینتی، طرح ویژه برای گودال‌های حاصل از برداشت مصالح و حوضچه‌های ذخیره، پلکانی کردن دیواره‌های سیل‌بند، استفاده از معماری ویژه برای احداث دیواره‌های سیل‌بند و ایستگاه‌های پمپاژ یا سازه‌های دیگر

۲-۵- اصلاح مسیر رودخانه

«اصلاح مسیر رودخانه[1]» شامل تعدیل راستای جریان و بهبود شرایط فیزیکی و هیدرولیکی هندسه رودخانه در یک بازه معین برای تامین ظرفیت انتقال جریان (سیلاب مورد نظر)، و تامین پایداری نسبی رودخانه (کاهش تاثیرات فرسایش و رسوب‌گذاری) می‌باشد. به‌عبارت دیگر، اصلاح مسیر شامل: تغییر در عرض، عمق، شیب، مقاومت جریان (ضریب زبری) و راستای رودخانه است. به‌طوری‌که جریان آب در یک راستای مارپیچی (با پیچ‌های معکوس و متوالی، با انحنای نسبتا زیاد و با غیریکنواختی تدریجی در هندسه مقاطع عرضی متوالی)، به‌موازات دیواره‌های رودخانه هدایت گردیده و در وضعیت جدید تثبیت شده و پایدار گردد. در این‌حال، مقطع و هندسه هیدرولیکی رودخانه باید ظرفیت انتقال جریان آب و رسوب مورد نظر (در سیل طرح) را داشته باشد [۱۰۲ و ۱۰۴]. همچنین تثبیت و حفاظت دیواره‌های رودخانه[2] مجموعه عملیاتی است که با کاربرد روش‌های طبیعی و یا سازه‌ای، دیواره‌ها و سواحل رودخانه را در «راستای موجود و پایدار آن» یا در «راستای اصلاح شده» از تخریب و فرسایش احتمالی، حفاظت و کنترل نماید. شکل (۲-۱) نمونه‌هایی از طرح اصلاح مسیر، تثبیت و حفاظت دیواره‌های رودخانه‌ها را نشان می‌دهد.

1- River Training
2- Riverbank Stabilisation



شکل ۲-۱- نمونه‌هایی از طرح اصلاح مسیر رودخانه‌ها [۴۵]

۲-۵-۱- راهکارهای اصلاح مسیر رودخانه

اصلاح مسیر و تثبیت بازه رودخانه ممکن است شامل یک و یا ترکیبی از موارد زیر باشد [۲، ۳، ۵، ۱۳، ۳۷، ۴۵، ۱۰۲ و ۱۰۴]:

- بهسازی بستر و کناره‌های رودخانه به‌منظور کاهش مقاومت جریان، تحدید نواحی جریان غیرموثر و یا چرخشی، کاهش تراز سطح آب، افزایش ظرفیت انتقال سیلاب مورد نظر و در نتیجه کنترل و ایمنی در برابر خطرات سیلاب و بهبود شرایط زیستی سامانه رودخانه با توجه به راهکارهای پیشنهادی در جداول (۲-۲) تا (۲-۵)
- تثبیت بستر و شیب کف به‌منظور کاهش توان جریان از طریق کنترل شیب و فرسایش عمومی کف بستر با احداث کف بندها و یا آبشارهای کوتاه و به‌منظور کاهش شدت تخریب پنجه دیواره‌ها از طریق حفاظت طولی دیواره پایین و یا احداث صفحات مستغرق
- تثبیت راستای عمومی و عرض بستر کبیر در پهنه سیلابدشت رودخانه از طریق احداث سازه‌های طولی (مانند دیواره‌های ساحلی خاکریز) و یا سازه‌های تقاطعی (نظیر آبشکن‌ها)
- اصلاح راستای مارپیچی (شعاع انحنا و طول بازه حدفاصل پیچ‌ها) و هندسه هیدرولیکی مجرای اصلی رودخانه (عرض و عمق آبراهه) از طریق احداث سازه‌های آرام کننده جریان (نظیر شبکه‌های آبگذر، اسکله‌ای و حفاظ نرده‌ای)، سازه‌های انحراف دهنده جریان (نظیر آبشکن‌ها) و یا سازه‌های حفاظت طولی و روکش‌ها

۲-۵-۲- راهنمای اصلاح مسیر رودخانه

حفاظت‌های موضعی و یا اصلاح مسیر بدون توجه به پایداری سامانه رودخانه، عموما آسیب‌پذیر بوده‌اند [۱۱۵]. موفقیت طرح‌های اصلاح مسیر بستگی به رعایت دو اصل مهم دارد. اول توجه به الگوی عمومی رودخانه در بازه طولانی‌تر برای انتخاب راستا و دوم عدم تغییر قابل ملاحظه بیلان بده جریان و رسوب رودخانه در محدوده بالادست تا پایین‌دست بازه در طرح اصلاح هندسه هیدرولیکی بازه (مانند خصوصیات مارپیچی، شیب، عرض و عمق). بازه رودخانه علاوه بر ظرفیت انتقال جریان مورد نظر، باید از اثرهای ناخواسته آبشستگی و کف کنی یا رسوب‌گذاری و ازدیاد تراز کف بستر مصون بماند [۱۰۲]. در این‌صورت، اثرات منفی طرح در بالا دست و پایین‌دست بازه مورد نظر به حداقل ممکن می‌رسد [۱۱۵].

براساس بررسی‌ها و نتایج تجربی به‌دست آمده، رعایت ضوابط و نکات زیر در طرح اصلاح مسیر رودخانه‌ها ضروری است [۲، ۳، ۵، ۱۳، ۳۷، ۴۵، ۱۰۲ و ۱۰۴].

۲-۵-۲-۱- بررسی بازه‌های پایدار

بهترین راهنمای اصلاح مسیر، بررسی خصوصیات بازه‌های مختلف و پایدار در رودخانه مورد مطالعه است. متوسط مقادیر شیب، عرض، عمق، شعاع انحنای پیچ و ضریب مارپیچی (نسبت طول راستای رودخانه اصلی به طول دره رودخانه در حد فاصل دو مقطع) بازه‌های پایدار، راهنمای مناسبی برای انتخاب عوامل هندسه هیدرولیکی در بازه مورد نظر خواهد بود. همچنین با توجه به خصوصیات بازه بالادست و پایین‌دست، باید از ایجاد تغییرات شدید و ناگهانی در ابعاد هندسه هیدرولیکی بازه مورد نظر اجتناب نمود [۵۳].

۲-۵-۲-۲- راستای رودخانه

در شرایطی که راستای رودخانه نامناسب بوده و پیچ‌های تند و یا تغییرات شدید عرضی سبب خطرات رودخانه‌ای گردد، تنظیم راستا و امتداد دیواره‌های رودخانه نسبت به یک محور مناسب ضروری می‌باشد. به‌طور کلی، بازه‌های مستقیم و طولانی رودخانه عموما ناپایدار بوده و توان اضافی جریان صرف تغییرات رودخانه‌ای می‌گردد. در شرایط آزادی تنظیم رودخانه در محدوده مورد نظر، از ایجاد بازه‌های مستقیم و یا با انحنای بسیار کم (ضریب مارپیچی کم‌تر از ۱/۵، و یا شعاع انحنای نسبی بیش‌تر از ۲۶) باید اجتناب نمود. زیرا، تمایل مارپیچی جریان سبب اعمال نیروی اضافی به دیواره‌ها خواهد شد. در یک الگوی مناسب مطابق شکل (۲-۲)، رودخانه در مسیری مارپیچی، متشکل از سری پیچ‌های ملایم و معکوس با انحنای مناسب شکل داده می‌شود. بازه نسبتا مستقیم حد فاصل بین دو پیچ متوالی[1] برای هدایت جریان از یک پیچ به پیچ پایین‌دست بدون آشفتگی و تلاطم شدید است [۷۸ و ۱۰۲].

به‌هرحال، رودخانه در دشت آبرفتی خود همواره به‌صورت آزاد و بدون محدودیت‌های طبیعی یا اجتماعی جریان ندارد. اگر شرایط محدود کننده زیر وجود داشته، باید به‌عنوان کنترل‌های اجباری در انتخاب راستای رودخانه در نظر گرفته شوند.

- **کنترل‌های طبیعی:** امتداد دره رودخانه و توپوگرافی به‌عنوان کنترل طبیعی خط‌القعر و مسیر سیلابدشت رودخانه، امتداد گسل‌های طولی به‌عنوان کنترل راستای عمومی رودخانه، امتداد گسل‌های عرضی به‌عنوان عامل توسعه پیچ رودخانه و ابعاد پیچ و تغییرات موضعی در عرض بستر، عوامل تکتونیکی و بیرون زدگی موضعی تشکیلات سنگی و مقاوم به‌عنوان کنترل طبیعی در شیب کف و یا در عرض و همچنین در توسعه اجباری پیچ‌ها و یا تغییر مسیر رودخانه، به‌شمار می آیند.
- **کنترل‌های غیرطبیعی:** راه، کانال، خطوط انتقال حیاتی (آب، نفت، گاز، برق، تلفن)، پل‌ها و تاسیسات و اماکن تاریخی و مذهبی در بستر رودخانه و یا در نواحی ساحلی، تاسیسات صنعتی مهم، موقعیت روستاها یا اراضی و باغات، به‌عنوان کنترل‌های هندسی در طرح اصلاح مسیر باید به‌شمار آیند.
- **حریم رودخانه‌های شهری:** محدوده توسعه شهری، حریم ایمنی شهر از خطرات رودخانه‌ای، تخلیه شبکه زهکشی رواناب سطحی شهری، ظرفیت خود پالایی، قابلیت قایقرانی رودخانه، زیباسازی مسیر و فضاسازی تفریحی و گردشگری در نوار ساحلی رودخانه، باید به‌عنوان کنترل‌های شهری در طرح اصلاح مسیر رودخانه به‌شمار آیند.
- **حریم رودخانه‌های مرزی:** پایداری طبیعی رودخانه، ضرورت تثبیت رودخانه در خط مرزی (میل‌های مرزی)، ضرورت هدایت جریان به سامانه آبگیری به‌منظور تسهیل در برداشت حقابه قانونی از رودخانه، قابلیت کشتیرانی رودخانه و باراندازی ساحلی، ضرورت احیای شرایط زیستابی رودخانه و توافقات منطقه‌ای و بین‌المللی باید به‌عنوان کنترل‌های اصلی در طرح اصلاح مسیر رودخانه در نظر گرفته شوند.

۲-۵-۲-۳- انحنا و مارپیچ رودخانه

- **شعاع انحنای پیچ:** به‌طور کلی شعاع انحنای پیچ رودخانه باید در حدود متوسط شعاع انحنا در پیچ‌های مختلف و پایدار آن رودخانه باشد. پیچ‌های تند تنها در شرایط خاص (وجود کنترل‌های اجباری) و یا در شرایط پایدار دیواره و بستر مجاز بوده، و در این‌صورت نیز نیازهای حفاظتی بیش‌تر خواهد بود. از طرف دیگر، شعاع انحنای خیلی زیاد نیز مطلوب نیست. حداکثر شعاع

1- River Crossing

انحنا برای رودخانه‌های نیمه کوهستانی و بالا دست حوضه ۴۸۰۰ متر و برای رودخانه‌های سیلابدشتی ۷۲۰۰ متر پیشنهاد شده است. جهت کشتیرانی نیز حداقل انحنا ۲۵۰۰ متر لازم می‌باشد [۱۰۲].

- **انحنای نسبی پیچ:** عموما شعاع انحنای مرکزی پیچ (R) به‌صورت ضریبی از عرض بالای مجرای اصلی رودخانه (B) تعیین می‌گردد. براساس گزارش لیوپولد و ولمن (۱۹۵۷)، انحنای نسبی رودخانه‌ها (R/B) عموما بین ۱/۵ تا ۴/۳ است. گرچه این نسبت از ۱/۵ تا ۱۰ نیز مشاهده می‌شود، ولی تمایل طبیعی اکثر رودخانه‌ها دستیابی به نسبت پایدار (۲ تا ۳) می‌باشد [۱۳۰]. چانگ نیز در سال ۱۹۸۵ و ۱۹۸۶ نشان داد که، متوسط نسبت (R/B) برای شرایط تعادل پایدار رودخانه‌های بستر ماسه‌ای حدود ۳ می‌باشد [۳۷]. کینوری و موواراش (۱۹۸۴) این نسبت را برای پیچ‌های پایدار در دشت آبرفتی آزاد در حدود ۴ تا ۵، برای پیچ‌های با دیواره‌های قابل فرسایش ولی پایدار در حدود ۷ تا ۸ و برای پیچ‌های با دیواره‌های مقاوم و غیر فرسایشی در حدود ۲ تا ۳ گزارش کرده است. انحنای نسبی مناسب برای رودخانه‌های متوسط و بزرگ را در حدود ۷ تا ۸، و برای رودخانه‌های کوچک در حدود ۱۰ تا ۱۲ پیشنهاد شده است [۷۸].
- **هندسه پیچ:** پیچ رودخانه ممکن است به‌صورت ساده (قوسی از یک دایره) باشد. در رودخانه‌های متوسط و بزرگ، معمولا انحنای رودخانه به‌صورت یک پیچ مرکب طراحی می‌شود. به‌طورکلی شعاع انحنا از مقطع ورودی پیچ به سمت میانه پیچ کاهش یافته و سپس مجدد در جهت پایین‌دست پیچ افزایش می‌یابد. مشخصات هندسی طرح پیچ‌های ساده و مرکب مطابق شکل (۲-۳) توسط کینوری و موواراش (۱۹۸۴) ارائه شده است [۷۸].
- **زاویه ورودی به پیچ:** زاویه بین خط اصلی جریان با خط مماس بر دیواره در محل پیچ رودخانه را زاویه ورودی به پیچ یا زاویه حمله آب (α) می‌نامند. گاهی مطابق شکل (۲-۴)، این زاویه را بین خط مماس بر دیواره خارجی دو پیچ متوالی با خط دیواره رودخانه در مسیر مستقیم حد فاصل دو پیچ متوالی تعریف کرده و آن‌را زاویه انحراف می‌نامند [۱۰۷]. توصیه می‌شود که زاویه حمله آب برای شرایط حفاظت نشده دیواره‌ها از ۱۰ درجه تجاوز نکند. برای شرایطی که دیواره‌ها مستقیما با سازه روکشی محافظت می‌شود، این زاویه نیابد از ۲۵ درجه بیش‌تر شود [۱۱۵].
- **شیب و ضریب مارپیچی:** توازن توان جریان رودخانه[1] برای بازه قدیم و بازه اصلاح شده باید حفظ گردد تا تاثیرات نامطلوب طرح به بازه‌های بالا دست و پایین‌دست رودخانه گسترش نیابد. برای توازن توان جریان، رابطه زیر بین شیب (S) و ضریب مارپیچی (P: نسبت طول راستای رودخانه اصلی به طول دره رودخانه در حد فاصل دو مقطع) ارائه شده است.

$$P_1 S_1 = P_2 S_2 \qquad (۱-۲)$$

اندیس ۱ برای بازه قدیم رودخانه و ۲ برای بازه اصلاح شده است [۱۰۷]. ضریب مارپیچی بازه جدید (P_2) با توجه به شعاع انحنای مرکزی پیچ (R)، زاویه ورودی به پیچ (α) و طول مسیر حد فاصل دو پیچ متوالی (L) قابل محاسبه بوده و از این طریق شیب جدید بازه (S_2) به‌دست می آید.

- **بازه اتصال پیچ‌ها:** مطابق شکل (۲-۲)، طول مناسب برای بازه نسبتا مستقیم حد فاصل بین دو پیچ متوالی در حدود ۲ تا ۴ برابر عرض بالای مقطع اصلی رودخانه (L= 2-4 B) پیشنهاد شده است [۱۰۲]. طول موج مارپیچ رودخانه حدود ۷ تا ۱۱

1- Stream Power

برابر عرض مقطع اصلی رودخانه (λ= 7-11 B) است. برای دستیابی به شرایط فوق، حداقل زاویه مرکزی پیچ رودخانه (θ) در حدود ۵۰ درجه مناسب خواهد بود [۷۱].

۲-۵-۲-۴- عرض رودخانه

تغییر در عرض رودخانه به‌طور طبیعی روی فرآیند فرسایش یا رسوب‌گذاری اثر دارد. از نظر هیدرولیکی، رابطه عرض با عمق و با شیب کف معکوس می‌باشد. توازن توان جریان رودخانه بین بازه قدیم (با اندیس ۱) و بازه اصلاح شده (با اندیس۲) با روابط زیر میان متوسط عرض بالای مقطع اصلی (B)، عمق متوسط (D)، متوسط شعاع هیدرولیکی (R)، و شیب متوسط بازه رودخانه (S) باید تامین گردد [۵۴ و ۱۰۷].

$$D_1S_1 = D_2S_2 \quad ; \quad B_1S_2 = B_2S_1 \qquad (۲-۲)$$

رابطه میان عرض و عمق و تاثیر آن در فرآیند فرسایش یا رسوب‌گذاری به‌طور صریح نبوده و نیاز به ارزیابی کمی توازن بار رسوبی در بازه مورد نظر دارد. افزایش عرض بازه می‌تواند اثر افزایش شیب را جبران نماید. افزایش عرض حداکثر ۱۰ تا ۱۵ درصد مجاز است در غیر این‌صورت تمایل شریانی شدن و گسترش بارها و جزایر پدید آمده و از عرض موثر جریان در بازه می‌کاهد. رودخانه‌های شریانی عموما نیاز به کاهش عرضی و یکنواختی مقاطع در طول بازه دارند، ولی عرض تنگ شدگی باید ظرفیت انتقال حداکثر جریان مورد نظر را داشته باشد. کاهش بیش از ۳۰ درصد عرض توصیه نمی‌شود [۵۴ و ۱۰۷].

۲-۵-۲-۵- مواضع تثبیت

سازه‌های حفاظت دیواره‌ها باید از موضع پایدار رودخانه شروع شده و به موضع پایدار دیگری از دیواره در پایین‌دست ختم شوند در غیر این‌صورت، سازه‌ها باید از موضع بالادست که شدت تلاطم کم‌تر است شروع گردیده و به‌خوبی در دیواره قفل شوند تا امکان تخریب و انحراف جریان به پشت سازه نباشد. در پایین‌دست نیز، انتهای سازه به جایی ختم شود که تاثیرات نامطلوب احتمالی آن مهم نباشد [۱۰۲ و ۱۱۵].

در محدوده پیچ‌ها، شروع سازه‌های اصلاح مسیر و حفاظت دیواره‌ها باید از بالا دست محل پیچ باشد. به‌طور کلی دیواره خارجی پیچ از محدوده‌ای معادل یک برابر عرض رودخانه از بالادست پیچ تا فاصله یک و نیم برابر عرض در پایین‌دست پیچ باید تحت حفاظت مناسب قرار گیرد [۱۱۵]. بهتر است از محلی آغاز گردد که جریان موازی با دیواره‌ها بوده و سپس با زاویه کمی در راستای انحنای پیچ ادامه یابد. در غیر این‌صورت محل شروع سازه‌ها طوری باید 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. تنها در شرایط کاربرد سازه‌های مقاوم روکش حفاظتی، افزایش این زاویه تا ۲۵ درجه قابل قبول خواهد بود.

۲-۵-۲-۶- پیوستگی حفاظت و تثبیت دیواره‌ها

در رودخانه‌های شریانی مستقیم و ناپایدار حفاظت کناره‌ها در دو سمت رودخانه ضروری می‌باشد [۱۰۷، ۱۱۲ و ۱۱۵]. به‌طورکلی رودخانه‌های مارپیچی به حفاظت پیوسته و یکسان در دو سمت یا در طول مسیر نیازی ندارند. اقدامات اصلی‌ترعموما در محدوده

دیواره خارجی پیچ بوده و در امتداد دیواره داخلی و نیز مسیر مستقیم حد فاصل پیچ‌ها، اقدامات ضعیف‌تری کفایت می‌نماید. ازاین‌رو، طرح اصلاح مسیر در یک راستای مارپیچی اقتصادی‌تر و امکان‌پذیرتر است [۱۱۵ و ۱۴۴].

برای شرایطی که طول دیواره رودخانه نیاز به حفاظت سازه‌ای دارد، متناسب با شرایط رودخانه و نوع سازه‌های حفاظتی، ضرورتی برای پیوستگی سازه‌ها در طول حفاظت شده نیست ولی طول کلی سازه‌ها باید حدود دو سوم طول کل دیواره‌های رودخانه باشد [۱۱۵].

۲-۵-۲-۷- بده و ارتفاع سطح آب

به‌طورکلی سه جریان و ارتفاع سطح آب نظیر آن (جریان متوسط کم آبی، جریان سیلابی متناوب یا جریان غالب و یا بده مقطع پر در رودخانه‌های سیلابدشتی و جریانات سیلابی غیرمتناوب) باید مورد نظر قرار گیرد [۳۷ و ۱۰۲]. اهمیت تفکیک میان جریان کم آبی، متوسط و حداکثر سیلابی در تفاوت کاربرد روش‌ها و نحوه حفاظت دیواره‌ها می‌باشد. تا ارتفاع سطح کم آبی جریان، دیواره رودخانه به‌طور دایم اشباع و تحت تاثیر تنش برشی جریان بوده و پدیده آبشستگی پنجه دیواره یا غارکنی اتفاق می‌افتد ازاین‌رو، نوع حفاظت این بخش بسیار مهم خواهد بود. از این حد تا ارتفاع سطح آب جریان غالب و یا مقطع پر، نوسانات سطح آب به‌طور متناوب اتفاق می‌افتد و فرسایش سطح دیواره مهم می‌باشد. در بستر سیلابی، سطح دشت ساحلی و دیواره‌های کبیر رودخانه به‌ندرت و به‌طور غیرمتناوب در معرض آب گرفتگی و تخریب قرار می‌گیرند [۷۹].

۲-۵-۲-۸- تراز بالای دیواره

تراز دیواره‌ها یا سازه‌های حفاظتی در جهت پایین‌دست کاهش می‌یابد. بهترین معیار آن محاسبه نیمرخ سطح آب و احتساب ارتفاع آزاد مناسب به‌منظور کنترل نوسانات سطح آب در مواقع سیلابی می‌باشد همچنین ارتفاع متوسط دیواره‌های رودخانه معیاری برای کنترل ارتفاع سازه‌های حفاظتی خواهد بود [۱۱۵].

۲-۵-۲-۹- شیب دیواره‌ها

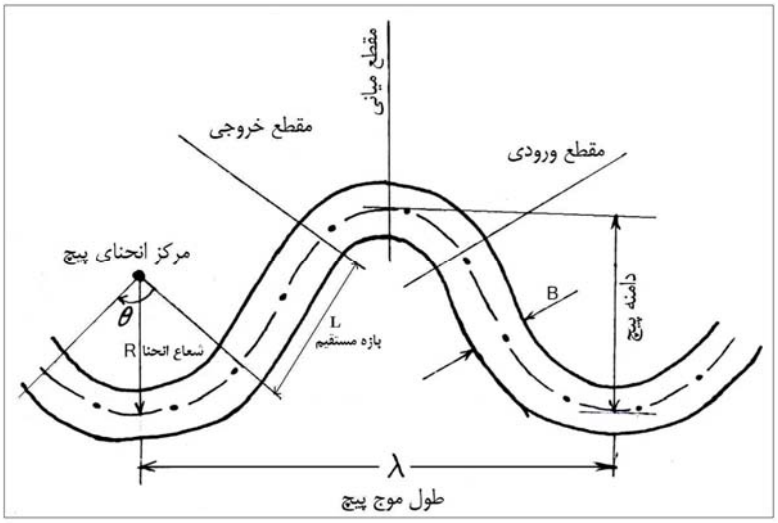
شیب مناسب دیواره‌ها نقش مهمی در پایداری کناره‌های رودخانه دارد. در بعضی موارد اصلاح شیب به تنهایی کفایت می‌کند و در موارد دیگری حفاظت شیب از طریق پوشش طبیعی و یا سازه‌ای ضروری می‌باشد. اصلاح شیب و پایداری دیواره‌ها با درک صحیح از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد دیواره و مکانیزم گسیختگی آن امکان‌پذیر خواهد بود. در شرایطی که محدودیت نباشد، حداقل شیب دیواره معادل (1.5H:1V) و شیب مناسب برابر (2H:1V) پیشنهاد شده است [۷۹].

۲-۵-۲-۱۰- پاکسازی و بهسازی بستر

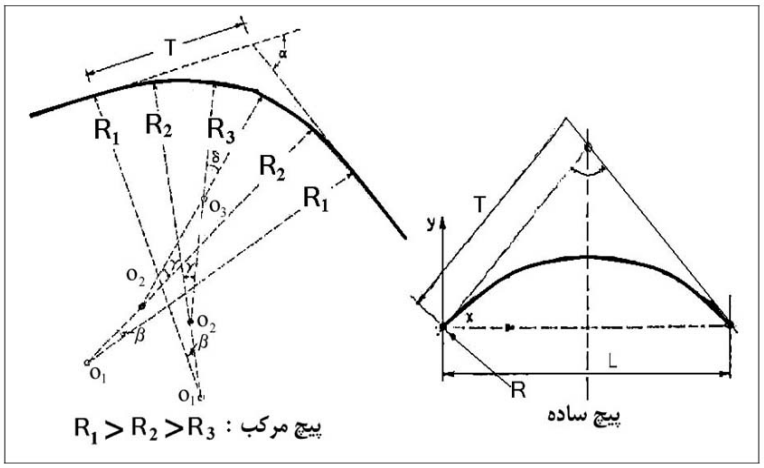
تجمع مواد زاید، نخاله، آشغال و تنه درختان در اثر وقوع سیل، باعث آشفتگی موضعی جریان به‌ویژه در کناره‌های رودخانه می‌گردد. پاکسازی این مواد باعث بهبود شرایط جریان، کاهش مقاومت جریان و افزایش ظرفیت انتقال جریان یا پایین افتادن سطح آب می‌گردد [۷۸]. همچنین لایروبی و حذف بارهای رسوبی، سطح موثر مقطع جریان را افزایش داده و سبب بهسازی بستر می‌گردد. بهسازی بستر هر چند سال یکبار و به‌ویژه بعد از وقوع سیل‌های بزرگ لازم می‌باشد [۱۰۷].

۲-۵-۲-۱۱- بهسازی شاخه‌های فرعی

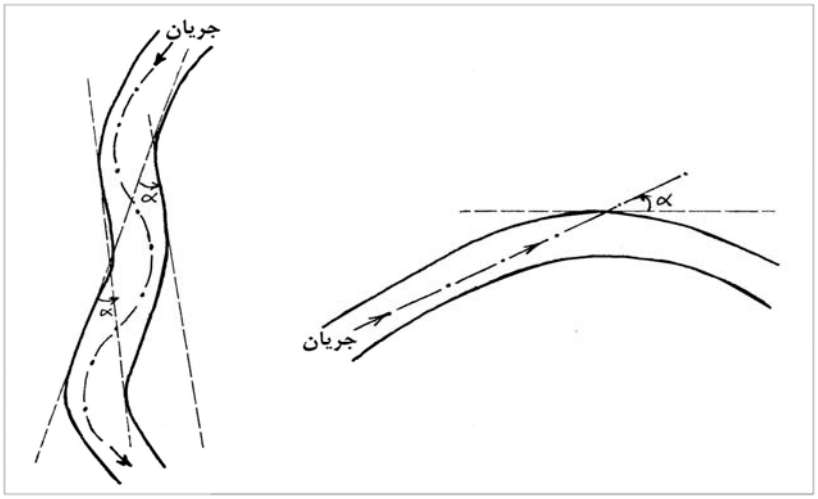
تعریض و تثبیت شاخه‌های ورودی به رودخانه اصلی در محدوده‌ای که تحت تاثیر برگشت آب رودخانه است، همراه با حفاظت دیواره‌های رودخانه اصلی در این محدوده ضروری می‌باشد زیرا علاوه بر حمله خطوط جریان به دیواره‌های مقابل، توسعه گردابی جریان در محدوده ورودی، عامل فرسایش موضعی و ناپایداری دیواره‌ها خواهد بود.



شکل ۲-۲- مشخصات و ابعاد مارپیچ رودخانه [۳۷]



شکل ۲-۳- طرح پیچ رودخانه [۷۸]



شکل ۲-۴- زاویه ورودی به پیچ (α) یا زاویه حمله آب به دیواره‌ها یا زاویه انحراف [۳۷]

۲-۶- روش‌های تثبیت و حفاظت دیواره‌های رودخانه

ساماندهی، اصلاح مسیر و حفاظت دیواره‌های رودخانه منحصر به استفاده از یک روش خاص در طول یک بازه و یا در دو سمت ساحلی رودخانه نیست، بلکه متناسب با شرایط مختلف، تلفیقی از کاربرد روش‌های مختلف را دربرمی‌گیرد [۴۲]. جدول (۲-۴) و جداول (۲-۶) تا (۲-۸) انواع روش‌های موجود حفاظت دیواره و تناسب کاربرد هر یک را در شرایط مختلف رودخانه‌ها به‌طور خلاصه معرفی می‌نماید. روش‌های حفاظت و تثبیت رودخانه بر حسب نوع مصالح، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن، مکانیزم عملکرد حفاظتی، دوام کارکرد و موضع کاربرد به‌ترتیب به شناسه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- انعطاف‌پذیری: «صلب» یا «انعطاف‌پذیر»
- آبگذری: «نفوذپذیر» یا «نفوذناپذیر»
- سازکارحفاظتی: روش «مستقیم» (روکش‌ها و دیواره حایل) و روش «غیرمستقیم» (آرام کننده‌ها و انحراف دهنده‌ها)
- نوع مصالح و ساختار حفاظتی: «طبیعی»، «سازه‌ای» و «طبیعی- سازه‌ای»
- موضع کاربرد: حفاظت بستر رودخانه (کنترل شیب کف)، حفاظت دیواره رودخانه اصلی و حفاظت حریم و ساحل بالا و یا سیلابدشت رودخانه
- دوام: «موقتی» (اضطراری)، «کوتاه مدت» یا «دایمی» (حفاظت درازمدت)

۲-۶-۱- مشخصات و مکانیزم کارکرد روش‌های مختلف

۲-۶-۱-۱- انعطاف‌پذیری

به‌طور کلی در مهندسی رودخانه، سازه‌های انعطاف‌پذیر بهتر از سازه‌های صلب هستند. دیواره‌های رودخانه به‌طور طبیعی بر اثر نیروی «تراوش» و پدیده «زیرشویی» نشست‌های ناهمگون کرده و یا بستر رودخانه در موقعیت پنجه دیواره در معرض آبشستگی

قرار می‌گیرد در این‌صورت، یک سازه صلب به‌سهولت و سرعت دچار ترک خوردگی شده و بخش‌هایی از آن تخریب می‌گردد که سرانجام منجر به گسیختگی کل سازه و تشدید روند تخریبی دیواره خواهد شد. درحالی‌که سازه‌های انعطاف‌پذیر نسبت به تغییرات، قابلیت تنظیم و جابجایی و تحکیم داشته و امکان مرمت و بازسازی مجدد دارند [۱۲۷ و ۱۲۸]. تنها ممکن است در شرایط خاص و استثنایی مانند رودخانه‌های کم عرض، حفاظت تاسیسات مهم ساحلی در طول محدودی از رودخانه‌های شهری، در محل پل‌ها یا سازه‌های آبی، سازه‌های صلب با مصالح ساختمانی و به‌صورت دیواره حایل یا روکش (با تمهیدات حجیم و پرهزینه) مناسب‌تر باشد. حفاظت دیواره‌های رودخانه با پوشش گیاهی و یا روکش سنگ‌ریزه‌ای[1] از مثال‌های بارز روش‌های انعطاف‌پذیر به‌شمار می‌آیند [۱۲۸].

۲-۶-۱-۲- آبگذری

در طرح‌های ساحل‌سازی رودخانه، روش‌ها و سازه‌های آبگذر از نظر هیدرولیکی برتر از سازه‌های نفوذناپذیر می‌باشند. در حفاظت مستقیم دیواره‌ها، کاربرد روکش‌های نفوذپذیر به‌سهولت و یکنواخت قادر به زهکشی دیواره رودخانه و آزادسازی نیروی تراوش و زیر فشار آب هستند. از سوی دیگر، جذب رسوبات معلق و ریزدانه در محیط متخلخل سطح پوششی، قابلیت تثبیت زیستی و بهسازی شرایط زیست محیطی کناره‌های رودخانه را فراهم می‌سازد. حفاظت غیرمستقیم دیواره‌ها از طریق احداث واحدهای آبگذر در کناره رودخانه، سبب گسترش جریان‌های چرخشی موضعی ضعیف شده که علاوه بر کاهش سرعت جریان اولیه رودخانه (در جهت طولی مسیر)، سبب رسوب‌گذاری و جذب مواد شناور و معلق می‌گردد و سرانجام سبب توسعه تدریجی و پایداری طبیعی دیواره رودخانه خواهد شد [۷۰، ۱۰۲، ۱۱۰ و ۱۲۸]. حفاظت مستقیم دیواره‌های رودخانه با پوشش گیاهی و یا روکش سنگ‌ریزه‌ای و حفاظت غیرمستقیم با سازه‌های آرام کننده از مثال‌های بارز روش‌های حفاظتی نفوذپذیر به‌شمار می‌آیند [۱۲۸].

۲-۶-۱-۳- روش‌های مستقیم

راهکار عمومی در حفاظت رودخانه، مقاوم‌سازی دیواره در برابر عوامل فیزیکی (فرسایش سطحی، ذوب و انجماد...) و عوامل هیدرولیکی (سرعت، تنش و تلاطم جریان، اثر موج، آبشستگی پنجه دیواره،...) است. دیواره‌های نگهدارنده (وزنی یا غیروزنی) و روکش‌های حفاظتی (سازه‌ای و یا طبیعی) از روش‌های حفاظت مستقیم به‌شمار می‌آیند. دیواره‌های نگهدارنده یا حایل برای حفاظت عمودی و یا با شیب زیاد (به‌صورت تخت یا پلکانی) دیواره رودخانه در مواضع خاص و در طول کوتاه ممکن است به‌کار رود. دیواره حایل وزنی (بتنی، سنگ و سیمان، تورسنگی)، دیواره سپری (با بتن مسلح، با صفحات فلزی یا چوبی یا ردیف تایر ماشین، با خاک مسلح همراه با سپر کوبی...) از انواع دیواره‌های نگهدارنده هستند. روکش‌ها[2] عمومی‌ترین سامانه حفاظتی پیوسته روی شیب پایدار دیواره خارجی یا در مسیر مستقیم رودخانه هستند [۷]. کارایی روکش‌ها بستگی به اصلاح فیزیکی و پایداری شیب دیواره و مقاومت مصالح روکش بر روی شیب دارد. در شرایطی که شیب دیواره خیلی زیاد است، لزوم احداث یک دیواره حایل کوتاه در پای دیواره جهت تعدیل شیب ضروری خواهد بود [۷۰]. به‌منظور حفاظت پنجه، دیواره‌های حایل یا روکش‌ها باید تا عمق آبشستگی بستر توسعه یابند. درصورتی‌که از سازه‌های روکش انعطاف‌پذیر (تورسنگی یا واحدهای بتنی لولایی) استفاده گردد، باید حداقل ۱/۵ تا ۲ برابر عمق

1- Riprap
2- Revetments

آبشستگی در عرض بستر رودخانه گسترش یابد [۱۰۲ و ۱۱۰]. همچنین کاربرد فیلتر مناسب در لایه زیرین روکش‌های سازه‌ای جهت پایداری خاک‌دانه‌ها و سهولت تراوش آب از دیوار بدون خروج مواد ریزتر از آن ضروری خواهد بود. جداول (۲-۶) تا (۲-۸) برخی از انواع روکش‌ها و شرایط کاربری آنها را نمایش می‌دهند. جزییات طرح انواع روش‌ها، محدودیت‌ها و توصیه‌های کاربردی در منابع موجود ارائه شده است [۷، ۱۰۲، ۱۰۴ و ۱۱۰].

۲-۶-۱-۴- روش‌های غیرمستقیم- آرام کننده‌ها

آرام کننده‌ها[1] از سازه‌های حفاظتی غیرمستقیم دیواره‌ها در طرح اصلاح مسیر رودخانه به‌شمار می‌آیند. دیواره‌های شمع‌کوبی[2]، شبکه‌های نرده‌ای یا سیم خاردار[3]، جک‌های فلزی[4] و صفحات مستغرق[5] از انواع «آرام کننده‌ها» هستند [۱۲۸].

در این روش، سازه‌های آبگذر (نفوذپذیر) به‌صورت مجموعه‌ای از عناصر مقاوم در مقابل جریان در کناره‌های رودخانه آرایش می‌یابند. افزایش زبری و مقاومت بستر جریان همراه با توسعه جریانات چرخشی موضعی و ضعیف سبب توقف انتقال رسوبات بستر، ته نشست مواد رسوبی معلق، و جذب مواد جامد شناور می‌گردد. میدان رسوب‌گذاری در کناره رودخانه به‌تدریج توسعه یافته و قابلیت تثبیت زیستی می‌یابد [۱۰۲ و ۱۲۸]. کاربرد سازه‌های آرام کننده در رودخانه‌های مرزی به‌صورت دو منظوره (توسعه تدریجی و طبیعی دیواره‌ها، و استقرار موانع دفاعی موثر) باید مورد نظر قرار گیرد [۳۵]. جداول (۲-۶) تا (۲-۸)، انواع آرام کننده‌ها و شرایط کاربری آنها را معرفی می‌کند. جزییات طرح انواع روش‌ها، محدودیت‌ها، و توصیه‌های کاربردی در منابع موجود ارائه شده است [۵۶، ۷۳، ۱۰۲، ۱۰۴ و ۱۲۸].

۲-۶-۱-۵- روش‌های غیرمستقیم- انحراف دهنده‌ها

انحراف دهنده‌ها[6] از سازه‌های حفاظتی غیرمستقیم رودخانه‌ای با هدف دورسازی جریان تخریبی از موقعیت دیواره‌های موجود به‌شمار می‌آیند. آبشکن‌های رودخانه‌ای از این نوع سازه‌ها بوده، که به‌صورت یک سازه متقاطع یا عرضی از دیواره رودخانه به سمت محور جریان توسعه یافته و سبب انحراف و هدایت جریان از کناره‌ها به سمت محور مرکزی راستای رودخانه می‌گردد. آبشکن‌ها از نظرسازه‌ای، نفوذناپذیر هستند ولی به‌علت انحراف مسیر آب از کناره‌ها باعث توسعه جریان گردابی در کناره‌ها (در محدوده پایین‌دست یک آبشکن و یا در حد فاصل بین آبشکن‌های متوالی) و ته نشست رسوبات می‌گردند. کناره رودخانه در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود با مرز راستای اصلاح شده به‌تدریج توسعه یافته و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در دراز مدت تثبیت می‌یابد [۳۷ و ۱۴۷].

۲-۶-۱-۶- روش‌های طبیعی

در روش طبیعی (زیستی)، حفاظت سطح دیواره و اراضی ساحلی (محدوده حریم رودخانه) با استفاده از مصالح طبیعی مانند پوشش گیاهی (در سه گروه چمنی، بوته‌ای، درختچه و درختان) یا استفاده از چوب و ترکه به‌هم بافته (به‌صورت پوشش سطحی یا تسلیح خاک)، صورت می‌پذیرد. مکانیزم حفاظت از طریق تقویت پایداری ساختمان دیواره و سواحل بالای رودخانه (در برابر فرسایش

1- Retarders
2- Pile Dikes
3- Fences
4- Steel-Jack field
5- Vanes
6- Deflectors

سطحی، لغزش و یا ریزش توده‌ای خاک روی شیب دیواره) در اثر عوامل درونی فیزیکی و هیدرولیکی مسیر اصلی رودخانه اصلی و عوامل بیرونی (ساحل بالا و حریم طبیعی رودخانه) اعمال می‌گردد. روش‌های طبیعی در گروه سازه‌های با انعطاف‌پذیری و نفوذپذیری زیاد قرار دارند [۱۱۰ و ۱۲۸]. این روش گرچه از نظر زیستی و زراعی و نیز از جنبه مدیریت نگهداری، مسایل و مشکلات پیچیده‌ای دارد ولی از جنبه‌های اقتصادی، اکولوژیکی و زیست محیطی همواره گزینه برتری محسوب می‌گردد [۷، ۳۷، ۷۰ و ۱۱۰].

به‌طور کلی موفقیت استفاده از پوشش گیاهی بستگی به شرایط رودخانه و شدت تخریب‌پذیری دیواره‌ها، سطوح پایینی، میانی یا بالایی دیواره، نوع گیاهان، تنوع و آرایش گیاهی، روش کاشت و تثبیت زیستی و مدیریت نگهداری پوشش گیاهی دارد. روش‌های طبیعی در شرایط تلاطم کم جریان (حداکثر سرعت متوسط ۱/۰ متر بر ثانیه و حداکثر ارتفاع موج ۰/۱۵ متر)، راستای نسبتا مستقیم رودخانه و یا پیچ‌های ملایم (انحنای نسبی– نسبت شعاع انحنای مرکزی R به عرض سطح آب B در بازه بیش از ۲۶)، و شرایط فیزیکی مناسب دیواره‌ها (حداقل شیب جانبی (1.5H:1V)، و ترجیحا (2H:1V)، کارایی خوبی دارند [۳۷، ۱۱۰ و ۱۲۸]. مطابق جدول (۲–۸)، کاربرد روش‌های طبیعی و زیستی برای حفاظت تمام سطح دیواره رودخانه‌های کوچک تا متوسط (با شیب کم، و مقطع عریض و کم عمق)، و نیز برای حفاظت سطح بالای دیواره رودخانه‌های بزرگ توصیه شده است [۱۲۸]. جزییات طراحی انواع روش‌های طبیعی، محدودیت‌ها و توصیه‌های کاربردی در منابع موجود ارائه شده است [۷، ۳۷، ۱۰۲، ۱۰۴، ۱۱۰ و ۱۲۸].

۲-۶-۱-۷- روش‌های سازه‌ای

در روش سازه‌ای (ساختمانی یا مکانیکی) با استفاده از مصالح فنی و ساختمانی (بتن، سنگ، سیمان و قیر) انواع سازه‌های مقاوم از نوع دیواره‌های «نگهدارنده» و یا «روکش» (برای حفاظت مستقیم سطح دیواره)، سازه‌های آرام کننده و یا هدایتی (برای اصلاح مسیر جریان)، سازه‌های تثبیت بستر رودخانه (برای کنترل شیب) طرح و انتخاب می‌گردند [۳]. سازه‌های ساختمانی عموما نیازمند مصالح، امکانات فنی و کارگاهی زیاد و پیچیده بوده و هزینه بالایی را شامل می‌گردد. در شرایطی که عوامل فیزیکی و هیدرولیکی در تخریب دیواره‌ها شدید بوده و یا ملاحظات خاصی در بازه‌های کوتاه مورد نظر باشد، روش‌های سازه‌ای می‌توانند از کارایی موثرتری برخوردار است. به‌هر حال، سازه‌های انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر (نظیر روکش سنگ‌ریزه‌ای، تورسنگی) همواره باید در اولویت انتخاب قرار گیرند [۱۲۸]. جزییات طرح انواع روش‌های سازه‌ای، محدودیت‌ها و توصیه‌های کاربردی در منابع موجود ارائه شده است [۳، ۳۷، ۱۰۲، ۱۰۴، ۱۱۰ و ۱۲۸].

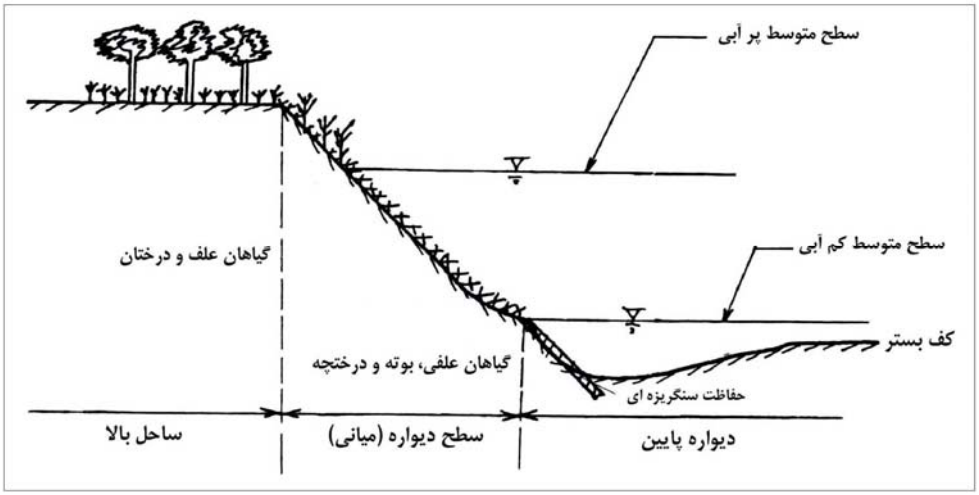
۲-۶-۱-۸- روش‌های طبیعی– سازه‌ای

در این روش مجموعه شرایط حفاظت سازه‌ای و زیستی به‌منظور گزینش برتر اقتصادی، فنی و زیست محیطی مورد نظر قرار می‌گیرد. کاربرد روش‌های تلفیقی «طبیعی– سازه‌ای[1]» (بیومکانیک یا بیومهندسی) با در نظر گرفتن موارد زیر عموما برتر و گاهی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود [۳۷، ۶۲، ۱۰۲، ۱۰۴ و ۱۱۰].

- در مسیر مستقیم رودخانه با سرعت و شدت تلاطم جریان زیاد، در نوار دیواره خارجی پیچ‌های تند، همچنین در شرایط دیواره‌های بلند عمودی و فرسایش‌پذیر، روش زیستی و گیاهی به تنهایی کارساز نخواهد بود [۳۷، ۱۱۰ و ۱۲۸].
- تحت شرایط فیزیکی و هیدرولیکی بالا، گزینه‌های ساختمانی (در طول زیاد رودخانه) عموما حجیم، پرهزینه و گاهی توجیه‌ناپذیر و غیرممکن خواهند بود [۶۲ و ۱۲۸].

1- Bio-Technical Methods

- شرایط فیزیکی و هیدرولیکی رودخانه (راستا، عرض، عمق، شیب و...) در طول مسیر، در دو سمت رودخانه (دیواره چپ و راست) و بر روی دیواره رودخانه (نواحی سه‌گانه از پنجه تا ساحل بالا در شکل (۲-۵)) عموما یکسان نیست ازاین‌رو، درجه حفاظتی در سطوح مختلف دیواره و در موقعیت‌های طولی در طرفین رودخانه لزوما مشابه نخواهد بود [۳۷ و ۸۴].
- در طرح‌های اصلاح مسیر رودخانه، حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه در مقطع اصلی و یا در مرزهای ساحلی جدید ضروری است. دیواره‌سازی در راستای اصلاح شده و یا حفاظت سطحی دیواره‌ها با مصالح سازه‌ای در بیش‌تر موارد از نظر اقتصادی و فنی توجیه‌ناپذیر، از نظر ریخت‌شناسی (به‌دلیل تغییرات ناگهانی در هندسه بازه و تاثیرات ناخواسته در بالادست و پایین‌دست بازه) خطرساز و از نظر زیست محیطی غیرقابل‌قبول هستند [۳۷ و ۶۲].



شکل ۲-۵- نمایش سطوح مختلف دیواره رودخانه با تلفیق روش‌های طبیعی- سازه‌ای [۳۷]

در حفاظت مستقیم دیواره‌ها به روش تلفیقی (شکل ۲-۵) ممکن است سطح پایین دیواره (از عمق آبشستگی احتمالی تا تراز سطح متوسط کم آبی) با روش سازه‌ای (ترجیحا انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر مانند روش سنگ‌ریزه‌ای)، و در سطوح بالاتر آن به‌ترتیب از روش‌های سازه‌ای با قابلیت تثبیت طبیعی (استقرار تایر ماشین...) و یا پوشش گیاهی حفاظت گردد.

در حفاظت غیرمستقیم دیواره‌ها و در اصلاح مسیر رودخانه از سازه‌های آبگذر (مانند شبکه نرده‌ای، جک‌های فلزی، شمع‌کوبی‌ها...)، و یا از سازه‌های ناپیوسته و نفوذناپذیر (مانند آبشکن‌ها، صفحات مستغرق) استفاده می‌شود. آبشکن‌های نفوذناپذیر گرچه مانع از عبور آب از خود سازه هستند ولی به‌علت انحراف مسیر آب از کناره‌ها باعث توسعه جریان گردابی در حد فاصل بین آبشکن‌های متوالی و ته نشست رسوبات می‌گردد [۱۴۷]. سازه‌های آبگذر، سبب کاهش سرعت و تنش برشی جریان اولیه رودخانه و گسترش جریان‌های چرخشی موضعی و ضعیف در میدان توزیع عناصر مقاومت جریان در کناره رودخانه شده که به‌طور طبیعی قابلیت رسوب‌گذاری و جذب مواد شناور و معلق را فراهم می‌سازد. در اثر تجمع و ته نشست رسوبات زمینه لازم برای توسعه دیواره و تثبیت طبیعی یا مصنوعی گیاهی آن فراهم می‌گردد [۱۴۷ و ۱۵۰]. روند تدریجی رسوب‌گذاری در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود و مرز راستای اصلاح شده رودخانه، همراه با استقرار پوشش گیاهی (طبیعی یا مصنوعی) به‌تدریج توسعه و تثبیت می‌یابد. از این دیدگاه،

سازه‌های حفاظت غیرمستقیم دیواره‌های رودخانه را می‌توان در گروه روش‌های تلفیقی به‌شمار آورد [۵۴ و ۱۳۹]. جزییات طرح انواع روش‌های «سازه‌ای– طبیعی»، محدودیت‌ها و توصیه‌های کاربردی در منابع موجود ارائه شده است [۶۲، ۱۰۲، ۱۰۴، ۱۱۰ و ۱۲۸].

۲-۶-۲- انتخاب روش‌های حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه

انتخاب روش یا روش‌های مناسب در حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه علاوه بر دانش مهندسی رودخانه، تابع مطالعات و بررسی‌های زیر می‌باشد [۴۲، ۶۲، ۷۰، ۱۲۸ و ۱۳۵].

- نوع و مشخصات رودخانه: مستقیم، مارپیچی، یا شریانی، بستر ریزدانه (ماسه‌ای)، یا درشت‌دانه (شنی و درشت‌تر)، بزرگ، متوسط یا کوچک، عمیق یا کم عمق، عریض یا کم عرض، مقطع ساده یا مقطع مرکب، رودخانه دایمی یا فصلی
- مشخصات دیواره‌ها: عوامل فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی فرسایش و تخریب (در سطوح سه‌گانه: دیواره پایین، سطح دیواره و ساحل بالا)، لایه‌بندی مواد دیواره و بستر، خصوصیات مکانیکی مواد دیواره، مکانیزم تخریب و گسیختگی دیواره‌ها (فرسایش سطحی، لغزش، ریزش توده‌ای– وزنی)
- مشخصات جریان: جریان دایمی یا فصلی، رژیم دوام جریان، رژیم سیلابی رودخانه، شدت تغییرپذیری جریان (کم یا زیاد)، شدت تلاطم و موج، شدت تغییرات سطح آب در مواقع سیلابی (اوج و افت سطح آب)، بار رسوبی کل (کم یا زیاد)، بار رسوبی کف (زیاد یا کم، مواد درشت‌دانه یا ریزدانه)، بار رسوبی معلق (قابلیت ته‌نشینی زیاد یا کم)، کیفیت شیمیایی آب (درجه قلیایی، خورندگی)، محاسبات نیمرخ سطح آب و خصوصیات هیدرولیکی جریان در بده‌های مورد نظر (سیل ۲۵ ساله و غیره)
- ارزیابی پایداری رودخانه: تشخیص و تفکیک بازه‌ها (پایدار، پایدار دینامیکی و ناپایدار)، مشخصات هندسه هیدرولیکی بازه‌های پایدار (شیب، عرض، عمق و شعاع انحنای پیچ)
- مواضع حفاظتی: در مسیر مستقیم، در پیچ (پیچ داخلی، پیچ خارجی)، تثبیت دیواره‌ها (در شرایط طبیعی و موجود، در راستای اصلاح شده)، در مقطع اصلی رودخانه، یا در بستر سیلابی، در دیواره پایین، سطح دیواره، حریم و ساحل بالا یا در سیلابدشت رودخانه
- ملاحظات زیست محیطی: حفظ وضع حیاتی موجود، احیای سامانه حیاتی و زیستابی رودخانه، حفظ زیبایی طبیعت رودخانه، تاثیرات زیستی و حیاتی اجرای طرح پیشنهادی در آینده رودخانه
- قابل قبول یا غیرقابل‌قبول بودن ارزش زیست محیطی کارهای رودخانه‌ای مورد نظر
- دوام مورد انتظار طرح: موقتی (اضطراری)، میان مدت یا دراز مدت (عمر مفید زیاد)
- مصالح قابل دسترسی در منطقه طرح: نوع مصالح (طبیعی، ساختمانی)، مقدار مصالح موجود، کیفیت مصالح (با مشخصات فنی لازم در کارهای رودخانه‌ای)، محل تامین مصالح (فاصله از منطقه طرح)، پتانسیل استقرار پوشش گیاهی (گونه‌های بومی و گونه‌های مناسب رودخانه‌ای)
- ارزیابی تناسب کاربرد گزینه‌های مختلف طبیعی و یا سازه‌ای متناسب با مطالعات فوق (تلفیق روش‌های حفاظتی «مستقیم» و «غیرمستقیم» با مصالح «طبیعی و یا سازه‌ای»و با قابلیت «انعطاف‌پذیری و نفوذپذیری» و نیاز به «مدیریت نگهداری» کم‌تر، به عنوان راهکار موثر و در عین حال اقتصادی مورد توجه بوده و از جنبه‌های زیستابی و زیباشناسی نیز گزیده‌تر می‌باشند)

- امکانات فنی و اجرایی قابل دسترس: ماشین‌آلات و تجهیزات فنی، کارشناسان ارشد و نیروهای فنی، پیمانکاران رودخانه‌ای- دریایی، ناظران با تجربه رودخانه‌ای و محدودیت‌های فنی و اجرایی
- ارزیابی اقتصادی طرح: برآورد صحیح از حجم و مقدار کار، امکان و سختی کار، هزینه‌ها، ریسک‌های رودخانه‌ای و خسارات احتمالی، مقایسه و ارزیابی گزینه‌های برتر
- ارزیابی ارزش‌های اجتماعی، زیست محیطی، منطقه‌ای و ملی طرح
- ارزیابی ارزش‌های سیاسی- دفاعی، زیست محیطی، ملی طرح و بین‌المللی طرح (در خصوص رودخانه‌های مشترک و مرزی)
- برآورد واقعی از هزینه و زمان‌بندی اجرای طرح در مراحل مختلف (با توجه به محیط طبیعی و ریسک‌پذیری رودخانه و سلامت رودخانه در صورت توقف احتمالی اجرای طرح به دلایل طبیعی یا عدم تامین اعتبار لازم)

جدول ۲-۶- روش‌های حفاظت دیواره‌های رودخانه براساس عملکرد سازه حفاظتی [۱۲۸]

حفاظت	مستقیم	دیواره‌ها	حفاظت	غیرمستقیم	دیواره‌ها	و اصلاح مسیر
صلب و نفوذناپذیر	انعطاف‌پذیر و نفوذناپذیر	انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر	آرام کننده‌ها (نفوذپذیر)	انحراف دهنده‌ها (صلب و نفوذناپذیر)	انحراف دهنده‌ها (انعطاف‌پذیر و نفوذناپذیر)	انحراف دهنده‌ها (انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر)
- دیواره حایل بتنی یا سنگ وسیمانی -روکش بتنی -روکش سنگ و سیمان روکش آجری -روکش خاک و سیمان -سپر فلزی -سپر آزبست سیمانی	- روکش‌پلاستیکی -روکش لاستیکی -روکش قیری و آسفالت	-روکش سنگ‌ریزه‌ای -روکش سنگ فرش -روکش تورسنگ -دیواره حایل تورسنگ -روکش بتنی مفصل‌دار روکش کیسه‌ای ماسه-سیمان (چیدمان کیسه‌ای منفرد بر روی یکدیگر) -مصالح طبیعی و گیاهی -پوشش گیاهی -تایر فرسوده ماشین -ماشین‌های اسقاطی -بلوک‌های‌سیمانی‌توخالی	-جک فلزی کلنر -جک فلزی چهار وجهی -شبکه نرده‌کشی -تورهای سیمی	-آبشکن- سپر فلزی -آبشکن- سپر بتنی -آبشکن- سنگ و سیمان -صفحات مستغرق: بتنی، سنگ وسیمان، یا سپر فلزی	- آبشکن- با هسته رسی و روکش سنگ‌ریزه‌ای - آبشکن- با هسته رسی و روکش تورسنگ - آبشکن- با هسته رسی و روکش کیسه‌ای	-آبشکن- سنگ‌ریزه‌ای -آبشکن- تورسنگی -آبشکن- بلوک بتنی -صفحات مستغرق: تورسنگی یا سنگ‌ریزه‌ای

جدول ۲-۷- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه براساس نوع و اندازه رودخانه [۱۰۷]

اندازه رودخانه	نوع رودخانه	بهسازی بستر	حفاظت مستقیم دیواره‌ها			حفاظت غیرمستقیم دیواره‌ها و اصلاح مسیر					
			روکش	روکش	روکش	آبشکن‌ها				آرام کننده‌ها	
			سنگ‌ریزه‌ای	تورسنگ	بتنی	شمع‌کوبی*	سنگ‌ریزه‌ای	خاکی	شمع‌کوبی*	جک فلزی
بزرگ	ماریپچی		×	*	×	×	×	*		*
	شریانی	×	×	*	×	×	×	*		*
	مستقیم		×	*		×	×	×		*
متوسط	ماریپچی	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	شریانی	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	مستقیم	×	×	+		×				×
کوچک	ماریپچی	×	×	+					×	×
	شریانی	×	×	+					×	×
	مستقیم	×	×	+						

× مناسب + درصورت فقدان سنگ‌های بزرگ * برای رودخانه‌های سیلابدشتی

جدول ۲-۸- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه براساس اندازه رودخانه و عوامل تخریب [۱۲۸]

شرایط رودخانه	سیلاب حداکثر (m^3/s)	عوامل تخریب دیواره*	روش‌های حفاظت دیواره
رودخانه اصلی	>۲۸۰۰۰	۱و۳و۴و۵و۶	۱- روکش بتنی مفصل‌دار، ۲- روکش سنگ‌ریزه‌ای، ۳- روکش بتنی صلب، ۴- روکش آسفالت (سطح بالای دیواره)، ۵- روکش طبیعی و ترکه‌ای (سطح بالای دیواره)، ۶- پوشش گیاهی (سطح بالای دیواره)، ۷- دیواره حایل کوتاه (سطح بالای دیواره)، ۸. موانع سخت
رودخانه بزرگ	۱۴۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰	۱و۳و۵و۶	۱- روکش سنگ‌ریزه‌ای، ۲- تورسنگ، ۳- آبشکن‌ها، ۴- دیواره شمع‌کوب چوبی، ۵- روش شبکه‌بندی، ۶- جک فلزی، ۷- روکش طبیعی و ترکه‌ای (سطح بالای دیواره)، ۸- پوشش گیاهی (سطح بالای دیواره)، ۹- دیواره حایل کوتاه (سطح پایین دیواره)، ۱۰- موانع سخت
رودخانه متوسط با شیب زیاد	۲۸۰۰ تا ۱۴۰۰۰	۲و۳و۵و۷	۱- روکش سنگ‌ریزه‌ای، ۲- تورسنگ، ۳- آبشکن‌ها، ۴- دیواره شمع‌کوب چوبی، ۵- شبکه‌بندی، ۶- روکش طبیعی و ترکه‌ای (سطح بالای دیواره)، ۷- پوشش گیاهی (سطح بالای دیواره)، ۸- موانع سخت
رودخانه متوسط با شیب کم	۲۸۰۰ تا ۱۴۰۰۰	۲و۳و۵و۷	۱- روکش سنگ‌ریزه‌ای، ۲- تورسنگ، ۳- آبشکن‌ها، ۴- جک فلزی، ۵- دیواره شمع‌کوب چوبی، ۶- دیواره شمع‌کوب با تورسیمی، ۷- روکش طبیعی ترکه‌ای، ۸- پوشش گیاهی، ۹- موانع سخت
رودخانه کوچک با شیب زیاد	<۲۸۰۰	۲و۳و۵و۷	۱- روکش سنگ‌ریزه‌ای، ۲- تورسنگ، ۳- آبشکن‌ها، ۴- دیواره شمع‌کوب چوبی، ۵- شبکه‌بندی، ۶- روکش طبیعی ترکه‌ای (سطح بالای دیواره)، ۷- پوشش گیاهی (سطح بالای دیواره)، ۸- موانع سخت
رودخانه کوچک با شیب کم	<۲۸۰۰	۲و۳و۵و۷	۱- روکش سنگ‌ریزه‌ای، ۲- تورسنگ، ۳- آبشکن، ۴- جک فلزی، ۵- دیواره شمع‌کوب چوبی، ۶- دیواره شمع‌کوب با تورسیمی، ۷- روکش طبیعی ترکه‌ای، ۸- پوشش گیاهی، ۹- موانع سخت

۱- فرسایش ناشی از ضربه برخورد قطرات باران بر سطح خاک در ساحل بالای رودخانه ۲- فرسایش دیواره ناشی از رواناب سطحی ۳- گسیختگی دیواره در اثر آبشستگی پنجه ۴- گسیختگی ناشی از روانگرایی مواد دیواره ۵- فرسایش دیواره پایین در جریان کم آبی ۶- فرسایش دیواره در اثر موج (باد، قایق) ۷- فرسایش دیواره در اثر نیروی تراوش

فصل ۳

آبشکن‌های رودخانه‌ای

۳-۱- تعریف آبشکن رودخانه‌ای

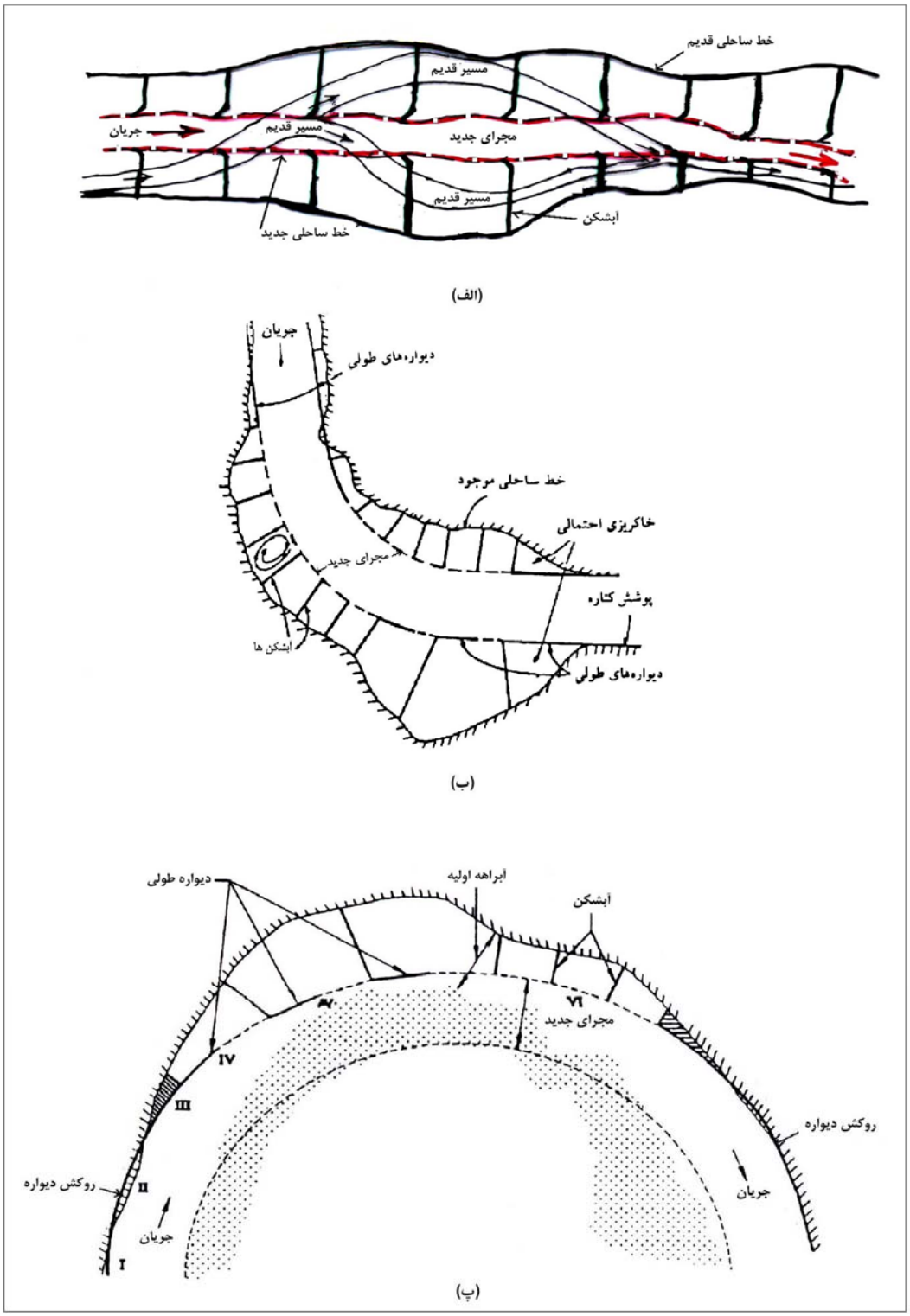
آبشکن‌های رودخانه‌ای، از سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه به‌شمار می‌آیند. آبشکن‌ها مبتنی بر ساخت سازه‌های متقاطع یا عرضی هستند که از دیواره طبیعی رودخانه با طول مناسب و با زاویه مناسبی نسبت به راستای عمومی جریان، توسعه یافته سبب انحراف حمله جریان از کناره‌ها و نواحی بحرانی شده و جریان را به سمت محور مرکزی رودخانه هدایت می‌نمایند. با انحراف جریان، کناره رودخانه در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود با مرز راستای اصلاح شده به تدریج با ته نشست رسوبات توسعه یافته و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در دراز مدت تثبیت می‌یابد. بنابراین با گذشت زمان، جریان در بخش میانی بازه رودخانه متمرکز می‌گردد [۴۵ و ۱۳۹].

آبشکن‌ها به‌صورت منفرد یا به‌صورت یک سری متوالی در یک و یا در دو سمت رودخانه ساخته می‌شوند. از نظر طول و با توجه به اهداف کاربری، آبشکن‌ها ممکن است خیلی کوتاه تا بلند باشند. نمونه‌هایی از آرایش آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه‌ها در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است.

ساختار عمومی یک آبشکن مطابق شکل (۳-۲) شامل اجزای زیر می‌باشد:

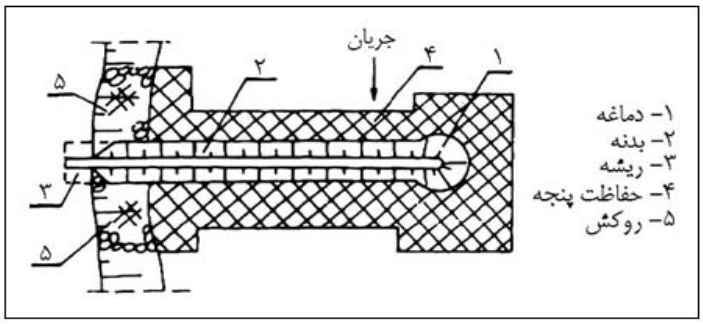
۱- دماغه یا پنجه که به‌علت مقاومت در برابر جریان و حفاظت در برابر آبشستگی بستر گسترده‌تر ساخته می‌شود، ۲- بدنه یا ساقه و تاج که بدنه اصلی آبشکن را تشکیل می‌دهد، ۳- ریشه یا تکیه گاه که نقش پایداری ساقه از طریق اتصال قفل شدگی آبشکن به دیواره رودخانه را به‌عهده دارد، ۴- حفاظت پنجه که جهت ایمنی آبشکن در برابر آبشستگی عمومی و موضعی در دماغه و پیرامون بدنه آبشکن حیاتی می‌باشد و ۵- حفاظت سطحی که پوشش حفاظتی آبشکن و دیواره طبیعی رودخانه از خطر فرسایش و تخریب است [۹۶]. نمونه سیمای یک آبشکن در پلان و مقاطع طولی و عرضی در شکل (۳-۳) نمایش داده شده است.

آبشکن‌های رودخانه‌ای از نوع انحراف دهنده‌ها هستند [۱۰۲ و ۱۲۸]. با توجه به کارکرد هیدرولیکی، آبشکن‌ها را می‌توان در گروه روش‌های «طبیعی- سازه‌ای» به‌شمار آورد [۳۷، ۶۲، ۱۴۷ و ۱۵۰]. نمونه‌هایی از ساخت و کارایی آبشکن‌ها در رودخانه‌های ایران و جهان در شکل‌های (۳-۴) تا (۳-۷) نشان داده شده است.

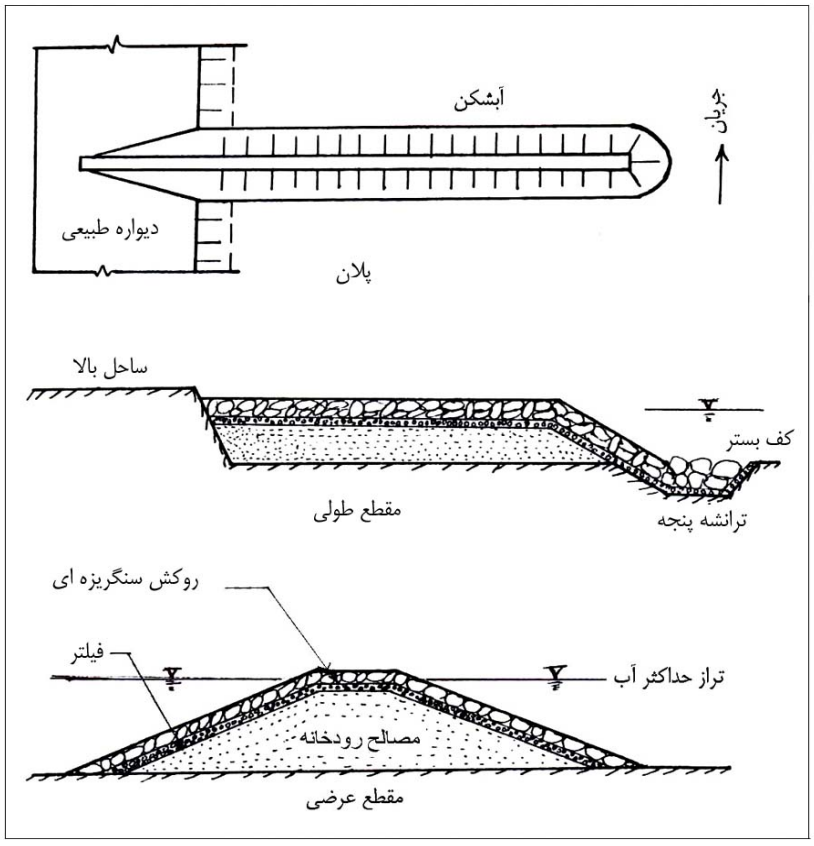


الف- اصلاح مسیر یک بازه مستقیم، عریض و شریانی، ب- اصلاح مسیر یک بازه مارپیچی، پ- اصلاح مسیر پیچ خارجی رودخانه

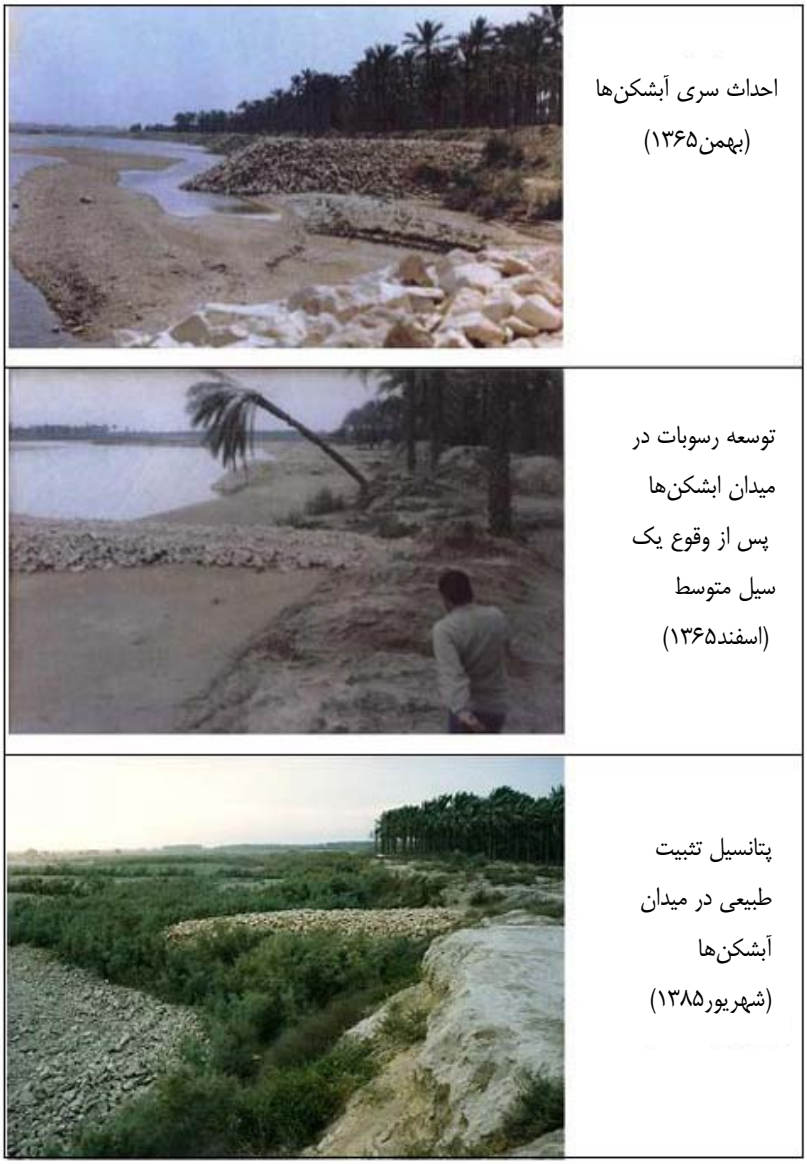
شکل ۳-۱- نمایش کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه‌ها



شکل ۳-۲- نمایش ساختار عمومی یک آبشکن در پلان [۱۰۴]



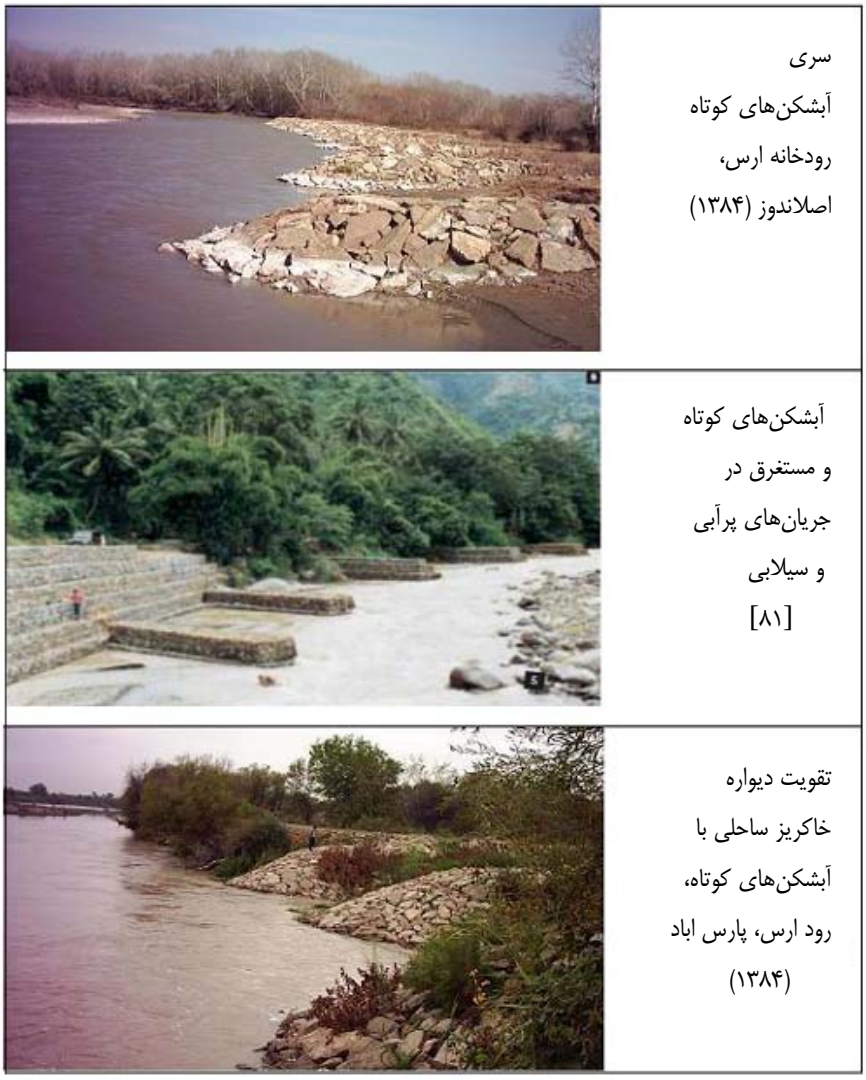
شکل ۳-۳- نمایش آبشکن نفوذناپذیر با مصالح رودخانه‌ای و روکش سنگ‌ریزه‌ای [۳۷]



شکل ۳-۴- آبشکن‌های سنگ‌ریزه‌ای، رودخانه حله، استان بوشهر [۴۵]

	کارایی سری آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه سنگی، کانادا [۵۰].
	آبشکن‌های سنگریزه‌ای کوتاه، رودخانه قزل اوزن، آذربایجان شرقی (۱۳۸۵)
	آبشکن مرکب: نفوذ نا پذیر در سمت ساحل و نفوذ پذیر در میانه رودخانه آرکانزاس، آمریکا [۹۴].

شکل ۳-۵- سیمای کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه [۴۵]



شکل ۳-۶- نمایش کاربرد آبشکن‌های کوتاه و یا مستغرق [۴۵]

۳-۲- اهداف کاربرد آبشکن‌ها

آبشکن‌ها در شرایط مختلف بازه‌های رودخانه‌ای (کوهستانی تا سیلابدشتی، مستقیم، شریانی تا مارپیچی در مجرای اصلی و یا در بستر کبیر سیلابدشت رودخانه، در کناره‌های با راستای مستقیم یا منحنی و در دیواره‌های خارجی یا داخلی پیچ‌ها)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. آبشکن‌ها برای اصلاح مسیر رودخانه‌های عریض و شریانی و به‌ویژه با بار رسوبی کف زیاد (از نوع ماسه، شن و درشت‌تر) و برای شرایط مختلف جریان مناسب و موثر هستند. هر چند که برای هدایت جریان در رودخانه‌های مارپیچی (حفاظت دیواره‌های مجرای اصلی و کنترل سیلاب در سیلابدشت رودخانه) نیز به‌طور گسترده‌ای از آبشکن‌ها استفاده می‌گردد [۵۴، ۵۶، ۱۰۷ و ۱۵۰]. در دهه‌های اخیر، استفاده از آبشکن‌های کوتاه با مصالح سازه‌ای و یا طبیعی برای ساماندهی سامانه زیستابی رودخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۶۰ و ۶۲].

به‌جز در رودخانه‌های کوچک و کم عرض و در شرایط خاص کاربرد آبشکن‌ها محدودیت قابل توجهی نداشته و می‌تواند به‌عنوان یک گزینه در ساماندهی بازه رودخانه در نظر گرفته شود. آبشکن‌های رودخانه‌ای برای یک یا ترکیبی از اهداف زیر مورد توجه هستند [۶۰، ۶۲، ۱۰۲ و ۱۵۰].

- اصلاح مسیر رودخانه به‌منظور کنترل سیلاب و یا کاهش خطر پیشروی رودخانه به اراضی ساحلی و فرسایش و تخریب دیواره‌ها و تاسیسات جانبی از طریق کاهش و یا تنظیم عرض رودخانه و تثبیت و حفاظت دیواره‌ها در راستای جدید
- حفاظت دیواره‌های خارجی پیچ از طریق تعدیل انحنای نسبی پیچ، بهبود راستای دیواره و انحراف جریان از دیوار خارجی به میانه رودخانه
- حفاظت موضعی بازه رودخانه در برابر تخریب سازه‌های آبی، تخریب پل‌ها و دیگر خطوط حیاتی تقاطعی (آب، برق، نفت و گاز) از طریق بهسازی راستای بازه و انحراف جریان از نواحی بحرانی
- تثبیت دیواره رودخانه در بالادست آبگیرها و یا انحراف جریان به‌سمت دهانه آبگیر در مسیر مستقیم و یا در قوس خارجی رودخانه (از طریق تشدید جریان ثانویه و افزایش میزان آبگیری)
- تامین قابلیت کشتیرانی رودخانه از طریق تنظیم و تثبیت عرض و عمق کافی، تغییر تراز بستر برای توسعه عمق مناسب و شعاع انحنای لازم
- احیای محیط زیستابی رودخانه از طریق کاهش احتمال خطر یخزدگی سطح آب رودخانه، توسعه حوضچه‌های گردابی در گستره دماغه آبشکن‌ها و پالایش طبیعی جریان و هندسه هیدرولیکی مناسب برای حیات آبزیان

جداول (۲-۴)، (۲-۷) و (۲-۸) در فصل دوم، برخی شرایط مناسب کاربری آبشکن‌ها را توصیه می‌نماید. آبشکن‌ها مانند دیگر گزینه‌های ساماندهی رودخانه، از مزایا و معایب و محدودیت‌های کاربردی برخوردار هستند که در بخش پایانی این فصل به اختصار به آنها اشاره می‌گردد.

۳-۳- انواع آبشکن‌ها

آبشکن‌ها از نظر مصالح و روش ساخت، شکل ظاهری و تاثیر آن‌ها بر روی جریان رودخانه‌ای به انواع مختلف تقسیم می‌گردند [۵۳، ۱۰۴، ۱۰۷ و ۱۵۰]:

۳-۳-۱- مصالح و روش ساخت آبشکن

۳-۳-۱-۱- نفوذپذیری آبشکن

آبشکن‌ها ممکن است که به دو نوع «نفوذناپذیر» (بسته یا آب‌نگذر) یا «نفوذپذیر» (باز یا آبگذر) تقسیم گردند، ولی ساختار و کارکرد هیدرولیکی این دو کاملا متفاوت است. در منابع موجود و از دیدگاه فنی نیز عموما واژه آبشکن به نوع «نفوذناپذیر» و به‌عنوان سازه انحراف دهنده اطلاق می‌گردد [۵۳، ۶۲ و ۱۵۰].

الف- آبشکن‌های نفوذناپذیر

آبشکن نفوذناپذیر از نظر نوع مصالح و ساختار، قابلیت آبگذری جریان اصلی رودخانه را نداشته و با انحراف مسیر آب از دیواره‌ها به میانه رودخانه باعث توسعه جریان گردابی در کناره‌ها می‌گردد. از این‌رو آبشکن‌های نفوذناپذیر (هرچند که از نظر نوع مصالح و ساخت قابلیت تراوش داشته باشند) در گروه سازه‌های انحراف دهنده به‌شمار می‌آیند. با توسعه جریان چرخشی در محدوده تاثیر یک آبشکن و یا در حد فاصل بین آبشکن‌های متوالی، کناره رودخانه (در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود با خط جدایی جریان یا مرز راستای اصلاح شده) با ته نشست بار رسوبی کف و معلق به‌سرعت توسعه یافته و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در دراز مدت تثبیت می‌یابد [۵۳ و ۱۵۰].

این نوع آبشکن از مصالح متنوع سازه‌ای و طبیعی ساخته می‌شود. براساس مصالح و ساختار آبشکن، انواع آن عبارتند از سنگ‌ریزه‌ای، تورسنگی از نوع جعبه‌ای، کیسه‌ای با محتوی ماسه و یا مخلوط ماسه- سیمان، واحدهای بتنی سه پایه[1]، مخلوط درشت‌دانه رودخانه‌ای (با روکش سنگ‌ریزه‌ای یا تورسنگی یا کیسه‌ای)، دیواره سپری همراه با شمع‌کوبی از جنس صفحات و پایه‌های فلزی، چوبی، بتنی، و یا ترکیبی، شمع‌های بتنی یا چوبی دو ردیفه همراه با استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو ردیف، دیواره سپری یا دیواره چوب بست دو ردیفه با یا بدون استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو صفحه، الوار چوبی به‌هم بافته، تنه درختان و شاخ و برگ‌های به‌هم بافته و یا ترکیبی از مصالح و روش‌های فوق [۱۰۲، ۱۰۴، ۱۲۸ و ۱۳۵]. نمونه‌هایی از انواع مختلف آبشکن‌های نفوذناپذیر در شکل‌های (۳-۴) تا (۳-۶) نمایش داده شده است.

ب- آبشکن‌های نفوذپذیر

آبشکن نفوذپذیر از نظر سازه‌ای، مجموعه‌ای از عناصر مقاومت جریان است که در امتداد عرضی رودخانه همانند شکل‌های (۳-۷) و (۳-۸) آرایش می‌یابد. این نوع آبشکن، عموما از تیرک یا شمع‌های بتنی، چوبی، یا ساقه‌های بامبو (در یک، دو و یا سه ردیف) ساخته می‌شود [۵۴ و ۱۰۴]. گاهی از مصالح سنگ‌ریزه‌ای برای حفاظت پایه‌ها از خطر آبشستگی موضعی استفاده می‌گردد. آرایش ردیف پایه‌ها سبب افزایش مقاومت بستر همراه با توسعه جریان‌های چرخشی موضعی پیرامون پایه‌های منفرد گردیده و سبب کاهش سرعت جریان، کاهش انتقال رسوبات کف، ته نشست مواد رسوبی معلق درشت‌دانه، و جذب مواد شناور می‌گردد. با گذشت زمان، به‌تدریج میدان رسوب‌گذاری در حد فاصل بین ردیف‌های آبشکن توسعه یافته و قابلیت تثبیت زیستی نیز فراهم می‌گردد [۱۰۲ و ۱۲۸].

این نوع سازه در رودخانه‌های عریض و کم عمق با راستای نسبتا مستقیم، با بستر ماسه‌ای یا شن ریز و با بار رسوبی معلق زیاد همراه با مواد جامد شناور موثرتر بوده، ولی در رودخانه‌های بزرگ با عمق بیش از ۳ متر، با بار رسوبی کم، با مواد بستری شنی و درشت‌تر (به‌دلیل مشکل شمع‌کوبی) و نیز در محدوده دیواره خارجی پیچ‌ها (به‌دلیل قدرت جریان ثانویه) مناسب نخواهد بود. آبشکن‌های نفوذپذیر را باید در گروه سازه‌های آرام کننده به‌شمار آورد. در بیش‌تر منابع موجود نیز عموما برای رفع ابهام به‌جای واژه Open/ Permeable Groynes از واژه خاص Pile Dikes (دیواره‌های شمع‌کوب یا اسکله‌ای) استفاده می‌گردد [۵۴، ۵۶، ۱۰۲ و ۱۰۷]. ازآن‌جاکه نوع مصالح، ساختار هندسی، کارکرد هیدرولیکی، روش طراحی پایدار، و روش مدیریت و نگهداری این نوع سازه با آبشکن‌های نفوذناپذیر متفاوت است، ادامه این گزارش به نوع آبشکن‌های نفوذناپذیر اختصاص دارد. از این رو در بخش‌های بعدی، واژه «آبشکن» به‌عنوان یک سازه «انحراف دهنده» از نوع «نفوذناپذیر» به‌کار برده خواهد شد.

1- Concrete Tripods -

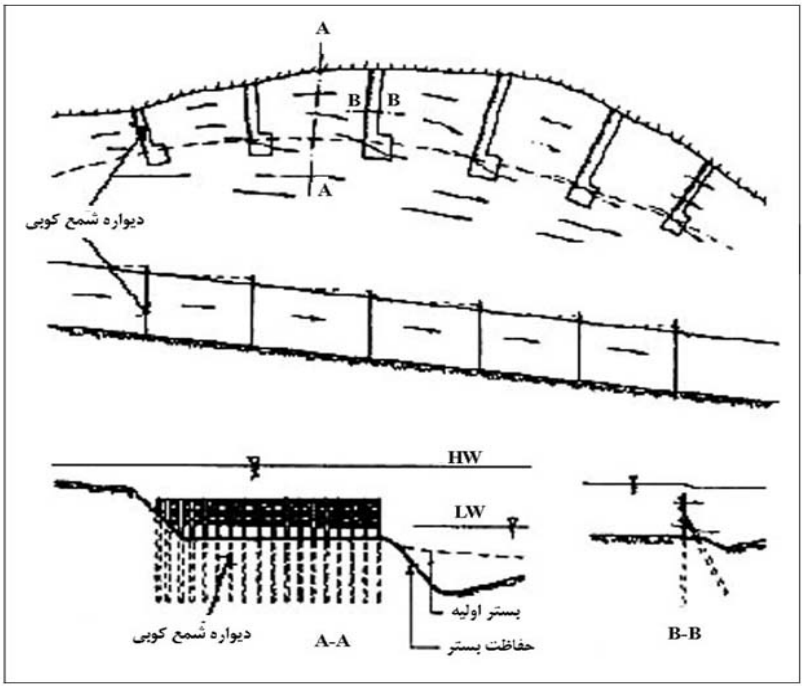
۳-۳-۱-۲- انعطاف‌پذیری آبشکن

آبشکن‌ها بر حسب نوع مصالح و ساختار آن‌ها و از نظر قابلیت تحکیم طبیعی، به دو نوع «صلب» یا «انعطاف‌پذیر» تقسیم می‌گردند. به‌طور کلی، آبشکن‌های انعطاف‌پذیر بهتر از انواع صلب هستند. به‌طور طبیعی بدنه آبشکن بر اثر نیروی «تراوش» و پدیده «زیرشویی» نشست‌های ناهمگون کرده و یا بستر رودخانه در موقعیت پنجه آبشکن در معرض آبشستگی قرار می‌گیرد. در این‌صورت، یک آبشکن صلب به‌سهولت و با سرعت دچار ترک خوردگی شده و بخش‌هایی از آن تخریب و سرانجام منجر به گسیختگی کل سازه و تشدید روند تخریبی دیواره رودخانه خواهد شد. درحالی‌که آبشکن‌های انعطاف‌پذیر نسبت به تغییرات قابلیت تنظیم و جابجایی و تحکیم داشته و امکان مرمت و بازسازی مجدد دارند [۳۷ و ۱۲۸]. آبشکن‌های نوع سنگ‌ریزه‌ای، تورسنگی و یا متشکل از واحدهای بتنی سه پایه از مثال‌های بارز سازه‌های انعطاف‌پذیر به‌شمار می‌آیند.

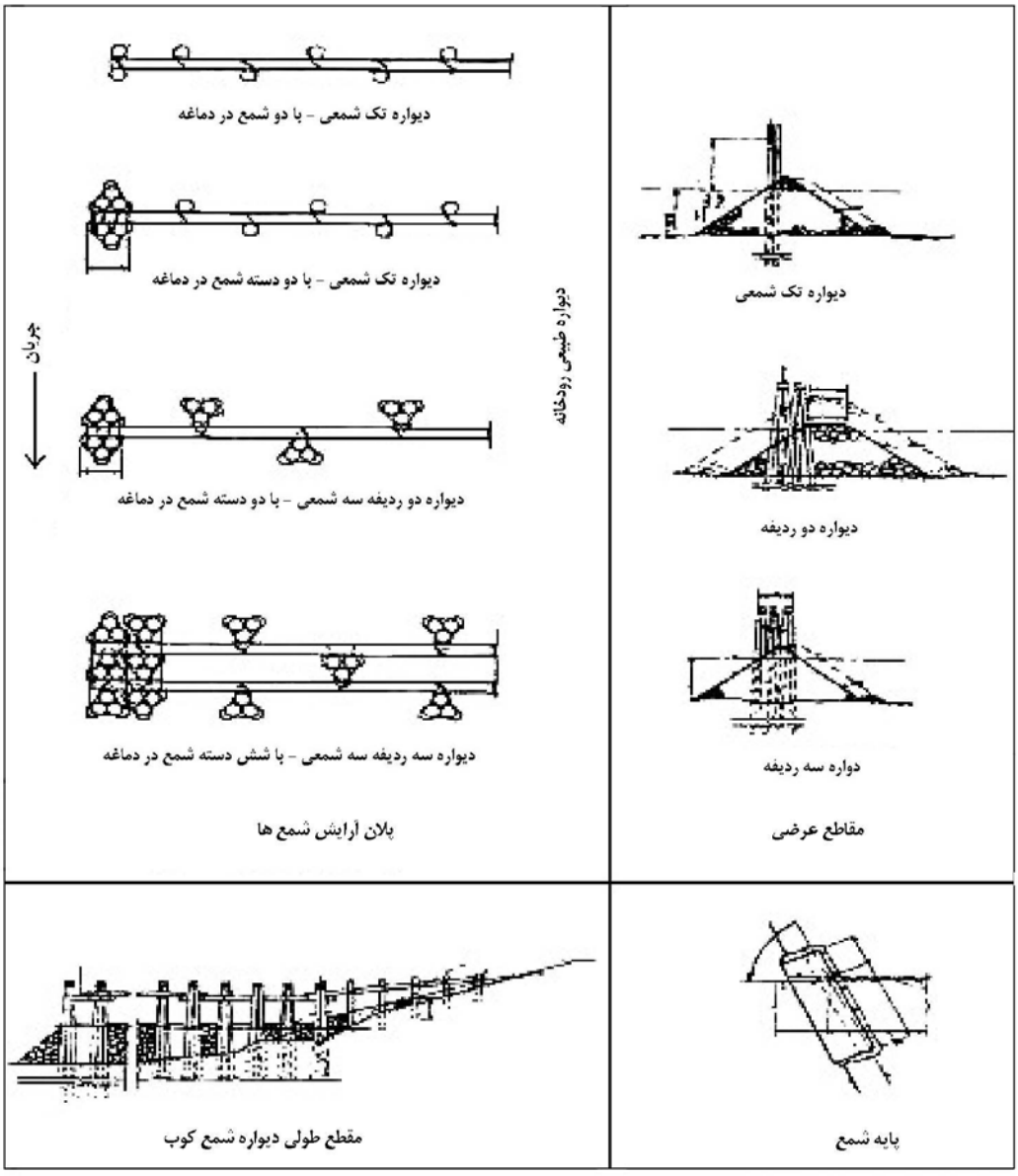
۳-۳-۱-۳- آبگذری آبشکن

آبشکن‌ها بر حسب نوع مصالح و ساختار آن‌ها و از نظر قابلیت تراوش جریان از بدنه، به دو نوع «آبگذر» یا «آب‌نگذر» تقسیم می‌گردند. آبشکن‌های آبگذر از نظر هیدرولیکی برترند زیرا به‌سهولت و به‌طور یکنواخت قابلیت زهکشی بدنه و آزادسازی نیروی تراوش و زیر فشار آب را دارند. از سوی دیگر، جذب رسوبات معلق و ریزدانه در محیط متخلخل سطح پوششی، قابلیت تثبیت زیستی و بهسازی شرایط زیست محیطی را در پیرامون آبشکن فراهم می‌سازد [۳۷، ۷۰، ۱۰۲ و ۱۲۸].

به‌طورکلی آبشکن‌های انعطاف‌پذیر، آبگذر نیز هستند. از این رو از امتیازات پایداری و دوام طبیعی برخوردار بوده و در طرح‌های رودخانه‌ای مورد توجه می‌باشند. آبشکن‌های نوع سنگ‌ریزه‌ای، تورسنگی و یا متشکل از واحدهای بتنی سه پایه از مثال‌های بارز سازه‌های انعطاف‌پذیر و آبگذر به شمار می‌آیند.



شکل ۳-۷- آبشکن‌های نفوذ پذیر- سازه آرام کننده جریان [۱۰۴]



شکل ۳-۸- ساختار عمومی دیواره‌های شمع کوب [۱۰۴]

۳-۳-۲- استغراق آبشکن

آبشکن‌ها بستگی به اهداف و شرایط رودخانه، ممکن است مستغرق یا غیرمستغرق باشند. عموما آبشکن‌های نفوذناپذیر را به‌صورت غیرمستغرق طراحی می‌کنند زیرا جریان عبوری از روی این نوع سازه منجر به فرسایش شدید تاج و تخریب احتمالی بدنه آبشکن گردیده و یا ممکن است که ناحیه رسوب‌گذاری شده در محدوده حفاظتی آبشکن را در معرض فرسایش قرار دهد. در مقایسه، آبشکن‌های نفوذپذیر چون تاثیر کم‌تری بر جریان عمومی رودخانه دارند، ممکن است که به‌صورت مستغرق طراحی گردند [۱۵۰].

در رودخانه‌های بستر ماسه‌ای و مارپیچی، برای حفاظت دیواره‌ها در مجرای اصلی معمولا از آبشکن‌های نفوذناپذیر با ارتفاع تاج در حد تراز دیواره بالای رودخانه اصلی (برای ظرفیت جریان مقطع پر در حدود سیل متناوب سالانه) استفاده می‌گردد. این آبشکن‌ها

در مواقع سیلاب‌های بزرگ‌تر و با گسترش جریان در دشت سیلابی رودخانه، لزوما مستغرق خواهند شد. در رودخانه‌های شریانی و یا با مواد بستری درشت‌دانه، به‌دلیل توان زیاد جریان و ناپایداری رودخانه، آبشکن‌های نفوذناپذیر به‌کار می‌روند. در این شرایط ارتفاع تاج آبشکن‌ها معادل تراز متوسط دیواره بالای مقطع ساده رودخانه (با ظرفیت جریان سیلابی بزرگ و غیرمتناوب) در نظر گرفته می‌شود، از این رو اغلب به‌صورت غیرمستغرق عمل می‌نمایند [۵۶، ۱۰۲ و ۱۰۷].

در ساماندهی رودخانه برای تامین قابلیت کشتیرانی، شدت جریان متوسط سالانه مورد نظر قرار می‌گیرد. ازاین‌رو در مواقع پرآبی و سیلابی، آبشکن‌ها لزوما مستغرق بوده که متعاقب آن نیز مشکلاتی برای کشتیرانی پدید می‌آید [۱۰۲].

۳-۳-۳- تاثیر آبشکن بر جریان رودخانه

آبشکن‌ها از نظر آرایش و امتداد قرارگیری در رودخانه و تاثیر آنها بر روی جریان رودخانه‌ای، به سه نوع «جاذب[1]»، «عمودی[2]»و یا «دافع[3]»، تقسیم می‌گردند [۵۳، ۶۲ و ۱۵۰]. شکل (۳-۹) انواع آرایش آبشکن‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۳-۳-۱- آبشکن‌های جاذب

آبشکن‌های جاذب از نظر سازه‌ای، به‌سمت پایین‌دست جریان رودخانه متمایل بوده و از نظر هیدرولیکی، جریان را به‌سمت خود جذب نموده و مانع از انحراف جریان به‌سمت دیواره مقابل می‌گردند. زاویه تمایل آبشکن به‌سمت پایین‌دست در حدود ۱۰ درجه پیشنهاد شده است [۵۴، ۱۰۳ و ۱۰۷]، ولی ممکن است تا ۳۰ درجه نیز باشد [۶۲]. با این آرایش، اگر زاویه تمایل بیش از ۴۵ درجه باشد، آبشکن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر انحراف جریان نداشته و در شرایط سیلابی نیز ممکن است باعث تخریب دیواره‌ها گردد [۶۲].

۳-۳-۳-۲- آبشکن‌های عمودی

آبشکن‌های عمودی از نظر سازه‌ای، عمود بر راستای عمومی جریان رودخانه یا دیواره‌ها احداث شده و از نظر هیدرولیکی، سبب تغییر جهت جریان از سمت کناره رودخانه گردیده و در عین حال مانع از انحراف شدید جریان به‌سمت دیواره مقابل می‌گردند. آبشکن‌های عمودی معمولا کوتاه‌تر از انواع دیگر بوده و در بازه‌های مستقیم و نیز برای حفاظت موضعی در برابر فرسایش به‌کار می‌روند.

۳-۳-۳-۳- آبشکن‌های دافع

آبشکن‌های دافع از نظر سازه‌ای، به سمت بالادست جریان رودخانه متمایل بوده و از نظر هیدرولیکی، جریان را با قدرت از کناره رودخانه و آبشکن دور نموده و سبب انحراف شدید جریان به‌سمت دیواره مقابل می‌گردند. با این آرایش، جریان حتی در شرایط سیلاب به میانه رودخانه منحرف می‌گردد. زاویه تمایل آبشکن به‌سمت بالا دست بین ۱۰ تا ۲۰ درجه پیشنهاد شده است [۵۴، ۱۰۳ و ۱۰۷]، ولی ممکن است بین ۵ تا ۳۰ درجه نیز باشد [۶۲].

1- Attracting/ Declined
2- Normal/ Deflecting
3- Inclined/ Repelling

به‌طور کلی، از نظر قدرت انحراف جریان و شدت رسوب‌گذاری در پایین‌دست، آبشکن‌های دافع بهتر عمل می‌کنند. از سوی دیگر، میزان آبشستگی پیرامون آبشکن‌های جاذب (که تمایل به پایین‌دست جریان دارند) کم‌تر بوده و سازه از پایداری طبیعی بیش‌تری برخوردار خواهد بود.

۳-۳-۴- شکل ظاهری آبشکن

آبشکن‌ها براساس نمای ظاهری در سطح افق و در مقاطع طولی و عرضی به انواع گوناگون تقسیم می‌گردند:

۳-۳-۴-۱- آبشکن‌ها در سطح افق

آبشکن‌ها با شکل و نماهای مختلف در سطح افق ساخته می‌شوند [۵۳ و ۱۵۰]. انواع شکل ظاهری آبشکن‌ها در پلان رودخانه مطابق شکل (۳-۱۰) عبارتند از مستقیم، مستقیم با دماغه گرد، تی شکل (T)، ال شکل (L)، چوگانی[1] یا قلاب شکل یا چنگکی[2]، چوگانی معکوس و باله‌ای[3]. شکل خاص آبشکن مستقیم با دماغه فارسی بر در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است.

آبشکن مستقیم با راستایی مستقیم و زاویه مناسب نسبت به دیواره یا جریان رودخانه قرار گرفته و عموما دماغه آن برای حفاظت در برابر آبشستگی موضعی به‌صورت دایره‌ای و گسترده‌تر می‌باشد. آبشکن L شکل یا سرکج نقش موثرتری داشته و میزان آبشستگی موضعی در دماغه آن کم‌تر بوده و همچنین قابلیت ته نشست رسوبات در حد فاصل آبشکن‌های متوالی بیش‌تر می‌باشد. زاویه سر کج آبشکن در دماغه آن کم‌تر از ۱۰ درجه توصیه شده است [۱۰۷]. انتخاب گزینه‌های دیگر شکل آبشکن نظیر T شکل یا چوگانی، بستگی به شرایط رودخانه و قضاوت مهندسی دارد.

۳-۳-۴-۲- آبشکن‌ها در مقطع طولی

در مقطع طولی، تاج آبشکن ممکن است مطابق شکل (۳-۱۲)، از دیواره به سمت محور رودخانه به‌صورت افقی و یا شیب‌دار (به‌سمت رودخانه) و یا مطابق شکل (۳-۱۳) به‌صورت پلکانی باشد. در حالت شیب‌دار و یا پلکانی، سطح موثر جریان در بده‌های زیادتر بیش‌تر بوده و سرعت متوسط و توان جریان کم‌تر می‌شود [۱۰۷]. در رودخانه‌هایی که تغییرات بده و سطح آب کم است، آبشکن‌های با تاج افقی مناسب هستند. وقتی تغییرات جریان خیلی زیاد باشد تاج شیب‌دار از نظر ظرفیت انتقال جریان مناسب‌تر بوده اما تاثیر آن در حفاظت دیواره‌ها نیز کم‌تر می‌شود [۳۷]. شیب تاج آبشکن‌ها در محدوده (4H:1V تا 10H:1V) توصیه شده است [۹۲]، ولی ممکن است با شیب ملایم‌تر در محدوده (10H:1V تا 100H:1V) نیز باشد [۶۲].

۳-۳-۴-۳- آبشکن‌ها در مقطع عرضی

مقطع عرضی آبشکن ممکن است به یکی از سه شکل هندسی سپری (دیواره کم عرض و قائم)، جعبه‌ای- پلکانی و یا ذوزنقه‌ای باشد. شکل عرضی آبشکن تابعی از نوع مصالح و روش ساخت می‌باشد. آبشکن‌های سپری با مقطع مستطیلی کم عرض،

1- Hockey
2- Hooked
3- Wing / Tail

آبشکن‌های تورسنگی یا کیسه‌ای با مقطع پلکانی و آبشکن‌های سنگ‌ریزه‌ای با مقطع ذوزنقه‌ای ساخته می‌شوند. برخی از انواع مقطع عرضی آبشکن‌ها در شکل (۳-۱۳) و (۳-۱۴) نشان داده شده است.

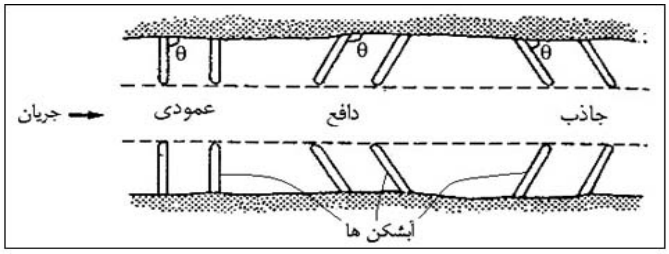
۳-۳-۵- طول آبشکن

آبشکن‌ها از نظر طول موثر و تاثیر آن بر کارکرد جریان چرخشی، عرض رودخانه و ظرفیت انتقال جریان معمولا به سه گروه آبشکن‌های کوتاه، متوسط و بلند تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی قراردادی بوده و از دیدگاه‌های مختلف کمیت‌های متفاوتی را در بر می‌گیرد.

از دیدگاه حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه، آبشکن‌های کوتاه با طول موثر کم‌تر از ۳۰ متر و آبشکن‌های بسیار بلند با طول موثر بیش‌تر از یک سوم عرض بالای رودخانه هستند [۱۰۲]. منظور از طول موثر، بخشی از طول آبشکن است که در کاهش عرض مجرای اصلی رودخانه تاثیر داشته و شامل طول اضافی برای جبران نامنظمی‌های موضعی دیواره‌ها نمی‌باشد. آبشکن‌های کوتاه‌تر نیاز به فاصله کم‌تر بین آبشکن‌ها دارند و نه تنها در پدیده رسوب‌گذاری در کناره‌های رودخانه موثر نبوده، بلکه در مقایسه با روش‌های حفاظت مستقیم دیواره‌های رودخانه نیز اقتصادی‌تر نمی‌باشند [۶۲]. همچنین آبشکن‌های بسیار بلند نیز ممکن است علاوه بر آبشستگی زیاد، حمله جریان را متوجه دیواره‌های ساحل مقابل نماید. آبشکن‌های بلندتر منجر به فاصله بیش‌تر بین آبشکن‌ها شده که ممکن است روند مارپیچی شدن را در رودخانه توسعه بخشد [۵۶ و ۱۰۲].

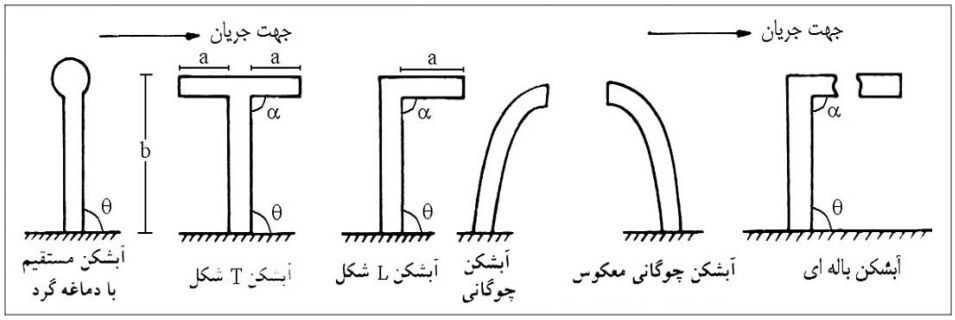
از آبشکن‌های کوتاه[1] برای استقرار مواضع تثبیت در کناره‌های رودخانه و اصلاح نامنظمی‌های جزیی در راستای دیواره استفاده می‌گردد (شکل ۳-۶). در این حالت کوتاهی آبشکن مانع از توسعه رسوب‌گذاری در کناره‌ها بوده ولی سبب بهبود راستای جریان در مجرای اصلی می‌گردد [۱۱۰]. آبشکن‌های کوتاه برای توسعه حوضچه گردابی جریان در پیرامون دماغه آن (ناحیه آبشستگی) برای احیای محیط زیست آبزیان از دیدگاه حفاظت از تنوع زیستی، مورد توجه است. در رودخانه‌های کوچک، حداقل عرض ۱۰ متر رودخانه باید تامین شده و یا عرض رودخانه نباید از دو سوم موجود آن کم‌تر گردد [۶۲].

از دیدگاه آبشستگی، شاخص بلندای آبشکن با نسبت طول موثر آبشکن به عمق متوسط جریان بالادست (b/h) بیان گردیده است. درصورتی‌که (b/h<1) باشد، آبشکن کوتاه است. اگر (b/h>25) باشد، آبشکن بلند تشخیص داده می‌شود. در حد فاصل این دو حد، آبشکن با طول متوسط ارزیابی می‌گردد [۹۳].

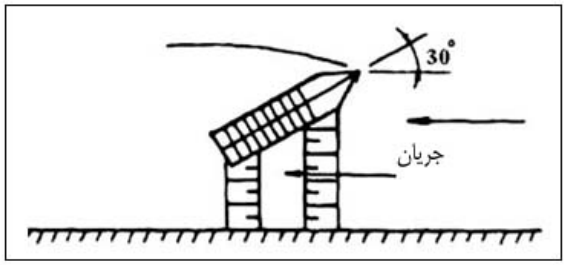


شکل ۳-۹- انواع آرایش آبشکن‌های جاذب، عمودی و دافع [۶۲]

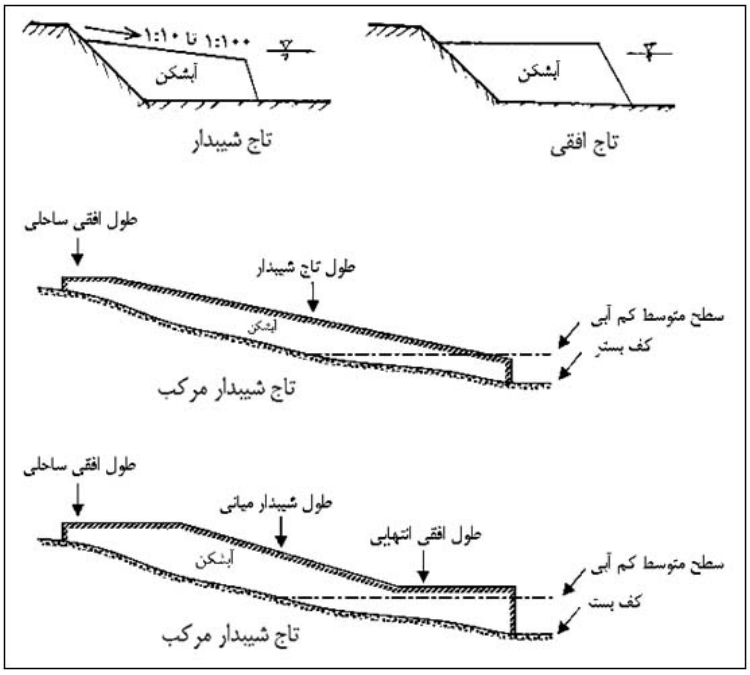
1- Mini Groynes/Hard Points



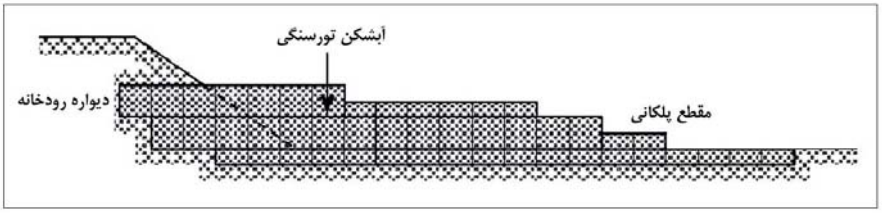
شکل ۳-۱۰- انواع شکل ظاهری آبشکن‌ها در پلان [۳۷ و ۱۵۰]



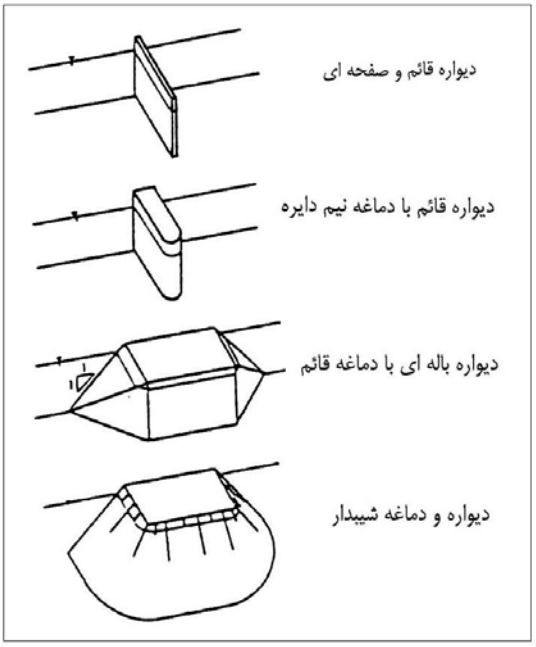
شکل ۳-۱۱- آبشکن‌های مستقیم با دماغه فارسی بر [۱۰۴]



شکل ۳-۱۲- انواع شکل مقطع طولی و تاج آبشکن- افقی و یا شیب‌دار [۳۷، ۶۲ و ۱۰۴]



شکل ۳-۱۳- شکل پلکانی مقطع طولی آبشکن- نوع تورسنگی [۸۹]



شکل ۳-۱۴- برخی از انواع شکل آبشکن‌ها در مقطع عرضی [۹۳]

۳-۴- مکانیزم کارکرد آبشکن‌ها

نقش اصلی آبشکن‌های نفوذناپذیر، انحراف جریان از کناره به‌سمت میانه رودخانه است. نتیجه انحراف جریان، توسعه یک ناحیه چرخشی با تلاطم شدید[1] پیرامون آبشکن است. این ناحیه از فاصله کم‌تری در بالادست تا فاصله بیش‌تری در پایین دست آبشکن ظاهر می‌گردد. در این ناحیه، مجموعه‌ای از گردابه‌های افقی و عمودی فعالیت داشته، که تلاطم شدیدی را در سطح آب پدید می‌آورد. فرآیند هیدرولیکی این جریان، توسعه ناحیه آبشستگی موضعی[2] در پیرامون آبشکن، ته نشست رسوبات به‌صورت یک بارررسوبی طویل[3] در پایین دست آبشکن و کناره رودخانه و تغییر فرم بستر در بازه پایین دست رودخانه می‌باشد. درحالی‌که آبشستگی یک خطر موضعی و جدی برای پایداری، دوام و کارکرد سازه آبشکن محسوب می‌شود، پدیده رسوب‌گذاری در کناره پایین دست رودخانه موجب توسعه و تثبیت طبیعی دیواره رودخانه در راستای مورد نظر خواهد بود [۲ و ۱۴۷].

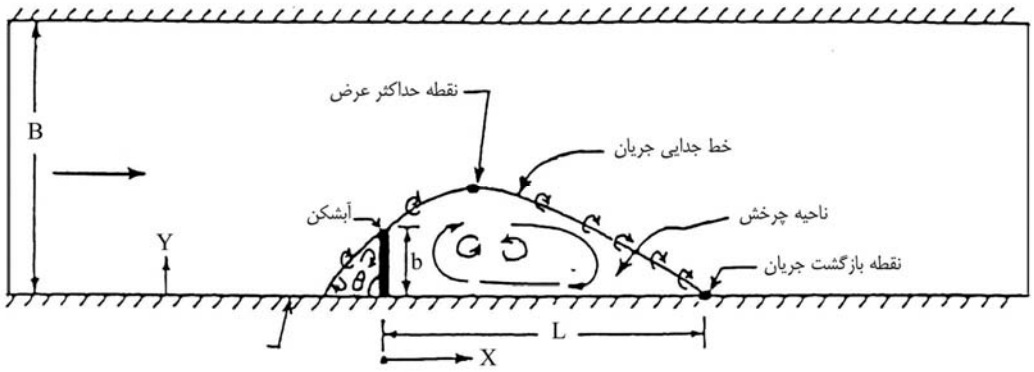
1- Recirculating Flow Area
2- Local Scour Hole
3- Deposition Bar

ساختار جریانات چرخشی پیرامون آبشکن‌ها، علاوه بر طول و فاصله آبشکن‌ها، به نوع آبشکن، شکل مقطع عرضی، شیب جانبی آبشکن در طول بدنه و دماغه آن، موقعیت قرارگیری آبشکن (در مسیر مستقیم، دیواره خارجی یا داخلی) و نیز آرایش زاویه‌ای آبشکن نسبت به دیواره‌ها و راستای جریان بستگی دارد [۸۲ و ۱۵۰]. توپوگرافی بستر پیرامون یک آبشکن منفرد، و نیز در میدان آبشکن‌های متوالی در یک سمت جریان به‌ترتیب در زیر خلاصه و ارائه می‌گردد.

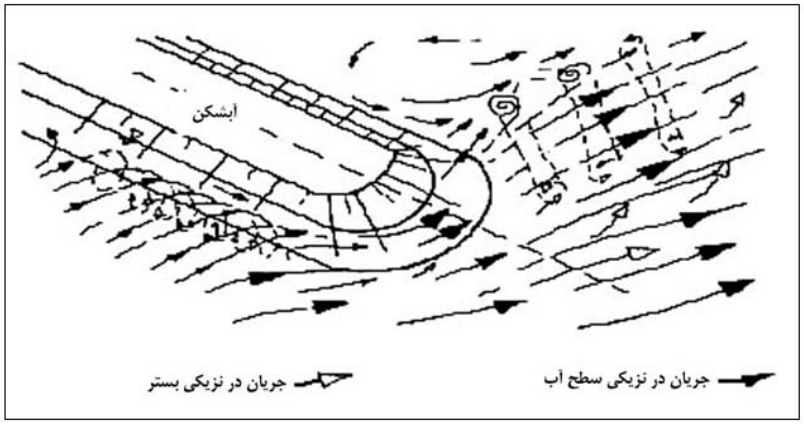
۳-۴-۱- ساختار جریان و توپوگرافی بستر پیرامون یک آبشکن منفرد

میدان جریان در پیرامون یک آبشکن منفرد با سری آبشکن‌ها متفاوت است. در شرایط کارکرد آبشکن غیرمستغرق، عرض رودخانه و سطح مقطع جریان محدود گردیده که سبب تغییر در ساختار جنبشی جریان در محدوده تاثیر آبشکن می‌گردد. با انحراف جریان بالادست به میانه رودخانه، سرعت متوسط و بده واحد عرض در مجرای اصلی افزایش می‌یابد. افزایش سرعت متوسط منجر به افزایش در گرادیان سرعت‌ها و توسعه گردابه‌ها و جریان تلاطمی شدید در اطراف آبشکن می‌گردد [۱۰۴].

شکل (۳-۱۵) نمایش ساده‌ای از استقرار فیزیکی یک آبشکن را در یک کانال مستطیلی با بستر صاف، تخت و ثابت نشان می‌دهد. میدان جریان چرخشی در محدوده تاثیر یک آبشکن با مقطع ذوزنقه‌ای در شکل (۳-۱۶) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۵- نمایش ساده جریان چرخشی پیرامون یک آبشکن- در بستر صاف، تخت [۱۰۵]



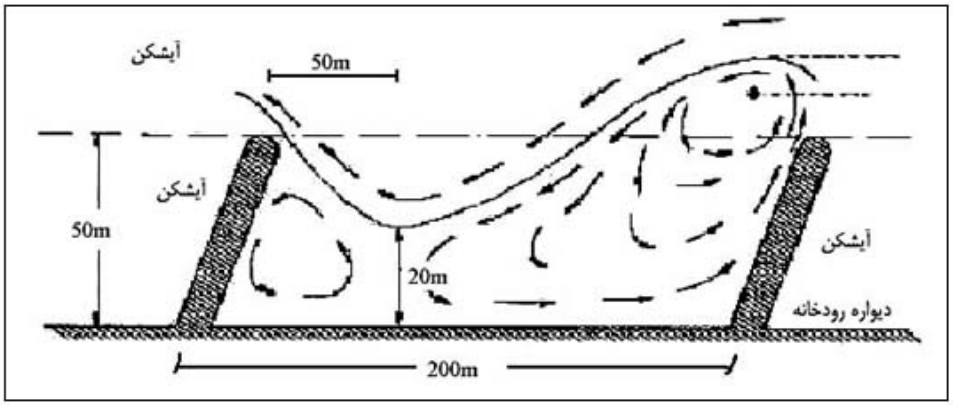
شکل ۳-۱۶- ساختار جریان چرخشی پیرامون یک آبشکن [۱۰۴]

۳-۴-۲- ساختار جریان و توپوگرافی بستر در محدوده تاثیر سری آبشکن‌ها

در شرایط کارکرد سری آبشکن‌های غیرمستغرق، میدان آبشکن به‌عنوان بخشی از سطح جریان اصلی رودخانه به حساب نمی‌آید. بنابراین الگوی جریان در میدان آبشکن به‌طور مستقیم وابسته به شدت جریان در مجرای اصلی رودخانه نمی‌باشد. از سوی دیگر، کاهش سرعت در میدان آبشکن نیز تاثیر خاصی روی الگوی جریان نداشته ولی کاهش تراز سطح آب در میدان آبشکن، تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی موقعیت و شدت توسعه جریان چرخشی دارد [۱۵۰].

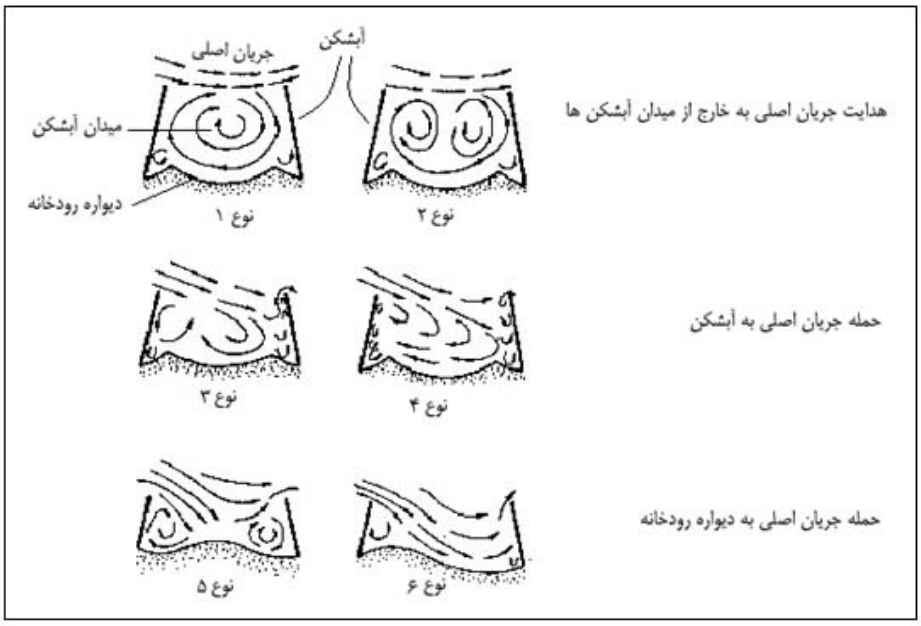
ساختار جریان چرخشی در میدان آبشکن، تابع هندسه میدان (طول و فاصله بین آبشکن‌ها)، نوع آبشکن و آرایش زاویه‌ای قرارگیری آبشکن (نوع جاذب یا عمودی یا دافع و شدت زاویه تمایل)، موقعیت استقرار آبشکن (در مسیر مستقیم یا پیچ، دیواره داخلی یا خارجی)، ارتفاع سطح آب، شرایط استغراق آبشکن، شکل مقطع عرضی، و شیب جانبی بدنه و دماغه آبشکن است. مطالعات تجربی در این خصوص بسیار محدود می‌باشد.

شکل (۳-۱۷) ساختار جریان چرخشی در حد فاصل دو آبشکن متوالی (با نسبت فاصله به طول موثر معادل ۴) را در مدل یک بازه مستقیم از رودخانه وال (در هلند) نشان می‌دهد [۱۵۰]. در این شکل، یک جریان گردابه‌ای بزرگ در محدوده سه چهارم پایین دست آبشکن اول مشاهده می‌شود. همچنین مرکز گردابه در وسط ناحیه چرخشی جریان نبوده، بلکه متمایل به پایین دست دماغه آبشکن اول و به‌سمت مجرای اصلی رودخانه می‌باشد. در ناحیه پایین دست میدان آبشکن، خطوط جریان اصلی وارد میدان آبشکن شده و سبب افزایش عرض جریان موثر می‌گردد. دومین جریان چرخشی با گستره کم‌تری، در سطح بالادست آبشکن دوم توسعه می‌یابد، جایی‌که جریان اصلی خروجی به‌وسیله این آبشکن محدوده شده است [۱۵۰]. شرایط جریان در شکل (۳-۱۷) نشانگر کارکرد مناسب آبشکن‌ها در انحراف جریان اصلی از دیواره‌ها می‌باشد.



شکل ۳-۱۷- ساختار جریان چرخشی در حد فاصل دو آبشکن متوالی در مدل یک بازه مستقیم از رودخانه وال در هلند [۱۵۰].

براساس مطالعات تجربی بر روی مدل فیزیکی استقرار سری آبشکن‌ها در یک پیچ رودخانه، شدت تاثیر فاصله بین آبشکن‌ها بر الگوی جریان چرخشی در میدان آبشکن‌ها، در شکل (۳-۱۸) نشان داده شده است. در این بررسی، متناسب با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها، شش نوع الگوی سامانه چرخشی در میدان آبشکن‌ها تشخیص داده شده است [۱۰۴ و ۱۵۰].



شکل ۳-۱۸- انواع الگوی جریان در پلان و روند توسعه جریان چرخشی متناسب با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها در مدل یک پیچ رودخانه [۱۰۴].

در سامانه چرخشی نوع (۱) جریان اصلی به خارج از محدوده تاثیر آبشکن منحرف گردیده و تنها یک واحد جریان چرخشی منفرد در بین آبشکن‌ها توسعه می‌یابد. این سامانه برای هدف کشتیرانی مناسب بوده، زیرا با تمرکز جریان اصلی در میانه رودخانه عمق لازم را به‌طور پیوسته تامین و کنترل می‌نماید.

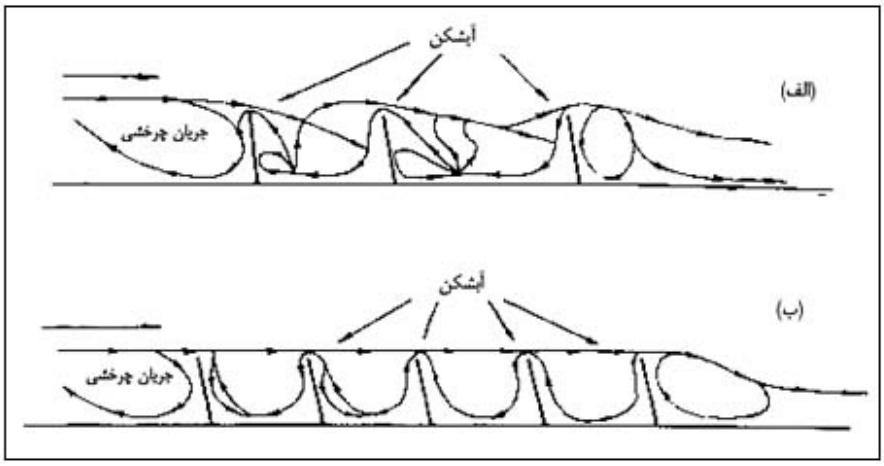
در الگوی چرخشی نوع (۲) با افزایش کمی در فاصله بین آبشکن‌ها، جریان اصلی همچنان به بیرون میدان آبشکن‌ها منحرف می‌گردد ولی گردابه دومی نیز در درون محدوده میدان آبشکن‌ها ظاهر می‌گردد.

با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها، الگوی جریان چرخشی نوع (۳) توسعه می‌یابد. به‌طوری‌که جریان اصلی به محدوده بین آبشکن‌ها وارد شده و گردابه قوی‌تری پیرامون آبشکن ایجاد گردیده و تلاطم شدیدی در طول سطح بالادست آبشکن دوم و پیرامون دماغه آن پدید می‌آورد.

در شرایط نوع (۴)، یک سامانه چرخشی معکوس توسعه می‌یابد. در الگوی نوع (۵)، جریان منحرف شده توسط آبشکن اول (در بالادست)، به‌سمت دیواره رودخانه در پایین دست هدایت می‌گردد. ولی در دو طرف خطوط حمله جریان، گردابه‌هایی تشکیل می‌شود که از توان حمله جریان اصلی کاسته و حفاظت‌های جزیی برای دیواره را تامین می‌کند.

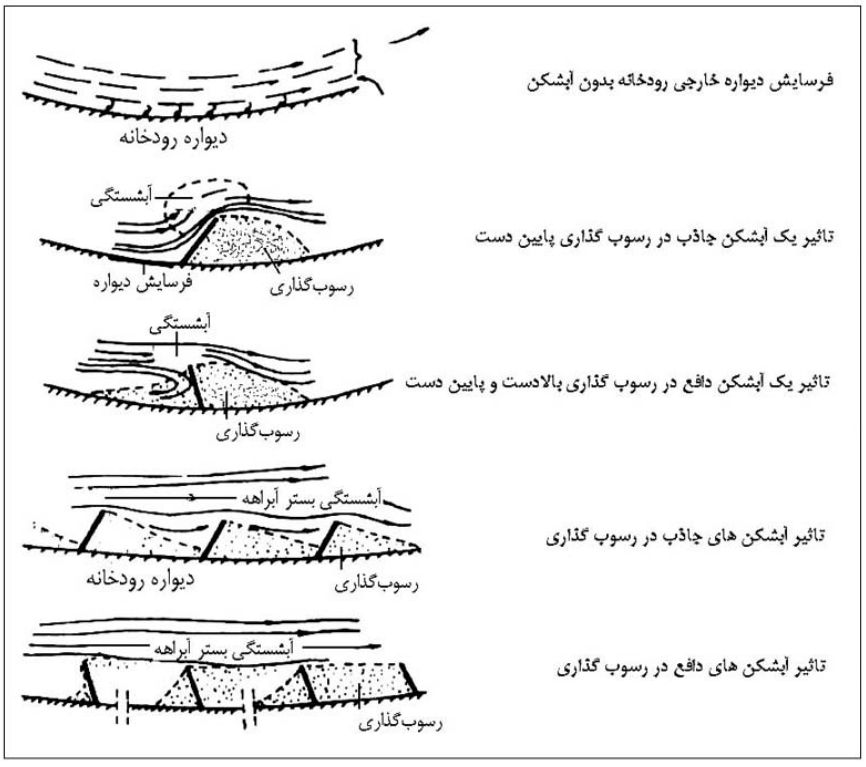
با افزایش زیادتر فاصله بین آبشکن‌ها، مطابق الگوی نوع (۶)، سامانه گردابه پایین دست نقش خود را در حفاظت دیواره از دست داده و خطوط جریان اصلی مستقیما به دیواره حمله می‌کنند. در این حالت، آبشکن کارایی مورد نظر را نخواهد داشت [۱۰۴ و ۱۵۰].

شکل (۳-۱۹) تفاوت جهت حمله جریان و سامانه چرخشی را برای دو شرایط فواصل غیریکنواخت و یکنواخت بین آبشکن‌ها مقایسه می‌نماید. همچنین، تاثیر آرایش آبشکن‌ها بر نحوه توزیع جریان و ته نشست رسوبات پیرامون یک آبشکن منفرد و در محدوده سری آبشکن‌ها در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است [۱۵۰].



الف- فواصل غیریکنواخت بین آبشکن‌ها، ب- فواصل یکنواخت بین آبشکن‌ها

شکل ۳-۱۹- مقایسه الگوی جریان در میدان آبشکن‌ها [۱۵۰].



شکل ۳-۲۰- تاثیر آرایش آبشکن‌ها بر نحوه توزیع جریان و رسوب‌گذاری پیرامون آبشکن‌ها [۱۵۰].

۳-۴-۳- ساختار جریان در محدوده تاثیر آبشکن‌های مستغرق

در شرایطی که آبشکن مستغرق شود، همانند جریان ریزشی از آبشارها، یک لایه جریان چرخشی با محور افقی در امتداد طولی بدنه آبشکن و در پایین دست آن ایجاد می‌گردد. ریزش جریان همراه با تلاطم چرخشی آن، باعث آبشستگی مواد ته نشست رسوبی در امتداد سطح پایین‌دست آبشکن می‌گردد که در این حالت ممکن است سازه آبشکن نیز ناپایدار گردد.

درصورتی‌که آبشکن از نوع جاذب باشد، لایه چرخشی جریان ریزشی به‌سمت دیواره رودخانه متمایل گشته و ممکن است باعث تخریب دیواره گردد. به‌همین دلیل، آبشکن نوع جاذب برای شرایط کارکرد مستغرق توصیه نمی‌گردد [۱۰۴].

۳-۵- ارزیابی کاربرد آبشکن‌ها

قابلیت و کاربرد آبشکن‌ها در شرایط مختلف رودخانه‌ها و با اهداف مختلف در بند (۳-۲) تشریح گردیده است. انتخاب آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه مانند دیگر گزینه‌ها، از مزایا و معایب و محدودیت‌های کاربردی برخوردار است که در زیر به اختصار ارائه می‌گردند [۵۰، ۶۲، ۱۰۲، ۱۲۱ و ۱۵۰].

۳-۵-۱- مزایای کاربرد آبشکن‌ها

- امکان استفاده از مصالح متنوع طبیعی (مصالح رودخانه‌ای، کوهی، زیستی و مصالح ساختمانی ساده و در دسترس)
- سادگی ساخت و عدم نیاز به تکنولوژی پیچیده و سنگین، سابقه قدیمی و تجربیات مختلف در ساخت و ارزیابی کارکرد
- امکان ساخت در شرایط مختلف بازه‌های رودخانه‌ای، کوهستانی تا سیلابدشتی، مستقیم تا مارپیچی، در کناره‌های با راستای مستقیم یا منحنی و در دیواره‌های خارجی یا داخلی پیچ‌ها
- قابلیت توانمندی انحراف جریان به میانه رودخانه، مقاومت در برابر توان جریان رودخانه و هدایت راستای جریان برای اهداف مختلف
- توسعه و یا تغییر ریخت‌شناسی بازه رودخانه (از شرایط ناپایدار مستقیم و یا شریانی به شرایط پایدار دینامیکی مارپیچی)
- قابلیت احیا و بازیابی دیواره‌های فرسایش یافته رودخانه و توسعه رسوب‌گذاری طبیعی در کناره‌ها با قابلیت تثبیت زیستی
- قابلیت کاربرد در مجرای اصلی رودخانه (برای کنترل فرسایش و بهسازی ریخت‌شناسی رودخانه در شرایط جریانات کم آبی تا سیلاب‌های متناوب) و کاربرد در سیلابدشت رودخانه (برای کنترل سیلاب‌های بزرگ، کاهش خطرات پیشروی سیلاب در دشت سیلابی رودخانه، و یا حفاظت غیرمستقیم گوره‌ها)
- قابلیت تنظیم و کنترل جریان‌های کم آبی و متوسط برای تامین شرایط مناسب کشتیرانی
- تاثیرات کم‌تر بر روی دیواره طبیعی رودخانه در مقایسه با روش‌های حفاظت مستقیم و پیوسته دیواره‌ها
- ناهنجاری و تغییرات ناچیز در دیواره‌ها، بستر و محیط زیست بوم رودخانه در مرحله ساخت
- قابلیت احیای تنوع زیستی (گیاهی و جانوری) در رودخانه از طریق تمرکز جریان، توسعه جریانات و حوضچه‌های چرخشی و افزایش ظرفیت خود پالایی رودخانه و ایجاد رویش گیاهی در کناره‌ها

- افزایش تنوع حیات آبزیان به‌ویژه تقویت ارزش حیاتی ماهیان از طریق قابلیت رشد گیاهان در کناره رودخانه و توسعه نواحی تخم‌گذاری و تشویق مهاجرت ماهیان
- بهبود سیمای طبیعی و منظرگاه رودخانه (در مرحله ساخت و بعد از ساخت)، برای اهداف زیبا شناختی و گردشگری
- محدودیت کم‌تر و قابلیت کاربرد بیش‌تر در شرایط مختلف جریان و رودخانه‌ها درمقایسه با گزینه‌های دیگر
- مشکلات اجتماعی و حقوقی کم‌تر در اجرای طرح به‌دلیل استقرار بخش اصلی کار در بستر رودخانه
- گزینه بسیار موثر با تاثیرات و کارکرد سریع بعد از احداث
- نیاز به نگهداری و مدیریت کم‌تر در دوره بهره‌برداری
- قابلیت انعطاف، بهسازی، بازسازی و تغییرات در آینده (کاهش یا افزایش ارتفاع، تغییر طول، حذف یا اضافه آبشکن‌ها، اقدامات تکمیلی زیستی در میدان آبشکن‌ها)
- مشکلات کم‌تر اجتماعی و حقوقی در نگهداری و یا ترمیم آبشکن‌ها به‌دلیل استقرار بدنه اصلی در بستر رودخانه
- گزینه اقتصادی‌تر در مقایسه با روش حفاظت مستقیم و پیوسته دیواره‌ها (مانند کاربرد انواع روکش‌ها) و به‌ویژه امتیاز اقتصادی و فنی ساخت آبشکن‌هایی با مصالح بدنه رودخانه‌ای و با روکش حفاظتی سنگ‌ریزه‌ای در شرایط مساوی با گزینه‌های دیگر
- امکان ترکیب ساخت آبشکن‌ها با گزینه‌های دیگر رودخانه‌ای (مانند روکش‌ها، سازه‌های آرام کننده و غیره) برای بهسازی موقعیت‌های مختلف بازه رودخانه و تطبیق با اهداف متفاوت

۳-۵-۲- معایب و محدودیت‌های کاربرد آبشکن‌ها

- تنها در دوره کم آبی رودخانه و فصل خشکی سال قابل احداث است. در شرایط دیگر به کارهای رودخانه‌ای سنگین و گسترده (انحراف جریان و...) نیاز دارد.
- دشواری ساخت آبشکن‌ها در شرایطی که دیواره‌های طبیعی رودخانه با شیب تند یا قائم باشند.
- عمق و گستره آبشستگی در پیرامون آبشکن‌ها در مقایسه با دیگر روش‌ها زیادتر بوده و بخش اعظم کار و هزینه‌ها به ایمنی و پایداری سازه در زیر سطح آب و عمق بستر معطوف است.
- از دیدگاه زیست محیطی و ظرفیت انتقال جریان، حداقل عرض ۱۰ متر رودخانه باید حفظ گردد. بنابراین در رودخانه کم عرض، تنها آبشکن‌های کوتاه برای اصلاح جزیی در راستای دیواره مجاز خواهد بود.
- برای رودخانه کوهستانی، گزینه‌های محدودی از آبشکن‌ها بر حسب مصالح و روش ساخت امکان‌پذیر است. استفاده از مصالح و روش‌های طبیعی امکان‌پذیر نمی‌باشد.
- تاثیر قابل ملاحظه کارکرد آبشکن‌ها بر روی ظرفیت انتقال رسوب بازه رودخانه، امکان رسوب‌گذاری در بازه بالادست و فرسایش در بازه پایین‌دست را فراهم می‌سازد. این شرایط، برای بقای سامانه حیاتی رودخانه و یا قابلیت کشتیرانی رودخانه خطرآفرین خواهد بود.
- استغراق آبشکن، باعث آبشستگی شدید در طول بدنه آبشکن، شستشوی رسوبات ته نشستی در میدان تاثیر آبشکن و در نهایت سبب آسیب رسیدن به آبشکن و تخریب دیواره‌های رودخانه می‌گردد.

- ارتفاع کم آبشکن‌ها ممکن است خطر اثر جریان‌های ثانویه بر کشتیرانی را پدید آورد.
- تغییر ساختار و سیمای طبیعی و موجود رودخانه، ممکن است از دیدگاه زیستی و حتی زیباشناسی مطلوب نبوده و یا ایجاد آسیب نماید. رعایت حداقل طول آبشکن برای حداقل تاثیرات در سامانه رودخانه به‌عنوان یک راهنما در کارهای رودخانه‌ای مورد نظر است.
- برای شرایطی که آبشکن‌ها در یک سمت رودخانه احداث شوند، انحراف جریان از یک سمت رودخانه ممکن است خطر حمله آب به سمت دیگر را در سیلاب‌های بزرگ‌تر از انتظار طراحی سبب گردد.
- برای شرایطی که آبشکن‌ها در یک سمت رودخانه احداث شوند به‌دلیل کارکرد سریع آبشکن، همواره مشکلات اجتماعی ناشی از ادعای ساکنین و بهره‌برداران ساحل مقابل رودخانه در خصوص خطر حمله جریان آب، جابجایی رودخانه و نقض مالکیت اراضی در ساحل روبرو وجود دارد.
- برای شرایطی که آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه احداث شده ولی امتداد عرضی دماغه آنها در برابر یکدیگر نباشند، جریان اصلی رودخانه در فضای بین آبشکن‌ها تاب خورده و کارکرد آبشکن‌ها در توسعه رسوب‌گذاری در کناره‌ها بی‌ثمر خواهد بود.

شبیه‌سازی خصوصیات جریان و تغییرات بستر پیرامون آبشکن‌های نیازمند جانمایی دقیق هندسه آبشکن‌های در شبکه محاسبات عددی و نیز توسعه معادلات حاکم بر شرایط جریان چرخشی است. مدل‌های ریاضی یک بعدی قابلیت شبیه‌سازی میدان جریان در حدفاصل آبشکن‌ها را نداشته و فضای سامانه آبشکن‌های را در محاسبات غیرموثر در نظر می‌گیرند. مدل‌های ریاضی دو و سه بعدی موجود نیز در تحلیل تنش برشی تلاطمی، انتقال رسوب و تغییرات فرم بستری در پیرامون آبشکن‌های با نامطمئنی‌های بسیاری مواجه هستند [۱۴۸]. ازاین‌رو درجه اعتماد مدل‌های ریاضی و ساخت مدل‌های فیزیکی در ارزیابی کارایی سامانه آبشکن‌های در شرایط نامطمئن باید مورد نظر قرار گیرد.

فصل ۴

اثرهای ریخت‌شناسی احداث آبشکن‌ها

۴-۱- کلیات

توان زیاد آبشکن‌ها در انحراف جریان و تثبیت مسیر رودخانه در مرزهای ساحلی، ظرفیت انتقال رسوب را تغییر داده و باعث فرسایش و یا رسوب‌گذاری در نواحی و بازه‌های رودخانه می‌گردد. در مرحله طراحی ساماندهی رودخانه، اغلب تاثیرات ریخت‌شناسی در نظر گرفته نمی‌شوند. بعد از اجرای طرح، مشکلات رودخانه‌ای ظاهر گردیده که به ناچار اقدامات گسترده و پرهزینه‌ای را می‌طلبد.

جهت بررسی پاسخ رودخانه به طرح ساماندهی، چهار سوال اساسی زیر باید مورد نظر قرار گیرد [۶۵].

- آیا ساماندهی رودخانه مشکل فرسایش یا رسوب‌گذاری و تغییرات رودخانه‌ای را ایجاد می‌کند؟
- با اجرای طرح چقدر این مشکلات جدی خواهد بود؟
- این مشکلات با چه سرعتی حادث می‌شوند و پاسخ طرح برای کاهش تاثیرات و یا خطرات ناخواسته چیست؟
- برای کنترل و تعدیل مشکلات فوق، آیا اصلاح طرح می‌تواند موثر باشد؟ آیا گزینه‌های دیگری وجود دارد؟

۴-۲- تاثیرات ریخت‌شناسی احداث آبشکن‌ها روی رودخانه

تاثیرات احداث آبشکن‌ها در سامانه رودخانه را می‌توان در مرحله طراحی ساماندهی رودخانه به‌ترتیب زیر انتظار داشت:

- تعدیل راستای جریان همراه با کاهش عرض بازه مورد نظر
- افزایش عمق آب، سرعت جریان، تنش برشی و توان جریان در بازه مورد نظر برای یک جریان معین
- افزایش بار رسوبی کف و معلق در بازه مورد نظر
- ته نشست رسوبات و توسعه کناره‌ها در محدوده تاثیر یک آبشکن یا در میدان حدفاصل سری آبشکن‌ها
- آبشستگی عمومی کف بستر و افزایش عمق بازه مورد نظر
- جابجایی و حذف لایه سطحی درشت‌دانه‌تر بستر و تشدید آبشستگی در اثر ظهور مواد ریزتر لایه زیرسطحی بستر در رودخانه‌های با مواد بستری شنی و درشت‌تر
- تغییر اندازه و خصوصیات مواد بستری در اثر آبشستگی در بازه مورد نظر و یا بهسازی بستر
- آبشستگی موضعی پیرامون آبشکن‌ها و امکان تخریب سازه و درنتیجه بروز خطرات رودخانه‌ای
- احتمال برگشت آب در بازه بالادست (در اثر کاهش عرض جریان در بازه مورد نظر) و فرسایش بستر و دیواره در بازه بالادست در جریان‌های سیلابی بزرگ (در اثر افزایش توان جریان در بازه مورد نظر) در نتیجه افزایش بار رسوبی ورودی به بازه مورد نظر
- رسوب‌گذاری در بازه پایین‌دست در اثر عدم تعادل بین ظرفیت انتقال رسوب بازه بالادست، در نتیجه احتمال برگشت آب و رسوب‌گذاری در بستر بازه مورد نظر در جریان‌های سیلابی بزرگ
- احتمال تغییر فرم رودخانه و توسعه شرایط شریانی شدن در بازه پایین‌دست

تاثیرات فوق ممکن است با اثرهای ناشی از افزایش یا کاهش شدت جریان آب در بازه (در اثر احداث سد مخزنی و یا انحراف بخشی از جریان رودخانه در بالادست) نیز همراه باشد. به‌طور مثال، مخازن سدها در بیش‌تر موارد از شدت جریان‌های سیلابی و بار رسوبی می‌کاهند، در نتیجه در بازه‌های پایین‌دست، شیب کم‌تر ولی عمق رودخانه و فرسایش کف بیش‌تر می‌گردد [۶۵].

۴-۲-۱- تاثیرات متقابل ریخت‌شناسی بین آبشکن‌های احداث شده و رودخانه

پس از ساخت آبشکن‌ها، مجرای اصلی رودخانه در مقیاس بزرگی عمیق می‌شود، درحالی‌که مواد بستری در فضای بین آبشکن‌ها ته نشست شده و باعث تثبیت دیواره‌ها می‌شود. در جریان‌های زیاد، رسوبات ورودی (از بازه بالادست) و نیز رسوبات حاصل از فرسایش بستر مجرای اصلی (در بازه اصلاح شده) در فضای بین آبشکن‌ها (و یا حتی بر روی سیلابدشت رودخانه در سیلاب‌های بزرگ) ته‌نشست می‌کند. تغییرات جریان و اثر موج باعث فرسایش مجدد فضای بین آبشکن‌ها و انتقال رسوب به مجرای اصلی می‌شود. در طی چند سال، وقتی فرسایش و رسوب‌گذاری در حد فاصل آبشکن‌ها به تعادل برسد، کناره‌های رودخانه به تعادل ریخت‌شناسی دست یافته و رودخانه تثبیت می‌گردد [۶۵]. در مرحله حضور و کارکرد آبشکن‌ها، این تعادل ممکن است در اثر عواملی دستخوش تغییر شده و منجر به تغییرات ثانویه ریخت‌شناسی در سامانه رودخانه گردد. برخی از این تاثیرات در زیر ارائه می‌گردد:

- تغییر اندازه و خصوصیات مواد بستری در اثر فرسایش یا رسوب‌گذاری در بازه و احتمال تغییر در عمق آبشستگی یا افزایش تراز بستر در اثر رسوب‌گذاری و کاهش قابلیت استفاده از رودخانه به‌منظور کشتیرانی یا زیست محیطی
- احتمال تخریب آبشکن‌ها (به‌ویژه اولین و آخرین آبشکن) در اثر حمله جریان اصلی و یا توسعه آبشستگی موضعی در جریان‌های بزرگ‌تر از سیلاب طرح و در نتیجه بروز خطرات رودخانه‌ای
- استغراق آبشکن‌های در جریان‌های بزرگ‌تر از سیلاب طرح و شستشوی رسوبات در حدفاصل آبشکن‌ها و یا تخریب ریشه آبشکن و دیواره‌های رودخانه درنتیجه احتمال بروز خطرات رودخانه‌ای
- احتمال فرسایش مواد رسوبی از میدان حد فاصل آبشکن‌ها در طی جریان‌های دایمی ناشی از حرکت کشتی‌ها، انتقال مجدد رسوبات به مجرای اصلی رودخانه و ایجاد مشکلات در قابلیت کشتیرانی رودخانه
- تاثیرات احتمالی تغییر هندسه آبشکن‌های ساخته شده در تغییر تعادل ریخت‌شناسی رودخانه

۴-۳- روش‌های ارزیابی تاثیرات ریخت‌شناسی

برای ارزیابی تاثیرات احتمالی ریخت‌شناسی احداث آبشکن‌های، به‌طورکلی چهار روش زیر در کارهای رودخانه‌ای متداول می‌باشد [۴۴ و ۵۷]:

- استفاده از دانش فنی و تجربیات مهندسی موجود
- ساخت و مطالعه بر روی مدل فیزیکی رودخانه و تعمیم نتایج بررسی به رودخانه اصلی
- کاربرد مدل‌های ریاضی در شبیه‌سازی جریان رودخانه
- کاربرد ترکیبی مدل‌های ریاضی و فیزیکی برای بهینه‌سازی مطالعات ساماندهی

در این فصل با استفاده از دانش فنی و تجربیات مهندسی موجود، روش‌های کیفی و کمی برای ارزیابی تاثیرات احتمالی ریخت‌شناسی ناشی از احداث آبشکن‌ها در مرحله طرح ساماندهی رودخانه ارائه می‌گردد. شناسایی و کاربرد روش‌های دوم تا چهارم به تفصیل، در فصل نهم ارائه شده است.

۴-۳-۱- روش‌های کیفی ارزیابی

۴-۳-۱-۱- ارزیابی تغییرات عمومی‌رودخانه

تشخیص عوامل موثر، درجه تاثیر هر یک و ارزیابی تاثیر متقابل متغیرها در سامانه رودخانه امر پیچیده‌ای می‌باشد. ولی به‌طورکلی، هندسه رودخانه تابعی از دستیابی رودخانه به تعادل دینامیکی میان ظرفیت انتقال جریان آب و رسوب است. بیش‌تر محققین بده جریان آب (Q_W) و بار رسوبی بستر (Q_S) را به‌عنوان متغیرهای مستقل و عواملی مانند عرض متوسط سطح آب (B)، عمق متوسط (D)، شیب متوسط کف (S)، نسبت فرم مقطع (F= B/D) و شاخص اندازه مواد بستری (عامل مقاومت جریان و یا زبری) (d_s)، همچنین ضریب مارپیچی (نسبت طول راستای رودخانه اصلی به طول دره رودخانه در حدفاصل دو نقطه) (P) و طول موج مارپیچی (λ: طول تناوب دو پیچ متوالی در شکل(۲-۲)) را به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد نظر قرار می‌دهند [۱۱۲].

شام (۱۹۸۴ و ۱۹۶۹) روابط بیان شده در صفحه بعد را برای ارزیابی کیفی از تغییرات احتمالی زمانی (t) و مکانی (x) متغیرهای رودخانه‌ای در نتیجه اجرای طرح ساماندهی رودخانه ارائه نمود [۶۵ و ۱۱۲].

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t},\frac{\partial Q_W}{\partial t}\Rightarrow\frac{-\partial S}{\partial t},\frac{\partial d_{50}}{\partial x},\frac{\partial D}{\partial x},\frac{\partial B}{\partial x},\frac{\pm\partial F}{\partial x},\frac{\partial\lambda}{\partial t},\frac{-\partial P}{\partial t} \qquad (۴-۱- \text{الف})$$

$$\frac{-\partial Q_s}{\partial t},\frac{\partial Q_W}{\partial t}\Rightarrow\frac{-\partial S}{\partial t},\frac{\partial d_{50}}{\partial x},\frac{\partial D}{\partial x},\frac{-\partial B}{\partial x},\frac{\partial F}{\partial x},\frac{\partial\lambda}{\partial t},\frac{-\partial P}{\partial t} \qquad (۴-۱- \text{ب})$$

$$\frac{-\partial Q_s}{\partial t},\frac{-\partial Q_W}{\partial t}\Rightarrow\frac{-\partial S}{\partial t},\frac{\partial d_{50}}{\partial x},\frac{\partial D}{\partial x},\frac{\pm\partial B}{\partial x},\frac{\pm\partial F}{\partial x},\frac{-\partial\lambda}{\partial t},\frac{\partial P}{\partial t} \qquad (۴-۱- \text{ج})$$

$$\frac{-\partial Q_W}{\partial t}\Rightarrow\frac{\partial S}{\partial t},\frac{-\partial d_{50}}{\partial x},\frac{-\partial D}{\partial x},\frac{-\partial B}{\partial x},\frac{\pm\partial F}{\partial x},\frac{-\partial\lambda}{\partial t},\frac{\partial P}{\partial t} \qquad (۴-۱- \text{د})$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t}\Rightarrow\frac{\partial S}{\partial t},\frac{\pm\partial d_{50}}{\partial x},\frac{-\partial D}{\partial x},\frac{\partial B}{\partial x},\frac{\partial F}{\partial x},\frac{\partial\lambda}{\partial t},\frac{-\partial P}{\partial t} \qquad (۴-۱- \text{ه})$$

در این روابط، علامت (+) یا بدون علامت به‌معنای افزایش، علامت (−) به‌معنای کاهش و علامت (±) به‌مفهوم تاثیر نامعین کمیت متغیر مورد نظر می‌باشد. به‌عنوان مثال مطابق رابطه (۴-۱- ه)، تاثیرات احتمالی افزایش بار رسوبی در بازه رودخانه به‌ترتیب سبب افزایش تدریجی شیب کف نسبت به زمان، تاثیر نامعین بر اندازه مواد بستری، کاهش عمق، افزایش عرض، افزایش طول موج و کاهش ضریب مارپیچی یا تمایل به مستقیم تر شدن راستای بازه نسبت به زمان خواهد گردید.

لی و سایمونز (۱۹۸۲) با تفکیک رودخانه‌های بستر ماسه‌ای از رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه (شن و قلوه‌سنگ)، تاثیرات احتمالی تغییر در متغیرهای رودخانه‌ای را به‌صورت جداول (۴-۱) و (۴-۲) ارائه نمودند [۸۸].

راس (۱۹۵۰) برای شرح کیفی اثر تغییر متغیرها در اصلاح مسیر رودخانه از معادله مانینگ برای جریان آب و از معادله دوبویز برای بار رسوبی بستر در رودخانه‌های عریض از روابط زیر استفاده نموده است [۳۷].

$$Q_W=\frac{1}{n}BD^{\frac{5}{3}}S^{\frac{1}{2}} \qquad (۴-۲)$$

$$Q_S=\frac{C}{d_S^{\frac{3}{4}}}BD^2S^2 \qquad (۴-۳)$$

که در این روابط:

C: ضریب ثابت تجربی و n ضریب زبری مانینگ بوده و عوامل دیگر قبلا تعریف شده‌اند. از روابط فوق، اثر متقابل تغییر متغیرها در نتیجه احداث آبشکن‌ها به‌صورت زیر قابل بررسی است [۳۷].

- تغییر درعرض (B): با احداث سری متوالی آبشکن‌ها عرض کاهش می‌یابد. در این‌صورت برای Q_w و S معین، عمق افزایش خواهد یافت در نتیجه بار بستر زیاد شده که بیانگر فرسایش کف خواهد بود.
- تغییر در شیب (S): برای یک جریان معین Q_w، اگر احداث آبشکن‌ها علاوه بر کاهش و تثبیت عرض B، با اصلاح راستا و کاهش ضریب مارپیچی یا با میانبری همراه باشد، در این‌صورت با افزایش شیب بازه S، کاهش عمق و در نتیجه بار بستر زیاد شده و آبشستگی کف توسعه می‌یابد.
- تغییر در مقاومت جریان (n): برای جریان معین Q_w، تغییردر ضریب مقاومت و زبری روی عمق D و شیب S اثر می‌گذارد. اصلاح راستا با آبشکن‌ها و بهسازی بستر (از طریق حذف گیاهان، بارها و جزایر رسوبی و یا لایروبی)، باعث کاهش مقاومت جریان n ، پایین انداختن نیمرخ سطح آب، افزایش سرعت و در نتیجه آبشستگی بستر خواهد شد.
- تغییر در عمق (D): اگر جریان آب و عرض ثابت باشد، افزایش عمق در اثر لایروبی باعث کاهش شیب و بار بستر و در نتیجه ته نشست رسوبات در بستر می‌گردد. ازاین‌رو، تعمیق رودخانه بدون کاهش عرض مقطع (با احداث آبشکن‌ها یا سازه‌های دیگر) موثر نخواهد بود.
- تغییر در اندازه مواد بستری (d_s): مطابق رابطه (۴-۳)، میزان بار بستر Q_S تابع معکوسی از اندازه مواد بستری است. با افزایش بده جریان Q_W و یا شیب S، توان جریان (γQS) افزایش می‌یابد. دراین‌صورت، قابلیت انتقال مواد ریزدانه افزایش یافته و بار بستر بیش‌تر می‌شود. از طرف دیگر با شستشوی مواد ریزتر به بازه پایین‌دست، دانه‌بندی مواد بستری در بازه مورد نظر درشت‌تر گردیده و بار رسوبی بستر کاهش خواهد یافت. در رودخانه‌های با بستر شنی و درشت‌تر، توسعه لایه سطحی درشت‌دانه با ساز و کار فوق قابل توجیه است. در این رودخانه‌ها با افزایش بده جریان سیلابی، اگر توان جریان بر لایه سطحی درشت‌دانه بستر غلبه یابد، لایه زیر سطحی با دانه‌بندی ریزتر در معرض جریان قرار گرفته و بار بستر افزایش ناگهانی می‌یابد [۱۴۴].

جدول ۴-۱- شرح کیفی عکس‌العمل رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای به تغییرات [۸۸]

متغیر	تغییر در متغیر	تغییر در فرم رودخانه	تغییر در مقاومت جریان	تغییر در سرعت	تغییر در تراز سطح آب	تغییر در سطح مقطع	تاثیر در پایداری
بده	+	مارپیچی به شریانی	±	+	+	+	−
	−	شریانی به مارپیچی	+	−	−	−	+
اندازه مواد بستری	+	مارپیچی به شریانی	+	−	+	+	±
	−	شریانی به مارپیچی	−	+	−	−	±
بار رسوبی کف	+	شریانی به مارپیچی	−	+	−	−	+
	−	مارپیچی به شریانی	+	−	+	+	−
بار رسوبی معلق	+	نامشخص	−	+	−	−	±
	−	نامشخص	+	−	+	+	+
پوشش گیاهی	+	شریانی به مارپیچی	+	−	+	+	+
	−	مارپیچی به شریانی	−	+	−	−	−

علامت (+) نشانگر افزایش، و علامت (−) نشانگر کاهش در متغیر است.

جدول ۴-۲- شرح کیفی عکس‌العمل رودخانه‌های با بستر شن و قلوه‌سنگ به تغییرات [۸۸]

متغیر	تغییر در متغیر	تغییر در فرم رودخانه	تغییر در مقاومت جریان	تغییر در سرعت	تغییر در تراز سطح آب	تغییر در سطح مقطع	تاثیر در پایداری
بده	+	شریانی	−	+	+	+	−
	−	مارپیچی	+	−	−	−	+
اندازه مواد بستری	+	مارپیچی	+	−	+	+	+
	−	شریانی	−	+	−	−	−
بار رسوبی کف	+	شریانی	−	+	±	−	−
	−	مارپیچی	+	−	+	+	+
بار رسوبی معلق	+	شریانی	−	+	−	−	+
	−	مارپیچی	+	−	+	+	−
پوشش گیاهی	+	مارپیچی	+	−	+	+	+
	−	شریانی	−	+	−	−	−

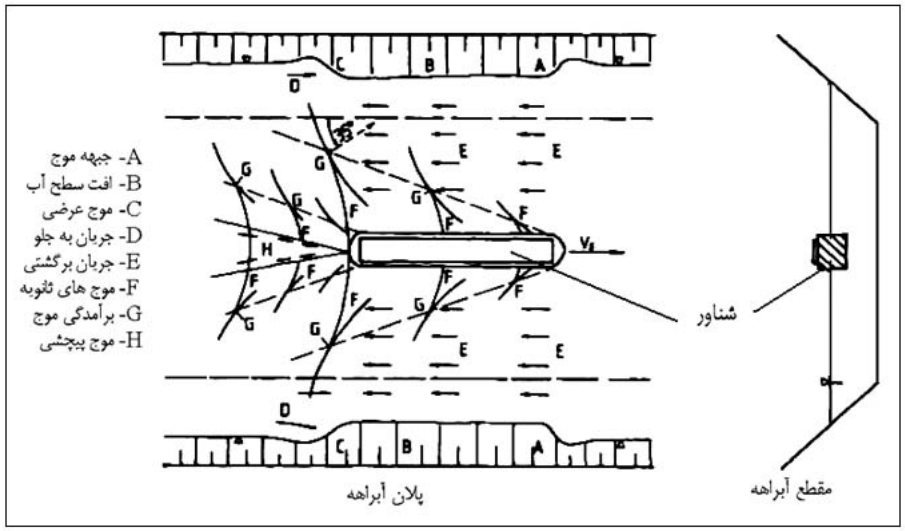
علامت (+) نشانگر افزایش، و علامت (−) نشانگر کاهش در متغیر است.

۴-۳-۱-۲- ارزیابی تاثیرات کشتیرانی

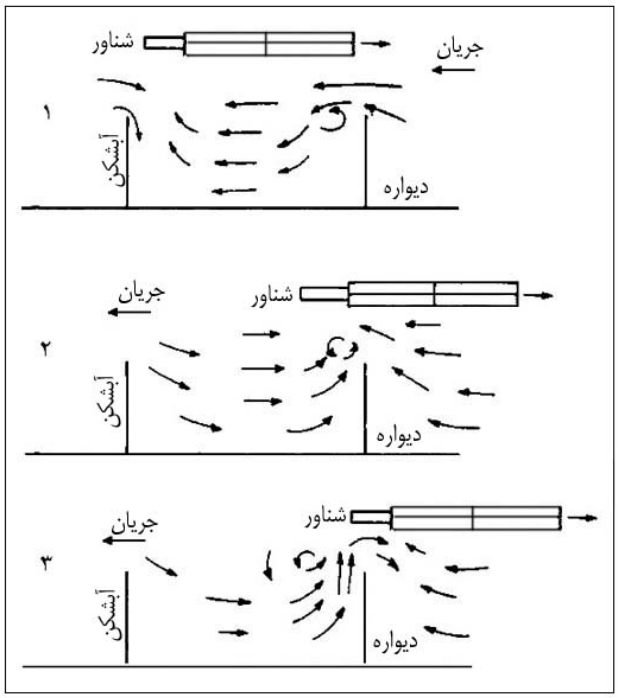
در رودخانه‌هایی با قابلیت کشتیرانی، گاهی طول کشتی‌ها از فاصله بین آبشکن‌ها بیش‌تر است و یا کشتی‌ها نزدیک به آبشکن‌ها حرکت می‌کنند. در این‌صورت، بخش قابل توجهی از رسوبات ته نشست شده بین آبشکن‌ها فرسایش یافته و به مجرای اصلی رودخانه انتقال می‌یابد که ممکن است مشکل رسوب‌گذاری و کاهش قابلیت کشتیرانی در مجرای اصلی به‌وجود آید. فرسایش میدان بین آبشکن‌ها در اثر جریان معکوس آب و انتشار موج ناشی از حرکت شناور به‌سوی میدان آبشکن‌ها هدایت شده که شدت آن در جریان‌های مختلف متفاوت است [۱۰۴ و ۱۵۰]. شکل (۴-۱) تاثیر عبور شناور را بر روی جریان در بازه رودخانه نشان می‌دهد. در این شکل با حرکت شناور، یک جبهه موج گسترده در جلوی شناور شکل می‌گیرد (جبهه A). همگام با تشکیل جبهه موج، جریان برگشتی (E) در امتداد کناره شناور توسعه یافته و فرو رفتگی در سطح آب (B) پدید می‌آید که شدت افت سطح آب با سرعت جریان برگشتی متناسب است. تداخل جریان رو به جلو (D) با جریان برگشتی (E) و تاثیر متقابل امواج عرضی (C) و امواج ثانویه (F)، سبب افزایش شدت تلاطم جریان و انتشار اثر امواج به کناره‌ها و میدان آبشکن‌ها می‌گردد [۱۰۴]. در شکل (۴-۲)، اثر حرکت یک شناور از نزدیکی سامانه آبشکن‌ها بر روی میدان جریان (در پیرامون و حد فاصل آبشکن‌ها) در سه موقعیت گذر شناور نشان داده شده است. با گذشت شناور از مجاور آبشکن‌ها (به‌سمت بالا دست رودخانه)، جریان برگشتی به محدوده میانی آبشکن‌ها وارد گردیده و به‌تدریج جریان گردابی در پیرامون دماغه آبشکن بالادست توسعه می‌یابد. در این‌صورت، رسوبات ته نشست شده در میدان آبشکن‌ها فرسایش یافته و به مجرای اصلی رودخانه انتقال می‌یابند [۱۵۰].

در جریان‌های سیلابی، با فرسایش بستر مجرای اصلی، رسوبات به فضای بین آبشکن‌ها هدایت می‌گردد. تاثیرات مداوم امواج کشتیرانی در طی جریان‌های معمولی ایجاد فرسایش با شدت کم می‌کند. با گذشت چند سال، کناره‌های رودخانه به تعادل می‌رسند. اگر ترافیک کشتیرانی در رودخانه تغییر قابل ملاحظه یابد، و یا اگر توزیع جریان در شاخه‌های رودخانه (در اثر انحراف یا ذخیره آب) تغییر یابد، تعادل ریخت‌شناسی میان مجرای اصلی و فضای بین آبشکن‌ها از بین خواهد رفت.

برای اطلاعات بیش‌تر به مرجع شماره [۱۰۴ و ۱۵۰] مراجعه گردد.



شکل ۴-۱- تاثیر عبور شناور بر روی جریان در یک بازه اصلاح شده با آبشکن‌ها [۱۰۴ و ۱۵۰]



شکل ۴-۲- شرایط جریان در سه موقعیت گذر شناور (۱، ۲ و ۳) از مجاورت آبشکن‌ها [۱۰۴ و ۱۵۰]

۴-۳-۱-۳- ارزیابی تاثیرات تغییر هندسه آبشکن‌ها

در ارزیابی و اصلاح کارکرد طرح ساماندهی رودخانه ممکن است گزینه تغییر هندسه آبشکن‌های موجود مورد توجه قرار گیرد. در این‌صورت، تاثیرات احتمالی کاهش ارتفاع آبشکن، افزایش و یا کاهش طول آبشکن، کاهش فاصله بین آبشکن‌ها و تغییر در شکل دماغه آبشکن بر تعادل مجدد ریخت‌شناسی رودخانه باید بررسی گردد.

الف- کاهش ارتفاع آبشکن‌ها

در شرایط کاهش ارتفاع آبشکن، تا زمانی که سطح آب پایین‌تر از تاج آبشکن باشد، تاثیر کاهش ارتفاع قابل ملاحظه نیست ولی وقتی سطح آب بالاتر از تاج بیاید، آبشکن مستغرق شده و بخشی از جریان سیلابی از فضای عرضی بین آبشکن‌ها عبور می‌کند که تاثیرات مثبت و منفی خواهد داشت [۱۵۰].

- تاثیرات مثبت:
  - ظرفیت انتقال جریان رودخانه افزایش می‌یابد.
  - گرادیان سرعت بین جریان در مجرای اصلی و جریان چرخشی در فضای بین آبشکن‌ها کاهش می‌یابد.
  - بده واحد عرض در مجرای اصلی و نیز عمق جریان کاهش یافته، عمق آبشستگی در پیرامون آبشکن کم‌تر می‌شود.
  - میزان رسوب‌گذاری در پایین‌دست حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. در هر صورت، موارد مثبت فوق باید هم‌زمان با اثرهای منفی آن در زیر مورد نظر قرار گیرند.
- تاثیرات منفی:
  - عرض موثر جریان بیش‌تر شده، شدت جریان در مجرای اصلی کاهش می‌یابد، سرعت متوسط جریان کم‌تر شده و در نتیجه تمایل به رسوب‌گذاری در بستر مجرای اصلی پدید می‌آید.
  - ارتفاع سطح آب در رودخانه تغییر می‌کند که روی پایداری دیواره‌ها می‌تواند تاثیر داشته باشد.
  - در شرایط استغراق آبشکن‌ها در پیچ خارجی، جریان بیش‌تری در مدت زمان طولانی‌تری (در مقایسه با کارکرد غیرمستغرق آبشکن‌ها) به میدان آبشکن‌ها وارد شده که ممکن است باعث افزایش انتقال رسوبات به سیلابدشت رودخانه گردد.
  - تاثیر ریخت‌شناسی ناشی از کشتیرانی در شرایط کاهش ارتفاع تاج آبشکن‌ها هنوز براساس دانش کنونی قابل پیش‌بینی نیست. تعادل بین انتقال رسوب از مجرای اصلی به میدان آبشکن‌ها (و بالعکس)، بستگی زیادی به ارتفاع آبشکن دارد بنابراین تاثیر کاهش ارتفاع تاج در این تعادل ناشناخته است.
  - جهت جریان در نزدیکی بستر از مجرای اصلی به سمت فضای بین آبشکن‌ها و دیواره‌هاست و در نزدیکی سطح آب معکوس است. ازاین‌رو اندازه ناحیه چرخشی جریان از کف به‌سمت سطح آب کاهش می‌یابد که این شرایط هم‌سو با شرایط کارکرد غیرمستغرق آبشکن‌ها نبوده و میدان کارکرد موثر آبشکن‌ها را می‌کاهد.

با استغراق بیش‌تر جریان، آبشکن به‌صورت سرریز تخت عمل کرده و نقش اصلی خود را در تعادل ته نشست رسوبات پایین‌دست آبشکن از دست می‌دهد. به‌طور کلی اثرهای منفی ناشی از کاهش تراز تاج آبشکن (و احتمال کارکرد مستغرق آن در جریان‌های زیاد) بیش‌تر از اثرهای مثبت آن است.

ب- افزایش یا کاهش طول آبشکن

- افزایش طول آبشکن، باعث کاهش عرض و افزایش عمق آب در مجرای اصلی گردید و در نتیجه میزان آبشستگی عمومی و موضعی را افزایش می‌دهد.

- با افزایش طول سری آبشکن‌ها، آبشستگی عمومی قابل توجه گردیده و روی نیمرخ سطح آب در بازه بالادست تاثیر می‌گذارد. ازاین رو تاثیر منفی ریخت‌شناسی در بالادست خواهد داشت.
- عرض رودخانه برای کشتیرانی کاهش می‌یابد.
- کاهش طول آبشکن‌ها، اثرهای معکوس مذکور در بندهای فوق را دارد.
- افزایش یا کاهش یک یا چند آبشکن در سری آبشکن‌های با تعداد زیاد، تاثیر کم‌تری روی بالادست و پایین‌دست خواهد داشت [۱۵۰].
- تغییر طول، در واقع شکل و اندازه سطح فضای بین آبشکن‌ها (یا نسبت فاصله به طول) را تغییر می‌دهد، که سبب تغییر در ساختار جریان چرخشی (به‌ویژه چرخش افقی بزرگ مقیاس) خواهد شد. البته با تغییرات کم در طول (۱۰ تا۲۰ متر در رودخانه‌های بزرگ)، تاثیرات مذکور کم‌تر است.
- برای اهداف کشتیرانی، افزایش طول در جهت تعمیق مجرای اصلی می‌تواند مفید باشد. ولی کاهش طول آبشکن‌ها به‌دلیل افزایش پتانسیل رسوب‌گذاری و کاهش عمق آب مناسب نخواهد بود.

ج- کاهش فاصله بین آبشکن‌ها

- ساختار جریان چرخشی کاملا تابع نسبت فاصله به طول آبشکن‌ها است. کاهش فاصله آبشکن‌ها باعث استقرار یک سلول جریان چرخشی با عرض کم‌تر و با پایداری بیش‌تر می‌گردد که تاثیر ریخت‌شناسی آن بر مجرای اصلی جزیی بوده و آبشستگی عمومی را به مقدار کم افزایش می‌دهد.
- در شرایط کشتیرانی، تاثیر تغییر فاصله بین آبشکن‌ها بر تعادل موجود در انتقال رسوب بین مجرای اصلی و فضای بین آبشکن‌ها، هنوز قابل پیش‌بینی نبوده و نیاز به مطالعه خاص دارد.
- کاهش فاصله آبشکن‌ها از یک سو باعث انتقال و ته نشست رسوبات در فضای بین آبشکن‌ها و حفاظت بیش‌تر دیواره‌ها می‌شود و از سوی دیگر، ممکن است باعث افزایش سطح آب در مجرای اصلی و افت بیش‌تر سطح آب در فضای بین آبشکن‌ها شده و به خروج بیش‌تر جریان از میدان آبشکن‌ها و انتقال رسوب به مجرای اصلی منجر گردد. کاهش زیاد فاصله منجر به افزایش چند درصدی عمق آب در مجرای اصلی می‌شود. به‌هرحال، حداقل فاصله بین آبشکن‌ها نباید از طول حفره آبشستگی در جهت جریان کم‌تر باشد. فاصله بین آبشکن‌ها باید براساس پایداری هندسه ناحیه جدایی جریان در شرایط جریان‌های مختلف تعیین گردد.

د- تغییر شکل دماغه آبشکن‌ها

آبشکن‌ها براساس نمای ظاهری در سطح افق ممکن است به فرم‌های مختلف در شکل (۳-۷) ساخته شده باشند. فرم دماغه آبشکن گاهی در حمله موضعی جریان به دیواره‌ها و میدان آبشکن‌ها، شدت آبشستگی موضعی در پنجه و یا تخریب دماغه آبشکن‌ها موثر است. اصلاح نمای دماغه آبشکن‌ها گاهی موثرتر از بازسازی مجدد فرم قبلی آبشکن است.

- فرم L شکل نقش موثرتری در انحراف جریان داشته، رسوب‌گذاری در حد فاصل آبشکن‌های متوالی را افزایش داده و میزان آبشستگی موضعی در دماغه را کاهش می‌دهد. کارکرد آن در بستر عریض، در پیچ خارجی، برای کشتیرانی و برای اولین و آخرین آبشکن موثرتر از فرم مستقیم است.
- افزایش طول دماغه سرکج نوع L شکل (فرم آبشکن‌های باله‌ای) مانند یک دیواره هادی برای هدایت جریان در بسترهای عریض شریانی، برای کشتیرانی و برای اولین و آخرین آبشکن می‌تواند موثر باشد.
- فرم T شکل دماغه آبشکن نقش موثرتری در هدایت جریان به‌سمت مجرای اصلی داشته و گستره حفره آبشستگی آن کم‌تر از نوع L شکل و یا مستقیم است.
- گاهی تخریب دماغه L شکل یا T شکل، سبب تخریب آبشکن و دیواره رودخانه و در نتیجه توسعه جزیره در بستر اصلی رودخانه می‌گردد. در این شرایط، بازسازی دماغه آبشکن به‌صورت مستقیم و با دماغه گرد موثرتر بوده و تاثیرات منفی قابل توجهی در کارکرد عمومی آبشکن‌ها نخواهد داشت [۱۰۴].

۴-۳-۲- روش‌های کمی ارزیابی

۴-۳-۲-۱- ارزیابی توان جریان

در ساماندهی بازه رودخانه، توازن توان جریان رودخانه باید به‌گونه‌ای حفظ گردد تا تاثیرات نامطلوب ریخت‌شناسی طرح به بازه‌های بالا دست و پایین‌دست رودخانه گسترش نیابد [۶۵]. توان جریان (S.P.) عبارت از انرژی مصرفی جریان در واحد طول و در واحد زمان است.

$$\tau = \gamma RS \quad و \quad \frac{S.P.}{B} = \tau V \quad و \quad S.P. = \gamma QS \qquad (۴-۴)$$

که در این روابط:

γ: وزن مخصوص آب، Q: شدت جریان، S: شیب متوسط بازه، B: عرض متوسط بالای رودخانه، R: شعاع هیدرولیکی، τ: متوسط تنش برشی بستر، V: سرعت متوسط جریان و حاصلضرب τV توان جریان مخصوص (در واحد عرض رودخانه) است. برای برقراری توازن توان جریان مخصوص رابطه تعادلی زیر بین بازه قدیم رودخانه (با اندیس ۱) و بازه اصلاح شده (با اندیس ۲) ارائه شده است [۶۵].

$$\tau_1 V_1 = \tau_2 V_2 \qquad (۵-۴)$$

تفاوت محسوس بین دو طرف رابطه فوق (به‌طور مثال اختلاف بیش از ۱۰٪) به‌معنای احتمال تاثیرات نامطلوب طرح ساماندهی از نظر فرسایش بازه خواهد بود [۴۵]. نتایج ارزیابی توان جریان راهنمای مناسبی برای تعیین عرض بازه اصلاح شده (طول آبشکن‌ها) است.

۴-۳-۲-۲- فرضیه رژیم

براساس فرضیه رژیم، رودخانه آبرفتی صرف نظر از هندسه رودخانه در پلان، عرض، عمق و شیب خود را برای دستیابی به تعادل پایدار دینامیکی به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند تا ظرفیت انتقال جریان معین آب و رسوب را فراهم سازد. در شرایط رژیم، بازه رودخانه

پایدار بوده و تحت فرسایش یا رسوب‌گذاری قرار ندارد. روابط تجربی و نیمه‌تجربی برای تعیین سه درجه آزادی (عرض، عمق و شیب) در شرایط رژیم ارائه شده است [۱۰۲].

پیشنهاد می‌شود که براساس بده طراحی و ظرفیت انتقال رسوب مورد نظر، ابعاد هندسه پایدار بازه رودخانه در طرح ساماندهی با روش‌های نیمه‌تجربی رژیم ارزیابی گردیده تا راهنمای استقرار آبشکن‌ها (طول و فاصله) باشد. در این روش، شش متغیر سرعت متوسط V، عمق متوسط D، شیب S، بدهQ، غلظت بار رسوبی و عرض رودخانه B در نظر گرفته می‌شود. ارتباط میان این شش متغیر از طریق کاربرد رابطه پیوستگی جریان آب، رابطه بار رسوبی، رابطه مقاومت جریان و شرایطی که مبین پایداری بازه باشد، امکان‌پذیر است. در روش صریح و کاربردی، فرض جریان پایدار و یکنواخت و مواد بستری غیرچسبنده و انتخاب Q و S و سپس محاسبه D، B، V و X در بازه ساماندهی با استفاده از چهار رابطه فوق است. روش دیگر، انتخاب Q و X و محاسبه D، B، V و S از روابط مربوط می‌باشد [۶۵].

چون بار رسوبی و مقاومت جریان تابعی از اندازه مواد بستری d_s است، بنابراین عامل d_s را نیز باید معین و معرفی نمود. همچنین در رودخانه‌ها منظور از Q، بده غالب با مفهوم ریخت‌شناسی آن در شکل پذیری هندسه هیدرولیکی پایدار است. روابط زیر به ترتیب برای محاسبه چهار متغیر D، B، V و X پیشنهاد شده است [۶۵]. برای پیوستگی جریان، از رابطه عمومی زیر برای بستر عریض استفاده می‌شود.

$$Q = BDV \qquad (۶-۴)$$

برای بار رسوبی، رابطه مناسبی نظیر رابطه ایکرز و وایت (۱۹۹۰) به‌صورت زیر پیشنهاد شده است [۶۵]. این روش براساس داده‌های زیاد آزمایشگاهی و صحرایی به‌دست آمده، و برای مجاری با مواد بستری ماسه و درشت‌تر مناسب بوده و به نوع فرم بستری حساس نمی‌باشد.

$$q_t = Xq \qquad (۴-۷-\text{الف})$$

$$X = \frac{G_{gr} d_{35}}{D}\left(\frac{V}{U_*}\right)^n \qquad (۴-۷-\text{ب})$$

$$G_{gr} = C\left(\frac{F_{gr}}{A} - 1\right)^m \qquad (۴-۷-\text{ج})$$

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{\sqrt{g d_{35}(S_g - 1)}}\left[\frac{V}{\sqrt{32}\log(\frac{10D}{d_{35}})}\right]^{(1-n)} \qquad (۴-۷-\text{د})$$

$$D_{gr} = d_{35}\left[\frac{g(S_g - 1)}{\nu^2}\right]^{\frac{1}{3}} \qquad (۴-۷-\text{ه})$$

$$U_* = \sqrt{gDS}$$

$$D_{gr} \succ 60 \qquad (۴-۷-\text{و})$$

$$C = 0.025 \;\; ; \;\; m = 1.78 \;\; ; \;\; A = 0.17 \;\; ; \;\; n = 0$$

$$1 \prec D_{gr} \leq 60 \qquad (۴-۷-\text{ز})$$

$$n = 1 - 0.56\log_{10}(D_{gr}) \qquad (ح-۷-۴)$$

$$A = \frac{0.23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0.14 \qquad (ط-۷-۴)$$

$$m = \frac{6.83}{D_{gr}} + 1.67 \qquad (ی-۷-۴)$$

$$\log_{10} C = 2.79\log_{10}(D_{gr}) - 0.98[\log_{10}(D_{gr})]^2 - 3.46 \qquad (ک-۷-۴)$$

که در این روابط:

q_t: بار رسوبی کل حجمی در واحد عرض، q: بده واحد عرض، d_{35}: اندازه ۳۵٪ مواد بستری، S_g: چگالی نسبی مواد بستری، g: شتاب ثقل، ν: لزجت جنبشی، U_*: سرعت برشی، G_{gr}: عامل بدون بعد انتقال رسوب، F_{gr}: عامل بدون بعد حرکت رسوبی، D_{gr}: عامل بدون بعد مواد بستری و n، m،A ضرایب ثابت تجربی هستند. روابط فوق در سامانه واحدی بین‌المللی (SI) است.

شرایط آستانه حرکت مواد بستری، پایداری بستر و فقدان بار رسوبی در روابط فوق با شرط ($F_{gr} \le A$) تامین می‌گردد.

برای مقاومت جریان، رابطه وایت- پاریس- بیتس (۱۹۸۰) برای محدوده اندازه مواد بستری ۰/۴ تا ۱۰ میلی‌متر به‌صورت زیر پیشنهاد شده است [۵۷].

$$\frac{F_{gr} - A}{F_{fg} - A} = 1 - 0.76\left[1 - \frac{1}{\exp(\log D_{gr})^{1.7}}\right] \qquad (الف-۸-۴)$$

$$F_{fg} = \frac{U_*}{\sqrt{g d_{35}(S_g - 1)}} \qquad (ب-۸-۴)$$

که در این روابط:

F_{fg}: تنش برشی بدون بعد و A مقدار F_{gr} در شرایط آستانه حرکت بستر است.

برای تبیین شرایط پایداری، توصیه شده که از فرضیه حداقل توان جریان به‌جای شرط حداکثر انتقال رسوب در دستیابی به عرض تعادلی رودخانه استفاده گردد [۶۵]. با انتخاب Q و S اگر شرایط حداکثر انتقال رسوب به‌طور صریح معرفی نگردد، در این‌صورت یک مجموعه جواب وجود خواهد داشت که هر یک از جواب‌ها مقادیر D، B، V و X خود را دارد. تنها یکی از مجموعه‌ها بیانگر شرایط حداکثر انتقال رسوب (X_{max}) بوده و جواب نهایی خواهد بود.

۴-۳-۲-۳- ارزیابی ظرفیت انتقال رسوب

فرضیه پایداری ایجاب می‌کند که بیلان بده- رسوب در رودخانه تغییر قابل ملاحظه‌ای نکند تا از اثرهای نامطلوب فرسایش بستر یا رسوب‌گذاری بر روی بستر مصون باشد. باید توجه داشت که بیش‌تر انتقال رسوب در جریانات زیاد صورت می‌گیرد و رابطه میان بده و بار رسوبی غیرخطی است [۶۵].

بار رسوبی در بازه موجود و بازه اصلاح شده رودخانه از رابطه مناسبی (نظیر روش ایکرز و وایت، ۱۹۹۰، در مجموعه روابط ۴-۷)، برای چندین جریان مختلف تا حد سیلاب طراحی محاسبه و مقایسه می‌گردد. اگر شدت بار رسوبی در هر دو شرایط بازه کم باشد، احتمال بروز مشکلات فرسایش یا رسوب‌گذاری در طرح ساماندهی بسیار کم خواهد بود. در این صورت اگر مشکلاتی نیز در اثر تغییر

بار رسوبی بین دو شرایط پدید آید، سریع نبوده و در طی چند سال بروز خواهد کرد. اگر بار رسوبی در شرایط موجود بازه زیاد باشد و یا اختلاف میان برآورد بار رسوبی در دو شرایط بازه موجود و بازه اصلاح شده زیاد باشد، احتمال بروز مشکلات فرسایش یا رسوب‌گذاری در اثر طرح ساماندهی زیاد بوده و نیاز به مدیریت بهسازی و نگهداری در درازمدت دارد [۶۵].

۴-۳-۲-۴- ارزیابی خصوصیات جریان

احداث آبشکن‌ها در بازه رودخانه منجر به کاهش عرض، افزایش عمق و سرعت و توان جریان می‌گردد. از طرفی شدت آبشستگی عمومی در بازه، آبشستگی موضعی در پیرامون آبشکن و آسیب‌پذیری احتمالی پنجه، بدنه و روکش آبشکن‌ها بستگی به شدت تغییر خصوصیات جریان بین بازه موجود و بازه اصلاح شده رودخانه دارد [۴۶].

هندسه هیدرولیکی رودخانه در بازه موجود و در بازه اصلاح شده با استفاده از یک مدل جریان مناسب (نظیر مدل HEC-RAS برای شرایط جریان پایدار) برای چندین جریان مختلف تا حد سیلاب طراحی محاسبه و مقایسه می‌گردد. اگر تغییر عامل‌های جریان قابل ملاحظه نباشد (کم‌تر از ۵٪ برای ارتفاع سطح آب و سرعت متوسط، و ۱۰٪ برای تنش برشی و توان جریان)، احتمال بروز مشکلات فرسایش یا رسوب‌گذاری در طرح ساماندهی بسیار کم خواهد بود [۴۶].

۴-۳-۲-۵- ارزیابی آبشستگی و رسوب‌گذاری

وقتی یک آبشکن یا سری آبشکن‌ها در یک بازه رودخانه ساخته می‌شود، فرم بستر رودخانه در اثر آبشستگی بستر در طول بازه و در پیرامون آبشکن و همچنین در اثر ته نشست رسوبات (حاصل از آبشستگی و یا بار رسوبی رودخانه) در میدان جریان چرخشی آبشکن‌ها، تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌کند.

شکل (۴-۳)، نمونه فرم بستری را در محدوده تاثیر یک آبشکن نشان می‌دهد. در این شکل، خطوط کنتوری منفی نشانگر وسعت حفره آبشستگی و مقادیر مثبت نشانگر رسوب‌گذاری است. تجمع رسوبات در دامنه پایین‌دست حفره آبشستگی، یک بار رسوبی را در مجاورت دیواره پایین‌دست (تا امتداد تقریبی طول ناحیه چرخشی جریان) ایجاد می‌کند [۱۴۷]. حفره آبشستگی در پیرامون آبشکن گسترش یافته و ممکن است به دیواره رودخانه رسیده و ریشه آبشکن را نیز تهدید کند. پایداری و ایمنی و کارکرد آبشکن‌های رودخانه‌ای بستگی به ارزیابی صحیح از عمق و گستره آبشستگی در پیرامون آبشکن دارد.

تاثیرات آرایش آبشکن‌ها (طول، فاصله و زاویه آبشکن‌ها) بر الگوی رسوب‌گذاری در میدان آبشکن‌ها قبلا در بند (۳-۴-۲) و شکل‌های (۳-۱۸) و (۳-۲۰) تشریح گردیده است. برای ارزیابی گستره و ابعاد هندسی رسوب‌گذاری در میدان آبشکن‌ها، هنوز یک رابطه عمومی و یا رابطه تجربی قابل اعتمادی به‌دست نیامده است. ولی برای ارزیابی آبشستگی در بازه آبشکن‌ها، نتایج تجربی و نیمه‌تجربی قابل استناد وجود دارد.

به‌طور کلی، آبشستگی تحت یکی از دو شرایط زیر است:

- آبشستگی جریان آب صاف[1] (جریان آب فاقد رسوبات قابل ته‌نشینی بر روی بستر پایدار)
- آبشستگی جریان آب و رسوب یا بستر متحرک[2] (جریان آب با رسوبات قابل ته‌نشینی بر روی بستر فرسایشی)

1- Clear-Water Scour
2- Sediment Transporting Scour/ Live-bed scour

تجربیات نشان می‌دهد که مطابق شکل (۴-۴)، حداکثر آبشستگی در جریان آب صاف و در شرایط آستانه حرکت مواد بستری (تنش برشی بحرانی) به‌وجود می‌آید [۹۶]. فرسایش کف بستر در بازه آبشکن‌ها به دو صورت آبشستگی عمومی[1] (در مجرای اصلی بازه) و آبشستگی موضعی[2] (در پیرامون آبشکن) ایجاد می‌گردد.

الف- آبشستگی عمومی

کاهش عرض رودخانه باعث افزایش سرعت و تنش برشی شده، و پدیده فرسایش کف بستر یا آبشستگی عمومی را در بازه فشرده شده، توسعه می‌دهد. اگر فشردگی بازه در طول زیاد و به‌طور دایمی‌باشد، اثرهای آن ممکن است به بازه طولانی‌تری از رودخانه گسترش یافته و باعث کاهش تراز بستر رودخانه گردد.

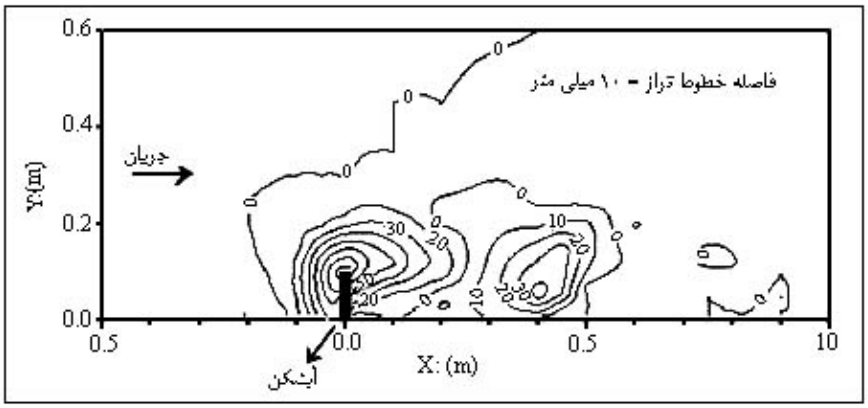
ب- آبشستگی موضعی

یکی از اثرهای حضور آبشکن‌ها توسعه آبشستگی موضعی در دماغه و پنجه آبشکن (در اثر جریان گردابی اصلی- نعل اسبی) و گسترش حفره آبشستگی در پیرامون بدنه آبشکن (همراه گردابه‌های دیگر) است. آبشستگی موضعی همگام با آبشستگی عمومی ممکن است وقوع یابد. به‌هرحال عمق فرسایش حفره‌ای ناشی از آبشستگی موضعی در پیرامون آبشکن‌ها خیلی بیش‌تر از عمق آبشستگی عمومی خواهد بود. مهم‌ترین مشخصات آبشستگی موضعی عبارت از عمق آبشستگی، تحول زمانی گستره آبشستگی و هندسه حفره فرسایشی است.

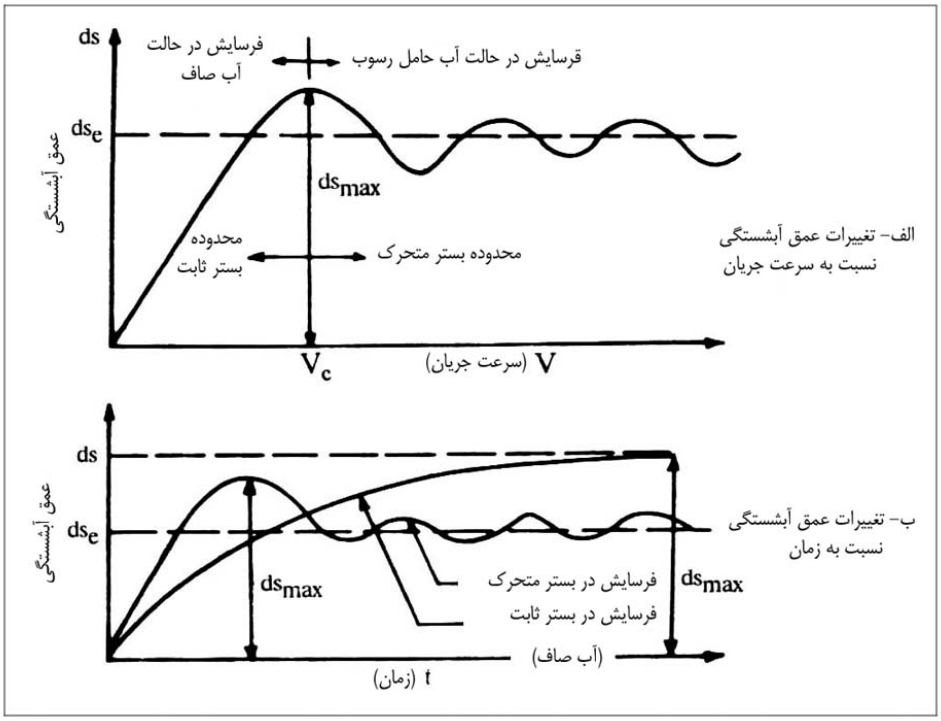
عمق آبشستگی موضعی تابع زمان و شدت تغییر جریان عبوری بوده و با حرکت مواد بستری به داخل حفره فرسایشی و نیز با تعلیق و خروج مواد از آن تغییر می‌کند. روند تغییرات عمق آبشستگی موضعی در ابتدا بسیار سریع بوده ولی به‌تدریج به‌سمت تعادل دینامیکی از شدت آن کاسته می‌شود. شکل (۴-۵) توسعه زمانی حفره آبشستگی را در امتداد دماغه یک آبشکن (در بستر ماسه‌ای) نمایش می‌دهد [۱۴۷]. رابطه گسترش عمق آبشستگی (d_s) با زمان (T) برای یک آبشکن منفرد توسط یاسی (۱۹۹۷) و هافمن و ورهیج (۱۹۹۷) ارائه شده است [۱۴۷ و ۱۵۰]. در شرایط تعادل دینامیکی بستر، متوسط عمق آبشستگی موضعی را «عمق تعادل آبشستگی» می‌نامند. عمق تعادلی در شرایط دوام زمانی جریان ایجاد شده، زیرا فرصت زمانی برای حصول آن زیاد می‌باشد. از این‌رو در رودخانه‌هایی که زمان دوام حداکثر سیل آنها کوتاه است، گسترش آبشستگی به عمق تعادلی نخواهد رسید (۸۶).

روابط زیادی برای برآورد عمق آبشستگی ارائه شده است. جزییات محاسبات عمق و گستره آبشستگی عمومی و موضعی در بازه سامانه آبشکن‌ها (برای آبشکن‌های منفرد و سری آبشکن‌ها)، در بند (۶-۲-۸) ارائه شده است.

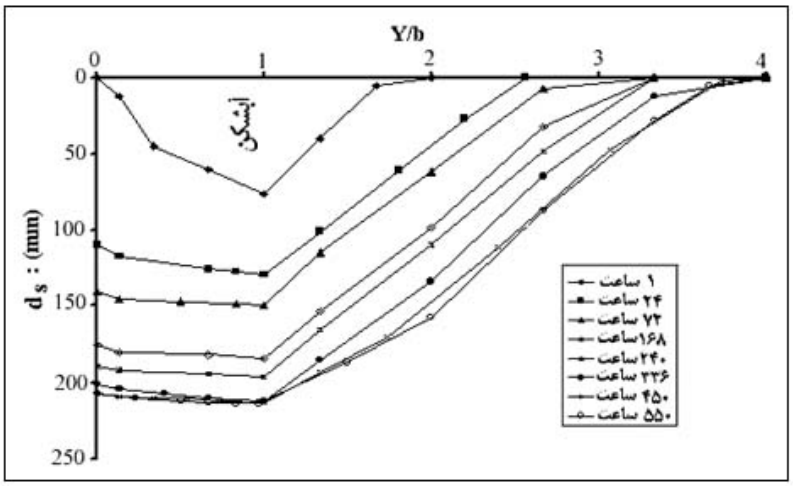
1- General Scour
2- Local Scour



شکل ۴-۳- تغییر فرم بستر (آبشستگی و رسوب‌گذاری) در پیرامون یک آبشکن [۱۴۷]



شکل ۴-۴- تغییرات عمق آبشستگی در شرایط جریان آب صاف و جریان آب و رسوب [۴ و ۱۰۴]



شکل ۴-۵- تحول زمانی عمق آبشستگی موضعی (d_s) در امتداد دماغه یک آبشکن به‌طول b [۱۴۷]

فصل ۵

مبانی جانمایی و طراحی آبشکن‌ها

۵-۱- کلیات

گزینش و جانمایی آبشکن‌ها در طرح اصلاح مسیر و یا حفاظت دیواره رودخانه‌ها نیازمند مطالعات لازم برای شناخت رودخانه، تبیین اهداف، تناسب کاربرد موثر آبشکن‌ها، طراحی اصولی آرایش و هندسه آبشکن‌ها، ارزیابی تاثیرات ریخت‌شناسی، تعیین شرایط اجرای طرح در رودخانه، برنامه زمانی اجرا و هزینه‌های پروژه و طرح پایش و نگهداری سامانه آبشکن‌ها می‌باشد.

در این فصل با استفاده از دانش علمی و فنی موجود جهانی، مبانی اصلی جانمایی و طراحی آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه ارائه می‌گردد.

۵-۲- اطلاعات مورد نیاز

۵-۲-۱- جمع‌آوری اطلاعات موجود

اطلاعات موجود در سامانه رودخانه مورد مطالعه باید از منابع مختلف جمع‌آوری گردد. در این رابطه، واحدهای وابسته وزارت نیرو (مانند شرکت مدیریت منابع آب ایران، آرشیو فنی گزارش‌ها، مستندات و غیره)، وزارت امور خارجه (در خصوص رودخانه‌های مشترک و مرزی)، سازمان‌های آب منطقه‌ای حوضه رودخانه مورد نظر، وزارت جهاد کشاورزی (مرکز تحقیقات آبخیزداری، واحدهای خاکشناسی ، آبخیزداری و غیره)، استانداری و فرمانداری‌های ادارات راه حوضه رودخانه مورد نظر، سازمان زمین‌شناسی، سازمان جغرافیایی ارتش، سازمان نقشه‌برداری کشور، سازمان هواشناسی، دفاتر مهندسان مشاور و دیگر منابع وابسته کشوری و یا محلی باید مورد نظر قرار گیرد.

اطلاعات موجود شامل موارد زیر بوده که باید از منابع مختلف فوق جمع‌آوری و مستند گردد.

- عکس‌های هوایی در سنوات مختلف موجود
- عکس‌های ماهواره‌ای با تناوب مناسب
- نقشه‌های توپوگرافی سراسری موجود (با مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰) و نقشه‌های محلی موجود از بازه مورد نظر
- نقشه‌ها و عکس‌های انطباقی موجود از بازه مورد نظر
- نقشه و گزارش‌ها از وضعیت آب‌های زیرزمینی در محدوده نواری بازه مورد نظر
- نقشه و گزارش‌های زمین‌شناسی موجود و وضعیت لرزه‌خیزی در محدوده نواری بازه مورد نظر
- نقشه و گزارش‌های خاک‌شناسی در نوار ساحلی بازه مورد نظر
- وضعیت پوشش گیاهی در بستر و در محدوده نواری ساحل بالای بازه مورد نظر
- سازه‌های آبی و تاسیسات موجود در رودخانه و در محدوده نواری ساحل بالای بازه مورد نظر
- اطلاعات زیست بوم در محدوده نواری رودخانه و آبزیان رودخانه مورد نظر
- کاربری رودخانه برای مصارف مختلف (محیط زیست، آبیاری، صنعتی، شرب و غیره) در بازه مورد نظر
- کاربری اراضی ساحلی رودخانه (زراعی، باغی، مرتع، جنگل، صنعتی، مسکونی و غیره)
- آبراهه‌ها و شاخه‌های فرعی در محدوده بازه مورد نظر (بالادست، در محدوده و در پایین‌دست)

- اهمیت منطقه‌ای (مرزی)، ملی و محلی رودخانه و بازه مورد نظر
- محدودیت‌های منطقه‌ای، ملی، محلی، اجتماعی، حقوقی، مالی و... موجود در بازه مورد نظر
- مصالح و منابع قرضه موجود طبیعی- ساختمانی در رودخانه و منطقه طرح
- مشکلات و چالش‌های موجود در محدوده طرح
- ارزش و پتانسیل‌های رودخانه در بازه مورد نظر
- آمار و اطلاعات هواشناسی شامل بارندگی، باد، تبخیر، رطوبت و دما
- آمار و اطلاعات جریان آب و انتقال رسوب (معلق، کف و کل) در رودخانه و بازه مورد نظر
- آمار مربوط به کیفیت آب در رودخانه و بازه مورد نظر
- حقابه‌ها در بازه مورد نظر و در پایین‌دست (حقابه‌های محیط زیست، آبیاری، صنعتی، شرب و غیره)
- گزارش‌ها و مستندات از مطالعات، طرح‌ها و سوابق کارهای انجام شده در رودخانه و بازه مورد نظر

۵-۲-۲- برداشت اطلاعات و مطالعات صحرایی

نقشه‌برداری از بازه موردنظر، بررسی زمین‌شناسی محدوده، مشخصات ژئوتکنیکی و مکانیک خاک بستر، دیواره و ساحل بالای رودخانه، جانمایی مصالح مناسب طبیعی و ساختمانی و بررسی هیدرولیکی هندسه و عوامل جریان آب و رسوب در بازه مورد نظر، نیازمند مطالعات صحرایی است. شرح جزییات این موارد در زیر ارائه می‌گردد:

۵-۲-۲-۱- مشاهدات صحرایی و بازدیدهای میدانی

بررسی دقیق شرایط عمومی بازه مورد نظر (فرسایش دیواره‌ها، داغاب و حدود پیشروی سیلاب)، و درجه انطباق آن با عکس‌ها، نقشه‌ها، و شواهد موجود نیازمند مشاهدات صحرایی است. گفتگو و مباحثه با اهالی منطقه، شوراها و مسوولین دولتی و غیر دولتی پیرامون شرایط رودخانه اطلاعات مفیدی می‌دهد، گرچه خاطره‌ها و داستان‌های افراد گاهی اوقات مورد تردید خواهد بود. همچنین تهیه عکس از ویژگی‌های خاص برای بررسی زمینی لازم می‌باشد. پرواز با ارتفاع کم در محدوده بازه مورد نظر، خصوصیات ظاهری رودخانه، وضعیت کاربری اراضی ساحلی و گستره عرضی سیلابدشت رودخانه را بهتر نشان می‌دهد.

۵-۲-۲-۲- برداشت عکس هوایی

عکسبرداری هوایی از بازه رودخانه مورد نظر به‌صورت نواری و از ارتفاع کم مبنای اطلاعاتی خوبی از شرایط اخیر رودخانه را با صرف زمان و هزینه کم فراهم می‌سازد.

عکس‌های هوایی با حداکثر مقیاس (۱:۲۰۰۰۰) و ترجیحا (۱:۱۰۰۰۰) برای مطالعات مرحله مقدماتی، برای تشخیص حدود پیشروی سیلاب، برای تعیین محدوده نواری نقشه‌برداری زمینی، به‌عنوان نقشه مرجع در ارزیابی کاربری اراضی ساحلی و نیز برای جانمایی اولیه طرح ساماندهی و آرایش آبشکن‌ها مناسب هستند [۳۷ و ۱۱۵].

۵-۲-۲-۳- نقشه‌برداری زمینی

برای مطالعات جزیی ابعاد ریخت‌شناسی رودخانه، هندسه هیدرولیکی بازه مورد مطالعه، جانمایی طرح و ارائه نقشه‌های اجرایی، نقشه‌برداری از رودخانه (به‌صورت توپوگرافی نواری و پلان همراه با مقاطع طولی و عرضی) با مقیاس مناسب ضروری می‌باشد. توپوگرافی و یا پلان رودخانه هم‌زمان با مقاطع طولی و عرضی و نسبت به یک مبنای ارتفاعی مشترک (B.M.) برداشت می‌شوند. همچنین، انتقال B.M. کشوری (NCC) به محل پروژه و موقعیت B.M. محلی (برای انطباق مبنای ارتفاعی با نقشه‌های دیگر، مقایسه با عکس‌های هوایی و ایمنی مختصات مکانی و ارتفاعی B.M. محلی در طول انجام پروژه و در آینده) ضروری است.

توپوگرافی و یا پلان رودخانه در بازه مورد نظر به‌صورت نواری برداشت شده و باید شامل بستر اصلی، بستر سیلابدشت (با عرض کافی برای مرزهای پیشروی احتمالی حداکثر سیلاب مورد نظر در دو بال رودخانه) و عوارض خاص طبیعی و مصنوعی (راه‌ها، نهرها، سردهانه آبگیرها، خطوط حیاتی و...) باشد. مقیاس (۱:۱۰۰۰) تا (۱:۵۰۰۰) و عموما (۱:۲۰۰۰)، با فواصل خطوط کنتوری ۰/۳ تا ۱ متر و عموما ۰/۵ متر مناسب است. رقوم‌های زمینی برداشت شده، مسیرهای جریان، دیواره اصلی رودخانه (خط پنجه دیواره در بستر و ساحل بالا) و عوارض خاص باید بر روی نقشه منعکس باشند.

مقاطع طولی در سه محور (محور میانی و یا خط‌القعر، محور یک سوم راست و یک سوم چپ در مجرای اصلی) با مقیاس طولی (۱:۱۰۰۰) و مقیاس ارتفاعی (۱:۱۰۰) برداشت و تهیه می‌شود. مقاطع عرضی نیز عمود بر راستای جریان و با عرض کافی (بیش‌تر از حداکثر حدود پیشروی سیلاب در دو بال ساحلی) و در فواصل معین از طول رودخانه تهیه می‌شوند. مقاطع عرضی از سمت چپ به سمت راست رودخانه و به‌طور متوالی در جهت بالادست رودخانه و با یک مقیاس مشترک برداشت شده و موقعیت آنها روی نقشه پلان رودخانه نمایش داده می‌شود. برداشت مقاطع عرضی در محل‌های تغییر ناگهانی در شیب، در عرض، در زبری بستر، در پیچ‌ها (ورودی، میانی و خروجی پیچ) و همچنین در محل شاخه‌های فرعی، دهانه‌های آبگیر و در بالادست و پایین‌دست تاسیسات (سازه‌های آبی، پل و غیره) و در مقاطع کنترل ضروری است. تعداد نقاط در مقطع عرضی باید نشانگر تغییرات مقطع (و به‌ویژه موقعیت رشته‌های جریان، جزایر رسوبی و دیواره‌های اصلی رودخانه شامل پنجه دیواره در بستر و ساحل بالا) بوده و حداکثر ۱۰۰ نقطه باشد [۳۷].

۵-۲-۲-۴- بررسی زمین‌شناسی

مطالعه تفصیلی زمین‌شناسی در محدوده رودخانه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی، گزارش‌های موجود و نیز بررسی‌های صحرایی برای تشخیص تاثیر عوامل زمین‌شناسی در کنترل آزادی رودخانه، در تعیین الگوی مارپیچی، موقعیت و ابعاد پیچ، گسترش عرضی، شیب و ابعاد هندسی بازه ضروری می‌باشد.

تفکیک نوع تشکیلات زمین‌شناسی، تغییرپذیری نوع و مشخصات کلی آبرفت (در طول رودخانه و نیز در دو بال ساحلی رودخانه) راهنمای تشخیص عمق و گستردگی سنگ کف و انتخاب محل گمانه‌های ژئوتکنیک و تراکم سطحی و عمق نمونه‌برداری از مواد بستر و دیواره‌های رودخانه خواهد بود. همچنین تشخیص موقعیت گسل‌هایی که در محدوده رودخانه وجود دارند و نیز وضعیت آنها از نظر فعال یا غیرفعال بودن ضروری می‌باشد. گسل‌هایی که رودخانه را در امتداد عرضی قطع می‌کنند یک ناحیه تکتونیکی موضعی ایجاد نموده و عامل گسترش و یا ناهنجاری مقاطع عرضی هستند. درحالی‌که گسل‌هایی که به‌موازات رودخانه امتداد دارند عموما عامل تعیین کننده در راستای کنونی رودخانه و خط‌القعر می‌باشند [۳۷].

۵-۲-۲-۵- ژئوتکنیک و مکانیک خاک

به‌منظور تشخیص خواص فیزیکی و مکانیکی مواد تشکیل دهنده لایه‌های سطحی و زیرسطحی در بستر، دیواره‌ها و ساحل بالای رودخانه، برداشت نمونه‌ها و مطالعات ویژه ژئوتکنیک و مکانیک خاک لازم خواهد بود.

گمانه‌های شاهد در بستر و در ساحل رودخانه به روش دستی یا مکانیکی حفر می‌شوند. انتخاب محل گمانه‌ها تابعی از تفسیر نتایج زمین‌شناسی، مسایل هیدرولیکی رودخانه (از نظر تغییر خصوصیات مواد رسوبی، تاثیر شاخه‌های فرعی ورودی و غیره) و بررسی‌های صحرایی در تشخیص مواضع فرسایشی، اهمیت موضعی و غیره است. در هرحال، برداشت اطلاعات با فاصله ۵۰ تا ۳۰۰ متر و حداکثر به‌فاصله دو کیلومتر از یکدیگر توصیه می‌شود [۳۷]. عمق گمانه‌ها بستگی به ضخامت آبرفت، نوع و ابعاد سازه‌های حفاظتی پیشنهادی (آبشکن‌ها) و حداکثر عمق احتمالی آبشستگی دارد. به‌طور کلی، عمق هر گمانه حداقل دو برابر عمق رودخانه یا دو برابر عرض پی آبشکن‌ها بر روی بستر و حداقل حدود ۱۰ متر می‌باشد [۳۷].

نتایج عملیات صحرایی گمانه‌های ژئوتکنیک به‌صورت تهیه لوگ زمین‌شناسی با تفسیر کیفی لایه‌های مختلف، آزمایش‌های مستقیم تعیین چگالی طبیعی و نیز آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد (SPT برای آبرفت ریزدانه و CPT برای آبرفت درشت‌دانه) در لایه‌های مختلف گزارش می‌گردد. نمونه‌های دست نخورده و یا دست خورده (از گمانه‌ها حفر شده در بستر و ساحل بالا و از دیواره‌های رودخانه) به آزمایشگاه مکانیک خاک منتقل می‌گردد. آزمایش‌های مکانیک خاک به‌شرح زیر است:

- **برای لایه سطحی و زیرسطحی بستر اصلی رودخانه با مواد غیرچسبنده:** نمونه‌برداری دست خورده برای آزمایش‌های دانه‌بندی و تعیین چگالی مواد لازم می‌باشد. در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه (شن و درشت‌تر)، نمونه‌برداری و دانه‌بندی لایه سطحی از روش شبکه سطحی- شمارش[1] انجام می‌گردد [۳۷]. در رودخانه‌های بستر ماسه‌ای و یا برای لایه‌های زیر سطحی، روش متداول نمونه‌برداری حجمی و تحلیل وزنی کفایت می‌کند.
- **برای لایه‌ها و مواد درشت‌دانه و غیرچسبنده:** نمونه به‌صورت دست خورده برداشت شده و خواص مکانیکی، مقاومت و ضرایب پایداری از روی نتایج دانه‌بندی و همچنین نتایج عملیات صحرایی به‌دست می‌آید.
- **برای لایه‌ها و مواد ریزدانه و چسبنده:** انجام آزمایش‌های کامل بر روی نمونه‌های دست نخورده ضروری می‌باشد. علاوه بر آن، بررسی شیمی خاک از نظر نوع رس و خصوصیات شیمیایی آن در تبادل یونی و پیوند آن با ذرات دیگر عامل مهمی در بررسی مقاومت یا فرسایش‌پذیری مواد چسبنده است.

شناسایی مصالح ساختمانی (رودخانه‌ای، کوهی و یا غیر رودخانه‌ای) و تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها نیز در دستور کار این بخش از مطالعات قرار دارد. آزمون‌های مختلف و استانداردهای مربوط در زیر تشریح می‌گردد:

الف- آزمون مصالح خاکی و ریزدانه

- آزمایش دانه‌بندی و طبقه بندی: استاندارد AASHTO T89، 90-81 ; ASTM D421، 422-87
- آزمایش حد روانی و خمیری: استاندارد AASHTO T87، 88-81 ; ASTM D4318-87
- آزمایش تراکم و مقاومت فشاری: استاندارد AASHTO T99-90 ; ASTM D698-78

1 –Grid-by-Number

- آزمایش تحکیم خاک C_C و C_V: استاندارد ASTM D2435-90 ; AASHTO T216-83
- آزمایش نفوذپذیری: استاندارد ASTM D2434-87 ; AASHTO 215-81
- آزمایش تعیین رطوبت طبیعی: استاندارد AASHTO T265-81 ; ASTM 2216-90
- آزمایش تعیین ضرایب C و φ
- تعیین درصد گچ، نوع رس و درصد رس

ب- آزمون مصالح درشت‌دانه و فیلتری (شن و ماسه)

- توصیف نوع و جنس مصالح، آزمایش چگالی، و درصد جذب آب: استاندارد ASTM 854-87
- آزمایش دانه‌بندی و طبقه بندی: استاندارد ASTM D2488 ; AGU
- آزمایش تعیین ارزش ماسه‌ای: استاندارد ASTM D2419-87 ; AASHTO T176-81
- آزمایش تعیین درصد تراکم طبیعی و تراکم لرزشی

ج- آزمون مصالح سنگی

- توصیف سنگ شناسی، آزمایش چگالی، و درصد جذب آب: استاندارد ASTM 854-87
- آزمایش مقاومت سایش (درصد افت وزنی در آزمون لس آنجلس): استاندارد ASTM C131،C535
- آزمایش مقاومت شیمیایی (درصد افت وزنی در آزمون سولفات سدیم و منیزیم): استاندارد ASTM C88
- آزمایش مقاومت فشاری سنگ (در شرایط خشک و اشباع): استاندارد ASTM D2938

شرح بیش‌تر روش‌های نمونه‌برداری و تحلیل نتایج در مراجع [۲، ۵، ۷، ۸، ۳۷ و ۳۸] ارائه شده است. جزییات ارزیابی کیفیت مصالح برای ساخت آبشکن‌های در بند (۶-۲-۹) ارائه شده است. نتایج این بخش از مطالعات در بررسی پایداری طبیعی دیواره‌ها و بستر رودخانه، شناسایی مصالح ساختمانی، انتخاب نوع آبشکن‌ها، ارتفاع آبشکن، محاسبات عمق و گستره آبشستگی و عمق پی آبشکن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۲-۲-۶- بررسی هیدرولیکی

بررسی ایستگاه‌های هیدرومتری موجود بر روی رودخانه مورد نظر، به‌عنوان مقاطع کنترل (رابطه بده- ارتفاع سطح آب) و منبع تولید داده‌های بده آب- بار رسوبی و همچنین اندازه‌گیری‌های جریان آب و رسوب حداقل در یک دوره یک‌ساله و ترجیحا در دوران مطالعات و اجرای طرح ساماندهی از منابع اطلاعات صحرایی طرح به شمار می‌آید. در بازه مورد نظر، مطالعات هیدرولیکی صحرایی ممکن است شامل موارد زیر باشد [۶، ۳۵،۳۷ و ۳۸].

- نمونه‌برداری از مواد لایه سطحی و زیر سطحی بستر
- نصب اشل سطح آب در حداقل سه مقطع در طول بازه و در صورت لزوم نصب اشل اضافی در مواضع خاص (مانند پل‌ها، سرریزها و غیره) و انطباق قرائت آن با .B.M محلی

- قرائت هم‌زمان ارتفاع سطح آب در موقعیت اشل‌ها و اندازه‌گیری یا برآورد بده برای جریان‌های شاهد در یک دوره یک ساله و ترجیحا در دوران مطالعات تا پس از اجرا
- نمونه‌برداری هم‌زمان از رسوبات معلق و کف در بازه، برای تعیین خصوصیات فیزیکی مواد رسوبی و غلظت بار رسوبی معلق، کف و کل

۵-۲-۳- تجزیه و تحلیل اطلاعات

در این مرحله، مجموعه اطلاعات موجود و اطلاعات صحرایی برداشت شده در هر یک از موارد فوق از نظر کمیت و کیفیت ارزیابی شده و نامطمئنی‌های موجود تعیین می‌گردد. این اطلاعات مبنای مطالعات پایه در بخش بعدی خواهد بود.

به‌طور مثال باید توجه داشت که عکس‌های هوایی بهتر از نقشه‌های زمینی جزییات زمین را نشان داده و با هزینه و زمان کم‌تر و نیز با تناوب بیش‌تری فراهم می‌باشند. انطباق عکس‌های هوایی و نقشه‌های زمینی موجود بر روی یک نقشه مادر (با یک مقیاس، ترجیحا ۱:۱۰۰۰۰)، اطلاعات خوبی از شرایط ریخت‌شناسی بازه مورد نظر در گذشته، شدت پایداری بازه و یا تاثیر حوادث پیشین (مانند سیلاب‌های شاهد) را ارائه می‌دهد. اما خطای مقیاس در تبدیل عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای به نقشه باید در نظر گرفته شود. همچنین تغییرات جزیی در ابعاد و هندسه رودخانه قابل تشخیص نبوده و مقایسه عکس‌ها در شرایط سیلابی و کم آبی گاهی گمراه کننده است مگر آن‌که چندین سری متوالی عکس‌ها با تناوب زمانی مناسب فراهم باشد.

۵-۳- مطالعات پایه و تخصصی

مجموعه بررسی‌های زیر به‌عنوان مطالعات پایه و تخصصی در طرح ساماندهی باید مورد نظر قرار گیرد:

- بررسی وضعیت بهره‌برداری از بازه رودخانه مورد نظر
- بررسی وضعیت کاربری اراضی ساحلی بازه مورد نظر
- بررسی ارزش‌های رودخانه‌ای در بازه مورد نظر (زیست محیطی، کشاورزی، صنعتی، شرب، کشتیرانی، گردشگری، تفریحی و زیبایی)
- بررسی اهمیت منطقه‌ای، ملی، محلی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی بازه مورد نظر
- توجیه عمومی طرح ساماندهی از جهات مختلف
- بررسی ریخت‌شناسی شامل: نوع رودخانه (کوهستانی، نیمه کوهستانی، سیلابدشتی، مستقیم، مارپیچی، شریانی)، نوع مواد بستری (بستر ماسه‌ای، شنی، قلوه‌سنگی و تخته سنگی)، فرم‌های مختلف بستری (بار رسوبی، جزایر، تل‌ماسه و غیره)، شکل مقطع عرضی (مقطع ساده، مقطع مرکب)، عوامل تغییرات ریخت‌شناسی و شدت تاثیر آنها، تغییرات ریخت‌شناسی در دوران گذشته، بررسی پایداری بازه
- بررسی هیدرولوژیکی شامل آورد رودخانه و شدت تغییرات آن، سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف، شدت تغییرات سیلاب‌های متوالی رودخانه
- بررسی خصوصیات مواد بستری (سطحی و زیر سطحی) و دیواره‌های رودخانه شامل: دانه‌بندی، تخلخل، چگالی، تراکم طبیعی، چسبندگی و دیگر پارامترها و تغییرات آن در طول بازه

- بررسی هیدرولیکی شامل: تغییرات عمق در مقطع عرضی، نیمرخ سطح آب در طول بازه، تغییرات عرض، تغییرات سرعت متوسط در عرض و طول بازه، تنش برشی و یا توان رودخانه و تغییرات آن در طول بازه، مقاومت و زبری بستر و دیواره‌ها، ارزیابی ضریب زبری، ضریب توزیع سرعت، سرعت متوسط، شدت تلاطم و دیگر عوامل هیدرولیکی، ارزیابی ظرفیت انتقال جریان در بازه
- بررسی رسوب شامل: پتانسیل رسوب خیزی حوضه آبریز، پتانسیل انتقال رسوب در بازه رودخانه، بار رسوب معلق، بار رسوب کف، بار رسوب کل و خصوصیات مواد بار رسوبی
- بررسی کیفی و زیست محیطی شامل: کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی آب، پتانسیل‌های آلودگی طبیعی، پتانسیل آلودگی‌های دست ساز
- بررسی سازه‌های موجود در سامانه رودخانه و سازه‌های فراساحلی
- بررسی اطلاعات صحرایی و پایه لازم برای مرحله طراحی و نیز جهت ارزیابی و واسنجی مدل‌های فیزیکی و ریاضی در مطالعات تکمیلی در آینده

۵-۴- تبیین اهداف ساماندهی

اهداف خاص ساماندهی در بازه مورد نظر می‌تواند براساس فهرست اهداف مندرج در بند (۲-۳) و با توجه به مطالعات پایه، توجیه، تبیین، بازبینی و نهایی گردد. ساماندهی رودخانه باید در راستای توسعه پایدار سامانه رودخانه در محدوده وسیع‌تر و به‌ویژه در بازه مورد نظر باشد. به‌طوری‌که اثرهای منفی و یا ناخواسته بر بازه‌های بالادست و پایین دست بر کاربری‌های موجود و بر نظام طبیعی و قانونی حقابه برآن نداشته و از نظر زیست محیطی نیز قابل قبول باشد.

۵-۵- تعیین جریان‌های شاخص

جریان‌های شاخص یا بده‌های طرح ساماندهی با توجه به مطالب بند (۲-۵) به‌طورکلی شامل سه بخش زیر است:

- بده جریان متوسط کم آبی (برای حفاظت پنجه و دیواره پایین رودخانه)
- جریان غالب (یا سیلاب متناوب برای حفاظت سطح دیواره مجرای اصلی رودخانه)
- سیل طرح با دوره برگشت مناسب (برای حفاظت سامانه رودخانه اصلی و سیلابدشت رودخانه)

درصورتی‌که ایستگاه آب سنجی در محدوده بازه مورد مطالعه موجود باشد، با روش‌های معمول می‌توان برآورد دقیقی از بده‌های مورد نظر فوق را ارائه داد. درصورتی‌که محدوده فاقد ایستگاه آب سنجی باشد، باید از روش‌های تحلیل منطقه‌ای به برآورد بده‌های شاخص مبادرت نمود.

سیل طرح با دوره بازگشت مناسب، با توجه به اهمیت پروژه، اندازه رودخانه و رژیم جریان تعیین می‌شود. عموما سیل با دوره برگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰و۵۰۰ ساله تعیین شود. ضوابط انتخاب بده سیل حداکثر طرح در فصل بعدی بند (۶-۲-۶-۱) ارائه شده است. به‌طورکلی انتخاب حداکثر سیل ۲۵ تا ۱۰۰ ساله می‌تواند مدنظر قرار گیرد. توصیه می‌شود که اگر سیل طرح معادل سیل ۵۰ ساله در نظر گرفته شود، ایمنی طرح برای یک سیل بزرگ‌تر (مثلا ۱۰۰ ساله) کنترل گردد [۳۷].

۵-۶- طرح اصلاح مسیر بازه رودخانه

در مقایسه با دیگر روش‌ها و سازه‌های رودخانه‌ای، بیش‌ترین حمله جریان در مراحل اولیه مستقیما متوجه آبشکن‌ها است که اگر شرایط کارکرد مناسب را نداشته باشند نه تنها به‌شدت آسیب‌پذیر بوده، بلکه اثرهای زیان‌بار آن نیز شدیدتر از دیگر روش‌ها خواهد بود. تجربیات رودخانه‌ای نشان می‌دهد که کارهای موضعی و با اهداف محدود و بدون توجه به اصلاح مسیر بازه رودخانه و اطمینان از هدایت جریان در یک بستر مناسب به‌موازات دیواره‌های رودخانه، عموما منجر به بروز مشکلات بیش‌تر شده است. نمونه بارز این مشکلات عبارت از کف کنی بستر در بازه آبشکن‌ها، رسوب‌گذاری در مواضع دیگر، تغییر مواضع حمله جریان، تخریب سریع اولین و آخرین آبشکن، تشدید تخریب دیواره‌ها و آسیب‌های دیگر خواهد بود.

گزینش و جانمایی آبشکن‌ها در یک بازه رودخانه‌ای نیاز به اطمینان از پایداری دینامیکی بازه مورد نظر و نیز اطمینان از حداقل تاثیرات بر سامانه طبیعی و موجود رودخانه در طول گسترده‌تری دارد. عدم توجه به ساماندهی جریان در بازه مورد نظر به‌معنای پیش‌بینی شکست طرح خواهد بود.

ساماندهی و اصلاح مسیر بازه رودخانه با توجه به موارد زیر باید مورد نظر قرار گیرد:

- انتخاب اهداف خاص طرح (بند ۲-۲)
- راهنمای عمومی انتخاب روش‌های مناسب ساماندهی (بند ۲-۳)
- رعایت دقیق ضوابط اصلاح مسیر (بند ۲-۴)

برای این منظور، عکس‌ها و نقشه‌های توپوگرافی، بازدیدهای صحرایی و مجموعه مطالعات پایه (بند ۵-۳) برای طرح مقدماتی اصلاح مسیر بازه مورد استفاده خواهد بود.

طرح نهایی اصلاح مسیر بازه مورد نظر با توجه به مراحل زیر ارائه می‌گردد:

- تعیین راستای مناسب رودخانه، تعدیل شیب عمومی بستر، میانبری پیچ‌های تند در صورت لزوم، بهسازی بستر جریان، هدایت جریان در میانه مجرای اصلی رودخانه و ابعاد پایدار هندسی (عرض، عمق، شعاع انحنای پیچ‌ها، مشخصات مارپیچ) در بازه (براساس مطالب بند ۲-۴)
- ارزیابی پایداری بازه اصلاح مسیر شده در مجرای اصلی، حریم بستر و در سیلابدشت رودخانه (بند ۴-۴-۲)
- بررسی ریخت‌شناسی تاثیر طرح اصلاح مسیر بر روی بازه مورد نظر و نیز بر بازه‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه (مطالب فصل ۴)
- ارائه طرح پایدار اصلاح مسیر بازه با حداقل تاثیرات منفی و قابل قبول از نظر زیست محیطی
- محاسبات هیدرولیکی جریان آب و انتقال رسوب در بازه اصلاح مسیر شده (در سه نوع جریان‌های شاخص بند ۵-۵)

۵-۷- ارزیابی تناسب کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه

آبشکن‌ها با اهداف مختلف و در شرایط مختلف بازه‌های رودخانه‌ای (کوهستانی تا سیلابدشتی، مستقیم تا شریانی تا مارپیچی، در مجرای اصلی و یا در بستر کبیر سیلابدشت رودخانه، در کناره‌های با راستای مستقیم یا منحنی، در دیواره‌های خارجی یا داخلی

پیچ‌ها)، و به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهرحال، انتخاب آبشکن‌ها در ساماندهی یک بازه مورد نظر نیاز به بررسی و ارزیابی مراحل زیر دارد:

- بررسی قابلیت کاربرد آبشکن‌ها براساس نوع و شرایط رودخانه، اهداف ساماندهی، پایدارسازی بازه رودخانه
- بررسی مزایا و معایب کاربرد آبشکن‌ها در بازه مورد نظر (بند ۳-۵)
- بررسی انواع آبشکن‌ها و تناسب کاربرد هر یک از انواع مختلف (بند ۳-۳ و ۶-۲ و جدول ۵-۱)
- بررسی مصالح موجود، مسایل فنی و اجرایی، جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی در انتخاب نوع و مصالح آبشکن‌ها
- مقایسه آبشکن‌ها از جهات فنی و اجرایی (پایداری، انعطاف‌پذیری، سهولت اجرا، سادگی نگهداری و بازسازی)، اقتصادی (تحلیل هزینه‌ها- منافع) و زیست محیطی (همراستا با اکولوژی و زیست بوم سامانه رودخانه)، با گزینه‌های دیگر اصلاح مسیر در بازه مورد نظر (مانند روش‌های حفاظت مستقیم و پیوسته دیواره‌ها، و روش‌های آرام کننده جریان در کناره‌ها)
- ارزیابی نهایی تناسب کاربرد آبشکن‌ها و انتخاب نوع و یا انواع مناسب آبشکن‌ها در بازه مورد نظر

جدول (۵-۱) به‌عنوان راهنمای ارزیابی و انتخاب گزینه برتر و به‌ویژه گزینش آبشکن برتر در طرح ساماندهی بازه رودخانه مورد نظر ارائه شده است. این جدول براساس اطلاعات موجود به‌صورت یک ماتریس تصمیم‌گیری تکمیل می‌گردد. اعضای ماتریس در مرحله اول می‌تواند به‌صورت امتیازدهی کیفی تعیین گردد (علامت + برای ارزشیابی مطلوب، علامت - برای ارزشیابی نامطلوب و علامت o برای عدم امکان تصمیم‌گیری). ارزشیابی عددی برای اعضای ماتریس جدول (۵-۱) برای تصمیم‌گیری مناسب‌تر بوده و براساس تجربه تا پنج سطح عددگذاری (عدد ۱ برای درجه ضعیف یا حداقل مطلوبیت و عدد ۵ برای درجه عالی یا حداکثر مطلوبیت) می‌تواند انتخاب شود.

۵-۸- طراحی وجانمایی آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه

طراحی آبشکن‌ها در ساماندهی یک بازه رودخانه، به‌طور کلی شامل چهار مرحله «طراحی مقدماتی»، «طراحی توجیهی»، «ارزیابی و بهینه‌سازی طرح یا مدل‌سازی» و سرانجام «طراحی نهایی» است. شرح تفصیلی این مراحل به‌ترتیب در زیر ارائه می‌گردد:

۵-۸-۱- طرح مقدماتی آبشکن‌ها

طراحی و جانمایی آبشکن‌ها در بازه مورد نظر با رعایت مراحل پیشین و براساس اطلاعات و مطالعات پایه زیر به‌صورت مقدماتی انجام می‌یابد.

- نقشه پلان و مقاطع از بازه اصلاح مسیر شده
- هیدرولیک جریان آب (نیمرخ سطح آب، توزیع عمق، عرض، سرعت، تنش برشی و غیره) و انتقال رسوب در بازه اصلاح شده در سه بده شاخص طرح اصلاح مسیر بازه
- پارامترهای مکانیک خاک و ژئوتکنیک از مواد بستری و دیواره‌های رودخانه
- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح قرضه و ساختمانی (برای پی، بدنه، فیلتر و روکش آبشکن‌ها)
- عوامل غیرفنی (اقتصادی، مقبولیت اجتماعی و محلی، زیست محیطی و غیره)
- ضوابط و استانداردهای طراحی آبشکن‌ها

- جانمایی آبشکن‌ها در بازه مورد نظر

جانمایی آبشکن‌ها با توجه به اطلاعات و مراحل فوق، به‌طورکلی شامل موارد زیر است:

- انتخاب نوع و یا انواع مناسب آبشکن‌ها در بازه مورد نظر
- تعیین نوع مصالح ساخت آبشکن (برای پی، بدنه، فیلتر و روکش آبشکن‌ها)
- آرایش آبشکن‌ها (در دو طرف ساحل یا در یک طرف رودخانه)
- شکل ظاهری آبشکن‌ها در پلان
- راستای آبشکن نسبت به جریان
- تعیین موقعیت اولین و آخرین آبشکن
- تعداد آبشکن‌هایی که باید ساخته شوند و فاصله بین آبشکن‌ها
- طول هر یک از آبشکن‌ها (پیشروی آبشکن‌ها به میانه رودخانه)
- ارتفاع آبشکن‌ها در ارتباط با کارکرد مورد نظر (مستغرق یا غیرمستغرق) و سیل حداکثر طرح
- پتانسیل آبشستگی (عمومی و موضعی) و ضرورت حفاظت پی آبشکن
- طرح پایدار آبشکن (ریشه، بستر و پی، بدنه، دماغه و روکش) و ابعاد هندسی آبشکن (عرض و ارتفاع تاج و شیب جانبی)

جدول ۵-۱- راهنمای تصمیم‌گیری و انتخاب گزینه برتر حفاظتی و گزینش آبشکن برتر در طرح ساماندهی بازه رودخانه

عوامل موثر فیزیکی و هیدرولیکی													
انواع آبشکن	قابلیت استفاده در رودخانه دایمی	قابلیت استفاده در آب‌های عمیق	قابلیت استفاده در رودخانه با مواد بستری درشت‌دانه	قابلیت استفاده در رودخانه با بار رسوبی کم	قابلیت انطباق با اهداف مورد نظر	قدرت انحراف جریان	ظرفیت انتقال سیلاب	اثرهای منفی هیدرولیکی بر بازه بالادست و پایین‌دست	اثرهای منفی ریخت‌شناسی در بازه و بر بازه بالادست و پایین‌دست	مقاومت در برابر عوامل فیزیکی و هیدرولیکی	مقاومت در برابر مواد جامد شناور	انعطاف‌پذیری سازه‌ای	مقاومت در برابر آبشستگی
مستقیم													
غیرمستقیم													
دافع													
عمودی													
جاذب													
تاج افقی													
تاج شیب‌دار													
تاج پلکانی													
مستغرق													
سنگ‌ریزه‌ای													
تورسنگی													
کیسه‌ای													
مصالح دیگر													
گزینه‌های دیگر حفاظتی													

ادامه جدول ۵-۱- راهنمای تصمیم‌گیری و انتخاب گزینه برتر حفاظتی و گزینش آبشکن برتر در طرح ساماندهی بازه رودخانه

عوامل موثر اجرایی اجتماعی اقتصادی زیست محیطی زیبا شناختی پایش و نگهداری											سایر ملاحظات
انواع آبشکن	سهولت دسترسی و تامین مصالح	سهولت اجرا در رودخانه	سرعت اجرا در رودخانه	مقبولیت روش در عمل	توجیه اقتصادی هزینه و منافع	اکولوژی و همزیستی	زیست بوم رودخانه و سیلابدشت	چشم‌انداز و زیبایی طرح	نیاز به ترمیم و بازسازی	سهولت ترمیم و بازسازی	ملاحظات خاص رودخانه‌های مرزی، رودخانه‌های شهری اهمیت طرح
مستقیم											
غیرمستقیم											
دافع											
عمودی											
جاذب											
تاج افقی											
تاج شیب‌دار											
تاج پلکانی											
مستغرق											
سنگ‌ریزه‌ای											
تورسنگی											
کیسه‌ای											
مصالح دیگر											
گزینه‌های دیگر حفاظتی											

۵-۸-۲- طرح توجیهی آبشکن‌ها

طرح مقدماتی جانمایی آبشکن‌ها در بازه مورد نظر، لازم است با توجه به موارد زیر مجددا مورد ارزیابی، تجدید نظر احتمالی و تکمیل قرار گیرد.

- ارزیابی مجدد محدودیت‌های فنی و اجرایی، مصالح و روش‌های ساختمانی و شرایط خاص رودخانه در اجرا و ساخت آبشکن‌ها
- بررسی مجدد اثرهای ریخت‌شناسی و کارکرد آبشکن‌ها در آرایش پیشنهادی
- اصلاح آرایش آبشکن‌ها در صورت لزوم (از نظر راستا، زاویه، فاصله، شکل دماغه و...)
- بررسی لزوم ترکیب روش‌ها و یا گزینه‌های دیگر برای پایداری بازه، ترمیم‌های موضعی و کارایی بهتر آبشکن‌ها (نظیر اصلاح موضعی ارتفاع دیواره‌های رودخانه با احداث دیواره‌های ساحلی، هدایت موضعی جریان و یا مقاوم‌سازی موضعی آبشکن‌ها با احداث دیواره‌های هادی و پایدارسازی دیواره رودخانه در بالادست اولین آبشکن و در پایین‌دست آخرین آبشکن با استفاده از روش‌های حفاظت مستقیم دیواره‌ها) و طرح سازه‌های تکمیلی براساس ضوابط و استانداردهای موجود
- ارزیابی مجدد زیست محیطی و ارائه راهکارهای اصلاحی برای کاهش و یا حذف اثرهای منفی
- طرح جزییات آبشکن (ریشه، پی، بدنه، روکش، پنجه و...)
- طرح سامانه انحراف آب رودخانه یا تمهیدات دیگر برای ساخت آبشکن‌ها
- طرح دسترسی، استقرار و تجهیز کارگاه
- تحلیل اقتصادی و عمومی و توجیه طرح (با توجه به اهمیت چندجانبه طرح و محدودیت‌ها و انتظارات)
- زمان‌بندی مراحل اجرای طرح
- متره و برآورد هزینه طرح (در مراحل مختلف اجرا و در کل پروژه)

۵-۸-۳- ارزیابی و بهینه‌سازی طرح آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه

طرح مقدماتی و یا توجیهی ساماندهی رودخانه با آبشکن‌ها با استفاده از دانش فنی موجود و تجربیات مهندسی در پروژه‌های مشابه ارائه می‌شود. ازاین‌رو ریسک‌پذیری و نامطمئنی‌های کارکرد طرح پیشنهادی در شرایط رودخانه مورد نظر دور از انتظار نیست. با توجه به اهمیت و ابعاد پروژه ساماندهی، پیچیدگی شرایط طبیعی، اجتماعی، زیستی و ملی، نامطمئنی‌ها و درجه ریسک‌پذیری طرح، هزینه و زمان کل پروژه، ممکن است برای مطالعات تکمیلی از راهکارهای مدل‌سازی به روش‌های زیر استفاده گردد:

- ساخت و مطالعه بر روی مدل فیزیکی رودخانه با مقیاس مناسب
- کاربرد مدل‌های ریاضی در شبیه‌سازی جریان رودخانه
- کاربرد ترکیبی مدل‌های ریاضی و فیزیکی برای بهینه‌سازی مطالعات رودخانه‌ای

در ارزیابی و بهینه‌سازی طرح ساماندهی رودخانه با آبشکن‌ها، به‌طور کلی جزییات و موارد زیر مورد بررسی و تجدید نظر قرار می‌گیرد:

- ارزیابی الگوی جریان در مجرای اصلی و در میدان آبشکن‌ها

- پتانسیل فرسایش و یا رسوب‌گذاری در بازه و میدان آبشکن‌ها
- تاثیرات احتمالی احداث آبشکن‌ها بر روی دیواره مقابل و در بازه‌های بالادست و پایین دست
- اصلاح آرایش و آزمون گزینه‌های دیگر جانمایی آبشکن‌ها (راستا، زاویه، فاصله، طول، شکل دماغه و غیره)
- اصلاح ابعاد هندسی آبشکن‌ها (ارتفاع، شیب تاج، شیب جانبی، سکوبندی و غیره)
- بررسی ترکیب روش‌ها و یا گزینه‌های دیگر برای پایداری بازه، ترمیم‌های موضعی، و کارایی بهتر آبشکن‌ها

۵-۸-۴- طرح نهایی آبشکن‌ها در ساماندهی بازه رودخانه

طرح نهایی ساماندهی بازه رودخانه مورد نظر با توجه به مشخصات طرح توجیهی، مراحل ارزیابی و بهینه‌سازی طرح، و با بررسی‌های جامع فنی، مهندسی و اجرایی، و با توجه به توجیهات اقتصادی، مقبولیت اجتماعی و ملاحظات زیست محیطی تهیه و ارائه می‌گردد.

طرح ساماندهی نهایی بازه باید حداقل شامل جزییات و موارد زیر باشد:

- ارزیابی عوامل طراحی نهایی (مانند: عمق، عرض، سرعت جریان، تنش برشی، عمق و گستره آبشستگی)
- نقشه جانمایی طرح آبشکن‌ها (پلان و مقاطع)
- نوع مصالح و روش ساخت
- طرح پایدار آبشکن‌ها (شامل ابعاد هندسی آبشکن، عمق پی، شیب‌های جانبی، جزییات ریشه آبشکن و اتصال به دیواره، طرح حفاظت دماغه و پنجه آبشکن، طرح بدنه آبشکن و روکش حفاظتی، فیلتر و غیره)
- طرح ترکیب روش‌ها و یا گزینه‌های تکمیلی جهت کارایی بهتر آبشکن‌ها (مانند احداث دیواره‌های ساحلی، احداث دیواره‌های هادی، روش‌های حفاظت مستقیم دیواره‌ها، حفاظت و تثبیت زیستی تاج آبشکن، سطح دیواره طبیعی رودخانه، میدان حدفاصل آبشکن‌ها، حریم و ساحل بالای رودخانه)
- نقشه بستر سازی، حفر ترانشه دیواره رودخانه، کف بستر و محدوده پنجه آبشکن‌ها و دیگر سازه‌های تکمیلی
- طرح سامانه انحراف آب رودخانه برای ساخت
- راه دسترسی، کمپ مسکونی و تجهیز کارگاه
- زمان بندی اجرا و ساخت
- متره و برآورد کار (در مراحل مختلف اجرا و در کل پروژه)
- ارائه نقشه‌های اجرایی
- تهیه و تنظیم اسناد مناقصه طرح

متناسب با اهمیت و ابعاد پروژه ساماندهی، ممکن است مراحل سه‌گانه فوق با عناوین «طراحی توجیهی»، «ارزیابی و بهینه‌سازی طرح یا مدل‌سازی» و «طراحی نهایی» در یکدیگر ادغام گردیده و به‌صورت مرحله «طرح نهایی آبشکن‌ها» ارائه گردد.

۵-۹- زمان‌بندی اجرای طرح

بازه زمانی کار و برنامه زمان‌بندی مراحل مختلف ساخت آبشکن‌ها در رودخانه براساس شرایط جریان رودخانه، تامین ایمنی لازم در اثر احتمال وقوع سیلاب و حوادث پیش‌بینی نشده در بازه زمانی ساخت، کم‌ترین تاثیرات منفی بر سامانه حیاتی رودخانه و نیاز بهره‌برداران، و بهینه‌سازی عملیات اجرا باید تعیین گردد.

راهنمای عمومی عملیات اجرایی ساخت آبشکن‌ها در رودخانه به‌صورت جدول (۵-۲) ارائه شده است. تنظیم دقیق برنامه اجرایی و انجام عملیات مطابق با برنامه زمان‌بندی در استفاده بهینه از نیروها، انرژی، و ماشین‌آلات و در نتیجه در کاهش هزینه‌ها موثر می‌باشد. در تنظیم این برنامه، توجه به مجموعه امکانات و محدودیت‌های طبیعی، زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی اجتناب‌ناپذیر است. به‌طور کلی، برنامه کار با رویکرد مرحله‌ای با رعایت اصول و ترتیب کار می‌تواند از آسیب پروژه در حدفاصل دو مرحله ساخت بکاهد و حتی امکان اجرای طرح را در یک یا چند سال فراهم سازد. درحالی‌که، اجرای ناقص پروژه و تکمیل آن در مراحل بعدی و هنگام بهره‌برداری عموما ناموفق بوده و نباید مورد نظر قرار گیرد. برنامه زمان‌بندی اجرای کار ابتدا توسط مشاور تهیه و در اسناد مناقصه ارائه می‌گردد.

جدول ۵-۲- راهنمای عمومی برنامه زمان‌بندی عملیات اجرایی ساخت آبشکن‌ها در رودخانه

زمان (سال/ ماه)	سال				
عملیات طرح	۱	۲	۳	۴	۵
اخذ مجوز مالکیت اراضی مربوط به راه‌های دسترسی و محدوده کارگاه					
اخذ مجوز زیست محیطی احداث راه‌های دسترسی و محدوده کارگاه					
اجرای راه‌های دسترسی و تجهیز کارگاه					
آماده‌سازی منابع قرضه برای برداشت					
انحراف آب و یا خشک انداختن محل احداث آبشکن‌ها					
پاکسازی و بهسازی بستر بازه رودخانه					
حفاری های بستر (آماده‌سازی بستر ساخت، حفاری پی، ترانشه پنجه و ریشه آبشکن‌ها)					
حفاظت ترانشه پنجه و ریشه آبشکن‌ها					
ساخت بدنه آبشکن‌ها					
حفاظت روکش بدنه آبشکن‌ها					
اصلاح شیب دیواره رودخانه و ارتفاع ساحل بالای رودخانه					
حفاظت حریم رودخانه از عوامل بیرونی					
نصب ابزار پایش					
برداشت خاکریزهای انحراف آب و بهسازی بستر بازه رودخانه					
برچیدن کارگاه					
تحویل پروژه (اتمام کار)					

۵-۱۰- متره و برآورد

براساس نقشه‌های اجرایی طرح ساماندهی رودخانه با آبشکن‌ها، احجام کار (متره) توسط مشاور تعیین می‌گردد. سپس با توجه به فهرست بهای مرتبط با کار مورد نظر، قیمت واحد کار (قیمت پایه) برآورد می‌گردد. در نهایت با توجه به شرایط خاص کار در سامانه رودخانه در منطقه مورد نظر و توجه به موارد زیر هزینه انجام پروژه برآورد می‌گردد:

- استفاده از آخرین فهرست بهای آبیاری و زهکشی و در صورت نیاز استفاده از آیتم‌های باند فرودگاه یا ژئوتکنیک و مکانیک خاک
- اعمال ضرایب منطقه‌ای، ضرایب صعوبت کار در رودخانه (برای شرایط و مراحل کار در زیر آب، بالای آب، و در خشکی، در فصل خشک یا در دوره جریان آب)، ضرایب تجهیز و برچیدن کارگاه
- احتساب هزینه کاربرد ماشین‌آلات و یا عملیات خاصی که در فهرست بها دیده شده یا نشده مانند نیاز به شناور و قایق در شرایط کار در جریان آب، پمپاژ جهت انحراف و خشک‌سازی بستر کار، تکنولوژی کار در زیر آب و غیره

سرانجام، مجموعه اسناد مناقصه (شامل نقشه‌های اجرایی، متره و برآورد، زمان‌بندی اجرای کار، پیمان عمومی و پیمان خصوصی) از سوی مشاور به کارفرما جهت تایید ارائه می‌گردد. تصویب اعتبار کل پروژه و تامین بودجه متناسب با برنامه زمان‌بندی (و با پیش‌بینی لازم برای حوادث محتمل رودخانه‌ای)، نقش کلیدی در اجرای موفق طرح آبشکن‌های رودخانه‌ای دارد.

۵-۱۱- طرح و برنامه اجرا و ساخت سامانه آبشکن‌ها

در اجرای طرح ساماندهی بازه رودخانه مورد نظر، جزییات مراحل «آماده‌سازی کارگاه»، «انحراف آب رودخانه»، «بسترسازی»، و «ساخت آبشکن‌ها و دیگر گزینه‌های تکمیلی» همراه با «تعهدات کارفرما در تامین خدمات فنی و غیرفنی» و نیز «زمان‌بندی اجرای کار و تقاضای هزینه»، باید در شرح خدمات فنی پروژه و در شرایط پیمان خصوصی و نیز در اسناد مناقصه تهیه و ارائه گردد.

شرح تفصیلی برنامه اجرا و ساخت سامانه آبشکن‌ها (و یا دیگر گزینه‌های تکمیلی) در فصل (۷) ارائه شده است.

۵-۱۲- طرح پایش آبشکن‌ها

طرح پایش و ارزیابی کارکرد سامانه آبشکن‌ها برای ایمنی طرح ضروری است. شرح تفصیلی طرح و برنامه پایش سامانه آبشکن‌ها (و یا دیگر گزینه‌های تکمیلی) در فصل (۸) ارائه شده است. اهداف و ابزار اصلی طرح پایش به‌طور خلاصه شامل موارد زیر می‌باشد:

- ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها متناسب با اهداف مورد نظر، در طول عمر مفید پروژه و با توجه به محدوده ریسک مورد انتظار طرح
- کنترل مبانی طراحی آبشکن‌ها، شامل ضوابط و عوامل طرح (فاصله، طول، ارتفاع تاج، عمق آبشستگی، عمق ریشه آبشکن‌ها و غیره) و اثرهای ریخت‌شناسی، زیست محیطی، اجتماعی طرح بر روی رودخانه و در جامعه محلی
- بهبود و اصلاح ضوابط و استانداردهای طراحی، و پیش‌بینی اثرهای اکولوژیکی، ریخت‌شناسی و هیدرولیکی
- ابزاربندی طرح پایش به‌صورت نصب وسایل اندازه‌گیری سطح آب، عمق فرسایش و رسوب‌گذاری و شدت تخریب ساحل رودخانه، اندازه‌گیری‌های ادواری از الگوی جریان در میدان تاثیر آبشکن‌ها و بازدیدهای ادواری (فصلی، بعد از سیلاب، پیرو گزارش‌های محلی) و تهیه گزارش و عکس
- تامین اطلاعات لازم برای واسنجی و تایید مدل فیزیکی بازه مورد نظر و یا مدل‌های ریاضی

۵-۱۳- طرح بهره‌برداری و نگهداری از آبشکن‌ها

پس از ساخت و اجرای سامانه آبشکن‌ها (و یا دیگر گزینه‌های تکمیلی) در بازه مورد نظر، برنامه نگهداری از این سامانه برای کارکرد مناسب آبشکن‌ها (منطبق بر اهداف طرح) لازم و ضروری است. اقدامات ضروری برای بهره‌برداری و نگهداری آبشکن‌ها به تفصیل در فصل (۸) ارائه شده است.

فصل ۶

طراحی آبشکن‌ها

۶-۱- کلیات

علیرغم کاربرد گسترده آبشکن‌ها در رودخانه‌های جهان، هنوز ضوابط عمومی برای طراحی مطمئن آبشکن‌ها ارائه نشده و کاربرد نتایج تجربی و نیمه‌تجربی موجود برای شرایط محدودی توصیه شده است. راهکار اصلی در طراحی آبشکن‌ها استفاده از دانش علمی، فنی و تجربیات موجود جهانی همراه با قضاوت مهندسی است [۱۴۷ و ۱۵۰].

مهم‌ترین عوامل در طراحی آبشکن‌ها به‌ترتیب زیر است.

- شکل ظاهری آبشکن در پلان
- امتداد آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان
- اتصال ریشه آبشکن در دیواره رودخانه
- طول و فاصله آبشکن‌ها
- آرایش آبشکن‌ها
- ارتفاع تاج آبشکن
- شکل مقطع طولی و عرضی آبشکن
- عمق و گستره آبشستگی عمومی در بازه ساماندهی و آبشستگی موضعی پیرامون آبشکن‌ها
- طرح پایدار سازه آبشکن (ریشه، بدنه، روکش و پنجه)

ضوابط و راهنمای موجود در طراحی عوامل فوق به‌ترتیب در زیر ارائه می‌گردد:

۶-۲- عوامل و ضوابط طراحی آبشکن‌ها

۶-۲-۱- شکل ظاهری آبشکن در پلان

آبشکن‌ها براساس نمای ظاهری در سطح افق، به انواع گوناگون: مستقیم، مستقیم با دماغه گرد، مستقیم با دماغه فارسی بر، L شکل یا سرکج، T شکل یا سرسپری، چوگانی[1] یا قلاب شکل یا چنگکی[2]، چوگانی معکوس، و باله‌ای[3] تقسیم می‌شوند [۱۰۴ و ۱۰۷]. انواع آبشکن‌ها قبلا در شکل‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) نشان داده شده است. تصاویری از آبشکن‌های مستقیم، L شکل و T شکل در شکل (۶-۱) نمایش داده شده است.

آبشکن مستقیم با امتداد مستقیم و با زاویه مشخصی نسبت به راستای عمومی جریان یا دیواره رودخانه (زاویه θ در شکل۳-۱۰) قرار می‌گیرد. جهت حفاظت در برابر آبشستگی موضعی، عموما دماغه آنها به‌صورت دایره‌ای و گسترده ساخته می‌شود.

آبشکن L شکل یا سرکج، نقش موثرتری در انحراف جریان داشته، میزان آبشستگی موضعی در دماغه آن کم‌تر بوده و قابلیت ته نشست رسوبات در حد فاصل آبشکن‌های متوالی بیش‌تری دارد. مطابق شکل (۳-۱۰)، بدنه آبشکن در پلان به‌صورت عمودی ($\theta=90^\circ$)، بخش سر کج آن در دماغه با زاویه α بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه، و طول بخش سر کج آن (a) بین ۴۵ تا ۶۵ درصد فاصله بین

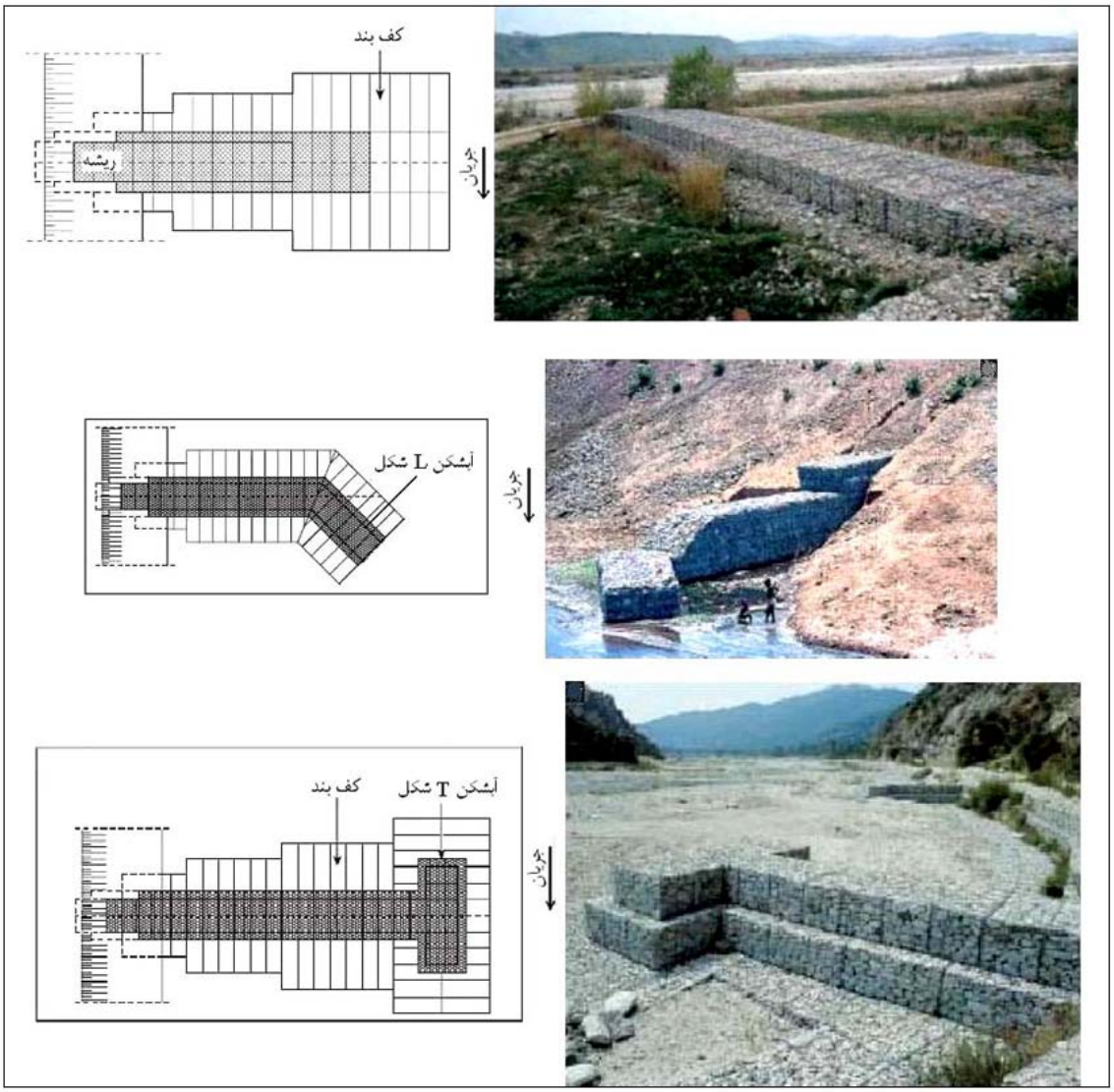
1- Hockey
2- Hooked
3- Wing/Tail

آبشکن‌های متوالی توصیه شده است [۱۰۴]. از این نوع برای هدایت جریان در بسترهای عریض، در پیچ خارجی، برای کشتیرانی و به‌عنوان اولین و آخرین آبشکن در سری متوالی آبشکن‌ها استفاده می‌گردد.

آبشکن باله‌ای مشابه نوع L شکل بوده ولی دماغه سرکج آن به‌صورت یک دیواره هادی طویل در راستای مرز کنترل ساحلی ساخته می‌شود. از این نوع برای اصلاح مسیر رودخانه‌های بزرگ با قابلیت کشتیرانی، برای هدایت جریان در بسترهای عریض شریانی، و به‌عنوان اولین و آخرین آبشکن در سری متوالی آبشکن‌ها استفاده می‌گردد.

آبشکن T شکل یا سرسپری نقش موثرتری در کنترل مرز ساحلی و هدایت جریان به‌سمت مجرای اصلی داشته و بیش‌تر برای اصلاح مسیر رودخانه‌های بزرگ با قابلیت کشتیرانی به‌کار می‌رود. مطابق شکل (۳-۱۰)، بدنه آبشکن در پلان به‌صورت عمودی ($\theta=90^{\circ}$) بوده، و زاویه دماغه سپری (α) و طول سپری (a) مشابه آبشکن نوع L شکل است. آبشکن چوگانی شبیه آبشکن L شکل بوده، ولی بخش انتهایی دماغه آن مطابق با شکل (۳-۱۰)، به‌صورت قوسی و متمایل به پایین‌دست است. درصورتی‌که قوس دماغه به‌سمت بالادست رودخانه متمایل گردد، به آن چوگانی معکوس گویند. از آبشکن‌های مستقیم با دماغه فارسی بر (در شکل ۳-۱۱)، برای توسعه هدفمند حوضچه آبشستگی جهت زیستگاه ماهیان مهاجر و ماهیگیری استفاده شده است [۱۰۴].

انتخاب گزینه‌های مناسب شکل آبشکن، بستگی به هدایت جریان رودخانه در راستای مورد نظر و قضاوت مهندسی دارد. به‌طور کلی بیش‌تر اطلاعات تئوری و تجربی موجود در زمینه طراحی، کارکرد و آبشستگی آبشکن‌های نوع مستقیم و ساده است. گستره حفره آبشستگی در نوع T شکل کم‌تر از نوع L شکل و یا مستقیم است. ولی جابجایی و تخریب دماغه سرکج و سرسپری در بیش‌تر موارد سبب تخریب آبشکن و دیواره رودخانه، و توسعه جزیره در بستر اصلی رودخانه بوده است. فرم هندسی آبشکن‌های چوگانی پیچیده‌تر بوده، گستره سطحی حفره آبشستگی آن از نوع T شکل بیش‌تر بوده و امتیاز خاصی برای آن گزارش نشده است. در طراحی ممکن است ترکیبی از شکل‌های مختلف انتخاب گردد. انتخاب آبشکن‌های مستقیم با دماغه دایره‌ای و گسترده از اطمینان بیش‌تری در طراحی برخوردار است، مگر این‌که از مدل‌های فیزیکی و ریاضی در تکمیل طراحی مقدماتی انواع دیگر آبشکن استفاده گردد. از نوع L شکل می‌توان برای هدایت جریان در بسترهای عریض، در پیچ خارجی و به‌عنوان اولین و آخرین آبشکن در سری متوالی آبشکن‌ها استفاده نمود.

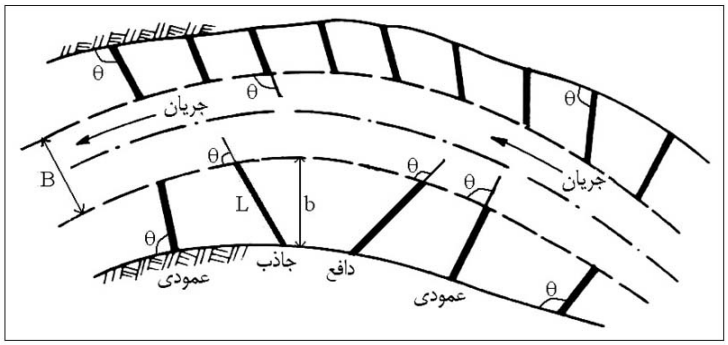


شکل ۶-۱- پلان و سیمای برخی انواع آبشکن‌های تورسنگی [۸۹]

۶-۲-۲- امتداد آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان

آبشکن‌ها از نظر آرایش زاویه قرارگیری در رودخانه و تاثیر آنها بر روی جریان رودخانه‌ای، به سه نوع «جاذب[1]»، «عمودی[2]» یا «دافع[3]»، تقسیم می‌گردند [۵۳، ۶۲ و ۱۵۰]. انواع آرایش آبشکن‌ها و زاویه امتداد بدنه آبشکن با راستای جریان یا دیواره پایین‌دست (θ)، قبلا در شکل (۳-۹) نشان داده شده است. این آرایش همچنین در شکل (۶-۲) نمایش داده شده است.

1- Attracting/ Declined
2- Normal/ Deflecting
3- Inclined/ Repelling



شکل ۶-۲- آرایش آبشکن‌های جاذب، عمودی و دافع در پلان یک رودخانه [۴۵]

آبشکن‌های عمودی، عمود بر راستای عمومی جریان رودخانه یا دیواره‌ها احداث شده ($\theta=90^\circ$)، سبب تغییر جهت جریان از سمت کناره رودخانه گردیده و در عین حال مانع از انحراف شدید جریان به‌سمت دیواره مقابل می‌گردد. آبشکن‌های عمودی در بازه‌های مستقیم و نیز برای حفاظت موضعی در برابر فرسایش به‌کار می‌روند.

آبشکن‌های جاذب، به‌سمت پایین‌دست جریان رودخانه متمایل بوده، جریان را به‌سمت خود جذب نموده و مانع از انحراف جریان به‌سمت دیواره مقابل می‌گردد. از سوی دیگر، این نوع تاثیر کم‌تری در حفاظت دیواره سمت آبشکن داشته و ممکن است که باعث حمله جریان به سمت دیواره پایین‌دست و یا ریشه آبشکن پایین‌دست گردد [۱۰۰]. زاویه تمایل آبشکن به‌سمت پایین‌دست در حدود ۱۰ درجه ($\theta=80^\circ$) مناسب است، ولی ممکن است تا ۳۰ درجه ($60^\circ<\theta<90^\circ$) نیز باشد [۶۲، ۱۰۲ و ۱۰۷]. اگر زاویه تمایل بیش از ۴۵ درجه ($\theta<45^\circ$) باشد، آبشکن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر انحراف جریان نداشته و در شرایط سیلاب‌های بزرگ‌تر به‌صورت یک سرریز عمل نموده و باعث تخریب دیواره‌ها می‌گردد [۶۲].

آبشکن‌های دافع، به سمت بالادست جریان رودخانه متمایل بوده و جریان اصلی را با قدرت از کناره رودخانه و میدان آبشکن دور نموده و سبب توسعه بیش‌تر بار رسوبی در پایین‌دست و حفاظت کناره رودخانه می‌گردد. زاویه تمایل آبشکن به‌سمت بالا دست بین ۱۰ تا ۲۰ درجه مناسب است ($100^\circ<\theta<110^\circ$)، ولی ممکن است بین ۵ تا ۳۰ درجه ($95^\circ<\theta<120^\circ$) نیز باشد [۶۲، ۱۰۲ و ۱۰۷]. زاویه بیش‌تر θ در شرایط سیلابی، ممکن است که سبب انحراف شدید جریان به‌سمت دیواره مقابل گردد.

به‌طور کلی، از نظر قدرت انحراف جریان و شدت رسوب‌گذاری در پایین‌دست، آبشکن‌های دافع بهتر عمل می‌کنند. از سوی دیگر، میزان آبشستگی پیرامون آبشکن‌های جاذب (که تمایل به پایین‌دست جریان دارند) کم‌تر بوده و سازه از پایداری طبیعی بیش‌تری برخوردار خواهد بود.

برای بازه‌های مستقیم، آبشکن‌های عمودی و در پیچ رودخانه‌ها، آبشکن‌های جاذب با زاویه تمایل کم به پایین‌دست ($80^\circ<\theta<90^\circ$) جهت سهولت هدایت جریان پیشنهاد گردیده است [۶۲، ۱۰۲ و ۱۰۷]. درصورتی‌که حمله جریان و فرسایش در محدوده دیواره خارجی پیچ شدید بوده و رسوب‌گذاری در پیچ داخلی نیز از ظرفیت انتقال جریان می‌کاهد، آبشکن‌های عمودی یا دافع توصیه می‌گردند [۵۳]. برای رودخانه‌های بستر شنی با شیب زیاد، آبشکن‌های عمودی یا جاذب (با زاویه تمایل کم به پایین‌دست) مناسب هستند [۵۳]. برای بهسازی رودخانه به‌منظور کشتیرانی، آبشکن‌های عمودی یا جاذب مناسب‌تر خواهند بود [۶۲ و ۱۵۰]. آبشکن‌های دافع برای حفاظت دیواره‌ها موثرتر ولی برای کشتیرانی نامناسب هستند. آبشکن‌های دافع در مسیر مستقیم با زاویه تمایل

($90^\circ<\theta<105\text{-}110^\circ$)، در پیچ خارجی با ($90^\circ<\theta<100^\circ$)، و در پیچ داخلی با ($100^\circ<\theta<110^\circ$) توصیه شده است. در سری آبشکن‌ها، آبشکن‌های بالادست از نوع دافع با زاویه تمایل ($\theta= 100^\circ\text{-}120^\circ$) برای تثبیت دیواره‌ها مناسب است [۱۰۴]. در شرایطی که طرح آبشکن‌های نفوذناپذیر به‌صورت مستغرق مورد نظر باشد، آبشکن‌های عمودی یا دافع (با زاویه کمی متمایل به پایین‌دست) و با ارتفاع تاج حدود یک سوم عمق جریان مورد نظر پیشنهاد گردیده است [۵۶]. جدول (۶-۱)، زاویه تمایل (θ) را برحسب توصیه‌ها و یا از نتایج طرح‌های انجام شده ارائه می‌دهد.

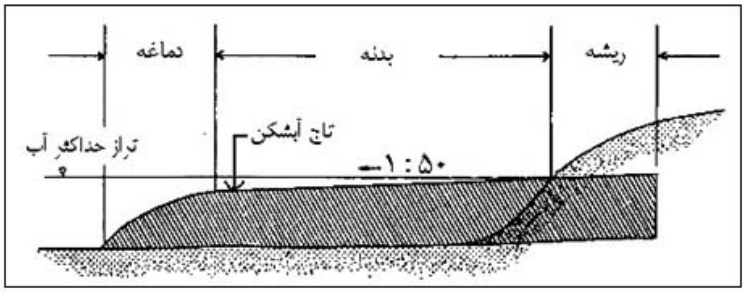
۶-۲-۳- ریشه آبشکن

یکی از عوامل اصلی ناپایداری آبشکن‌ها (و به‌ویژه آبشکن نفوذناپذیر اول) تخریب دیواره در محل اتصال آبشکن به دیواره رودخانه است. ریشه آبشکن مطابق شکل‌های (۶-۳) و (۶-۴) باید در دیواره طبیعی رودخانه یا دیواره ساحلی موجود به خوبی قفل شود تا یکپارچه عمل نماید. قفل‌شدگی آبشکن و پایداری دیواره ساحلی مانع از حمله جریان آب به ریشه آبشکن و تخریب دیواره‌ها و سامانه آبشکن‌های پایین‌دست خواهد شد.

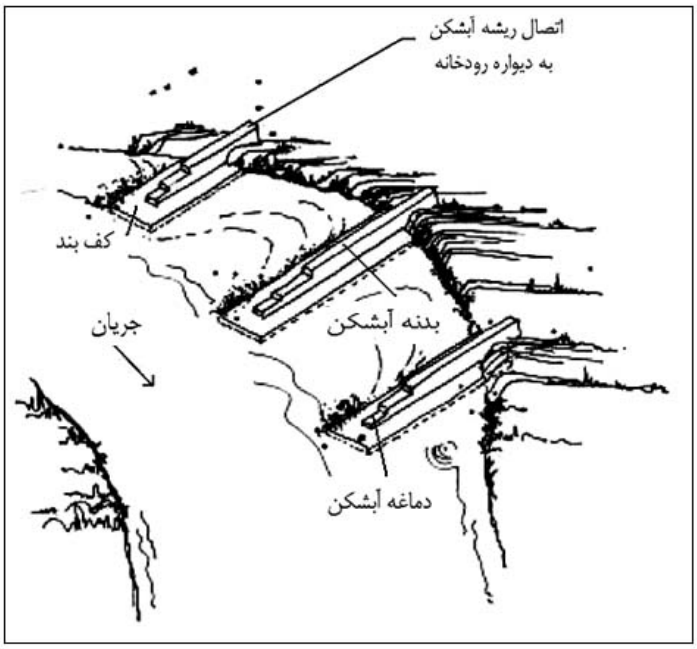
برای پایداری آبشکن، دیواره رودخانه در محدوده طولی ۲۰ تا۵۰ متر در بالادست و پایین‌دست محور آبشکن باید به‌طور طبیعی پایدار بوده و یا حفاظت گردد. طول ریشه آبشکن در دیواره رودخانه، معادل ۴-۲ متر (و حداکثر یک چهارم طول موثر آبشکن) توصیه شده است [۲۲ و ۱۱۳]. اتصال عمقی و پایداری دیواره ساحلی برای آبشکن منفرد و یا آبشکن اولی بسیار مهم می‌باشد.

جدول ۶-۱- زاویه تمایل آبشکن (θ) با توجه به شکل (۶-۲) [۴۵ و ۱۰۴]

مرجع	زاویه تمایل پیشنهادی (θ°)	ملاحظات
سازمان ملل (۱۹۵۳)	۱۰۰–۱۲۰	آبشکن‌های بالادست
مامک (۱۹۵۶)	۱۰۰–۱۱۰	
ماکورا (۱۹۶۶)	۱۱۰ ۱۰۰ ۹۰	پیچ خارجی راستای مستقیم پیچ داخلی
جاگلیکار (۱۹۷۱)	۱۰۰–۱۲۰ ۳۰–۶۰	آبشکن دافع آبشکن جاذب
کوپلند (۱۹۸۳)	۹۰	-
اسکانتیز و همکاران (۱۹۸۹)	۶۵	پیچ داخلی با انحنای نسبی ۸ تا ۱۳/۵
مازا الوارز (۱۹۸۹)	۷۰	آبشکن پایین‌دست
توصیه عمومی	۹۰–۱۱۰ ۹۰–۱۰۰ ۱۰۰–۱۱۰ ۱۰۰–۱۲۰ ۸۰–۹۰	حفاظت دیواره – بازه مستقیم حفاظت دیواره – پیچ خارجی حفاظت دیواره – پیچ داخلی حفاظت دیواره – آبشکن‌های بالادست حفاظت دیواره – آبشکن پایین‌دست
توصیه عمومی	۹۰ ۸۰–۹۰	هدایت جریان– بازه مستقیم هدایت جریان– پیچ داخلی یا خارجی
توصیه عمومی	۸۰–۹۰	رودخانه‌های بستر شنی با شیب زیاد
توصیه عمومی	۸۰–۹۰	رودخانه‌های قابل کشتیرانی– در بازه مستقیم یا در پیچ داخلی و خارجی



شکل ۶-۳- نمایش مقطع طولی یک آبشکن [۶۲]



شکل ۶-۴- نمایش قفل‌شدگی ریشه آبشکن در دیواره طبیعی رودخانه

۶-۲-۴- طول و فاصله آبشکن‌ها

۶-۲-۴-۱- طول آبشکن‌ها

مطابق شکل (۶-۵)، طول کل آبشکن (L_t) شامل طول اتصال ریشه آبشکن به دیواره رودخانه (L_k) و طول ظاهری آن در پلان رودخانه (طول بدنه و دماغه L) است. طول آبشکن‌ها بستگی به اهداف ساماندهی، عرض و راستای رودخانه در شرایط موجود، عرض پایدار و مورد نظر بازه رودخانه، عمق مورد نظر، ظرفیت انتقال سیلاب مورد نظر، حد آبشستگی مجاز در بازه و در دماغه آبشکن، مصالح موجود و اقتصاد طرح دارد [۳۷ و ۶۲].

در طراحی طول و فاصله آبشکن‌ها، از واژه «طول موثر آبشکن» استفاده می‌گردد. منظور از طول موثر، بخشی از طول آبشکن است که در کاهش عرض مجرای اصلی بازه رودخانه تاثیر داشته باشد. ازاین رو مطابق شکل (۶-۵)، طول موثر آبشکن (b) عبارت از تصویر طول ظاهری بدنه آبشکن بر روی امتداد عمود بر راستای عمومی جریان بوده و شامل قسمت‌های طولی زیر نمی‌باشد.

- بخشی از طول که به‌عنوان ریشه آبشکن در دیواره قفل گردیده
- قسمتی از طول که جبران نامنظمی‌های موضعی دیواره‌ها را نموده
- طول جزیی مربوط به تمایل امتداد آبشکن نسبت به امتداد عمود بر راستای عمومی جریان در بازه اصلاح شده است.

شاخص بلندای آبشکن با نسبت طول موثر آبشکن (b) به عمق متوسط جریان بالادست (h) بیان می‌گردد. درصورتی‌که (b/h<1) باشد، آبشکن کوتاه است. اگر (b/h>25) باشد، آبشکن بلند تشخیص داده می‌شود. در حد فاصل این دو، آبشکن با طول متوسط ارزیابی می‌گردد [۹۳].

- **طول موثر آبشکن:** طول آبشکن‌ها در رودخانه‌های جهان از چند متر تا چند صد متر است ولی کاهش عرض مقطع در بازه رودخانه نباید از ۳۰ درصد تجاوز نماید [۱۰۲]. به‌عبارت دیگر در هر مقطع عرضی از بازه رودخانه، مجموع طول موثر آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه حداکثر باید معادل ۳۰٪ عرض رودخانه در وضعیت طبیعی و موجود آن باشد.

$$B_2 \le 0 \cdot 3B_1 \qquad (۱-۶)$$

که B_1 و B_2 به‌ترتیب عرض بازه رودخانه در قبل و بعد از اصلاح مسیر است.

در انتخاب طول موثر آبشکن‌ها در رودخانه‌های کوچک، حداقل عرض ۱۰ متر رودخانه باید تامین شده و یا عرض رودخانه نباید از دو سوم موجود آن کم‌تر گردد [۶۲]. همچنین، دامنه تغییرات طول موثر آبشکن از حداقل مرز سطح جریان متوسط در کناره رودخانه تا حداکثر یک چهارم عرض متوسط سطح آب توصیه شده است [۱۵۰].

طول کم آبشکن‌ها نیازمند فاصله کم‌تر بین آبشکن‌ها است. از دیدگاه حفاظت دیواره‌های رودخانه، آبشکن‌های با طول کم‌تر از ۳۰ متر موثر نیستند [۵۶ و ۱۰۲]. آبشکن‌های کوتاه‌تر نیاز به فاصله کم‌تر بین آبشکن‌ها دارند و نه تنها در پدیده رسوب‌گذاری در کناره‌های رودخانه موثر نبوده، بلکه در مقایسه با روش‌های حفاظت مستقیم و پیوسته دیواره‌های رودخانه اقتصادی‌تر نیز نمی‌باشند [۶۲]. آبشکن‌های بلند نیز ممکن است علاوه بر آبشستگی زیاد، حمله جریان را متوجه دیواره‌های ساحل مقابل نماید. همچنین، آبشکن‌های بلندتر منجر به انتخاب فاصله بیش‌تر بین آبشکن‌ها شده، که ممکن است سبب بازگشت حمله جریان به کناره‌ها شده و با فرسایش دیواره‌ها و یا تخریب آبشکن پایین‌دست، روند ناخواسته مارپیچی شدن را در حدفاصل آبشکن‌ها توسعه بخشد [۵۶ و ۱۰۲].

از نظر قابلیت رودخانه برای کشتیرانی، حداقل طول موثر آبشکن (b) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$b \ge Z\sqrt{1+\cot^2\phi} \qquad (۲-۶)$$

که در این رابطه:

Z: حداکثر عمق آبشستگی موضعی و ϕ زاویه قرار مواد بستری است.

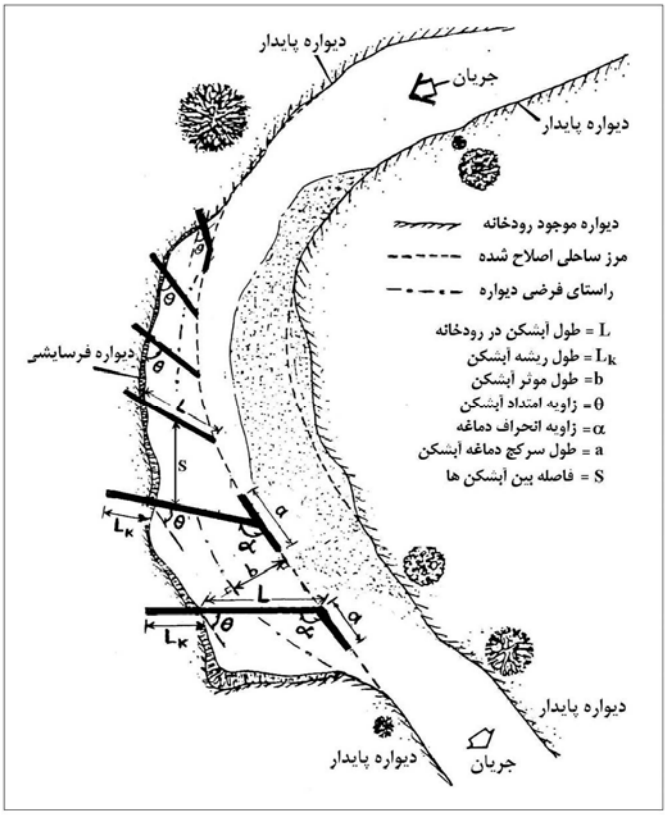
برای استقرار مواضع تثبیت در کناره‌های رودخانه و اصلاح نامنظمی‌های جزیی در راستای دیواره، از آبشکن‌های کوتاه استفاده می‌گردد. در این حالت، کوتاهی آبشکن مانع از توسعه رسوب‌گذاری در کناره‌ها بوده، ولی سبب بهبود راستای جریان در مجرای اصلی می‌گردد [۱۱۰].

برای حفاظت از تنوع زیستی، طول آبشکن تا حدود ۳۰٪ عرض رودخانه مناسب است. همچنین، از آبشکن‌های کوتاه جهت توسعه حوضچه گردابی جریان در پیرامون دماغه آنها (ناحیه آبشستگی) استفاده می‌گردد. به‌هرحال، حداقل عرض ۱۰ متر رودخانه باید تامین گردد. در این‌حالت، عمق و تلاطم جریان، شرایط مناسب جهت هوادهی آب و احیای محیط زیست آبزیان در رودخانه را فراهم می‌سازد [۶۲].

۶-۲-۴-۲- فاصله آبشکن‌ها

طول تاثیر آبشکن‌ها و یا فاصله بین آبشکن‌ها بستگی به اهداف ساماندهی، عرض بازه رودخانه، راستای رودخانه (مستقیم یا پیچ)، شدت انحنای پیچ رودخانه (نسبت انحنای نسبی)، سمت ساحلی پیچ رودخانه (پیچ خارجی یا داخلی)، طول موثر آبشکن‌ها، نوع آبشکن، شکل ظاهری آبشکن در پلان و شکل مقطع عرضی آبشکن دارد [۳۷ و ۶۲].

طول تاثیر یک آبشکن در حفاظت دیواره رودخانه، حداکثر معادل «طول ناحیه جدایی جریان» در شکل‌های (۳-۱۵) و (۳-۱۶) است. این طول بستگی کمی به زاویه امتداد آبشکن (θ)، ولی بستگی زیادی به انحنای نسبی رودخانه (R/B) و شکل مقطع عرضی آبشکن دارد [۳۷]. گارد و چاندرا (۱۹۶۹) نشان دادند که نسبت طول دیواره حفاظت شده به طول موثر آبشکن، در بازه‌های مستقیم و یا با انحنای نسبی زیاد در حدود ۵ مناسب بوده و در دیواره خارجی پیچ‌های تند حدود ۱ تا ۲ مناسب است. ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) این نسبت را در بازه نسبتا مستقیم بین ۷ تا ۱۱ گزارش نموده‌اند [۳۷]. مطالعات یاسی (۱۹۹۷) نشان داد که در بازه مستقیم، طول حفره آبشستگی دماغه آبشکن در جهت جریان در حدود ۳ برابر طول موثر آبشکن، و طول توسعه بار رسوبی برای حفاظت کناره رودخانه در پایین‌دست حداقل ۱۰ برابر طول موثر آبشکن است. به‌طورکلی، حداقل فاصله بین آبشکن‌ها معادل طول حفره آبشستگی دماغه آبشکن در جهت جریان، و حداکثر فاصله بین آبشکن‌ها معادل طول ناحیه جدایی جریان، در جریان‌های مختلف است [۱۴۷].



شکل ۶-۵- نمایش ابعاد طولی و زوایا در انواع آبشکن‌ها [۴۵ و ۶۰]

فاصله بین آبشکن‌ها (S) عموما به‌صورت ضریبی از طول موثر آبشکن (b)، یا به‌صورت نسبت فاصله به طول آبشکن (S/b) بیان می‌شود. محققین مختلف براساس نتایج تجربی نسبت فاصله به طول آبشکن (S/b) را متفاوت پیشنهاد نموده‌اند، که در جدول (۶-۲) به‌صورت خلاصه ارائه شده است [۱۴۷].

ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۵) نسبت S/b را حداقل (۳ تا ۴) و حد اکثر (۱۰ تا ۱۲) گزارش نموده است. چارلتون (۱۹۸۲) نسبت S/b را برای بازه‌های نسبتا مستقیم حداکثر (۴ یا ۴/۵) پیشنهاد نموده، که برای دیواره‌های داخلی پیچ بیش‌تر و برای دیواره‌های خارجی کم‌تر خواهد بود. کینوری و موواراش (۱۹۸۴) نسبت S/b را برای حفاظت دیواره‌ها در محدوده (۱ تا ۵)، یا (۱ تا ۲) برابر عرض رودخانه توصیه نموده است. پترسن (۱۹۸۶) نسبت S/b را برای حفاظت دیواره‌ها در محدوده (۲ تا ۶)، و برای کشتیرانی در محدوده (۱/۵ تا ۲) پیشنهاد نموده است [۳۷]. برای انحراف جریان رودخانه به‌سمت آبگیر (در مسیر مستقیم و یا در محدوده پیچ خارجی)، توصیه شده که آبشکن در ساحل مقابل آبگیر و به فاصله‌ای برابر عرض رودخانه در بالادست آبگیر قرار گیرد [۴۵].

فرانکو (۱۹۶۷) معادله زیر را برای محاسبه حداکثر فاصله بین آبشکن‌ها (جهت توزیع مناسب رسوبات در میدان دو آبشکن متوالی) ارائه نموده است [۳۷].

$$S_{max} = K\frac{d^{\frac{4}{3}}}{2gn^2} \qquad (۶-۳)$$

که در این رابطه:

S_{max}: حداکثر فاصله بین آبشکن‌ها (متر)، d: عمق متوسط آب (متر)، g: شتاب ثقل، n: ضریب زبری مانینگ و k ضریب ثابت کوچک‌تر از یک، که برای شرایط گردابی شدید (K= 0.6) است.

عباسی و همکاران (۱۳۷۵) نسبت S/b را برای حفاظت دیواره‌ها در بازه مستقیم با آبشکن‌های L شکل و T شکل، به‌ترتیب معادل ۳ و ۴ توصیه نموده‌اند [۲۴].

فاصله بین دو آبشکن متوالی (S_i)، از حاصلضرب «متوسط طول موثر دو آبشکن متوالی i و i+1 ام» و «نسبت فاصله به طول آبشکن (S/b)» به‌دست می‌آید (i شماره از پایین‌دست می‌باشد) [۳۷].

$$S_i = \left[\frac{1}{2}(b_i + b_{i+1})\right](S/b) \qquad (۶-۴)$$

برای تعیین فاصله و جانمایی آبشکن‌ها، دو شرایط زیر نیز در طراحی پیشنهاد شده است [۶۲].

الف- جانمایی سری آبشکن‌ها با کارکرد منفرد

اگر آبشکن‌ها در یک سری به‌صورت منفرد رفتار نمایند، خط جدایی جریان باید آبشکن بعدی (در پایین‌دست) را در میانه طول آبشکن قطع کند. براساس شکل (۶-۶)، فاصله بین دو آبشکن از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$S = (f \cdot L)[\sin(\alpha - \beta)] \qquad (۶-۵)$$

که در این رابطه:

S: فاصله بین دو آبشکن، L: طول آبشکن، α: زاویه امتداد آبشکن، β: زاویه خط جدایی جریان (β=6-15°) و f ضریب تجربی است. برای حفاظت دیواره‌ها به‌طور کلی f= 4.5-4.8 یا f.L= (0.25-1)B در بازه مستقیم و f.L≤ 0.5B در پیچ خارجی پیشنهاد شده است.

همچنین روش مشابه دیگری نیز مطابق شکل (۶-۷)، برای محاسبه فاصله بین دو آبشکن از رابطه زیر پیشنهاد شده است.

$$l_p = \frac{2}{3}L \qquad (۶-۶)$$

$$S = l_p \cos\alpha_1 + l_p \sin\alpha_1 \cot g(\beta + \alpha_2 - \alpha_1) \qquad (۶-۷)$$

که در این رابطه:

S: فاصله بین دو آبشکن متوالی، L: طول آبشکن، l_p: طول موثر، α_1: زاویه انحراف آبشکن از دیواره ساحلی، α_2: زاویه بین جهت جریان و جهت بالادست آبشکن و β زاویه جهت جریان با خط عمود بر راستای آبشکن (β=6-15°) است.

باید توجه نمودکه اگر از آبشکن‌های با دماغه غیرمستقیم (نظیر T یا L شکل) استفاده شود، می‌توان این فاصله را بیش‌تر در نظر گرفت.

ب- جانمایی سری آبشکن‌ها با کارکرد وابسته

اگر آبشکن‌ها در یک سری به‌صورت ترکیبی و متراکم رفتار نمایند، فاصله بین آنها باید به‌حدی کم‌تر باشد تا خط جدایی جریان و یا جریان اصلی به آبشکن بعدی (در پایین‌دست) برخورد نکند [۶۲]. در این شرایط، فاصله بین دو آبشکن از روش ترسیمی نشان داده شده در شکل (۶-۸) محاسبه می‌گردد [۱۰۴]. در این شکل، خطی از دماغه آبشکن به‌سمت کناره رودخانه رسم شده که با خط جریان عبوری از دماغه زاویه β را می‌سازد. این زاویه بین ۹ تا ۱۴ درجه پیشنهاد شده که زاویه کم‌تر معادل با فاصله بیش‌تر آبشکن‌ها خواهد بود.

روش ترسیمی ساده دیگری برای تعیین فاصله و موقعیت آبشکن‌ها در پیچ رودخانه مطابق شکل (۶-۹) ارائه شده است [۷۵ و ۷۸]. در این شکل، نقطه A با توجه به امتداد خط حمله اصلی جریان برای استقرار اولین آبشکن انتخاب می‌گردد. سپس خطی به‌موازات خط جریان طوری رسم می‌شود که از دماغه آبشکن A عبور کرده و امتداد آن دیواره رودخانه را در B قطع کند. نقطه C در دیواره رودخانه طوری انتخاب می‌شود که فاصله A تا C دو برابر A تا B باشد. در این‌صورت موقعیت آبشکن دوم در نقطه C قرار می‌گیرد. موقعیت استقرار آبشکن سوم در نقطه D خواهد بود که از تلاقی خط مماس بر دماغه دو آبشکن قبلی با دیواره رودخانه به‌دست می‌آید. محل آبشکن‌های متوالی بعدی نیز شبیه حالت آبشکن سوم D تعیین می‌گردد.

جدول ۶-۲- نسبت فاصله بین دو آبشکن متوالی
(S) به طول موثر آبشکن‌ها (b) و به عرض بازه اصلاح شده (B_2) در منابع مختلف [۴۵ و ۱۰۴].

مرجع	نسبت (S/b)	نسبت (S/B2)	ملاحظات
گرانت (۱۹۴۸)	۳		پیچ خارجی
احمد (۱۹۵۱)	۴/۳ ۵		بازه مستقیم بازه منحنی
سازمان ملل (۱۹۵۳)	۱ ۲-۲/۵		پیچ خارجی پیچ داخلی
ماتس (۱۹۵۶)	۱/۵		-
مامک (۱۹۵۶)	۲-۳	۱	-
استورم (۱۹۶۲)	۳-۵		-
آلتونین (۱۹۶۲)	۴ ۳ ۲		بازه مستقیم، $\theta>45^\circ$ بازه مستقیم، $0.005\leq S\leq 0.01$ بازه مستقیم، $S>0.01$
ماکورا (۱۹۶۶)		۰/۵ ۱/۲۵ ۰/۷۵-۱	پیچ خارجی پیچ داخلی بازه مستقیم
اکسن (۱۹۶۸)	۳-۴		بستگی به انحنا و شیب
جاکلیکار (۱۹۷۱)	۲-۲/۵		آبشکن‌های بالادست
کمیته آبیاری هند (۱۹۷۱)	۲-۲/۵		-
نیل (۱۹۷۳)	۴		-
ریچاردسن و همکاران (۱۹۷۵)	۲-۶ ۳-۴ ۱/۵-۲		برای حفاظت دیواره‌ها برای کشتیرانی با آبشکن T شکل برای کشتیرانی با مجرای اصلی عمیق
بلنچ و همکاران (۱۹۷۶)	۳/۵		-
جنسن و همکاران (۱۹۷۹)		۱-۲ ۰/۵-۱	بازه با کاهش عرض زیاد
مامن و اگراول (۱۹۷۹)	۵		آبشکن مستغرق (با ارتفاع یک سوم عمق آب)
مهندسی ارتش آمریکا، واحد لس آنجلس (۱۹۸۰)	۲ ۱/۵ ۲/۵		۱
چارلنون (۱۹۸۲)	۴-۴/۵ <۴ >۴/۵		بازه مستقیم پیچ خارجی پیچ داخلی
کوپلند (۱۹۸۳)	۲-۳		پیچ خارجی
کواکس و همکاران (۱۹۸۳)	۱-۲		رودخانه دانوب
کینوری و موراش (۱۹۸۴)	۱-۵		برای حفاظت دیواره‌ها
مهندسی ارتش آمریکا، واحد می‌سی‌سی‌پی (۱۹۸۴)	۲		رودخانه می‌سی‌سی‌پی
پترسن (۱۹۸۶)	۲-۶ ۱/۵-۲		برای حفاظت دیواره‌ها برای کشتیرانی
سوزوکی و همکاران (۱۹۸۷)	<۴		بازه مستقیم
مازا الواراز (۱۹۸۹)	۵/۱-۶/۳ ۲/۵-۴		حفاظت دیواره‌ها در بازه مستقیم، تاج شیب‌دار حفاظت دیواره‌ها در بازه منحنی، تاج شیب‌دار

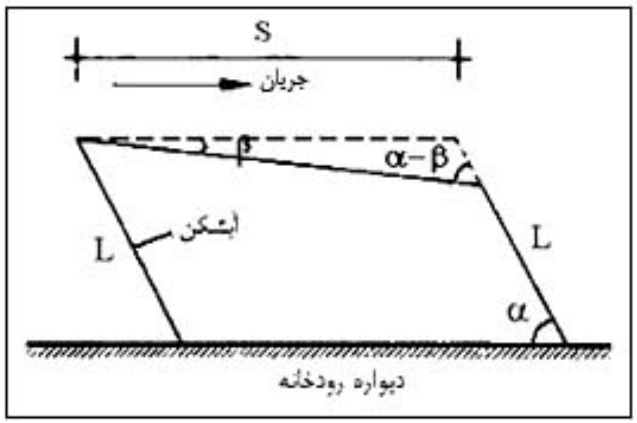
S: شیب طولی بازه، R: شعاع انحنای مرکزی پیچ، B: عرض سطح آب، θ: زاویه تمایل آبشکن

ادامه جدول ۶-۲- نسبت فاصله بین دو آبشکن متوالی

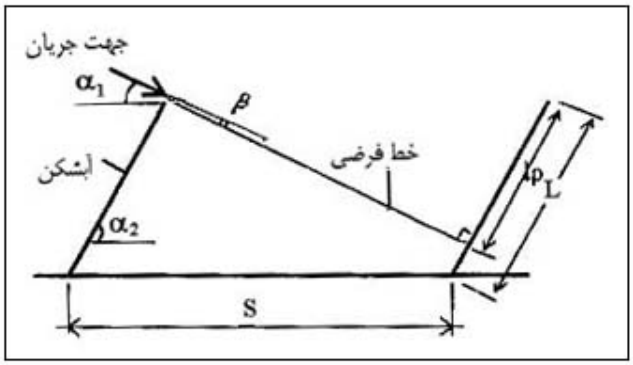
(S) به طول موثر آبشکن‌ها (b) و به عرض بازه اصلاح شده (B_2) در منابع مختلف [۴۵ و ۱۰۴].

مرجع	نسبت (S/b)	نسبت (S/B2)	ملاحظات
آکانتیز و همکاران (۱۹۸۹)		۰/۹-۱ ۱/۱ ۰/۹-۱/۱	R/B= 8-13.5 و θ= 45° -50° R/B= 8 و θ= 55° R/B= 13.5 و θ= 55°
مرکز احیای رودخانه، انگلستان (۱۹۹۷)	۴		بازه منحنی رودخانه اوان- انگلستان
یوسف (۲۰۰۲)	۴		بازه نسبتا مستقیم رودخانه وال- هلند
یاسی (۱۳۶۷)	۶		بازه نسبتا مستقیم شریانی، رودخانه فهلیان- فارس
عباسی و همکاران (۱۳۷۵)	۳ ۴		حفاظت دیواره‌ها- بازه مستقیم، آبشکن L شکل حفاظت دیواره‌ها- بازه مستقیم، آبشکن T شکل
یاسی (۱۳۸۴)	۵/۲		بازه منحنی- بستر درشت‌دانه

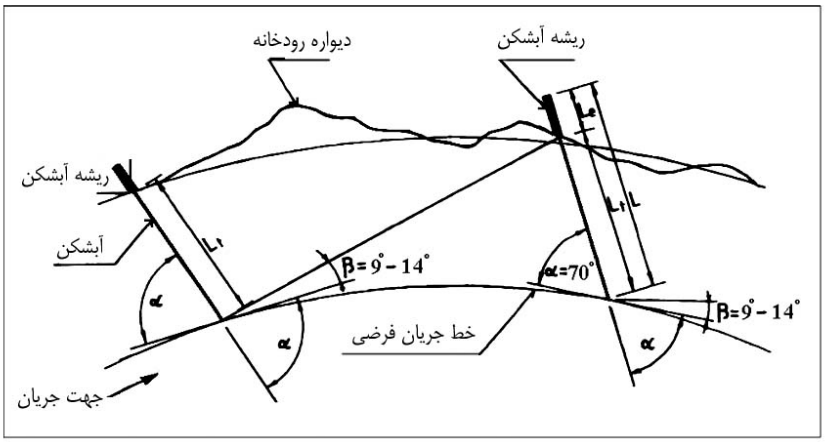
S: شیب طولی بازه، R: شعاع انحنای مرکزی پیچ، B: عرض سطح آب، θ: زاویه تمایل آبشکن.



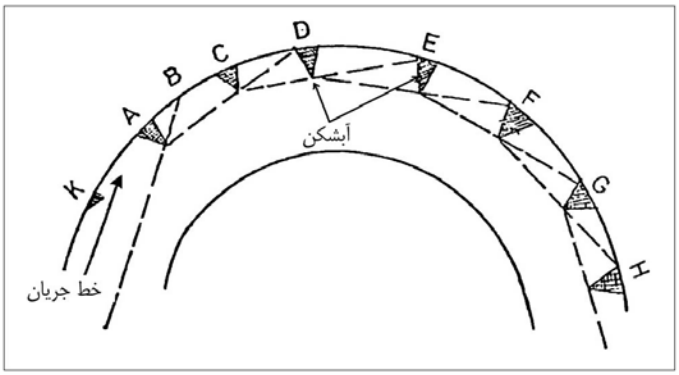
شکل ۶-۶- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها با کارکرد منفرد [۶۲]



شکل ۶-۷- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها با کارکرد منفرد [۲۲]



شکل ۶-۸- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها با کارکرد وابسته [۱۰۴]



شکل ۶-۹- تعیین فاصله بین آبشکن‌ها در پیچ [۷۵ و ۷۸]

۶-۲-۵- آرایش آبشکن‌ها

موقعیت استقرار اولین آبشکن براساس الگوی اصلاح مسیر در بازه مورد نظر، و با توجه به پایداری طبیعی راستا و دیواره رودخانه در محدوده بالادست انتخاب می‌گردد. ناپایداری رودخانه و احتمال حمله جریان و تخریب دیواره در بالادست منجر به آسیب دیدگی ریشه و بدنه اولین آبشکن و در نتیجه تخریب متوالی آبشکن‌های پایین‌دست خواهد شد. فاصله اولین آبشکن از ابتدای بازه فرسایشی مورد نظر نباید از یک سوم طول موثر آبشکن بیش‌تر باشد [۱۴۷].

از نظر قدرت انحراف جریان و شدت رسوب‌گذاری در پایین‌دست و تثبیت شرایط بالادست برای آبشکن‌های متوالی، آبشکن‌های دافع با زاویه تمایل (θ=100°-120°) بهتر هستند. ولی به‌دلیل آسیب‌پذیری بیش‌تر از نظر اتصال و قفل‌شدگی بدنه به دیواره، پایداری بدنه و حفاظت در برابر آبشستگی باید مقاوم‌تر از دیگر آبشکن‌ها ساخته شود.

آخرین آبشکن باید در موقعیتی قرار گیرد که فاصله آن تا محدوده پایدار راستا و دیواره پایین‌دست بازه از ۱۰ برابر طول موثر آبشکن بیش‌تر نباشد [۱۴۷]. در غیر این‌صورت، جریان چرخشی در دیواره پایین‌دست رودخانه به‌تدریج به بالادست توسعه یافته و سرانجام به ریشه آخرین آبشکن رسیده و شرایط برای تخریب متوالی آبشکن‌ها در جهت بالادست فراهم می‌گردد.

امتداد بدنه آبشکن‌ها نسبت به راستای بازه، و طول و فاصله بین آبشکن‌ها براساس ضوابط ارائه شده در بخش‌های قبلی انتخاب می‌گردد. اگر آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه ساخته شوند، دماغه آنها تا حد امکان باید در مقابل یکدیگر قرار گیرد. در غیر این‌صورت، جریان اصلی به‌صورت زیگزاگی در حد فاصل آبشکن‌های طرفین تاب خورده و سبب شستشوی رسوبات در میدان آبشکن‌ها خواهد گردید [۶۲]. نمونه‌های آرایش و استقرار آبشکن‌های در شکل‌های (۶-۲) و (۶-۵) نشان داده شده است.

از نظر اجرایی، ابتدا اولین آبشکن و سپس آبشکن‌های دیگر به‌ترتیب از بالادست به پایین‌دست ساخته می‌شوند. اگر آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه طرح گردیده، ساخت آبشکن‌ها به‌طور همگام از بالا به پایین‌دست و در دو سمت انجام می‌گیرد.

۶-۲-۶- تراز تاج آبشکن

آبشکن‌ها بستگی به اهداف و شرایط رودخانه ممکن است مستغرق یا غیرمستغرق طرح گردند. به‌هرحال، هر آبشکن برای یک بده طراحی معین به‌صورت غیرمستغرق عمل می‌کند. به‌طورکلی، تراز تاج آبشکن (H_G) از رابطه زیر تعیین می‌شود [۳۷ و ۷۸].

$$H_G = h_d + h_b + h_w + F.B. \qquad (۶-۸)$$

که در این رابطه:

h_d: ارتفاع متوسط سطح آب در بده سیلاب طراحی در هندسه هیدرولیکی بازه اصلاح شده، h_b: افزایش ارتفاع سطح آب در دیواره خارجی پیچ، h_w: ارتفاع موج ناشی از باد و یا کشتیرانی و F.B. ارتفاع آزاد است.

رابطه تقریبی زیر نیز برای محاسبه ارتفاع آبشکن از سطح متوسط بستر رودخانه در حد فاصل دو آبشکن متوالی (H) بر حسب متر ارائه شده است [۲۷].

$$H = 0.019\frac{S^{0.6}}{S_o^{0.3}} + 1 \qquad (۶-۹)$$

که در این رابطه:

S_o: شیب متوسط بازه رودخانه بر حسب درصد و S فاصله بین دو آبشکن بر حسب متر است.

برای حفاظت از دیواره، تراز تاج آبشکن باید حداقل تا ارتفاع دیواره بالای رودخانه ساخته شود. در رودخانه‌های با مشکل یخ‌زدگی سطح آب و با جریان یخ‌های شناور، ارتفاع تاج باید بالاتر از سطح احتمالی یخ باشد [۱۵۰].

وقتی سری آبشکن‌های متوالی استفاده می‌شود بهتر است ارتفاع تاج آنها یکسان و یا در جهت پایین‌دست به تدریج کاهش یابد [۴۸]. کاهش ارتفاع تاج آبشکن‌ها در طول رودخانه می‌تواند از نیمرخ سطح آب پیروی کند [۱۰۲].

نتایج تجربی نشان داده است که، کاهش پلکانی ارتفاع تاج آبشکن‌ها در جهت پایین‌دست سبب هدایت بار رسوبی کف به‌سمت میدان آبشکن‌ها و افزایش رسوب‌گذاری در کناره‌های رودخانه گردیده و تاثیر ریخت‌شناسی حضور آبشکن‌ها را به‌تدریج در جهت پایین‌دست کاهش می‌دهد. بر عکس، افزایش پلکانی ارتفاع تاج آبشکن‌ها در جهت پایین‌دست سبب انحراف جریان سطحی به میانه رودخانه و کاهش ورود رسوبات به حدفاصل بین آبشکن‌ها شده، بنابراین توصیه نمی‌گردد [۷۵].

۶-۲-۶-۱- بده سیل طراحی

انتخاب بده سیل طراحی بستگی به نوع رودخانه، موقعیت منطقه‌ای (شهری، مرزی، صنعتی، کشاورزی،...) و نیز اهمیت اراضی و تاسیسات مورد تهاجم داشته و در طرح نهایی تابعی از تحلیل اقتصادی است [۱۲۸]. این بده ممکن است معادل سیل با دوره برگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و.... ساله باشد. برای حفاظت اراضی کشاورزی عموما سیل ۱۵ تا ۲۰ ساله و در مناطق خشک سیل ۲۰ تا ۳۰ ساله، برای حفاظت مناطق مسکونی روستایی سیل ۱۰۰ تا ۲۰۰ ساله و برای مراکز شهری و صنعتی سیل ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ ساله پیشنهاد شده است [۳۷]. در کشور ایران، معیار تعیین بستر و حریم قانونی رودخانه‌ها سیل حداکثر لحظه‌ای ۲۵ ساله می‌باشد [۶]. ولی سیل طرح لزوما از این قاعده پیروی نمی‌کند. به‌طورکلی انتخاب حداکثر سیل ۲۵ تا ۱۰۰ ساله می‌تواند مدنظر قرار گیرد [۱۰]. توصیه می‌شود که اگر به‌طور مثال سیل ۵۰ ساله سیل طرح باشد، برای کنترل ایمنی طرح از یک سیل بزرگ‌تر (مثلا ۱۰۰ ساله) نیز استفاده گردد [۴۵].

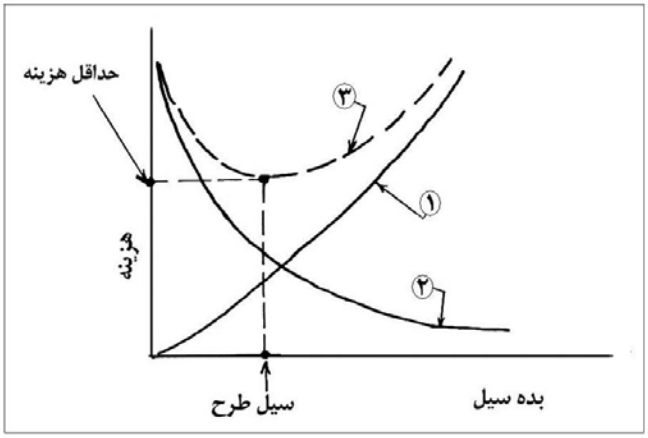
در رودخانه‌های با مواد بستری ماسه‌ای، مقطع اصلی رودخانه ظرفیتی نزدیک به بده سیل متوسط (بده مقطع پرعموما معادل سیل با دور برگشت ۱/۴ تا ۲/۳۳ ساله) دارد. ولی مقطع کبیر و سیلابی آنها در محدوده سیلابدشت گسترش داشته و به‌طور غیرمتناوب درمعرض سیلاب قرار می‌گیرد. در این نوع رودخانه‌ها، حفاظت و تثبیت رودخانه در دو سطح صورت می‌پذیرد. حفاظت مجرای اصلی و مارپیچی رودخانه در برابر تخریب‌های متناوب و دایمی براساس بده مقطع پر و حفاظت دشت ساحلی رودخانه از خطر پیشروی سیلاب براساس سیل حداکثر مورد نظر است [۷۹]. بنابراین، در مواقع سیلاب‌های بزرگ‌تر، آبشکن‌های مجرای اصلی لزوما مستغرق خواهند بود.

در رودخانه‌های کوهستانی یا نیمه کوهستانی، و در رودخانه‌های شریانی با مواد بستری درشت‌دانه، تفکیک میان مقطع اصلی با مقطع سیلابی عموما امکان‌پذیر نیست. ازاین‌رو، طرح آبشکن‌ها در رودخانه‌های شریانی و یا بستر درشت‌دانه (شنی و قلوه‌سنگی) عموما به‌صورت غیرمستغرق و براساس بده سیل حداکثر طراحی خواهد بود. [۱۰۷، ۱۱۵ و ۱۴۴].

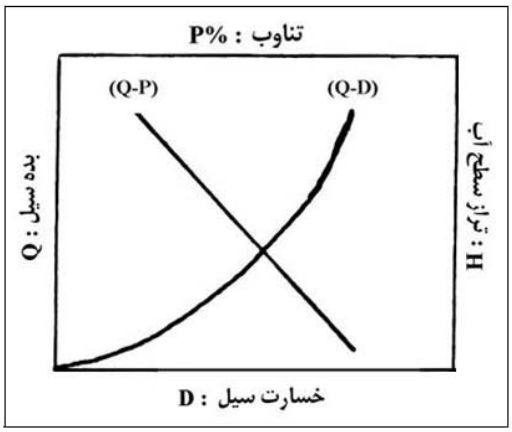
در مناطق نیمه خشک و برای رودخانه‌های فصلی یا رودخانه‌هایی که تغییرپذیری رژیم جریان سیلابی در آنها شدید است، حساسیت زیاد به تغییرات سبب می‌شود تا بده طراحی حداکثر معیار مطمئن‌تری باشد [۷۸ و ۱۱۸].

در ساماندهی رودخانه برای تامین قابلیت کشتیرانی، شدت جریان متوسط سالانه مورد نظر قرار می‌گیرد. ازاین‌رو در مواقع پرآبی و سیلابی، آبشکن‌ها لزوما مستغرق خواهند بود [۱۰۲].

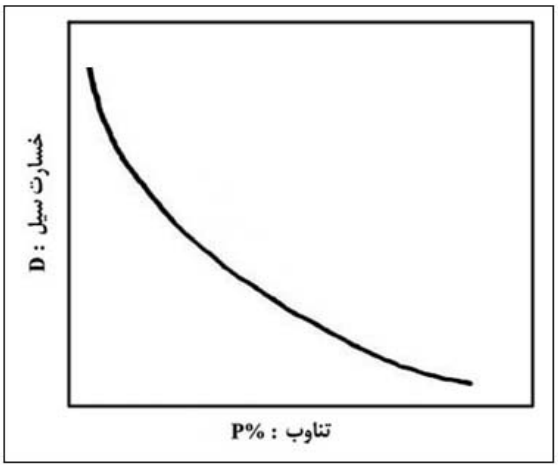
روش ساده بهینه‌سازی انتخاب سیلاب طراحی در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است [۱۲۸]. در این شکل، منحنی شماره ۱ هزینه معادل سالانه طرح برای حفاظت از هر سیل معین، منحنی شماره ۲ متوسط خسارات سالانه ناشی از هر سیل معین و منحنی شماره ۳ مجموع دو منحنی ۱ و ۲ است. نقطه حداقل بر روی منحنی شماره ۳ بیانگر گزینش سیل طراحی براساس حداقل هزینه متوسط سالانه طرح ساماندهی است. شکل (۶-۱۱) رابطه بده سیلاب یا ارتفاع سطح آب نظیر آن را با میزان خسارات حاصله نشان می‌دهد. از ترکیب رابطه (بده سیل- خسارت) با منحنی تناوب سیلاب (رابطه بده سیل- تناوب یا دوره برگشت سیل)، رابطه (خسارت- تناوب) مطابق شکل (۶-۱۲) به‌دست می‌آید. متوسط خسارات سالانه از سطح زیر منحنی شکل (۶-۱۲) قابل محاسبه است. با اجرای طرح ساماندهی، خسارات سالانه معادل منافع سالانه طرح محسوب می‌گردد. هزینه سالانه طرح نیز از ارزیابی اقتصادی هزینه طرح (برای هر گزینه پیشنهادی ساماندهی) در طول عمر مفید طرح محاسبه می‌گردد. ازاین‌رو با توجه به نسبت هزینه به خسارات سالانه حداقل، گزینه برتر اقتصادی و نیز سیلاب طراحی نظیر آن به‌دست خواهد آمد [۳۷].



شکل ۶-۱۰- بهینه‌سازی انتخاب سیلاب طراحی در ساماندهی رودخانه [۳۷]



شکل ۶-۱۱- رابطه بده سیلاب یا ارتفاع سطح آب نظیر آن با میزان خسارات حاصل شده [۳۷]



شکل ۶-۱۲- رابطه خسارت سیلاب با تناوب یا دوره برگشت سیل [۳۷]

۶-۲-۶-۲- تراز سطح آب

تراز متوسط سطح آب در بده سیل طراحی (h_d) در رابطه (۶-۱) از محاسبه نیمرخ سطح آب در بازه اصلاح شده رودخانه مورد نظر به‌دست می‌آید. این ارتفاع مستقیما از نتایج مدل‌های یک بعدی (نظیر مدل HEC-RAS یا BRI-STARS) در هر مقطع عرضی به‌دست آمده و یا از متوسط عرضی ارتفاع سطح آب در شبکه عددی نتایج خروجی مدل‌های دو یا سه بعدی در هر مقطع عرضی محاسبه می‌گردد.

- افزایش سطح آب در پیچ خارجی

افزایش ارتفاع سطح آب در دیواره خارجی پیچ (h_b) در رابطه (۶-۱۰) نسبت به سطح متوسط آب در مقطع پیچ (h_d) از رابطه ساده زیر قابل محاسبه می‌باشد [۳۷].

$$h_b = \frac{V^2 B}{2 g r_c} \qquad (۶-۱۰)$$

که در این رابطه:

V: سرعت متوسط جریان در مقطع پیچ، B: عرض سطح آب، g: شتاب ثقل و r_c شعاع انحنای محور مرکزی پیچ است. با کاربرد مدل‌های ریاضی دو یا سه بعدی، ارتفاع سطح آب در دیواره خارجی پیچ (مجموعه $h_d + h_b$) مستقیما محاسبه می‌گردد.

- ارتفاع موج

ارتفاع موج ناشی از حرکت قایق‌ها و یا باد (h_W) از جدول (۶-۳)، و یا از رابطه (۶-۱۱) قابل محاسبه است [۱۱۰].

$$h_W = 1.3\left[0.00354\left(\frac{U_{10}^2}{g}\right)^{0.58} F^{0.42}\right] \qquad (۶-۱۱)$$

که در این رابطه:

h_W : ارتفاع موج قابل توجه، $U_{۱۰}$: سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح متوسط آب، g: شتاب ثقل، F: طول مشخصه وزش موج باد (به‌طور متوسط معادل $F= 2.5B$) و B عرض سطح آب است. حداکثر ارتفاع موج ۳۰ درصد بیش‌تر از مقدار جدول (۶-۳) یا رابطه (۶-۱۱) است ($h_{max}=1.3\ h_W$).

جدول ۶-۳- ارتفاع موج (h_W) ناشی از کشتیرانی و یا باد [۱۱۰]

ارتفاع موج (h_W متر)	سرعت متوسط (V متر بر ثانیه)	شرایط تلاطم جریان
≤۰/۱۵	≤۱	کم
≤۰/۵	۱/۰ – ۲/۵	متوسط
≤۱	۲/۵ – ۴/۰	زیاد
≤۱	۴ - ۷	شدید

۶-۲-۶-۳- ارتفاع آزاد

ارتفاع آزاد (F.B.) برای تامین ارتفاع لازم جهت نوسانات سطح آب، امواج ناشی از سیلاب و اطمینان از عبور سیلاب‌های بزرگ‌تر از سیل طراحی منظور می‌گردد. تاثیرات موج ناشی از باد و یا کشتیرانی (h_W) نیز در ارتفاع آزاد منظور می‌گردد. به‌طور کلی، ارتفاع آزاد تابع اندازه رودخانه، بده سیلاب و شدت تغییرات سیلاب در رودخانه، شدت و دوام موج، اهمیت اراضی ساحلی و قضاوت مهندسی است. حداقل ارتفاع آزاد معادل ۰/۳ متر، برای حفاظت اراضی کشاورزی ۰/۵ متر و برای حفاظت مناطق مسکونی، شهری، صنعتی و مواضع مهم حدود ۱/۰ متر پیشنهاد شده است [۳۷ و ۴۵].

در رودخانه‌های نیمه کوهستانی با بستر درشت‌دانه و یا شریانی، ارتفاع آزاد از سطح آب سیلاب طرح تا تراز مقطع پر (در مقطع اصلی و سیلابی) در نظر گرفته می‌شود. در رودخانه‌های مارپیچی و سیلابدشتی با بستر ماسه‌ای، ارتفاع آزاد در مقطع اصلی حداقل ۰/۳ متر یا تا بالای تراز دیواره و در مقطع سیلابدشتی و برای دیواره خاکریز ساحلی از ۰/۳ تا ۰/۶ متر پیشنهاد شده است [۳۷ و ۴۵].

۶-۲-۶-۴- تراز آبشکن‌های مستغرق

در رودخانه‌های مارپیچی و سیلابدشتی، برای حفاظت دیواره‌ها در مجرای اصلی معمولا از آبشکن‌های نفوذناپذیر با ارتفاع تاج در حد تراز دیواره بالای رودخانه اصلی استفاده می‌گردد. به‌هرحال این آبشکن‌ها در مواقع سیلاب‌های بزرگ‌تر و با گسترش جریان در دشت سیلابی رودخانه، لزوما مستغرق خواهند شد. در این‌حالت، ارتفاع تاج آبشکن معادل تراز بالای دیواره مقطع اصلی یا حدود ۰/۳ متر پایین تر قرار می‌گیرد.

در شرایطی که در مقطع اصلی رودخانه طرح آبشکن به‌صورت مستغرق مورد نظر باشد (شکل ۳-۶)، ارتفاع تاج آبشکن حدود یک سوم عمق جریان مورد نظر (یا یک سوم عمق مقطع پر رودخانه) پیشنهاد گردیده است [۱۳۸].

۶-۲-۷- مقطع آبشکن

۶-۲-۷-۱- آبشکن‌ها در مقطع طولی

در مقطع طولی، تاج آبشکن ممکن است از دیواره به سمت محور رودخانه به‌صورت افقی و یا شیب‌دار باشد (شکل ۳-۱۳). در حالت شیب‌دار، سطح موثر جریان در بده‌های زیادتر بیش‌تر بوده و سرعت متوسط و توان جریان کم‌تر می‌شود [۱۰۷]. تاج شیب‌دار برای انواع آبشکن‌های عمودی یا دافع مناسب‌تر است. در رودخانه‌های با قابلیت کشتیرانی و یا در رودخانه‌هایی که تغییرات بده و سطح آب کم است، آبشکن‌های با تاج افقی از نوع عمودی یا جاذب مناسب هستند [۶۲ و ۱۵۰]. وقتی تغییرات جریان خیلی زیاد باشد، تاج شیب‌دار از نظر ظرفیت انتقال جریان مناسب‌تر بوده اما تاثیر آن در حفاظت دیواره‌ها نیز کم‌تر می‌شود. به‌هرحال برای حفاظت دیواره‌ها، تاج شیب‌دار توصیه شده است [۱۵۰]. در این‌صورت، شیب طولی تاج آبشکن‌ها در محدوده (4H:1V تا 10H:1V) پیشنهاد شده است [۹۲]، ولی ممکن است با شیب ملایم‌تر در محدوده (10H:1V تا 100H:1V) نیز ساخته شود [۶۲]. نیمرخ طولی تاج آبشکن ممکن است به‌صورت ترکیبی از سطوح افقی و شیب‌دار ساخته شود (شکل ۳-۱۲).

تاج آبشکن‌های تورسنگی نوع جعبه‌ای، ممکن است به‌صورت پلکانی احداث شود (شکل ۳-۱۳). این نوع نیمرخ تاج برای رودخانه‌های عریض و شریانی مناسب بوده و باعث تمرکز رشته‌های جریان کم آبی به‌سمت محور رودخانه شده، رابطه شدت جریان با عرض مجرا را تامین نموده و از نظر حجم مصالح و روش اجرایی نیز اقتصادی‌تر می‌باشد.

۶-۲-۷-۲- آبشکن‌ها در مقطع عرضی

مقطع عرضی آبشکن ممکن است به شکل‌های هندسی مختلف مانند دیواره قائم کم عرض (صفحه‌ای یا سپری)، دیواره قائم عریض (مستطیلی)، پلکانی یا ذوزنقه‌ای باشد. برخی از انواع مقطع عرضی آبشکن‌ها قبلا در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است. شکل‌های (۶-۱۳) تا (۶-۱۵) تصاویر واقعی‌تری از شکل مقطع عرضی آبشکن‌ها را نمایش می‌دهد.

شکل عرضی آبشکن تابعی از نوع مصالح و روش ساخت می‌باشد. به‌طور مثال، آبشکن‌های سپری (فلزی یا بتنی) با مقطع مستطیلی کم عرض، آبشکن‌های تورسنگی یا کیسه‌ای با مقطع پلکانی و آبشکن‌های سنگ‌ریزه‌ای با مقطع ذوزنقه‌ای ساخته می‌شوند.

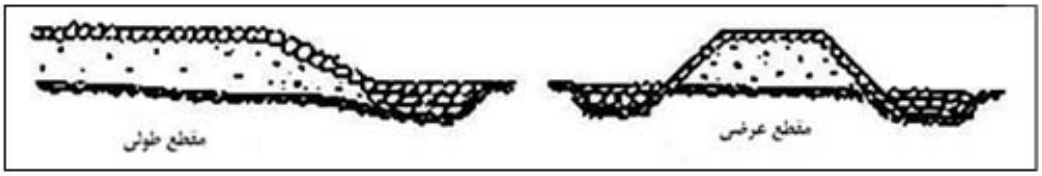
به جهت سهولت ساختمانی و پایداری طبیعی، مقطع عرضی آبشکن عموما به شکل ذوزنقه‌ای ساخته می‌شود. عرض تاج آب شکن از ۱ تا ۶ متر متغیر بوده که با توجه به عرض کار ماشین‌آلات معمولا حداقل ۳ متر مناسب است [۳۷ و ۱۵۰].

شیب جانبی آبشکن از (1.25H:1V تا 5H:1V) تا (5H:1V) ممکن است تغییر کند [۱۵۰]. ولی حداقل آن با توجه به تنوع مصالح و روش اجرا (1.5H:1V) و ترجیحا (2H:1V) توصیه شده است [۵۴ و ۱۰۷]. شیب جانبی آبشکن در وجه بالادست عموما در محدوده (2H:1V تا 3H:1V) و در وجه پایین‌دست کم‌تر و معادل (حداقل 2H:1V و ترجیحا 3H:1V تا4H:1V) پیشنهاد شده است. شیب دامنه آبشکن در زیر سطح آب (تا حد ارتفاع متوسط کم آبی) ممکن است که ملایم‌تر (حداقل2.5H:1V)، و در قسمت بالا تندتر (حداقل 1.5H:1V یا 2H:1V) باشد. همچنین در امتداد بدنه آبشکن و متناسب با سطح آب، ممکن است که شیب جانبی به‌سمت کناره رودخانه تندتر و به‌سمت دماغه آبشکن ملایم‌تر باشد [۲۲].

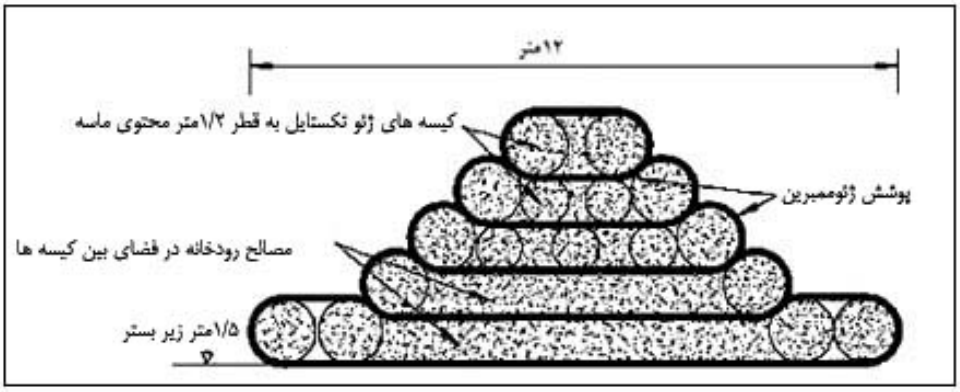
دماغه آبشکن اغلب در معرض حمله جریان اصلی رودخانه بوده و آسیب‌پذیر می‌باشد. پنجه آبشکن در معرض آبشستگی موضعی با قدرت گردابی زیاد قرار گرفته که عامل اصلی در تخریب دماغه آبشکن‌ها به‌شمار می‌رود. در محدوده دماغه آبشکن برای کاهش شدت آبشستگی موضعی، شیب دماغه ملایم‌تر (حداقل 2H:1V تا 4H:1V، و ترجیحا 4H:1V تا 10H:1V) و با گستره دایره‌ای در پیرامون آبشکن پیشنهاد گردیده است [۳۷ و ۶۲].

گاهی به‌منظور افزایش پایداری و سهولت اجرا از سکوبندی بر روی شیب دامنه آبشکن استفاده می‌گردد. احداث سکو[1] در شرایطی نظیر حد ارتفاع متوسط کم آبی، در سطح تغییر شیب بدنه آبشکن، در سطح انتقال از یک نوع روکش حفاظتی به نوع دیگر و در حد فاصل قسمت زیر آب و بالای آب، ممکن است ضروری تشخیص داده شود. برای نگهداری و یا بازسازی احتمالی آبشکن در رودخانه‌های بزرگ با جریان دایمی، احداث سکو در تراز سطح کم آبی تا متوسط در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری‌که در طول چند ماه از سال خشک بوده و بتوان از گستره آن استفاده نمود. شکل (۶-۱۵) استقرار سکو را در مقطع عرضی و دماغه آبشکن نشان می‌دهد.

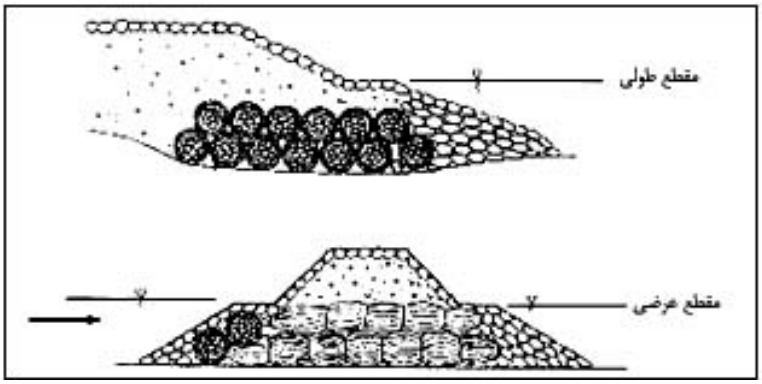
1- Berm



شکل ۶-۱۳- مقطع طولی و عرضی آبشکن با مصالح رودخانه‌ای و روکش سنگ‌ریزه‌ای [۱۰۴]



شکل ۶-۱۴- شکل مقطع عرضی آبشکن با مصالح کیسه‌ای و شن و ماسه [۱۰۴]



شکل ۶-۱۵- مقطع طولی و عرضی آبشکن همراه با سکوبندی در تراز معین سطح آب [۱۰۴]

۶-۲-۸- آبشستگی

پایداری و ایمنی، و کارکرد آبشکن‌های رودخانه‌ای بستگی به ارزیابی صحیح از عمق و گستره آبشستگی در پیرامون آبشکن دارد. زیرا تراز کف بدنه و به‌ویژه پنجه آبشکن باید تا زیر عمق آبشستگی ادامه یابد. در این بخش، روش‌های برآورد عمق و گستره آبشستگی در سامانه آبشکن‌ها به‌طور خلاصه ارائه می‌گردد.

۶-۲-۸-۱- آبشستگی عمومی

برای برآورد عمق آبشستگی عمومی در شرایط تعادل دینامیکی بستر در بازه آبشکن‌ها روش‌های مختلفی ارائه شده است. مهم‌ترین این روش‌ها که کاربرد عمومی‌تری در خصوص آبشکن‌ها دارند، در زیر شرح داده شده است.

- **رابطه کامورا (۱۹۶۶ و ۱۹۷۱) ، می چیو و همکاران (۱۹۸۷)**

برای شرایط فشردگی طولانی یک بازه با دیواره ساحلی، رابطه زیر توسط کامورا (۱۹۶۶) برای برآورد عمق آبشستگی عمومی ارائه شده است [۱۵۰].

$$\frac{d_1}{d_2} = (B_1/B_2)^{\frac{6}{7}}(\tau_1/\tau_2)^{\frac{3}{7}}(D_1/D_2)^{\frac{-1}{7}} \qquad \text{جریان آب صاف} \qquad (۶-۱۲-\text{الف})$$

$$\frac{d_1}{d_2} = (B_1/B_2)^{\frac{6}{7}}(\tau_1/\tau_2)^{\frac{2}{7}} \qquad \text{جریان آب و رسوب (بستر متحرک)} \qquad (۶-۱۲-\text{ب})$$

$$d_S = d_2 - d_1 \qquad (۶-۱۲-\text{ج})$$

که در این روابط:

مطابق شکل (۶-۱۶)، ds: عمق آبشستگی عمومی، d: عمق آب، B: عرض سطح آب، τ: متوسط تنش برشی جریان و D متوسط اندازه مواد بستری است. اندیس ۱ و ۲ به‌ترتیب مربوط به بازه اصلاح نشده (یا بازه بالادست) و بازه اصلاح شده است. آبشستگی به دو نوع جریان آب صاف[1] (فاقد رسوبات قابل ته‌نشینی) و بستر متحرک[2] (شرایط جریان آب با رسوبات قابل ته‌نشینی و بستر فرسایشی) تقسیم می‌شود. تجربیات نشان داده که حداکثر آبشستگی در جریان آب صاف و در شرایط آستانه حرکت مواد بستری (تنش برشی بحرانی) به‌وجود می‌آید [۱۰۴].

همچنین، کامورا (۱۹۷۱) رابطه زیر را برای برآورد عمق آبشستگی در بستر متحرک ارائه داد [۱۰۴].

$$\frac{d_S}{d_1} = (1+1.2Fr_1^2)\left[(B_1/B_2)^{\frac{2}{3}} - 1\right] \qquad (۶-۱۳)$$

که در این رابطه Fr_1 عدد فرود در بازه اصلاح نشده (یا بازه بالادست) است.

در شرایطی که فشردگی بازه رودخانه ناشی از احداث سری آبشکن‌ها است، به‌دلیل توسعه ناحیه جدایی جریان متاثر از هر آبشکن به داخل مجرای اصلی، عرض موثر جریان کم‌تر از عرض ظاهری فشردگی بازه است. سوزوکی و همکاران (۱۹۸۷) مطابق شکل (۶-۱۶)، ضریب تصحیح عرض موثر (λ) را برای تعدیل عرض B_2 معرفی نمودند. ضریب λ برحسب نسبت فاصله به طول آبشکن‌ها (S/L) به‌طور تجربی بررسی شده،که نتایج آن در شکل (۶-۱۷) ارائه گردیده است. مفهوم فیزیکی تاثیر ضریب λ در زیر تشریح گردیده است [۱۰۴ و ۱۵۰].

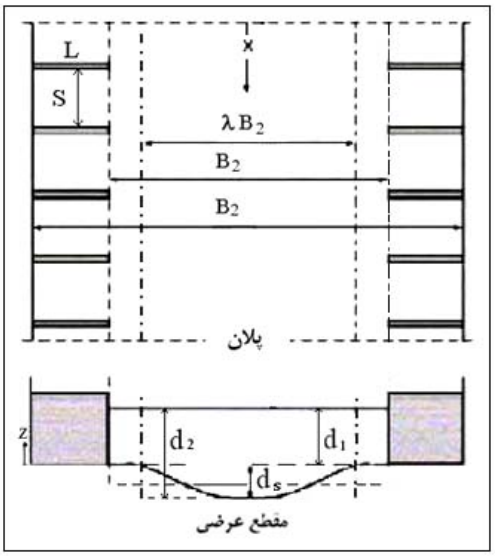
اگر $S/L < 4$ باشد، $\lambda = 1$ بوده و آبشستگی آبشکن‌ها معادل فرسایش در بازه فشرده است.

اگر $S/L = 4\text{-}8$ باشد،$\lambda < 1$ بوده و آبشستگی آبشکن‌ها بیش‌تر از فرسایش در بازه فشرده (آبشکن‌های متراکم) است.

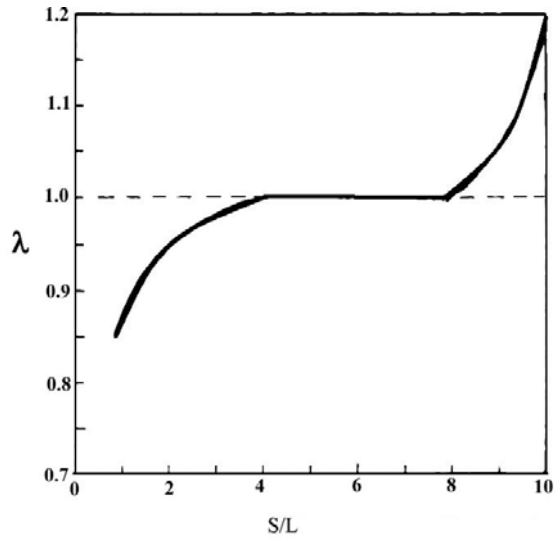
اگر $S/L > 8$ باشد، در این‌صورت$\lambda > 1$ بوده و آبشستگی آبشکن‌ها کم‌تر از فرسایش در بازه فشرده (آبشکن منفرد) است.

ازاین رو توصیه گردیده تا در روابط (۶-۱۲) و (۶-۱۳) به‌جای B_2 عبارت λB_2 قرار داده شود.

1- Clear-Water Scour
2- Live-Bed Scour



شکل ۶-۱۶- نمایش آبشستگی عمومی در یک بازه فشرده شده با آبشکن‌ها [۱۵۰]



شکل ۶-۱۷- ضریب تصحیح عرض موثر (λ) برحسب نسبت فاصله به طول آبشکن‌ها (S/L) [۱۰۴]

- رابطه لارسن (۱۹۶۰ و ۱۹۸۰)

رابطه لارسن (۱۹۶۰ و ۱۹۸۰) برای برآورد عمق آبشستگی عمومی در رودخانه‌های سیلابدشتی (با مقطع اصلی و بستر سیلابی)، و برای رودخانه‌های با مقطع ساده کاربرد دارد. برای شرایطی که تمام جریان آب در بستر سیلابی بالادست از بازه فشرده شده عبور نماید، معادله تجربی زیر برای حالت تعادل دینامیکی بستر متحرک ارائه شده است [۳۷ و ۱۰۲].

$$\frac{d_2}{d_1} = (Q_t / Q_C)^{\frac{6}{7}} (B_1 / B_2)^{\frac{6(2+a)}{7(3+a)}} (n_2 / n_1)^{\frac{6a}{7(3+a)}} \qquad (۶-۱۴-\text{الف})$$

$$d_S = d_2 - d_1 \qquad (۶-۱۴-ب)$$

که در این روابط:

اندیس ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به بازه بالا دست و بازه تنگ شده می‌باشد (شکل ۶-۱۸)، Q_t: کل بده مقطع مرکب بازه بالادست که از مقطع بازه تنگ شده عبور می‌کند، Q_c: بده در مقطع اصلی بازه بالادست، d: عمق آب، B: عرض سطح آب و n ضریب زبری مانینگ است. a ضریبی است که تابع نسبت (V_*/W) بوده (که V_* سرعت برشی و W سرعت حد سقوط مواد بستر است و از روابط زیر محاسبه می‌گردند) و مقادیر آن به‌طور تجربی از جدول (۶-۴) به‌دست می‌آید.

$$V_* = \sqrt{gRS} \approx \sqrt{gdS} \qquad (۶-۱۴-ج)$$

$$W = \left[\frac{4}{3}\frac{gD_{50}}{C_D}(S_g - 1)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۶-۱۴-د)$$

که در این روابط:

S: شیب انرژی در بازه بالادست، g: شتاب ثقل، D_{50}: اندازه متوسط مواد بستری، S_g: چگالی ویژه حقیقی مواد بستری، و C_D ضریب کشش است. برای رودخانه‌های با مقطع ساده، مواد بستری درشت‌دانه و یا شریانی (که تنها یک مقطع اصلی سیلابی دارند)، در رابطه (۶-۱۴- الف) تساوی‌های $Q_t = Q_c$ و $n_1 = n_2$ برقرار خواهد بود.

همچنین، توصیه می‌شود که برای محاسبه عمق آبشستگی عمومی (ds) در بازه آبشکن‌ها، از ضریب اصلاحی λ (سوزوکی و همکاران، ۱۹۸۷) استفاده شده و در رابطه (۶-۱۴-الف) به‌جای B_2 عبارت λB_2 قرار داده شود.

جدول ۶-۴- مقادیر ضریب (a) در رابطه (۶-۱۴-الف) [۳۷]

بار رسوبی غالب رودخانه	مقدار (V_*/W)	ضریب a
بار کف	<۰/۵	۰/۲۵
بار کف و بار معلق	<۱	۱
بار معلق	<۲	۲/۲۵

- **رابطه گیل (۱۹۷۲)**

گیل (۱۹۷۲) برای محاسبه عمق آبشستگی عمومی (ds) برای شرایط بستر متحرک در بازه آبشکن‌ها رابطه زیر را ارائه داد [۱۰۴].

$$\frac{d_S}{d_1} = (B_1/B_2)^{\frac{-6}{7}}\left[(B_1/B_2)^{-P}(1-\tau_c/\tau_1) + \tau_c/\tau_1\right] \qquad (۶-۱۵)$$

که در این رابطه:

d: عمق آب، B: عرض سطح آب رودخانه، τ: متوسط تنش برشی جریان و τ_c تنش برشی بحرانی برای مواد بستری است. اندیس ۱ و ۲ به‌ترتیب مربوط به بازه اصلاح نشده (یا بازه بالادست) و بازه اصلاح شده است.

- **رابطه می چیو و همکاران (۱۹۸۴)**

می چیو و همکاران (۱۹۸۴) برای محاسبه عمق آبشستگی عمومی (ds) برای شرایط بستر متحرک در بازه آبشکن‌ها رابطه زیر را ارائه دادند [۱۰۴].

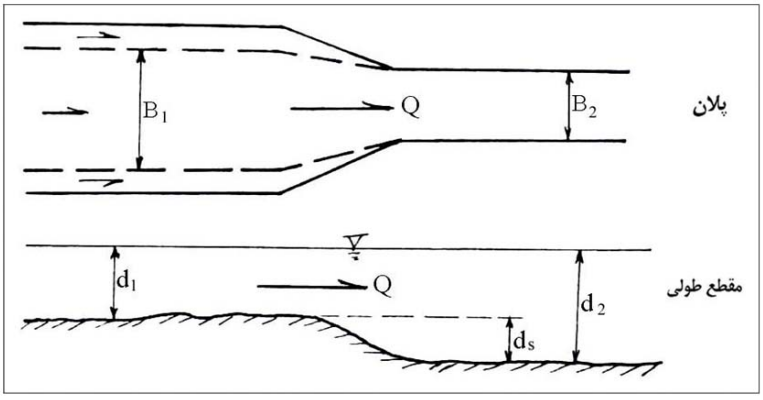
$$\frac{d_S}{d_1}=\left[(B_1/B_2)^{\frac{-4}{7}}-1\right]+(\frac{1}{2}Fr_1^2)\left[(B_1/B_2)^{\frac{-6}{7}}-1\right] \qquad (۶-۱۶)$$

- **رابطه وانگ و یاناپیروت (۱۹۸۸)**

وانگ و یاناپیروت (۱۹۸۸) برای محاسبه عمق آبشستگی عمومی در بازه آبشکن‌ها، برای نسبت فاصله به طول آبشکن در محدوده ($1.67\ S/L \leq 5$)، رابطه زیر را ارائه دادند [۱۵۰].

$$\frac{d_2}{d_1}=(B_1/B_2)^{\frac{6}{7}}(S/L)^{\frac{-1}{7}} \qquad (۶-۱۷-\text{الف})$$

$$d_S=d_2-d_1 \qquad (۶-۱۷-\text{ب})$$



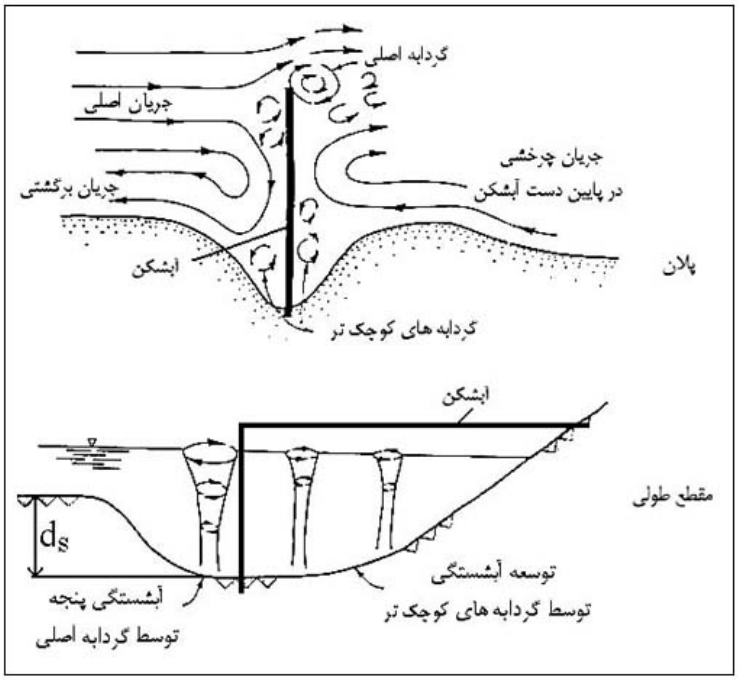
شکل ۶-۱۸- نمایش آبشستگی عمومی در بازه تنگ شده از یک رودخانه سیلابدشتی [۱۰۲]

۶-۲-۸-۲- آبشستگی موضعی

یکی از اثرهای کارکرد آبشکن‌ها توسعه آبشستگی موضعی در دماغه و پنجه آبشکن (در اثر جریان گردابی اصلی- نعل اسبی) و گسترش حفره آبشستگی در پیرامون بدنه آبشکن (همراه گردابه‌های دیگر) است (شکل ۶-۱۹). آبشستگی موضعی همگام با آبشستگی عمومی ممکن است وقوع یابد. به‌هرحال عمق فرسایش حفره‌ای ناشی از آبشستگی موضعی در پیرامون آبشکن‌ها خیلی بیش‌تر از عمق آبشستگی عمومی‌خواهد بود.

عمق آبشستگی موضعی تابع زمان و شدت تغییر جریان عبوری بوده و با حرکت مواد بستری به داخل حفره فرسایشی و نیز با تعلیق و خروج مواد از آن تغییر می‌کند. متوسط عمق آبشستگی موضعی را در شرایط تعادل دینامیکی بستر، «عمق تعادل آبشستگی» می‌نامند. عمق تعادلی در شرایط دوام زمانی جریان ایجاد شده، زیرا فرصت زمانی برای حصول آن زیاد می‌باشد. ازاین‌رو در رودخانه‌هایی که زمان دوام حداکثر سیل آنها کوتاه است، گسترش آبشستگی به عمق تعادلی نخواهد رسید. نتایج تجربی نشان داده که «عمق حداکثر آبشستگی» در واقعیت حدود ۳۰ درصد بیش‌تر از «عمق حداکثر تعادلی آبشستگی» خواهد بود [۱۰۷]. روابط

مختلفی برای برآورد عمق حداکثر تعادلی آبشستگی ارائه شده است. مهم‌ترین این روابط، به‌تفکیک برای آبشکن‌های منفرد و سری آبشکن‌ها در زیر معرفی می‌گردند.



شکل ۶-۱۹- نمایش آبشستگی موضعی در پیرامون یک آبشکن [۱۴]

- **عمق آبشستگی برای آبشکن‌های منفرد**

روش‌های مختلف برآورد عمق حداکثر آبشستگی در دماغه یک آبشکن منفرد و مستقیم در جدول (۶-۵) ارائه شده است [۴۵ و ۱۴۷]. مهم‌ترین این روش‌ها که کاربرد عمومی‌تری دارند، در زیر شرح داده شده است.

- **رابطه احمد (۱۹۵۱)**

رابطه تجربی احمد (۱۹۵۱) به‌صورت زیر است [۴۸، ۴۹ و ۱۵۰]:

$$d_S = K_A K'_A \left[\frac{q}{1-(b/B)}\right]^{\frac{2}{3}} - d \qquad \text{(۶-۱۸- الف)}$$

$$K_A = 2K_p K_s K_\alpha K_\mu \qquad \text{(۶-۱۸- ب)}$$

که در این روابط:

ds: حداکثر عمق تعادلی آبشستگی، d: عمق متوسط آب در بازه بالادست، b: طول موثر آبشکن، B: عرض رودخانه، q: بده واحد عرض، K'_A: ضریب تبدیل واحدی (برابر ۱/۰ در سامانه بین‌المللی)، K_p: ضریب تصحیح پیچ (۰/۸۵ برای پیچ داخلی، ۱/۱ تا ۱/۴ برای پیچ خارجی)، K_s: ضریب تصحیح شکل آبشکن (۱/۰ برای دیواره جانبی قائم، ۰/۸۵ برای دیواره با شیب جانبی 1H:1V)،

K_α: ضریب تمایل استقرار آبشکن (۰/۸ تا ۱/۱ برای زاویه ۳۰ تا ۱۵۰ درجه) و K_μ ضریب تصحیح تخلخل مواد بستری (۱/۰ برای تخلخل ۲۰٪ و ۰/۶ تا ۰/۹ برای تخلخل ۵۰٪) است.

- **رابطه لیو و همکاران (۱۹۶۱)**

لیو و همکاران (۱۹۶۱) براساس نتایج آزمایشگاهی (بر روی آبشکن‌های کوتاه‌تر) و مطالعات صحرایی (بر روی آبشکن‌های بلند سنگ‌ریزه‌ای در رودخانه می‌سی‌سی‌پی)، معادلات زیر را برای آبشکن‌های مستقیم و با امتداد قائم (زاویه تمایل $\theta= 90^\circ$) در رودخانه‌های بستر ماسه‌ای به‌صورت زیر ارائه داده‌اند [۳۷]:

$$\frac{d_S}{d} = 1.10\left(\frac{b}{d}\right)^{0.4} Fr^{0.33} \qquad (b/d) < 25 \qquad \text{(۶-۱۹- الف)}$$

$$\frac{d_S}{d} = 4Fr^{0.33} \qquad (b/d) > 25 \qquad \text{(۶-۱۹- ب)}$$

که در این روابط:

d_S: عمق تعادلی آبشستگی موضعی، d: عمق متوسط آب در بازه بالادست، b: طول موثر آبشکن و Fr عدد فرود بازه بالادست است. در شرایطی که امتداد استقرار آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان قائم نباشد، ضریب تصحیح K_θ (شکل ۶-۲۰) پیشنهاد شده است.

- **رابطه گیل (۱۹۷۲)**

رابطه نیمه‌تجربی گیل (۱۹۷۲) برای آبشکن‌های با دیواره قائم، در رودخانه‌های بستر ماسه‌ای، و با تمایز بین آبشستگی جریان صاف و جریان رسوبی به‌صورت زیر ارائه شده است [۱۵۰]:

$$d_S = \alpha d\left(\frac{1}{1-b/B}\right)^{\frac{6}{7}}\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)^{\frac{3}{7}} - d \qquad \text{جریان آب صاف} \qquad \text{(۶-۲۰- الف)}$$

$$d_S = \alpha d\left(\frac{1}{1-b/B}\right)^{\left(\frac{6}{7}-\frac{3}{7n}\right)} - d \qquad \text{جریان آب و رسوب (بستر متحرک)} \qquad \text{(۶-۲۰- ب)}$$

$$\alpha = 8.375\left(\frac{D_{50}}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad \text{(۶-۲۰- ج)}$$

که در این روابط:

τ: تنش برشی جریان بالادست، τ_c: تنش برشی بحرانی، D_{50}: اندازه ۵۰٪ مواد بستری بوده و دیگر عوامل در رابطه (۶-۱۶) تعریف شده است.

- **رابطه پترسن (۱۹۸۶)**

پترسن (۱۹۸۶) نیز معادله زیر را برای آبشکن‌های مستقیم با امتداد قائم (زاویه تمایل $\theta= 90^\circ$) و با دیواره جانبی عمودی به‌صورت زیر گزارش نموده است [۱۰۲]:

$$\frac{d_S}{d} = 2.75\left(\frac{b}{d}\right)\left[\left(\frac{b}{11.5d}+1\right)^{1.69} - 1\right] \qquad \text{(۶-۲۱)}$$

که در این رابطه:

d_S: عمق تعادلی آبشستگی موضعی، d: عمق متوسط آب در بازه بالادست و b طول موثر آبشکن است. درصورتی‌که دیواره جانبی بدنه و دماغه آبشکن شیب‌دار باشد، مقدار d_S حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

- **رابطه ملویل (۱۹۹۲)**

رابطه ملویل (۱۹۹۲) براساس تحلیل ابعادی و با استفاده از داده‌های تجربی موجود در منابع مختلف به‌صورت زیر است [۹۳]:

$$ds = 2K_S(b) \qquad (b/d) < 1 \qquad \text{(۶-۲۲- الف)}$$

$$ds = 2K_S{}^{*}K_\theta{}^{*}(bd)^{\frac{1}{2}} \qquad 1 \le (b/d) \le 25 \qquad \text{(۶-۲۲- ب)}$$

$$ds = 10K_\theta^{*}d \qquad (b/d) > 25 \qquad \text{(۶-۲۲- ج)}$$

$$K_s^{*} = K_S \qquad (b/d) \le 10 \qquad \text{(۶-۲۲- د)}$$

$$K_s^{*} = K_S + (1-K_s)(\frac{0.1b}{d} - 1.5) \qquad 10 \le (b/d) \le 25 \qquad \text{(۶-۲۲- ه)}$$

$$K_s^{*} = 1 \qquad (b/d) > 25 \qquad \text{(۶-۲۲- و)}$$

$$K_\theta^{*} = K_\theta \qquad (b/d) \ge 3 \qquad \text{(۶-۲۲- ز)}$$

$$K_\theta^{*} = K_\theta + (1-K_\theta)(1.5 - \frac{0.5b}{d}) \qquad 1 \le (b/d) \le 3 \qquad \text{(۶-۲۲- ح)}$$

$$K_\theta^{*} = 1 \qquad (b/d) \le 1 \qquad \text{(۶-۲۲- ط)}$$

که در این روابط:

ds: حداکثر عمق تعادلی آبشستگی، b: طول موثر آبشکن، d: عمق متوسط آب در بازه بالادست، K_θ: ضریب تمایل استقرار آبشکن (شکل ۶-۲۰) و K_S ضریب شکل آبشکن (جدول ۶-۶) است.

- **هافمن و ورهیج (۱۹۹۷)**

هافمن و ورهیج (۱۹۹۷) رابطه زیر را از انطباق داده‌های تجربی موجود در منابع ارائه داده است [۱۵۰]:

$$d_S = d\left[\left(\frac{1}{1-b/B}\right)^{\frac{2}{3}} - 1\right] + K_B b\left[\tanh\left(\frac{d}{b}\right)\right] \qquad \text{(۶-۲۳)}$$

که در این رابطه:

ds: حداکثر عمق تعادلی آبشستگی، d: عمق متوسط آب در بازه بالادست، K_B: ضریب تصحیح شیب جانبی آبشکن (۱/۵ برای دیواره شیب‌دار)، b: طول موثر آبشکن و B عرض رودخانه است.

جدول ۶-۵- روابط برآورد عمق حداکثر آبشستگی موضعی در دماغه آبشکن‌های منفرد و مستقیم [۴۵]

شماره	مرجع	عمق حداکثر آبشستگی نسبی: $(d_S+d)/d$
۱	احمد (۱۹۵۱)	$\frac{1}{d}K_A K'_A\left[\frac{q}{1-(b/B)}\right]^{\frac{2}{3}}$
۲	اوازو (۱۹۶۷)	$C_1 + C_2 * LOG[\tau_b / N_o)/(\tau_{b*} / N_{0*})]$ $N_o = \frac{(g*n^2)}{\frac{1}{d^3}}$; $(\tau_{b*} / N_{0*}) = C_3 * \tau_c /(C_4 * a + C_5)^2$
۳	انگلیس (۱۹۴۹)	$C_1 * (1/d) * (Q/f)^{\alpha}$
۴	ایزارد و برادلی (۱۹۵۷)	$C_1 * (1/d) * [(Q/(B-b)]^{\alpha} * (F_{bo}^{-\beta})$
۵	بلنچ (۱۹۶۹)	$C_1 * (1/d) * [(Q/(B-b)]^{\alpha} * (F_{bo}^{-\beta})$
۶	پترسن (۱۹۸۶)	$2.75(\frac{b}{d})\left[(\frac{b}{11.5d}+1)^{1.69}-1\right]+1$
۷	خوسلا (۱۹۳۶)	$C_1 * (1/d) * [(Q/(B-b)]^{\alpha} * (F_{bo}^{-\beta})$
۸	داس (۱۹۷۲)	$C_1 * [10^{(a-\alpha)} * F_r^{\beta} * (D_{50}/d)^{-\gamma}]$
۹	راجارتنام و نواچوکو (۱۹۸۳)	$1 + C_1 * (\tau_b / d)$
۱۰	زاگالول (۱۹۸۳)	$C * (1/a) * (\theta)^{-\beta} * (F_r)^{\gamma}$
۱۱	زایو (۱۹۹۴)	$1 + (1/d) * [C_1 * (d/3b)^{\alpha} * (V/U_S) * b - d] * K_\theta * K_\varphi$
۱۲	کوتو و همکاران (۱۹۹۴)	$1 + C_1 * (b/d)^{-\alpha} * (d/D_{50})^{\beta} * F_r^{\gamma}$
۱۳	گاردی و همکاران (۱۹۶۱)	$C_1 * [(1/a) * F_r^{\alpha}]$
۱۴	گیل (۱۹۷۲)	$C * [(D_{50}/d)^{\alpha} * (1/a)^{\beta}]$
۱۵	لارسن (۱۹۶۲ و ۱۹۶۳)	$C_1 * (b/d) * \{[(C_2 * d_S/d)+1]^{\alpha} - 1\}^{-1} + 1$
۱۶	لیو و همکاران (۱۹۶۱)	$C_1 + C_2 * [(B-b)/d]^{\alpha} * (1/a)^{\beta} * F_r^{\gamma}$
۱۷	لیسی (۱۹۲۹)	$C_1 * (1/d) * (Q/B)^{\alpha} * (f_1)^{-\alpha}$
۱۸	موخامدوف و همکاران (۱۹۷۱)	$(C_1/d) * [Sin^{\frac{1}{4}} * Cos^{\frac{1}{2}}\phi/(a * (D_{85}/D_{50})^{\frac{1}{6}}) * (1+0.09C)] *$ $[(V * d_m^{\frac{1}{2}})/q^{\frac{1}{2}} * (1+135F_r)^{\frac{3}{2}}$
۱۹	ملویل (۱۹۹۲)	$2K_S(b/d)+1$: $(b/d)<1$ $2K_s^* K_\theta^* * (b/d)^{\frac{1}{2}} + 1$: $1 \le (b/d) \le 25$ $10K_\theta + 1$: $(b/d)>25$
۲۰	هافمن و ورهیج (۱۹۹۷)	$\left[\left(\frac{1}{1-b/B}\right)^{\frac{2}{3}}-1\right]+K_B(b/d)\left[\tanh\left(\frac{d}{b}\right)\right]+1$

dS: عمق حداکثر تعادلی آبشستگی موضعی در دماغه آبشکن، B: عرض سطح آب، b: طول موثر آبشکن، a=(B-b)/b: نسبت فشردگی، θ: زاویه تمایل آبشکن، φ: شیب جانبی آبشکن، Q: بده جریان، d: عمق متوسط آب در بازه بالادست آبشکن، V: سرعت متوسط جریان، Fr: عدد فرود بالادست، τb: تنش برشی بستر، τc: تنش برشی بحرانی، Ks: ضریب تصحیح شیب جانبی آبشکن، دیگر عوامل در روابط جدول ضرایب ثابت و تجربی هستند.

نتایج مطالعات مستقل نشان می‌دهد که رابطه گیل (۱۹۷۲) و ملویل (۱۹۹۲) برآورد مناسبی از عمق حداکثر آبشستگی موضعی در دماغه آبشکن‌های منفرد و مستقیم (با ضریب اطمینان بالاتر) ارائه می‌دهند [۱۴۷]. کاربرد رابطه ملویل (۱۹۹۲) برای محاسبه عمق آبشستگی موضعی توصیه می‌شود. نتایج تجربی نشان داده که «عمق حداکثر آبشستگی» در واقعیت حدود ۳۰ درصد بیش‌تر از «عمق حداکثر تعادلی آبشستگی» محاسبه شده از روابط فوق یا روابط ارائه شده در جدول (۶-۵) است [۱۰۷]. بنابراین توصیه می‌شود که از ضریب تصحیح ۱/۳ برای برآورد عمق حداکثر آبشستگی استفاده گردد.

- عمق آبشستگی برای سری آبشکن‌ها

در آرایش سری آبشکن‌ها، عمق آبشستگی برای تمام آبشکن‌ها یکسان نبوده، بلکه تابع موقعیت هر یک در سری می‌باشد. عمق آبشستگی برای اولین آبشکن مشابه یک آبشکن منفرد است. برای آبشکن‌های پایین‌دست، به‌دلیل تاثیر متقابل آبشکن‌های مجاور، عمق آبشستگی کم‌تر از آبشکن اولی بوده و تابع نسبت فاصله به طول آبشکن‌ها (S/L) است.

- **راستای مستقیم رودخانه**

برای محاسبه عمق آبشستگی موضعی در راستای مستقیم رودخانه، رابطه سوزوکی و همکاران (۱۹۸۷) به‌صورت زیر ارائه شده است [۱۵۰].

$$\frac{d_{S,DS}}{d_{S,1}} = 0.07\left(\frac{S}{L}\right) + 0.14 \qquad 2 < \frac{S}{L} < 10 \qquad (۶-۲۴-الف)$$

$$\frac{d_{S,DS}}{d_{S,1}} = 1 \qquad \frac{S}{L} > 12 \qquad (۶-۲۴-ب)$$

که در این روابط:

$d_{S,DS}$: عمق آبشستگی آبشکن‌های پایین‌دست و $d_{S,1}$ عمق آبشستگی اولین آبشکن که مشابه آبشکن منفرد بوده و از روابط آبشکن منفرد در بخش قبلی محاسبه می‌گردد. برای شرایط (S/L>12)، تاثیر تداخل ناحیه چرخشی جریان بین دو آبشکن متوالی ناچیز بوده و کارکرد هر یک از آبشکن‌ها به‌صورت منفرد خواهد بود.

- **پیچ رودخانه**

در پیچ رودخانه، حداکثر عمق آبشستگی برای آبشکن‌های مستقر در محدوده خروجی پیچ (پایین‌دست راس پیچ) رخ می‌دهد. پرزودوفسکی (۱۹۹۵) رابطه زیر را برای محاسبه عمق حداکثر آبشستگی موضعی در پیچ رودخانه ارائه نمود [۱۵۰].

$$d_S = \beta D\left[\frac{d}{D} + \frac{Q_g}{Q_o}\cos\left(2\pi\frac{x}{L}\right) + \sin(\alpha - 90)\right]^{n-2} \qquad (۶-۲۵)$$

$$Q_g = dUS\left(\sin\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \qquad (۶-۲۶)$$

که در این روابط:

ds: حداکثر عمق تعادلی آبشستگی، β: ضریب ثابت (β=0.275)، D: عمق متوسط آب در بازه بالادست، d: عمق آب در بازه آبشکن‌ها، α: زاویه تمایل استقرار آبشکن، n: مقدار عددی توان در معادله بار رسوبی به فرم نمایی ($Q_s=mU^n$)، U: سرعت متوسط،

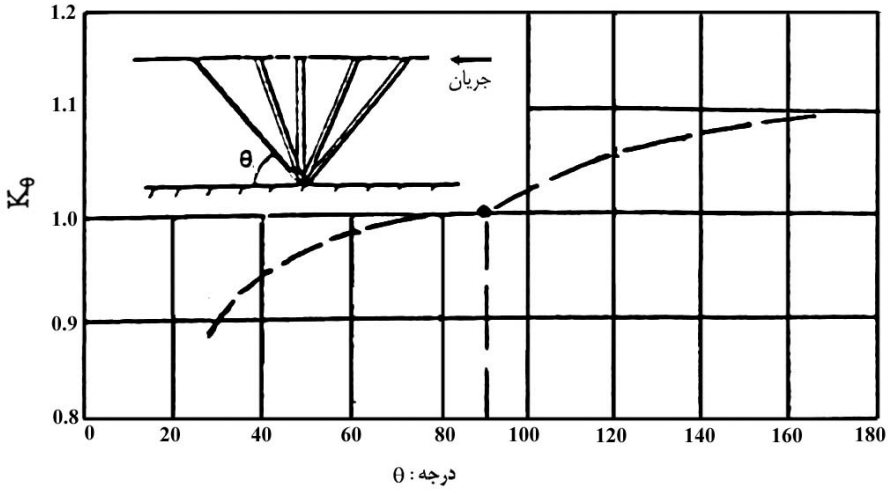
S: فاصله بین آبشکن‌ها، L: طول پیچ رودخانه، X: فاصله از ابتدای پیچ، Δφ: زاویه بین دو آبشکن متوالی در پیچ، Q_o: بده در مجرای اصلی رودخانه در بین آبشکن‌ها و Q_g بخشی از بده که در حد فاصل بین آبشکن‌ها محصور است.

هنوز یک رابطه عمومی برای محاسبه عمق آبشستگی ارائه نگردیده است. باید توجه داشت که مبنای تئوری و تجربی روش‌های مختلف موجود یکسان نبوده، و نباید انتظار داشت که برآورد عمق آبشستگی عمومی و یا موضعی از روش‌های مختلف لزوما یکسان و یا نزدیک به یکدیگر باشد. علاوه بر این بیش‌تر مطالعات در شرایط آزمایشگاهی بر روی بستر ماسه‌ای با دوام زمانی لازم برای حصول به تعادل دینامیکی حفره آبشستگی و عموما برای آبشکن‌های مستقیم انجام شده است. بنابراین برای شرایط طبیعی رودخانه، جریانات سیلابی با دوام کم‌تر، در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه (با لایه سطحی مقاوم به فرسایش) و برای آبشکن‌های نوع T یا L شکل، نامطمئنی‌هایی در برآورد آبشستگی موضعی به‌وجود می‌آید [۱۰۷].

کاربرد یک روش، به تنهایی و بدون اطمینان از تطبیق شرایط کاربرد آن با بازه رودخانه و مشخصات آبشکن‌های مورد نظر صحیح نمی‌باشد. کاربرد تمام و یا تعدادی از روش‌ها، بدون اطمینان از تطبیق شرایط کاربرد آنها و استفاده از متوسط برآورد روش‌های مختلف درست نبوده و توصیه نمی‌گردد. راه درست، انتخاب روش‌های مختلف براساس انطباق کاربرد آنها با شرایط مورد نظر، سپس برآورد عمق آبشستگی از این روش‌ها و سرانجام قضاوت مهندسی در برآورد نهایی عمق آبشستگی عمومی و یا موضعی است [۴۵]. ارزیابی نهایی نتایج حاصل از برآورد فوق نیاز به اندازه‌گیری صحرایی عمق و گستره آبشستگی در پیرامون آبشکن‌های رودخانه مورد نظر خواهد داشت. باید توجه داشت که عمق نهایی آبشستگی پیرامون آبشکن‌ها از مجموع دو عمق آبشستگی عمومی و موضعی به‌دست خواهد آمد [۱۰۴].

- **هندسه حفره آبشستگی**

گستره سطحی فرسایش حفره‌ای در پیرامون آبشکن با استفاده از عمق حداکثر آبشستگی (d_S) و زاویه قرار مواد بستری (φ) قابل محاسبه است. پترسن (۱۹۸۶) گسترش عرضی حفره آبشستگی را حداکثر معادل ($2.75d_S$) گزارش کرده است [۱۰۲].



شکل ۶-۲۰- ضریب تصحیح تمایل استقرار آبشکن (K_θ) در محاسبه عمق آبشستگی موضعی [۹۳]

جدول ۶-۶- ضریب تصحیح شکل مقطع آبشکن (K_s) در محاسبه آبشستگی موضعی [۹۳]

شکل مقطع آبشکن (با توجه به شکل ۳-۱۴)	ضریب شکل:K_s
دیواره قائم صفحه‌ای یا با ضخامت کم	۱/۰
دیواره قائم با دماغه نیم‌دایره‌ای	۰/۷۵
دیواره باله‌ای با شیب (1H:1V)، و دماغه قائم	۰/۷۵
دیواره باله‌ای و دماغه شیب‌دار، با شیب جانبی: (0.5H:1V) (1H:1V) (1.5H:1V)	 ۰/۶۰ ۰/۵۰ ۰/۴۵

۶-۲-۹- طرح سازه آبشکن

در این بخش ساختار آبشکن از نظر مصالح و ساخت پایدار سازه‌ای مورد نظر قرار می‌گیرد. جزییات مراحل اجرا و ساخت آبشکن‌ها در فصل (۷) ارائه می‌گردد.

۶-۲-۹-۱- مصالح ساخت آبشکن

آبشکن‌ها از مصالح متنوع سازه‌ای و طبیعی ساخته می‌شوند. به‌طورکلی مصالح ساخت آبشکن‌ها ممکن است از مصالح خاکی و یا رودخانه‌ای، مصالح سنگی، سیمان و بتن، تورسیمی، تیرک و الوار چوبی، شمع و پایه‌های فلزی، کیسه‌های الیاف طبیعی یا مصنوعی و مصالح طبیعی (تیرک و الوار چوبی، تنه و شاخ و برگ درختان) باشد.

انتخاب مصالح مناسب برای ساخت آبشکن‌ها تابعی از عوامل زیر است.

- فراوانی مصالح، فاصله و سهولت دسترسی و کیفیت و دوام مصالح در سامانه رودخانه
- روش انحراف آب رودخانه و شرایط اجرا در رودخانه (در خشکی یا زیر آب)
- ساختار آبشکن (نوع، شکل و شیب جانبی) و نیاز به نگهداری و ترمیم آبشکن در آینده
- مهارت فنی و تکنولوژی استفاده از مصالح مورد نظر در ساخت آبشکن
- ملاحظات زیست محیطی، مقبولیت اجتماعی و تحلیل اقتصادی

نوع و خصوصیات مصالح تاثیر مهمی روی انتخاب نوع آبشکن، کارایی آبشکن‌ها، طول عمر مفید آنها، هزینه‌های ساخت و نگهداری سازه در آینده دارد. شرح مختصر انواع مصالح، خصوصیات و کیفیت مصالح و کاربرد آنها در شرایط رودخانه و برای ساخت آبشکن‌ها در زیر ارائه شده است.

- **مصالح خاکی:** از مصالح خاکی برای ساخت هسته و بدنه اصلی آبشکن‌ها می‌توان استفاده نمود. منابع قرضه مصالح خاکی ممکن است رودخانه‌ای (بارها و جزایر رسوبی در بستر اصلی رودخانه و یا چاله‌زنی‌های کم عمق در سیلابدشت رودخانه) و یا خشکی و کوهی (ارتفاعات مجاور رودخانه) باشد. مواد خاکی باید فاقد مواد آلی و نباتی و همچنین گچ و مواد حل شدنی باشد. خاک‌های بسیار سنگین (با درصد رس زیاد و نوع رس قابل تورم) و ماسه بادی مناسب نیستند. ماسه ریزدانه و یکنواخت (با تعداد ضربات کم‌تر از ۱۰ در آزمون SPT) و مخلوط خاکی ریزدانه (با مقاومت تک محوری کم‌تر از ۰/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، با بارپذیری کم‌تر از ۱۰۰ کیلوگرم در آزمون سونداژ سوئدی و ضربات SPT کم‌تر از ۳) قابلیت

روانگرایی و نشست‌پذیری داشته و ناپایدار می‌باشند. از مصالح ضعیف (ماسه‌ای) برای ارتفاع بیش از ۲ متر نباید استفاده گردد [۱۲۶]. مصالح شنی و درشت‌تر ایده‌آل هستند. در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه و شریانی، بارها و جزایر رسوبی منبع مناسبی برای مصالح بدنه آبشکن‌ها است [۲۹ و ۳۰].خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مناسب برای مصالح خاکی بدنه آبشکن‌ها، عموما مشابه دیواره‌های خاکریز ساحلی کوتاه (گوره‌ها) است. جزییات مربوط به انتخاب منابع قرضه خاکی، نمونه‌برداری‌ها و آزمایش‌ها و حداقل استانداردهای لازم برای مصالح خاکی و کاربرد آنها در سامانه رودخانه در مراجع شماره [۲، ۳۰ و ۱۲۶] ارائه شده است.

- **سنگ:** بهترین مصالحی که در طبیعت فراوان یافت شده، برای سرعت زیاد، تلاطم شدید و شرایط مختلف رودخانه‌ها مناسب و مقاوم بوده، و برای ساخت آبشکن‌ها ایده‌آل می‌باشد، سنگ است. سنگ در فرم‌های مختلف (انعطاف‌پذیر یا صلب) مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌صورت یک سازه انعطاف‌پذیر کاربرد موثری دارد. سنگ و سیمان (در کل ساختار آبشکن، یا به‌صورت روکش) یک سازه صلب است که مناسب شرایط رودخانه‌ای نبوده و جز در موارد خاص توصیه نمی‌شود. کاربرد سنگ‌ها به‌صورت توده‌ای (با حجم زیادتر و کار کم‌تر) یا به‌صورت سنگ فرش و خشکه چین (با حجم کم‌تر و کار زیادتر) به‌دلیل انعطاف‌پذیری، قابلیت تغییر شکل و تنظیم و امکان مرمت و بازسازی، مناسب‌تر است. سنگ‌های با اندازه، شکل و دانه‌بندی مناسب از پایداری بیش‌تری برخوردار بوده و به‌طور گسترده‌ای در ساخت آبشکن‌های سنگ‌ریزه‌ای (در کل ساختار آبشکن یا به‌صورت روکش) استفاده می‌گردد. در شرایطی که سنگ با اندازه، شکل و دانه‌بندی مناسب فراهم نباشد، از تورسیمی برای ساخت آبشکن‌های تورسنگی (به‌صورت جعبه‌ای در کل ساختار آبشکن یا به‌صورت روکش تورسنگ) به‌عنوان سازه پایدار و انعطاف‌پذیر استفاده می‌گردد. سنگ‌های سنگین و توپر بدون ترک و شکستگی مناسب‌تر هستند. چگالی مخصوص سنگ در حالت اشباع و سطح خشک شده حداقل معادل ۲/۵ پیشنهاد شده یا چگالی مخصوص ۹۰٪ سنگ‌ها از ۲/۵ بیش‌تر باشد. مقاومت فشاری سنگ‌ها باید بیش از ۴۰ مگاپاسکال باشد [۳۷ و ۱۱۰]. مقاومت سنگ به هوازدگی و تخریب فیزیکی و شیمیایی (به‌ویژه در شرایطی که بار رسوبی رودخانه درشت‌دانه بوده و یا کیفیت شیمیایی آب رودخانه نامناسب باشد) مهم می‌باشد. برای مقاومت در برابر هوازدگی و فرسایش، متوسط درصد جذب آب سنگ‌ها باید کم‌تر از ۲٪ و درصد جذب آب ۹ قطعه از سنگ‌ها کم‌تر از ۲/۵٪ باشد. همچنین، سنگ فاقد مواد ناخالصی، گچی و حل شونده بوده و افت وزنی سنگ در آزمون ذوب و انجماد کم‌تر از ۰/۵٪ باشد [۱۱۰]. برای مقاومت فیزیکی، شاخص دوام سنگ در آزمایش سایش لس آنجلس حداقل به میزان ۵۲ پیشنهاد شده است. برای مقاومت شیمیایی، افت وزنی سنگ در آزمایش سولفات سدیم بعد از پنج سیکل تکرار نباید از ۲۰ درصد تجاوز نماید [۷ و ۳۷].از نظر شکل، سنگ‌های گوشه‌دار و غیرکروی مناسب‌تر هستند. نسبت بعد طولی سنگ (L) به بعد حداقل یا ضخامت آن (t) نباید بیش از ۳ باشد ($L/t< 3$)، یا توصیه شده که این نسبت برای ۹۵٪ سنگ‌ها از ۳ کم‌تر باشد. ۲۵ درصد سنگ‌ها با نسبت ($L/t\geq 2.5$) قابل قبول است [۱۱۰ و ۱۲۸]. رنگ سنگ نیز از نظر تناسب با محیط ممکن است مورد نظر باشد.

اندازه و دانه‌بندی سنگ‌ها بستگی به روش استفاده از مصالح سنگی در ساختار عمومی آبشکن دارد. ضوابط انتخاب سنگ‌ها در روش سنگ‌ریزه‌ای، سنگ چینی، ریزش توده‌ای، تورسنگی و غیره متفاوت بوده و در بخش‌های مربوط ارائه خواهد شد.

به‌هرحال، تخلخل توده سنگ‌ریزی در محدوده ۱۵ تا ۴۰ درصد باید باشد که تخلخل ۱۵٪ به‌معنای دانه‌بندی خوب و قفل‌شدگی اندازه‌های کوچک‌تر در فضای خالی سنگ‌های بزرگ‌تر است [۱۱۰].

- **بتن:** بتن به‌صورت غیرمسلح یا مسلح و با ساختارهای مختلف ممکن است در احداث آبشکن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. انواع کاربردهای ساختاری بتن عبارتند از آبشکن وزنی غیرمسلح، آبشکن سپری مسلح، آبشکن با واحدهای بلوکی بتنی سه پایه‌ای، حفاظت روکش آبشکن با واحد بالشتک بتنی و نیز به‌صورت مخلوط ماسه و سیمان خشک یا تر پرکننده کیسه‌ها (برای ساخت آبشکن کیسه‌ای یا به‌عنوان روکش کیسه‌ای).

  به‌طورکلی، نوع ساختارهای انعطاف‌پذیر بتنی برای سرعت‌های زیاد و شرایط مختلف رودخانه مناسب‌تر می‌باشد. از معایب ساختارهای بتنی، هزینه زیاد و تکنیک پیچیده‌تر ساخت آن‌ها می‌باشد [۱۲۸]. مشخصات کیفی بتن مصرفی متناسب با ساختار سازه‌ای آبشکن متفاوت بوده و در روش‌های مربوط ارائه می‌شود.
- **آجر:** در مناطقی که امکان دسترسی به سنگ نباشد، آجر با استفاده از مصالح خاکی موجود و با روش ساده قابل ساخت است. نوع سفالی و سنگین آن از شکل بهتر و از مقاومت بیش‌تری برای سرعت‌های زیاد برخوردار است. آجر با ملات سیمان یک سازه صلب را تشکیل می‌دهد. ولی استفاده از آجر به‌طور آزاد در جعبه‌های تورسیمی مناسب‌تر می‌باشد [۱۲۸].
- **چوب:** از چوب به‌عنوان شمع یا تیرک و نیز برای دیواره سپری استفاده می‌شود که انعطاف‌پذیر بوده و در مناطق جنگلی فراوان می‌باشد. قطر تیرک‌های چوبی حداقل ۱۷/۵ سانتی‌متر، و ضخامت دیواره‌های سپری چوبی حدود ۷/۵ سانتی‌متر است. عمر مفید چوب حدود ۳ سال بوده و ریسک پوسیدگی آن در آب زیاد است. به‌طور کلی مصالح چوبی برای رودخانه‌های بزرگ با عمق و سرعت زیاد مناسب نیستند. همچنین، امکان کوبیدن شمع یا سپرهای چوبی در بستر رودخانه‌های شنی و قلوه‌سنگی نیست [۵۶]. نوع مصالح چوبی، استانداردهای لازم و شرایط کاربرد مفید آن در سامانه رودخانه باید بررسی گردد [۱۲].
- **مصالح فلزی:** فلز به‌صورت سپر فلزی، تیرک‌های لوله ای یا نبشی، میل گرد و یا تور سیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای رودخانه‌های بستر شنی، استفاده از سپرهای فلزی و شمع‌کوبی مشکل و عموما غیرممکن است [۵۶].
- **تور سیمی:** تورسیمی برای آبشکن‌های تورسنگی مورد استفاده است. به‌هرحال، کاربرد تورسیمی در رودخانه‌های بستر شنی و درشت‌دانه با مواد جامد و شناور زیاد و نیز در حوضه‌های جنگلی به‌واسطه انتقال ترکه و شاخ و برگ درختان، خطر پارگی به‌همراه دارد [۵۶]. برای مقاومت در برابر زنگ‌زدگی، پوشش گالوانیزه و برای خورندگی شیمیایی، پوشش پلاستیکی ضروری خواهد بود [۱۲۸]. مشخصات فنی تورسنگ‌ها به تفصیل در مراجع شماره [۱۴ و ۸۹] ارائه شده است.
- **مواد پلاستیکی و لاستیکی:** مواد پلاستیکی به‌صورت ورقه‌های نایلون و پلی‌اتیلن می‌باشند که برای پوشش سطحی و موقت و یا برای ساخت کیسه‌های حفاظت دیواره‌ها به‌کار می‌روند. معایب اصلی آن، پارگی در اولین برخورد مواد جامد و شناور، مقاومت محدود در مقابل اشعه ماورای بنفش خورشید، مدت دوام کم و حساسیت نسبت به عوامل جوی است.

  روکش‌های لاستیکی ممکن است برای حفاظت سطح بالاتر دیواره‌ها و همچنین به‌صورت تایرهای فرسوده مورد استفاده قرار گیرند [۱۲۸]. به‌هرحال، اثرهای زیان‌بار زیستابی، اکولوژیکی و چشم‌انداز مواد پلاستیکی و لاستیکی مورد چالش است.

- **ژئوتکستایل:** ژئو تکستایل‌ها از مواد و بافت‌های رشته‌ای پلیمری و مصنوعی ساخته می‌شوند. پلیمرهای مورد استفاده عموما شامل ۸۳٪ پلی پروپیلین، ۱۴٪ پلی استر، ۲٪ پلی‌اتیلن و ۱٪ پلی امید یا نایلون بوده که به‌صورت رشته‌های نخی درآمده و با روش مستقیم بافته شده یا به‌طور غیرمستقیم به بافت‌های مخصوص تبدیل و به یکدیگر متصل شده و ژئو تکستایل را به‌وجود می‌آورد. نوع بافت روی خواص فیزیکی، مکانیکی و هیدرولیکی اثر دارد. قابلیت انعطاف و مقاومت کششی و نفوذپذیری از مزایای این محصول صنعتی به شمار می‌آید.

ژئو تکستایل‌ها به‌عنوان روکش حفاظتی (بر روی بدنه آبشکن) و به‌عنوان فیلتر (برای لایه زیرین سنگ‌ریزی، تورسنگ و غیره) استفاده می‌شود. برای کاربرد روکشی، مخلوط ماسه و سیمان (به‌صورت بتن رقیق با مقاومت کم) تحت فشار به‌داخل روکش تزریق و پمپاژ می‌گردد. برای کاربرد فیلتری، باید دو خصوصیت نفوذپذیری کافی و ممانعت از شستشوی ذرات بستر را داشته باشد. مشخصات فنی ژئو تکستایل‌ها بر حسب کارخانه سازنده متفاوت بوده و براساس کارکرد مورد نیاز باید انتخاب گردد. جزییات فنی لازم برای انتخاب ژئو تکستایل به‌تفصیل در مراجع شماره [۷ و ۸۰] ارائه شده است.

- **قیر و آسفالت:** قیر به‌صورت امولوسیون برای حفاظت سطحی دیواره بالا و یا اراضی ساحلی (به‌ویژه با مواد چسبنده و رسی) به‌کار می‌رود، ولی در برابر عوامل تخریبی مقاوم نیست. پوشش آسفالت برای حفاظت روکشی آبشکن در سطح بالاتر و یا برای حفاظت سطحی تورسنگ ممکن است استفاده شود [۵۶ و ۱۲۸]. به‌هرحال، اثرهای زیان‌بار زیستابی، اکولوژیکی و چشم‌انداز فرآورده‌های نفتی مورد چالش است.
- **مواد فیلتری:** هدف از کاربرد فیلتر کنترل سرعت تراوش آب و ممانعت از خروج مواد ریزدانه دیواره‌ها و یا بدنه آبشکن است. به‌عبارت دیگر، فیلتر باید قابلیت نفوذ و زهکشی مواد دیواره رودخانه و بدنه آبشکن را داشته باشد و از سوی دیگر مانع از شستشوی مواد و نشست گردد. در ساخت آبشکن‌ها از فیلتر به‌طور گسترده استفاده می‌شود.

فیلترها بر دو نوع هستند، فیلتر دانه‌ای که عموما از مصالح شن و ماسه دانه‌بندی شده رودخانه‌ای یا کوهی تامین می‌گردد و پوشش لفاف (با بافت طبیعی یا از مواد مصنوعی نظیر ژئو تکستایل‌ها). از پوشش لفاف بر روی بستر ریزدانه استفاده گردیده که مشخصات نفوذپذیری و پایداری آن در کاتولوگ کارخانه‌ای ارائه شده و با توجه به نیاز طرح باید انتخاب گردد. پوشش لفاف برای تماس با مصالح سنگ‌ریزه‌ای با گوشه‌های تیز خطر پارگی دارد. جزییات فنی لازم برای انتخاب پوشش لفاف طبیعی و یا ژئو تکستایل‌ها به‌تفصیل در مراجع شماره [۸۰ و ۱۱۰] ارائه شده است. استفاده از فیلتر دانه‌ای در ساخت آبشکن‌ها عموما اجتناب‌ناپذیر است. نوع و خصوصیات مواد فیلتر دانه‌ای مشابه ضوابط ارائه شده در بالا برای سنگ‌ها است. جزییات طراحی فیلتر دانه‌ای (اندازه، دانه‌بندی و ضخامت) در بخش‌های مربوط بعدی ارائه شده است.

۶-۲-۹-۲- ساختار آبشکن

ساختار کلی آبشکن‌ها از نظر مصالح و ساخت به دو صورت زیر ممکن است.

- استفاده از مصالح همگن و یکپارچه در ریشه، بدنه، پنجه و روکش آبشکن
- استفاده از مصالح ترکیبی نظیر مصالح خاکی در بدنه و مصالح مقاوم‌تر برای روکش حفاظتی، دماغه و پنجه

براساس مصالح و ساختار عمومی، انواع آبشکن‌ها عبارتند از [۳۷، ۶۲، ۱۰۴ و ۱۵۰]:

- سنگ‌ریزه‌ای (با یا بدون دانه‌بندی)، تور سنگی (نوع جعبه‌ای)، کیسه‌ای (محتوی ماسه و یا مخلوط ماسه- سیمان)، قطعات بزرگ بتنی، بلوک‌های بتنی سه پایه، الوار چوبی به‌هم بافته، تنه درختان و شاخ و برگ‌های به‌هم بافته و یا ماشین‌های اسقاطی
- دیواره سپری همراه با شمع‌کوبی از جنس صفحات و پایه‌های فلزی، چوبی، بتنی، و یا ترکیبی
- شمع‌های بتنی یا چوبی دو ردیفه همراه با استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو ردیف، دیواره سپری یا دیواره چوب بست دو ردیفه با یا بدون استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو صفحه
- مصالح خاکی، مخلوط درشت‌دانه رودخانه‌ای یا مصالح دیگر (در بدنه) با روکش حفاظتی و پنجه سنگ‌ریزه‌ای، تورسنگی، کیسه‌ای، بالشتک بتنی انعطاف‌پذیر، تایر ماشین، ترکه‌های به‌هم بافته و غیره

الف- بدنه و ریشه آبشکن

بدنه آبشکن ممکن است از مصالح همگن یا از مصالح ترکیبی ساخته شود. ساخت آبشکن‌ها با مصالح همگن (در ریشه، بدنه، پنجه و روکش آبشکن) به‌معنای پایداری بیش‌تر سازه نبوده و عموما نیز غیراقتصادی می‌باشد. این نوع ساختار بیش‌تر در رودخانه‌های بزرگ و دایمی (که امکان انحراف کامل آب فراهم نباشد) و عموما با استفاده از سنگ‌های با اندازه بزرگ، تورسنگ جعبه‌ای یا قطعات بزرگ بتنی انتخاب می‌گردد. آبشکن‌هایی که با هسته مخلوط درشت‌دانه رودخانه‌ای یا مصالح پرکننده دیگر (مانند کیسه‌های خاکی) و با روکش حفاظتی مقاوم طرح و ساخته می‌شوند، می‌تواند پایدار بوده و اقتصادی‌تر نیز باشد. ساختار بدنه آبشکن بستگی به نوع مصالح و روش ساخت متنوع بوده و به‌ترتیب زیر معرفی می‌گردد:

- **سنگ‌ریزی**

در شرایطی که سنگ با اندازه‌های مختلف، و با خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مناسب فراهم باشد، روش سنگ‌ریزی[1] به‌عنوان اولین گزینه باید مورد توجه قرار گیرد. سنگ‌ها ممکن است بدون ملات (کاربرد قطعات منفرد به‌صورت سازه انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر) و یا با ملات (به‌صورت سازه صلب و نفوذناپذیرو یا نیمه صلب و نفوذپذیر) استفاده گردند.

در طرح و ساخت آبشکن‌ها، روش سنگ‌ریزی با استفاده از سنگ‌های بدون ملات (به‌صورت ریزشی و تصادفی[2]، یا به‌صورت سنگچین[3]) ترجیح داده می‌شود. قابلیت انعطاف‌پذیری و نفوذپذیری سازه، مقاومت در شرایط تلاطم شدید و سرعت‌های زیاد، قابلیت تثبیت طبیعی در اثر جذب رسوبات و رویش گیاهان، ارزش اکولوژیکی و زیبایی، سهولت اجرا، اقتصادی بودن و قابلیت ترمیم و بازسازی مجدد بعد از سیلاب‌ها، از عوامل برتری گزینه سنگ‌ریزی در طرح‌های مهندسی رودخانه است [۱۲۸].

در روش سنگ‌ریزی، سنگ‌ها با اندازه و دانه‌بندی مناسب بر روی بستر قرار می‌گیرند. مشخصات فنی سنگ‌ریزه‌ها و سنگ‌ریزی (اندازه و دانه‌بندی سنگ‌ها، نیاز فیلتری و حفاظت پنجه) در کل بدنه آبشکن مشابه طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای است که به تفصیل در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

1 - Riprap
2 -Dumped
3 -Hand placed / Hand piched

در رودخانه‌های بزرگ با جریان دایمی، ممکن است از سنگ‌های بزرگ و سنگین، به‌صورت ریزشی[1] در بستر استفاده گردد. در این حالت، وزن حداکثر سنگ‌ها از ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم متغیر بوده، و کاربرد قطعات با وزن متوسط ۱۰۰۰ کیلوگرم در شرایط تلاطم شدید نیز گزارش شده است. در این صورت، رابطه وزن سنگ با اندازه و دانه‌بندی سنگ‌ها از روابط تقریبی زیر قابل ارزیابی است [۱۰۴ و ۱۱۰].

$$D_S = 1.24(W/\rho_S)^{\frac{1}{3}} \qquad \text{برای سنگ کروی شکل} \qquad (۲۷-۶)$$

$$D_n = (W/\rho_S)^{\frac{1}{3}} \qquad \text{برای سنگ مکعبی شکل} \qquad (۲۸-۶)$$

$$D_{50} = \frac{1}{(0.84-0.91)} D_{n50} \qquad (۲۹-۶)$$

$$D_{30} = D_{50}(\frac{D_{15}}{D_{85}})^{0.32} \approx 0.7D_{50} \qquad (۳۰-۶)$$

$$(\frac{D_{85}}{D_{15}}) = 2.5-5.0 \qquad (۳۱-۶)$$

$$n = (25-40)\% \qquad (۳۲-۶)$$

که در این روابط:

D_s: اندازه معادل شکل کروی سنگ (متر)، D_n: اندازه معادل شکل مکعبی سنگ (متر)، W: جرم سنگ (کیلوگرم)، ρ_S: چگالی سنگ (کیلوگرم بر مترمکعب)، D_{50}: اندازه میانه سنگ‌ها یا۵۰٪ در توده سنگ‌ریزی بر حسب روش مرسوم و کاربردی تعیین اندازه ذرات (m)، D_{15} و D_{30} و D_{85}: اندازه ۱۵٪، ۳۰٪ و ۸۵٪ در توده سنگ‌ریزی (متر) و n تخلخل توده سنگ‌ریزی که بیانگر درجه تراکم دانه‌بندی و قفل‌شدگی ذرات است. برای سنگ‌ریزی توده‌ای، تخلخل حدود ۴۰٪، و منحنی دانه‌بندی بازتر ($D_{85}/D_{15}>2.5$) مجاز است. درحالی‌که برای روکش سنگ‌ریزه‌ای، تخلخل کم‌تر یا تراکم بیش‌تر سنگ‌ها و دانه‌بندی یکنواخت‌تر لازم خواهد بود. حداقل اندازه سنگ‌های مصرفی ۲۰ یا ۲۵ سانتی‌متر باید باشد. وزن یا اندازه سنگ‌های شاخص (D_{50}) با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده برای طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای قابل ارزیابی است.

رابطه اسکارامیا و ماری[2] (۱۹۹۲) برای محاسبه D_{n50} . سنگ‌ها در طراحی آبشکن‌ها به‌صورت زیر است [۱۱۰]:

$$D_{n50} = (12.3TI-0.2)\frac{(-1.48TI+1.04)^2 U_d^2}{2g(S-1)} \qquad (۳۳-۶)$$

که در این رابطه:

D_{n50}: اندازه میانه معادل شکل مکعبی سنگ‌ها (متر)، S: چگالی نسبی سنگ، TI: شدت تلاطم جریان در برخورد به آبشکن (معادل ۰/۵)، U_d: سرعت متوسط عمقی در موقعیت آبشکن یا سرعت متوسط (متر بر ثانیه) و g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) است.

1- Quarry Run, Dumping
2- Escarameia and Mary (1992)

اندازه D_{50} و توزیع اندازه سنگ‌ها از روابط (۶-۲۹) تا (۶-۳۲) محاسبه می‌گردد. این رابطه برای استقرار سنگ‌ها بر روی کف بستر و یا دیواره با شیب‌های (2H:1V) یا کم‌تر صادق است.

وزن متوسط قطعات سنگی (W_{50}) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W_{50} = \rho_S (D_{n50})^3 \qquad (۶-۳۴)$$

که در این رابطه:

W: جرم سنگ (کیلوگرم) و ρ_S چگالی سنگ (کیلوگرم بر مترمکعب) است.

رابطه پیلارزیک[1] (۱۹۹۰) برای محاسبه D_{n50} سنگ‌ها در طراحی آبشکن‌ها به‌صورت زیر است [۱۱۰]:

$$D_{n50} = \frac{3}{2(S-1)} K_t \left(\frac{D_{n50}}{Y}\right)^{\frac{2}{10}} \left[\left(\frac{\sin(\phi-\beta)}{\sin\phi}\right)\left(\cos\alpha\sqrt{1-(\tan\alpha/\tan\phi)^2}\right]^{-1} \frac{U_d^2}{2g}\right. \qquad (۶-۳۵)$$

که در این رابطه:

S: چگالی نسبی سنگ، K_t: ضریب شدت تلاطم (برای آبشکن‌ها: معادل ۲)، Y: عمق آب در موقعیت آبشکن (متر)، β: زاویه شیب طولی بازه رودخانه، α: زاویه شیب بستر استقرار سنگ، φ: زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌ها (۴۰ تا ۴۵ درجه) و دیگر عوامل مشابه روابط قبلی است. حل رابطه (۶-۳۵) به‌طور صریح نبوده ولی با آزمون و خطا ممکن است. اندازه D_{50} و توزیع اندازه سنگ‌ها از روابط (۶-۲۹) تا (۶-۳۲) محاسبه می‌گردد. وزن متوسط قطعات سنگی (W_{50}) از رابطه (۶-۳۴) به‌دست می‌آید.

رابطه ماینورد[2] (۱۹۹۳) برای محاسبه D_{50} سنگ‌ها در طراحی آبشکن به‌صورت زیر است [۱۱۰]:

$$D_{30} = 1.5 \times C_S \times 1.25 \times Y\left[\left(\frac{1}{(S-1)}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{U_d}{\sqrt{K_1(gY)}}\right]^{\frac{5}{2}} \qquad (۶-۳۶)$$

$$K_1 = -0.67 + 1.49\cot(\alpha) - 0.45\cot^2(\alpha) + 0.04\cot^3(\alpha) \qquad (۶-۳۷)$$

$$D_{50} = D_{30}\left(\frac{D_{15}}{D_{85}}\right)^{-0.32} \approx \frac{D_{30}}{0.7} \qquad (۶-۳۸)$$

که در این روابط:

D_{30} و D_{50}: اندازه ۳۰٪ و ۵۰٪ سنگ‌ها (متر)، α: زاویه شیب جانبی استقرار سنگ، C_S: ضریب پایداری سنگ (معادل ۰/۳ برای سنگ‌های گوشه‌دار، و ۰/۳۷۵ برای سنگ‌های گرد گوشه)، K_1: ضریب شیب، و دیگر عوامل مشابه روابط قبلی است. توزیع اندازه سنگ‌ها ازروابط (۶-۳۱) تا (۶-۳۲) تعیین گردیده و وزن متوسط قطعات سنگی (W_{50}) با استفاده ازروابط (۶-۲۸) و (۶-۲۹) از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$W_{50} = \rho_S[(0.84-0.91)D_{50}]^3 \qquad (۶-۳۹)$$

که در این رابطه:

W: جرم سنگ (کیلوگرم)، و ρ_S چگالی سنگ (کیلوگرم بر مترمکعب) است.

1- Pilarczyk (1990)
2- Maynord (1993)

به‌هرحال با توجه به دانه‌بندی ضعیف‌تر در طرح سنگ‌ریزی توده‌ای، اندازه این سنگ‌ها باید با ضریب اطمینان بالاتری نسبت به طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای انتخاب گردد. همچنین، سنگ‌های مکعبی و تیز گوشه بهتر از سنگ‌های گرد است. در صورت استفاده از سنگ‌های گرد و قلوه‌ای، اندازه سنگ‌ها باید درشت‌تر و زاویه شیب جانبی بدنه آبشکن کم‌تر باشد [۹۱]. از طرف دیگر، اندازه‌های بزرگ سنگ ممکن است در بستر ماسه‌ای و ریزدانه رودخانه فرو روند. ازاین‌رو این روش برای رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه مناسب‌تر است [۱۰۴].

- **قطعات بتنی**

قطعات بتنی منفرد به‌صورت بلوک‌های پیش ساخته و با شکل‌های مختلف (مکعبی، هرمی، چهار پایه‌ای[1] و غیره) می‌تواند به‌جای سنگ استفاده گردد. اگر ابعاد و وزن بلوک‌های بتنی بسیار زیاد باشد، جهت سهولت اجرا می‌توان چند قطعه منفرد کوچک‌تر را در موقعیت استقرار در رودخانه با میله به‌یکدیگر متصل نمود. از طرف دیگر، اندازه‌های بزرگ و سنگین بتنی ممکن است در بستر ماسه‌ای و ریزدانه رودخانه فرو روند. ازاین رو این روش برای رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه مناسب‌تر است [۱۰۴].

از بلوک‌های چهار پایه‌ای برای ساخت آبشکن‌ها در رودخانه‌های آمریکا و لهستان استفاده شده است. مزایای اصلی این روش ساخت واحدهای پیش ساخته بتنی، با قابلیت هندسی قفل‌شدگی طبیعی در یکدیگر (بدون نیاز به مهار کردن) است. جزییات طرح هندسی بلوک‌های بتنی چهار پایه‌ای در مراجع شماره [۱۰۴ و ۱۲۸] آمده است. اندازه معادل و وزن قطعات منفرد بتنی قابل محاسبه است. رابطه اسکارامیا و ماری (۱۹۹۲) برای محاسبه اندازه معادل شکل مکعبی قطعات بتنی منفرد یا بلوک‌های بتنی قفل شونده (مانند واحدهای بتنی چهار پایه‌ای) در طراحی آبشکن‌ها به‌صورت زیر ارائه شده است [۱۱۰]:

$$D_n = (9.22TI - 0.15)\frac{(-1.48TI + 1.04)^2 U_d^2}{2g(S-1)} \qquad (۴۰-۶)$$

که در این رابطه:

D_n: اندازه معادل شکل مکعبی واحد بتنی (متر)، S: چگالی نسبی بتن (معمولا ۲/۴)، TI: شدت تلاطم جریان در برخورد به آبشکن (معادل ۰/۵)، U_d: سرعت متوسط عمقی در موقعیت آبشکن یا سرعت متوسط (متر بر ثانیه)، و g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) است. اندازه D_{50} و توزیع اندازه سنگ‌ها از روابط (۶-۲۹) تا (۶-۳۲) محاسبه می‌گردد. این رابطه برای استقرار واحدهای بتنی بر روی کف بستر و یا دیواره با شیب‌های (2.5H:1V) یا کم‌تر صادق است.

وزن متوسط قطعات بتنی از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$W = \rho_S (D_n)^3 \qquad (۴۱-۶)$$

که در این رابطه:

W: جرم بلوک بتنی (کیلوگرم) و ρ_S چگالی بتن (عموما: ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) است.

از نظر اقتصادی می‌توان قطعات بتن را در محل با استفاده از مصالح شن و ماسه رودخانه، و با نسبت حجمی سیمان به مخلوط شن و ماسه در حدود (۱ به ۱۰) ساخت [۱۰۴].

1 - Tetrahedron

- **تورسنگ جعبه‌ای**

در طرح آبشکن‌ها، سازه تور سنگ مطابق شکل (۶-۲۱) به سه صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع جعبه‌ای که به‌صورت یک دیواره حایل وزنی با شکل پلکانی برای ساختار کامل آبشکن به‌کار می‌رود. نوع روکش که برای حفاظت سطحی بدنه و پنجه آبشکن با ضخامت کم ساخته می‌شود. و نوع کیسه‌ای که بیش‌تر برای حفاظت پنجه و یا دیواره پایین آبشکن استفاده می‌گردد.

در نوع پلکانی، سبدهای تورسیمی با ابعاد طولی ۱/۵ یا ۲ متر، عرضی ۱ یا ۲ متر و ضخامت ۰/۵ یا ۱ متر (۲×۱×۰/۵) متر در کنار هم قرار گرفته و بعد از پر شدن از سنگ، به سبدهای مجاور خود سیم پیچی می‌شود. برای تامین وزن مستغرق پایدار در زیر آب، طول هر واحد تورسنگ ممکن است تا ۶ متر برسد. اندازه چشمه توری‌ها از (۴۰×۶۰) تا (۱۰۰×۱۲۰) میلی‌متر و ضخامت سیم‌های چهارچوب سبدها ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر است. اندازه کوچک‌ترین سنگ سبد باید بزرگ‌تر از اندازه چشمه توری و متوسط اندازه سنگ‌ها حدود ۱/۵ برابر اندازه چشمه توری باشد. به‌طور کلی، اندازه سنگ‌ها حداقل ۷/۵ سانتی‌متر و در محدوده ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر پیشنهاد شده است [۸۹ و ۱۰۲].

برای محاسبه اندازه متوسط سنگ‌ها در سبد تورسنگ جعبه‌ای (D_{50}) در طراحی آبشکن‌ها، رابطه پیلارزیک (۱۹۹۰) به‌صورت زیر ارائه شده است [۱۱۰]:

$$D_{n50} = \frac{3}{4(1-n)(S-1)} K_t \left(\frac{D_{n50}}{Y}\right)^{\frac{2}{10}} \left[\left(\frac{\sin(\phi-\beta)}{\sin\phi}\right)\left(\cos\alpha\sqrt{1-(\tan\alpha/\tan\phi)^2}\right]^{-1} \frac{U_d^2}{2g} \right. \qquad (۴۲-۶)$$

$$D_{50} = \frac{1}{(0.84-0.91)} D_{n50} \qquad (۴۳-۶)$$

که در این رابطه:

n: تخلخل سنگ‌های سبد (۰/۲۵ تا ۰/۴)، S: چگالی نسبی سنگ، K_t: ضریب شدت تلاطم (برای آبشکن‌ها: معادل ۲)، Y: عمق آب در موقعیت آبشکن (متر)، β: زاویه شیب طولی بازه رودخانه، α: زاویه شیب جانبی استقرار تورسنگ، φ: زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌های سبد (۴۰ تا ۴۵ درجه)، U_d: سرعت متوسط عمقی در موقعیت آبشکن یا سرعت متوسط (متر بر ثانیه) و g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) است. حل رابطه (۶-۴۲) به‌طور صریح نبوده، ولی با آزمون و خطا ممکن است.

برای حفاظت پنجه در برابر آبشستگی و انعطاف‌پذیری سازه، پیشنهاد می‌شود که پیش بندی با طول حداقل ۲ متر و ضخامتی بیش‌تر از عمق آبشستگی احتمالی (۱/۵ تا ۲ برابر) در پنجه منظور گردد. گزینه ساده‌تر و اقتصادی‌تر، احداث پیش بندی با ضخامت حداقل ۵۰ سانتی‌متر و با طول حداقل ۲ برابر عمق آبشستگی (و بیش از ۷ برابر ضخامت آن) است [۳۷].

نمونه آبشکن تورسنگی از نوع پلکانی در شکل (۶-۱) نشان داده شده است. سازه تورسنگی برای سرعت‌های حداکثر ۲/۴ تا ۴/۵ متر بر ثانیه مناسب و برای پیچ‌های با شعاع انحنای بیش از ۲۵۰ متر موثر خواهد بود [۷۸ و ۱۰۲]. در رودخانه‌های با مواد بستری و بار کف درشت‌دانه، خطر سایش و پارگی تورسیمی وجود دارد. همچنین خطر پیچش گیاهان و ترکه و شاخه درختان شناور در تورسیمی، و نیز پوسیدگی شیمیایی سیم‌های توری در آب‌های با کیفیت پایین (در بازه‌های پایین‌دست و رودخانه‌های سیلابدشتی) جدی است. برای این شرایط، پوشش PVC، ماستیک و یا پلی وینیل کلراید برای سیم‌های توری، و تزریق مواد پرکننده انعطاف‌پذیر نظیر آسفالت را در سطوح تورسنگ‌ها پیشنهاد می‌شود. در صورت لزوم جهت پیوستگی دانه‌بندی مواد بستر و دیواره با سنگ‌های تورسنگ، کاربرد فیلتر اجتناب‌ناپذیر خواهد بود [۱۴، ۸۹ و ۱۱۰].

- **کیسه‌ای**

در شرایطی که سنگ موجود نبوده ولی مصالح ریزدانه‌تر (شن و ماسه رودخانه) به‌وفور فراهم باشد، روش کیسه‌ای قابل توجه خواهد بود. هزینه ساخت آبشکن‌ها با گزینه کیسه‌ای زیاد است، ولی سهولت اجرا، انعطاف‌پذیری سازه و سادگی ترمیم و بازسازی از امتیازات آن به‌شمار می‌آید.

در این روش کیسه‌هایی از بافت طبیعی (کرباس یا کنف) یا بافت مصنوعی (مواد پلاستیکی) از موادی نظیر خاک، ماسه، مخلوط خاک- سیمان، مخلوط ماسه- سیمان پر شده و به ترتیب خاصی روی بستر و شیب دیواره چیده می‌شوند. کیسه‌های کنفی یا پلاستیکی به‌سرعت در معرض آب و یا هوا پوسیده شده یا در اثر برخورد مواد جامد شناور یا یخ پاره می‌شوند بنابراین کیسه‌های حاوی خاک عمر کوتاهی داشته و به‌زودی متلاشی شده و تنها برای اهداف اضطراری نظیر کنترل سیلاب و حفاظت تاسیسات آبی از خطر سیل و نیز در هسته سازه استفاده می‌گردد. تنها کیسه‌هایی که از مخلوط خاک- سیمان یا شن و ماسه- سیمان پر شوند، برای حفاظت دراز مدت در برابر جریان آب و عوامل محیطی توصیه شده و جنس و دوام کیسه اهمیت نخواهد داشت [۱۰۲ و ۱۲۸]. به‌هرحال، کیسه‌های حاوی مواد سیمانی انعطاف‌پذیری محدودی (به‌صورت حرکت نسبی کیسه‌ها) داشته، مانع از توسعه پوشش گیاهی بر روی سازه بوده و از نظر اکولوژیکی از مطلوبیت کم‌تری برخوردار است.

در طراحی آبشکن‌ها، می‌توان هسته و بدنه اصلی را با کیسه‌های حاوی خاک یا مخلوط رودخانه‌ای ساخت، ولی روکش سطحی و پنجه آبشکن باید با کیسه‌های مقاوم و سیمانی (یا روکش مناسب دیگری) حفاظت گردد. طراحی کیسه‌ها مستقل از سرعت و شرایط جریان است. ابعاد کیسه‌ها معمولا (۹۰×۴۵) سانتی‌متر بوده و حجمی معادل ۰/۰۲۷ مترمکعب (وزن حدود ۵۰ کیلوگرم) دارند. در چیدن کیسه‌ها بر روی بستر تخت رودخانه یا شیب‌های کم‌تر از (2.5H:1V) نیاز به همپوشانی کیسه‌ها نیست، ولی با الگوی آجری باید چیده شوند. در کارگذاری کیسه‌ها بر روی سطوح با شیب بیش‌تر، برای پایداری نسبی در برابر نشست و آبشستگی جزیی، حداقل ۱۵ سانتی‌متر همپوشانی کیسه‌ها ضروری خواهد بود [۳۷]. روی شیب‌های (2.5H:1V) یا (2H:1V)، بعد طولی کیسه‌ها در تماس با دیواره شیب‌دار قرار گرفته، و همپوشانی لازم را باید داشته باشد. در شیب بیش‌تر از (2H:1V)، بعد عرضی کیسه‌ها در تماس با دیواره شیب‌دار و با همپوشانی لازم قرار می‌گیرد [۱۰۶]. شیب دیواره و کارگذاری کیسه‌ها حداکثر (1.5H:1V) و در حالت مناسب (2H:1V) می‌باشد.

مطابق شکل (۶-۲۲)، کیسه‌ها باید هم حجم بوده، مانند آجر چینی در هم قفل شده و منظم چیده شوند تا سطح صافی را ایجاد نماید. برای حفاظت پنجه، کیسه‌ها تا عمق آبشستگی و حداقل ۱/۵ متر زیر کف بستر چیده می‌شوند. کیسه‌های روکش سطحی، ممکن است با میل‌های مهاری به دیواره یا بدنه اصلی دوخته شوند [۳۷]. همچنین، نیاز به لایه فیلتری در بستر کارگذاری کیسه‌ها نیز باید بررسی گردد [۱۰۶].

در مخلوط خاک- سیمان، ۸ تا ۱۵ درصد حجمی سیمان پرتلند کافی است [۱۲۸]. برای مخلوط شن وماسه- سیمان، درصد حجمی سیمان معادل ۲۰٪ توصیه شده است [۱۰۶]. جهت سهولت کار پیشنهاد می‌شود که ابعاد کیسه نصف گردد تا قدرت حمل آن توسط یک نفر میسر باشد. همچنین می‌توان خاک یا شن و ماسه را با سیمان به‌طور خشک در کیسه ریخته تا پس از جاگذاری در محل، با آبپاشی و یا جذب طبیعی رطوبت (به‌ویژه در شرایط زیر سطح آب) عمل گیرش در آن صورت گیرد [۳۷]. شکل (۶-۲۳) تصویری از آبشکن با مصالح کیسه ماسه- سیمان نشان می‌دهد.

- **شمع و سپر کوبی**

آبشکن‌ها ممکن است به‌صورت شمع‌های چوبی یا بتنی دو ردیفه همراه با استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو ردیف، و یا به‌صورت دیواره سپری یا دیواره چوب بست دو ردیفه با یا بدون استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو صفحه ساخته شود.

کاربرد این نوع ساختار آبشکن‌ها در رودخانه‌های بستر ماسه‌ای، با عرض زیاد و عمق کم مناسب بوده و سابقه طولانی دارد. این نوع آبشکن برای شرایط غیرمستغرق، و بیش‌تر برای شرایط مستغرق طراحی می‌شود. درصورتی‌که دیواره شمع‌کوبی به‌صورت دو ردیفه ساخته شده و حد فاصل آن با سنگ پر شود، برای عمق بیش از سه متر نیز موثر بوده و در مقایسه با آبشکن‌های سنگ‌ریزه‌ای حجم سنگ کم‌تری لازم داشته و اقتصادی‌تر خواهد بود. عمر مفید چوب مصرفی (حداقل ۳ سال) در حد کفایت برای توسعه رسوب‌گذاری در حد فاصل آبشکن‌ها می‌باشد. بنابراین، پوسیدگی شمع‌ها و سپرهای چوبی در طول ۵ تا ۱۰ سال تاثیری روی کارکرد دایمی سامانه آبشکن‌ها نخواهد داشت [۱۰۲].

شمع‌های منفرد، با قطری برابر با ۳۰ سانتی‌متر مقاومت لازم را در برابر ضربه و کوبیدن در بستر دارند. از شمع‌های قیرپاشی شده (که طول عمر بیش‌تری دارند) در ثلث انتهایی طول آبشکن استفاده می‌شود.

فاصله بین دسته شمع‌ها و تعداد ردیف شمع‌ها به شرایط جریان بستگی دارد. دیواره‌های شمع‌کوب معمولا دو یا سه ردیف از شمع‌های منفرد یا دسته‌ای هستند. شمع‌های منفرد به فاصله ۱تا ۲ متر، و دسته ها به فاصله ۴/۵ تا ۶ متر از همدیگر قرار می‌گیرند. انتهای دیواره‌های شمع‌کوب (در دماغه) مقاوم‌تر ساخته شده و از دو شمع ویا دو یا چند دسته تشکیل می‌شود. در حد فاصل دسته شمع‌ها در طول آبشکن، صفحات الوار چوبی کوبیده شده یا از سنگ‌ریزی استفاده می‌شود.

گاهی ممکن است، آبشکن به‌صورت ترکیبی از بدنه نفوذناپذیر (به‌صورت شمع‌های چوبی دو ردیفه همراه با استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو ردیف در سمت ساحلی) و بدنه نفوذپذیر (شمع‌های چوبی دو ردیفه، در میانه رودخانه) ساخته شود.

ارتفاع تاج آبشکن معادل ارتفاع دیواره در مقطع اصلی رودخانه (در شرایط غیرمستغرق) و یا عموما یک سوم تا دو سوم عمق مقطع اصلی رودخانه (در شرایط مستغرق) در نظر گرفته می‌شود. عمق شمع‌کوبی در کف بستر حداقل یک دوم تا دو سوم از کل طول شمع، یا ۶ تا ۹ متر، یا ۴ متر بیش از عمق آبشستگی گزارش شده است [۶۰، ۱۰۴ و ۱۰۷]. عمق نفوذ شمع‌ها در ناحیه ریشه آبشکن نیز حداقل ۲ متر باید باشد. برای حفاظت شمع‌ها در برابر آبشستگی و یا کاهش عمق شمع‌کوبی از روش سنگ‌ریزی در پای شمع‌ها استفاده می‌شود [۱۰۴].

اجرای آبشکن‌های با ساختار شمع و سپر کوبی در رودخانه‌های با بستر شنی و درشت‌دانه، از نظر فنی امکان‌پذیر نبوده و توصیه نمی‌گردد. همچنین، ساخت این نوع آبشکن در رودخانه‌های با عمق زیاد از نظر فنی و اقتصادی مناسب نبوده و در برابر مواد جامد شناور و یخ آسیب‌پذیر است [۱۰۴]. مشخصات فنی طرح این نوع آبشکن مشابه دیواره‌های شمع‌کوب[1] است، که به‌طور نمونه قبلا در شکل (۳-۸) نشان داده شده، و جزییات آن در مراجع شماره [۶۰، ۱۰۲ و ۱۰۴] ارائه شده است.

- **ماشین‌های اسقاطی**

در این روش ماشین‌های اسقاطی به‌طور تصادفی در موقعیت جانمایی آبشکن قرار گرفته، با کابل‌های سیمی و مقاوم به هم وصل شده، در بستر و دیواره رودخانه مهار و لنگر یافته و با ماشین‌آلات مکانیکی به‌یکدیگر فشرده و محکم می‌گردند. این روش مساله

1- Pile Dikes

وجود بی‌رویه ماشین‌های اسقاطی را به‌نحو مطلوبی حل کرده و از روش‌های کم هزینه با سهولت اجرایی به‌شمار می‌آید. به‌هر حال، برای چند سال اول شرایط بد منظره‌ای را در کناره‌های رودخانه پدید خواهد آورد، و از نظر اثرهای زیست محیطی آن نیز چالش برانگیز است. با گذشت زمان و توسعه رسوبات و رشد گیاهان، به‌تدریج بدنه آبشکن تثبیت یافته و پس از چند سال به‌جز ناحیه دماغه آن، تقریبا از نظر پنهان خواهد شد [۱۲۸].

استفاده از ماشین‌های اسقاطی برای رودخانه‌های کوچک و نیز رودخانه‌هایی که از نظر کیفیت آب، خطر فرسودگی شیمیایی سریع روی آهن‌آلات دارند، مناسب نمی‌باشد. مصالح فراوان و عدم نیاز به بسترسازی و حفاظت‌های خاص پنجه در برابر آبشستگی و امکان اجرا در آب‌های کم عمق، از امتیازات این روش به‌شمار می‌آید.

- **مصالح طبیعی**

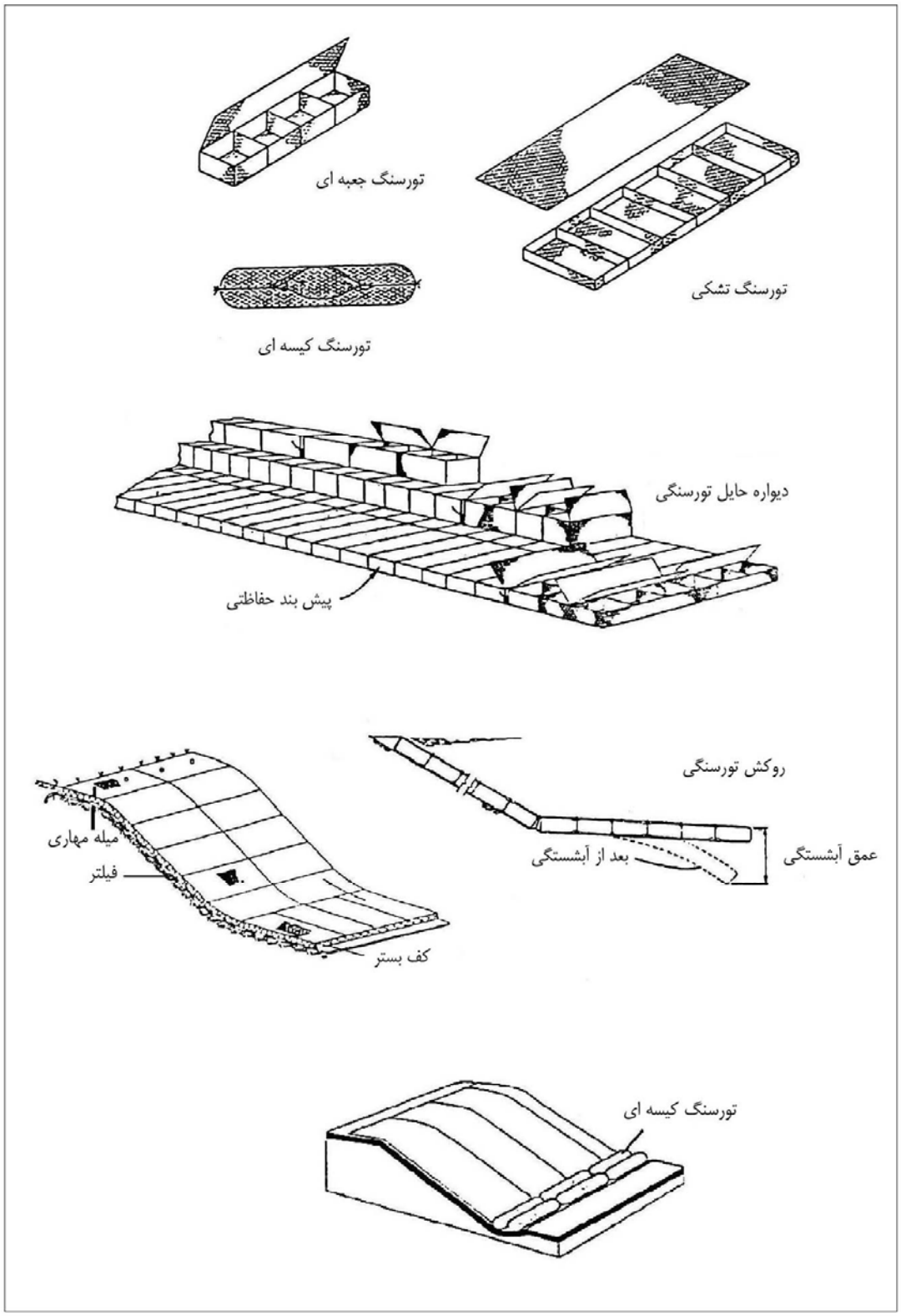
از دیدگاه فنی، اقتصادی و زیست محیطی، استفاده از مصالح طبیعی در ساخت و کارکرد آبشکن‌ها مورد توجه می‌باشد. استفاده از تنه درختان و شاخ و برگ‌های به‌هم بافته برای رودخانه‌های کوچک اقتصادی‌تر بوده و از نظر احیای محیط زیستابی رودخانه نیز مناسب است. برای استفاده از تنه درختان برای احداث آبشکن در رودخانه‌های با عرض، عمق و سرعت کم، مجموعه تنه چند درخت با طول حدود ۱۰ تا ۱۳ متر به‌صورت افقی و عمود بر راستای جریان بر بستر قرار گرفته و به زمین (دیواره و بستر) مهار می‌گردند. شکل‌های (۶-۲۴) و (۶-۲۵) استفاده از چوب و درختان را برای احداث آبشکن‌های کوتاه نشان می‌دهد. جزییات بیش‌تر در استفاده از مصالح طبیعی و طرح فنی آنها در کارهای رودخانه‌ای در مراجع شماره [۷، ۳۷ و ۶۲] ارائه شده است.

- **مصالح خاکی**

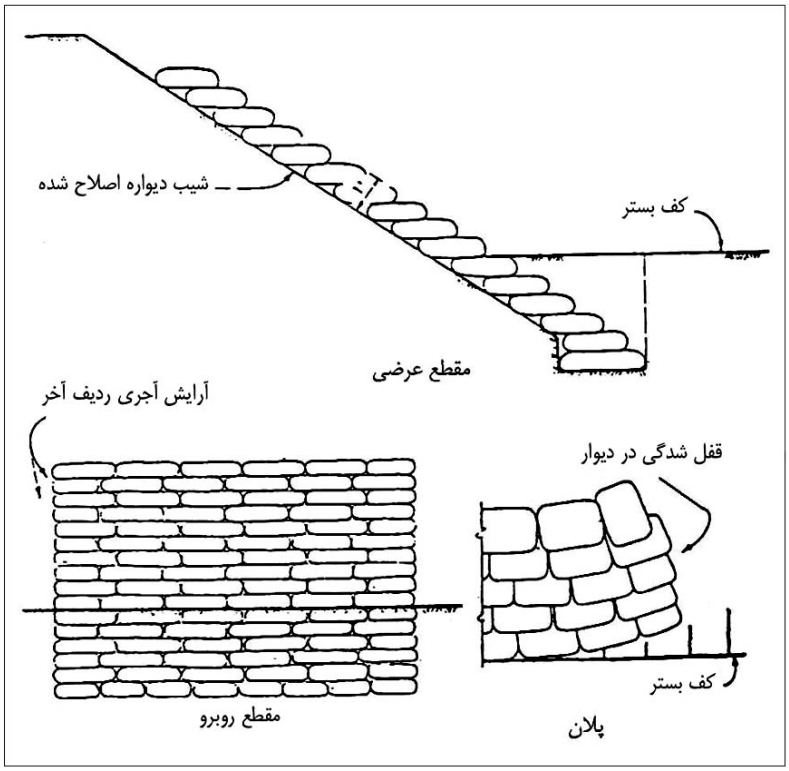
از مصالح خاکی برای ساخت بدنه اصلی آبشکن‌ها می‌توان استفاده نمود. ولی برای مقاومت در برابر جریان و آبشستگی، نیاز به حفاظت خاص در پنجه و روکش مقاوم در سطح آبشکن خواهد بود.

برای هسته آبشکن تا حد ممکن بهتر است از مصالح بستر رودخانه استفاده شود. در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه و شریانی، برداشت بارها و جزایر رسوبی علاوه بر بهسازی بستر، برای تامین مصالح بدنه اصلی آبشکن‌ها نیز مناسب و اقتصادی خواهد بود. مصالح شنی و درشت‌تر به‌دلیل تراکم طبیعی زیاد و خاصیت الاستیک، عدم نیاز به عملیات غلطکی، سهولت جابجایی و استقرار، نفوذپذیری و نیاز فیلتری کم‌تر برای ساخت بدنه اصلی آبشکن‌ها ایده‌آل هستند.

مشخصات عمومی مصالح خاکی در بخش قبلی به‌طور خلاصه تشریح گردیده و جزییات آن در مراجع شماره [۲، ۳۰ و ۱۲۶] آمده است. مصالح بدنه بعد از مراحل بسترسازی و حفاظت پنجه، به‌صورت لایه‌ای با تراکم لازم اجرا می‌گردد. مراحل اجرا و ساخت در فصل (۷) ارائه شده است.

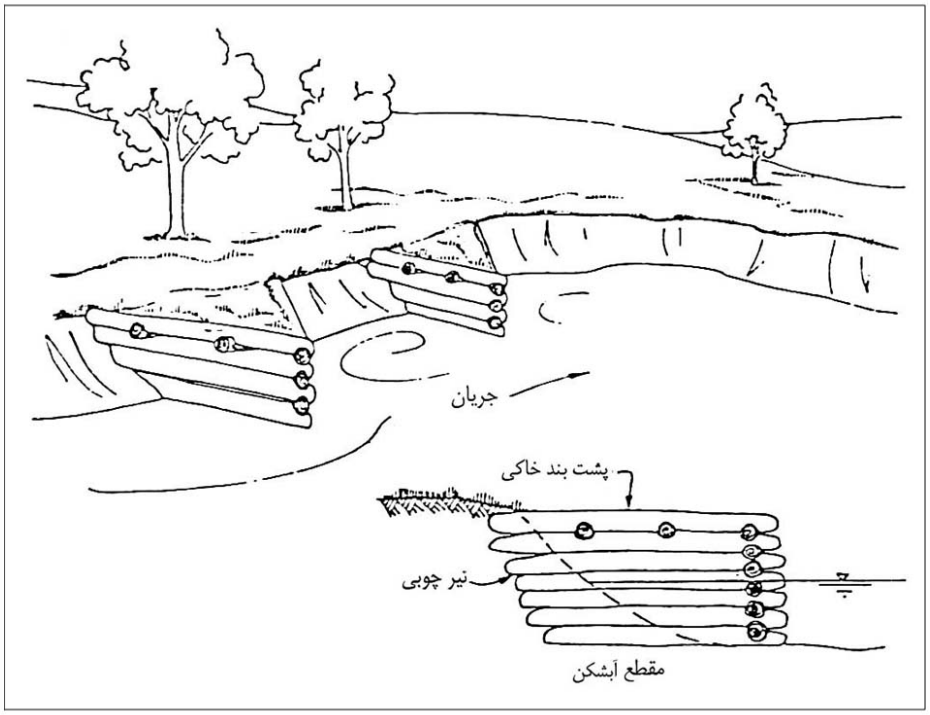


شکل ۶-۲۱- انواع تورسنگ‌ها در کارهای رودخانه‌ای [۱۰۴ و ۱۲۸]

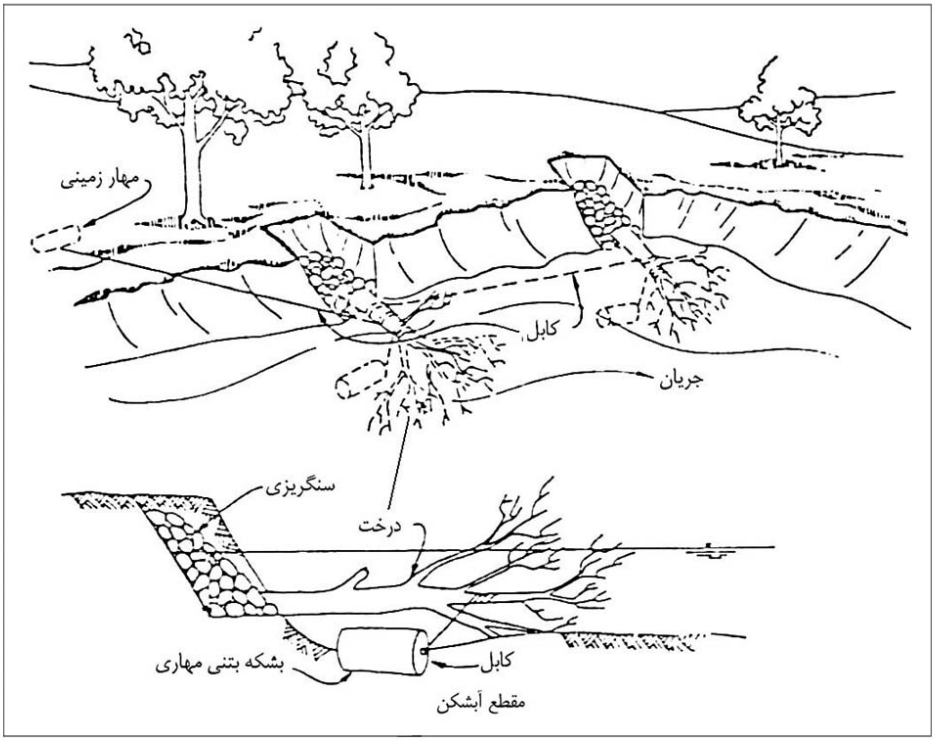


شکل ۶-۲۲- آرایش استقرار کیسه‌ها در ساخت آبشکن کیسه‌ای [۱۲۸]

شکل ۶-۲۳- آبشکن کیسه‌ای در رودخانه قزل اوزن، زنجان‌رود [۱۳۸۵]



شکل ۶-۲۴- آبشکن‌های کوتاه با مصالح طبیعی چوب و درختان [۲۲]



شکل ۶-۲۵- آبشکن‌های کوتاه با مصالح طبیعی چوب و درختان [۲۲]

ب - روکش و پنجه آبشکن

نوع مصالح و روش حفاظت لایه سطحی آبشکن (در تاج و شیب‌های جانبی) و پنجه آبشکن (در دماغه و امتداد وجوه بالا و پایین‌دست)، می‌تواند متفاوت از بدنه اصلی و هسته آبشکن باشد. هسته اصلی آبشکن ممکن است از مصالح خاکی، مخلوط درشت‌دانه رودخانه‌ای، یا مصالح پرکننده دیگر (مانند کیسه‌های خاکی) ساخته شود. مقاومت آبشکن در برابر عوامل تخریب فیزیکی، نیروهای تلاطمی جریان، و آبشستگی، می‌تواند با احداث روکش حفاظتی مقاوم تامین گردد. روکش حفاظتی ممکن است از نوع سنگ‌ریزه‌ای، تورسنگی، کیسه‌ای، بلوک‌های بتنی، بالشتک بتنی انعطاف‌پذیر، بتن آسفالتی، ژئوتکستایل، تایر ماشین، ترکه‌های به‌هم بافته و غیره باشد.

روکش حفاظتی آبشکن در سطوح مختلف ممکن است متفاوت باشد. به‌طور مثال در وجه پایین‌دست آب شکن و در زیر تراز متوسط سطح آب، بافه‌هایی از نی یا شاخ و برگ یا بوته و درختچه‌های سبز جهت حفاظت در برابر آبشستگی و از مصالح و روش‌های زیستی در حفاظت سطوح بالای بدنه آبشکن (بالاتر از تراز سطح آب متوسط) استفاده گردیده است [۶۲]. این‌گونه ساختار ترکیبی آبشکن می‌تواند از نظر سازه‌ای پایدار، از نظر فنی و اجرایی ساده‌تر، از نظر اکولوژیکی و زیبایی مقبول‌تر و در عین حال اقتصادی‌تر نیز باشد.

ساختار روکش حفاظتی آبشکن‌ها بستگی به نوع مصالح و روش ساخت، متنوع است. روش‌های عمومی به تفصیل در بند (۲-۶) معرفی گردیده و جزییات فنی انواع روش‌های مختلف در مراجع شماره [۷، ۱۴، ۶۲، ۱۰۲، ۱۰۴، ۱۱۰ و ۱۲۸] ارائه شده است. برخی از ساختارهای عمومی و کاربردی روکش‌ها به‌ترتیب در زیر معرفی می‌گردند.

- **روکش سنگ‌ریزه‌ای**

آبشکن‌هایی که با هسته مخلوط درشت‌دانه رودخانه‌ای و با روکش سنگ‌ریزه‌ای طرح می‌شوند، کارکرد موفق و موثری در شرایط مختلف رودخانه‌ها داشته و محدودیت خاصی نیز ندارند. حداکثر انعطاف‌پذیری و قابلیت ترمیم و بازسازی را داشته، قابلیت تثبیت طبیعی و گیاهی را دارد و از نظر زیست محیطی مقبول می‌باشد. در شرایطی که سنگ با اندازه‌های مختلف و با خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مناسب فراهم باشد، گزینه اقتصادی‌تری (در مقایسه با آبشکن‌های با مصالح همگن سنگی و یا روش‌های حفاظت مستقیم و پیوسته دیواره‌ها) خواهد بود [۱۲۸].

در این روش سنگ‌ها با شکل، اندازه و دانه‌بندی مناسب روی تاج و شیب دیواره آبشکن قرار گرفته و پنجه آبشکن (در دماغه و وجوه بالا و پایین‌دست) تا عمق مناسب، در برابر آبشستگی حفاظت مضاعف می‌گردد. برای پیوستگی دانه‌بندی مواد بدنه با روکش سنگ‌ریزه‌ای، استفاده از فیلتر عموما اجتناب‌ناپذیر است.

جزییات طراحی سازه روکش سنگ‌ریزه‌ای شامل کیفیت مصالح سنگی، شیب بستر سنگ‌ریزی، اندازه شاخص سنگ‌ها، شکل سنگ‌ها، دانه‌بندی سنگ‌ها، ضخامت سنگ‌ریزی، ارتفاع سنگ‌ریزی، حفاظت پنجه و طرح فیلتر روکش و پنجه، می‌باشد. این موارد به‌ترتیب در زیر تشریح می‌گردد:

- **کیفیت مصالح سنگی**

کیفیت مصالح سنگی مورد نیاز در ساخت آبشکن‌ها به‌تفصیل در بند (۶-۲-۹-۱) ارائه شده است.

- **شیب بستر سنگ‌ریزی**

شیب بستر سنگ‌ریزی برای روکش حداقل (1.5H:1V) برای کار دستی، و ترجیحا (2H:1V) برای کار ماشینی است. شیب با اندازه و پایداری سنگ‌ها رابطه مستقیم دارد. عموما شیب‌های روکش حداقل (2H:1V) و حداکثر (3H:1V تا 4H:1V) پیشنهاد شده است [۵۴، ۱۰۶ و ۱۰۷]. در محدوده دماغه آبشکن و نیز در امتداد پنجه آبشکن تا تراز دیواره پایین (سطح آب متوسط کم آبی)، شیب ملایم‌تر بوده و حداقل (2H:1V تا 4H:1V) و ترجیحا (4H:1V تا 10H:1V) توصیه شده است [۳۷ و ۶۲]. جزییات بیش‌تر درانتخاب شیب جانبی آبشکن و در نتیجه شیب سنگ‌ریزی (همچنین احتمال نیاز به سکوبندی شیب) در بند (۶-۲-۷-۱) ارائه شده است.

- **اندازه شاخص سنگ‌ها**

به‌طور کلی نیروهای موثر روی سنگ‌ها عبارتند از نیروهای وارده شامل نیروی برشی جریان و نیروی زیر فشار و نیز نیروهای مقاوم شامل وزن سنگ و مولفه نیروی قائم حاصل از اتکای سنگ به سنگ‌های مجاور. ازاین‌رو پایداری سنگ‌ریزه‌ها بستگی به خصوصیات موضعی جریان و نیز اندازه و دانه‌بندی و ضخامت سنگ‌ها دارد [۳۷].

عامل اصلی در طرح پایدار روکش سنگ‌ریزه‌ای، انتخاب اندازه شاخص سنگ‌ها است. ضخامت و دانه‌بندی سنگ‌ها به‌صورت تابعی از اندازه شاخص سنگ تعیین می‌گردد. روش‌های مختلف تجربی و نیمه‌تجربی جهت برآورد اندازه شاخص سنگ‌ها پیشنهاد شده است. این روش‌ها عموما براساس تئوری سرعت آستانه حرکت یا تنش برشی بحرانی، تاثیر شیب دیواره و تاثیر شدت تلاطم جریان به‌دست آمده و با نتایج تجربی تکمیل گردیده است.

براساس نتایج مستقل مولفین، از میان روش‌های مختلف، یازده روش که کاربرد بیش‌تری در مهندسی رودخانه دارند برای محاسبه اندازه سنگ‌ها انتخاب گردیده است [۲۹]. جدول (۶-۷) روش‌های مختلف ارزیابی اندازه شاخص سنگ‌ریزه‌ها را با معرفی منابع مورد استفاده و روابط و عوامل مورد نیاز در هر یک از یازده روش را ارائه می‌نماید. الگوریتم ارائه شده در نمودار شکل (۶-۲۶)، برای برآورد اندازه شاخص سنگ‌ها D_{50} از یازده روش مذکور درجدول (۶-۷) معرفی گردیده است. بعضی از روش‌ها اندازه‌ای غیر از اندازه متوسط یا میانه سنگ‌ها D_{50} را محاسبه می‌کنند که روابط مناسب برای تبدیل آنها به D_{50} در نمودار شکل (۶-۲۶) ارائه شده است [۲۹].

از آن‌جا که مبانی تئوریک و تجربی روش‌های فوق یکسان نیستند، هنوز یک روش عمومی در برآورد اندازه شاخص سنگ‌ها برای تمام رودخانه‌ها و یا بازه‌های مختلف یک رودخانه ارائه نگردیده است. ازاین‌رو نباید انتظار داشت که کاربرد روابط مختلف برای تمام شرایط رودخانه‌ها منجر به نتیجه یکسان و یا حتی نزدیک به یکدیگر گردد.

نتایج ارزیابی اندازه شاخص سنگ‌ها D_{50} از روش‌های مختلف جدول (۶-۷)، در شرایط مختلف بازه‌های رودخانه‌ای (با راستای مستقیم یا در محدوده پیچ، باموا‌د بستری متفاوت ریزدانه یا درشت‌دانه، با توان جریان کم تا زیاد)، به‌صورت زیر خلاصه و پیشنهاد می‌گردد [۲۹].

- برای رودخانه‌های بستر ماسه‌ای (در بازه مستقیم و در پیچ) و برای رودخانه‌های بستر شنی (در بازه مستقیم و با توان مخصوص جریان کم)، روش شماره (۲) برآورد مناسب‌تری دارد.

- برای رودخانه‌های بستر شنی (در بازه مستقیم و در پیچ)، روش‌های شماره (۷) و (۹) و (۱۱) برآورد نزدیک به‌هم و مناسبی ارائه می‌کنند. برآورد روش شماره (۴) نیز مناسب ارزیابی می‌شود.
- برای رودخانه‌های با بستر شن درشت و قلوه‌سنگی، روش‌های شماره (۶)، (۷) و (۸) مناسب‌تر می‌باشند.
- برای رودخانه‌های با بستر قلوه‌سنگی و شیب زیاد، برآورد روش‌های شماره (۱) ، (۵) و (۱۰) در مقایسه با روش‌های دیگر، کم و نامناسب است.
- روش شماره (۲) برای رودخانه‌های با توان جریان زیاد و یا با بستر قلوه‌سنگی و با بستر شنی در پیچ، توصیه نمی‌گردد.
- در روش شماره (۳)، حداقل اندازه سنگ (معادل D_{30}) با ضریب اطمینان بالاتری نسبت به روش‌های دیگر محاسبه می‌گردد.

به‌هرحال، کاربرد یک روش به‌تنهایی و بدون اطمینان از تطبیق شرایط کاربرد آن با بازه رودخانه مورد نظر صحیح نمی‌باشد. راه درست، انتخاب روش‌های مختلف براساس انطباق کاربرد آنها با شرایط مورد نظر، سپس محاسبه اندازه شاخص سنگ‌ها ازاین روش‌ها و سرانجام قضاوت مهندسی در برآورد نهایی است. برای حفاظت در مقابل آبشستگی، اندازه شاخص سنگ‌ها در محل پنجه آبشکن ۱/۵ تا ۲ برابر اندازه شاخص محاسبه شده سنگ‌ها از روش‌های فوق خواهد بود [۳۷ و ۱۲۸].

- شکل سنگ‌ها

سنگ‌های غیرکروی و گوشه‌دار مناسب‌تر هستند زیرا زاویه قرار آنها بیش‌تر از سنگ‌های قلوه‌ای بوده و بهتر در یکدیگر قفل می‌شوند نسبت بعد طولی سنگ (L) به بعد حداقل یا ضخامت آن (t) نباید بیش از ۳ باشد ($L/t<3$)، یا توصیه شده که این نسبت برای ۹۵٪ سنگ‌ها از ۳ کم‌تر باشد. ۲۵ درصد سنگ‌ها با نسبت ($L/t\geq2.5$) قابل قبول است [۱۱۰ و ۱۲۸]. در صورت استفاده از سنگ‌های قلوه‌ای و گرد گوشه بر روی شیب، اندازه سنگ‌ها باید درشت‌تر و زاویه قرار آنها بر روی شیب کم‌تر باشد. از سنگ‌های گرد گوشه در ترانشه پنجه آبشکن می‌توان استفاده کرد [۳۷].

- دانه‌بندی سنگ‌ها

اندازه سنگ‌ها در روکش سنگ‌ریزه‌ای باید از توزیع نرمال برخوردار باشند، و در عین حال از کاربرد سنگ‌های بسیار درشت یا بسیار ریز باید اجتناب نمود. توزیع نامناسب اندازه سنگ‌ها مانع از قفل‌شدگی سنگ‌ها و عامل افزایش شدت تلاطم جریان شده، که منجر به فرار سنگ‌های کوچک‌تر و ناپایداری سنگ‌ریزی خواهد گردید. با برآورد اندازه متوسط سنگ‌ها D_{50}، ضوابط زیر برای انتخاب توزیع دانه‌بندی مناسب سنگ‌ریزه‌ها ارائه گردیده است [۱۰۶، ۱۱۰ و ۱۲۸].

نمونه منحنی دانه‌بندی سنگ‌ها در طرح سنگ‌ریزه‌ای (در روکش بدنه یا در پنجه) در شکل (۶-۲۷) و یا جدول (۶-۸) نشان داده شده است [۱۰۶]. در این‌صورت، اندازه بزرگ‌ترین سنگ ۲ برابر اندازه متوسط و ۸ برابر کوچک‌ترین اندازه سنگ‌ها باید باشد. ولی وزن سنگ‌ها با این نسبت‌ها نبوده، بلکه وزن بزرگ‌ترین سنگ حدود ۶/۵ برابر وزن سنگ متوسط خواهد بود. علاوه بر آن، ضوابط زیر نیز پیشنهاد شده است [۱۱۰]، ولی نتایج شکل (۶-۲۷) و یا جدول (۶-۸) از نظر کاربردی بهتر هستند.

$$\frac{D_{85}}{D_{50}}=1.6 \qquad (۶-۴۴)$$

$$\frac{D_{30}}{D_{50}} = (\frac{D_{15}}{D_{85}})^{0.32} \approx 0.7 \qquad (۴۵-۶)$$

$$\frac{D_{85}}{D_{15}} = 1.5 - 2.5 \qquad (۴۶-۶)$$

تخلخل توده سنگ‌ریزی (n) در محدوده ۱۵ تا ۴۰ درصد باید باشد که تخلخل ۱۵٪ به‌معنای دانه‌بندی خوب و قفل‌شدگی اندازه‌های کوچک‌تر در فضای خالی سنگ‌های بزرگ‌تر است [۱۱۰].

$$n = (15 - 25 - 40)\% \qquad (۴۷-۶)$$

- **ضخامت سنگ‌ریزی**

ضخامت روکش سنگ‌ریزه‌ای بر روی تاج و شیب جانبی آبشکن حداقل ۳۰ سانتی‌متر بوده ولی باید دو لایه سنگ با اندازه متوسط را در برگیرد. در طراحی، ضخامت روکش سنگ‌ریز ۱ تا ۱/۵ برابر اندازه بزرگترین سنگ و یا حداقل دو برابر اندازه متوسط سنگ‌ها پیشنهاد شده است.

وقتی سنگ‌ریزی زیر سطح آب انجام شود، ضخامت فوق به اندازه ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. در صورت استفاده اجباری از سنگ‌های گرد و قلوه‌ای، ضخامت سنگ‌ریزی به میزان ۲۵ درصد بیش‌تر باید باشد. در رودخانه‌هایی که اثرهای موج و یا مواد جامد شناور مهم باشد، به میزان ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر به ضخامت مبنا افزوده می‌گردد یا ضخامت سنگ‌ریزی حداقل ۱/۵ برابر اندازه حداکثر سنگ باید باشد. به‌طور کلی، ضوابط زیر برای انتخاب ضخامت روکش سنگ‌ریزه‌ای (T) ارائه شده است [۳۷].

$$T = (1 - 1.5)D_{max} = (2 - 3)D_{50} \qquad \text{و} \qquad T \geq 2D_{50} \qquad (۴۸-۶)$$

- **ارتفاع سنگ‌ریزی**

روکش سنگ‌ریزه‌ای در سطح بالا تا ارتفاع تاج، و نیز بر روی تاج آبشکن ادامه خواهد داشت. جزییات برآورد ارتفاع تاج آبشکن در بند (۶-۲-۶) ارائه شده است.

حفاظت سنگ‌ریزه‌ای همچنین در پیرامون بدنه و دماغه آبشکن و در محل پنجه آبشکن تا عمق و گستره آبشستگی توسعه خواهد یافت، مگر حفاظت‌های خاص دیگری اعمال گردد. جزییات حفاظت پنجه آبشکن در بخش بعدی تشریح می‌گردد.

- **حفافظت پنجه**

پنجه آبشکن در معرض تاثیر نیروهای فرسایشی قوی‌تر، با تدوام زمانی بیش‌تری نسبت به دیواره‌ها قرار دارد. ازاین‌رو، ضخامت لایه سنگ‌ریز در محل پنجه باید افزایش یافته و یا تا بیش از عمق آبشستگی در زیر تراز بستر موجود گسترش یابد [۱۲۸]. راهکارهای حفاظت پنجه آبشکن، به‌تفصیل در بند (۶-۲-۹-۲-ب) تشریح گردیده است. ممکن است که حفاظت پنجه تا ۵۰٪ بیش از عمق حداکثر آبشستگی در زیر تراز بستر یا در صورت امکان تا رسیدن به سنگ کف انجام گردد [۱۱۰].

کیفیت مصالح سنگی و ضوابط لازم برای شکل و دانه‌بندی سنگ‌ها مشابه شرایط روکش سنگ‌ریزه‌ای می‌باشد. ولی اندازه سنگ‌ها برای حفاظت پنجه حداقل ۵۰ درصد بزرگ‌تر از سنگ‌های روی دیواره آبشکن است. اگر سنگ‌ریزی پنجه در ترانشه حفر شده در پیرامون آبشکن انجام یابد، استفاده از سنگ‌ها گرد گوشه و قلوه‌ای محدودیتی ندارد [۱۰۶ و ۱۲۸]. گرچه استقرار فیلتر در

پایداری بستر سنگ‌ریزی موثر است، ولی نیاز به فیلتر در پنجه محدودتر بوده، و ممکن است گاهی حذف گردد. در هرحال، ضوابط طرح فیلتر مشابه شرایط روکش سنگ‌ریزه‌ای بوده و در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

- **روکش تورسنگ**

انواع و مشخصات عمومی تورسنگ‌ها قبلا در بند (۶-۲-۹-۲-الف) ارائه شده و در شکل (۶-۲۲) نشان داده شده است. روکش تورسنگ با ضخامت کم، انعطاف‌پذیری و نفوذپذیری زیاد و با استفاده از سنگ‌های کوچک‌تر و حتی قلوه‌ای، برای حفاظت پیوسته دیواره و پنجه آبشکن‌ها استفاده می‌گردد.

نوار در روکش‌های تورسنگ، هر واحد تورسیمی دارای ضخامت ۱۵ تا ۵۰ (و عموما ۳۰) سانتی‌متر، عرض ۱ متر و طول ۲ تا ۳ متر است [۱۰۲ و ۸۹]. شیب دیواره استقرار تورسنگ (1.5H:1V) یا ملایم‌تر باید باشد. در این روش، ابتدا یک نوار تور سیمی روی شیب قرار گرفته، و برای اطمینان از این‌که تورسنگ شکم ندهد، در فواصل ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر سیم‌های اتصال با طول حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر بیرون نگهداشته می‌شود. سپس سنگ‌ها با تراکم مناسب درون واحدهای تور سیمی ریخته شده، توری رویین پهن گردیده و سیم‌های اتصال را به‌طور متقاطع و محکم می‌پیچند. همچنین برای مهار کردن روکش و جلوگیری از لغزش آن، میل‌های فولادی به فواصل لازم و تا عمق حداقل ۸۰ سانتی‌متر در سطح بالای دیواره کوبیده می‌گردد [۳۷]. اندازه چشمه توری‌ها از (۶۰×۵۰) تا (۸۰×۷۰) میلی‌متر و ضخامت سیم‌های توری نظیر آن (۲-۳) تا (۳-۵) میلی‌متر است. برای جلوگیری از خطر سایش و پارگی تورهای سیمی، پوشش سیم‌های توری و تزریق مواد آسفالتی در روکش تورسنگ پیشنهاد شده است [۸۹]. اندازه کوچک‌ترین سنگ سبد باید بزرگ‌تر از اندازه چشمه توری و متوسط اندازه سنگ‌ها باید حدود ۱/۵ برابر اندازه چشمه توری و یا ۰/۳ تا ۰/۵ برابر ضخامت روکش باشد. اندازه متوسط سنگ‌ریزه‌ها، محدوده اندازه سنگ‌ها و ضخامت روکش تورسنگ بر حسب سرعت متوسط جریان به‌صورت جدول (۶-۹) ارائه شده است [۸۹].

جدول ۶-۷- روش‌های برآورد اندازه سنگ‌ها برای طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ها [۲۹]

شماره	مرجع	رابطه	ملاحظات
۱	دفتر عمران اراضی آمریکا (۱۹۵۸)	$D_{50} = 0.5D_1$ $D_{100} = 0.035V^2 + 0.12V + 0.005$	اصل رابطه به‌صورت نمودار است. $V < 5.5m/s$
۲	انجمن مهندسان ارتش آمریکا (۱۹۶۱)	$D_{50} = 0.041U_b^{2.016}$	اصل رابطه به‌صورت نمودار است. $0.45m/s < U_b < 3m/s$ $S = 2.64$
۳	اداره بزرگراه‌های ایالت کالیفرنیا (۱۹۷۰)	$W_{min} = \frac{2\times10^{-5}S}{(s-1)^3\sin^3(\varphi-\theta)}U_b^6$ $D_{min} = (\frac{6.W_{min}}{\pi\rho_S})^{\frac{1}{3}}$ ، $s = \frac{\rho_S}{\rho_W}$ $D_{50} = 1.25D_{30}$ ، $D_{mim} = D_{30}$	سامانه واحدی: انگلیسی. $\varphi = 70^\circ$ کاربرد عمومی برای آبشکن‌ها دارد.
۴	ریچادسون و همکاران (۱۹۷۵)	$S.F. = \frac{\cos\theta.\tan\varphi}{\eta'\tan\varphi + \sin\theta.\cos B} = 1.5$ $\eta = \frac{21\tau_S}{\gamma_w(S-1)D_{50}}$ ، $\eta' = \eta(\frac{1+\sin(A+B)}{2})$ $B = \tan^{-1}(\frac{\cos A}{(2\sin\theta/\eta\tan\varphi) + \sin A})$	براساس تئوری تنش برشی، از دیاگرام اصلاح شده شیلدز، توسط گسلر برای بستر کاملا زبر استفاده شده است. S.F. =1.5ضریب اطمینان: با آزمون وخطا حل می‌شود. کاربرد عمومی برای آبشکن‌ها دارد. A: زاویه شیب سطح آب

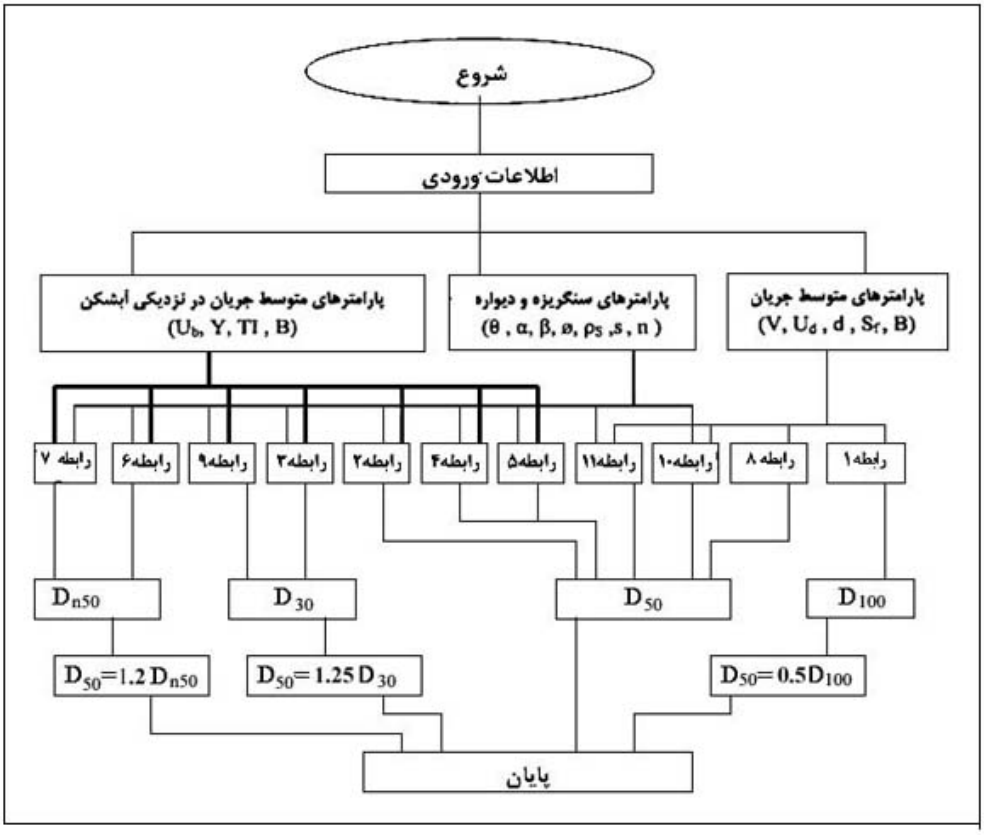
ادامه جدول ۶-۷- روش‌های برآورد اندازه سنگ‌ها برای طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ها [۲۹]

شماره	مرجع	رابطه	ملاحظات
۵	سایمونز و لی (۱۹۸۲)	$\frac{\tau_s}{\gamma_w (S-1) D_{50}} = 0.06$	برای شرایط بستر کاملا زبر $R_e^* > 500$
۶	پیلارزیک (۱۹۹۰)	$D_{50} = \frac{1}{(0.84-0.91)} D_{n50}$ $D_{n50} = \frac{3}{2(S-1)} 2K_h K_S^{-1} \frac{U_d^2}{2g}$ $K_S = K_d \times K_l \quad ، K_h = (\frac{D_{n50}}{Y})^{\frac{2}{10}}$ $K_d = \cos\alpha \sqrt{1-(\tan\alpha / \tan\varphi)^2}$ $K_l = \frac{\sin(\phi-\beta)}{\sin\phi}$	با آزمون وخطا حل می‌شود.
۷	اسکارامیا و می (۱۹۹۲)	$D_{50} = \frac{1}{(0.84-0.91)} D_{n50}$ $D_{n50} = C \frac{U_b^2}{2g(S-1)}$ $C = 12.3TI - 0.2$ $U_b = (-1.48TI + 1.04) U_d$	براساس تئوری سرعت آستانه حرکت است. برای شیب سنگ‌ریزی: (1H:1V) یا کم‌تر. شدت تلاطم برای آبشکن: (TI=۰/۵).
۸	قوش (۱۹۹۲)	برای شیب سنگ‌ریزه‌ای(1H:1V): $D_{50} = 0.042V^{2.017}$ برای شیب سنگ‌ریزه‌ای (2H:1V): $D_{50} = 0.031V^2 - 0.027V + 0.061$ برای شیب سنگ‌ریزه‌ای (2H :1V) $D_{50} = 0.022V^2$	اصل رابطه به‌صورت نمودار است. برای شیب سنگ‌ریزی: (1H:1V تا 3H:1V) $1m/s \le V \le 10m/s$
۹	ماینورد (۱۹۹۳)	$D_{30} = (S.F.).C_S.C_V.C_T.Y.A$ $A = \left[(\frac{1}{S-1})^{0.5} \times \frac{U_d}{\sqrt{K_l.g.Y}} \right]^{\frac{5}{2}}$ $K_l = -0.672 + 1.492\cot(\alpha) -$ $0.449\cot^2(\alpha) + 0.045\cot^3(\alpha)$ $D_{50} = 1.25 D_{30}$	براساس تحلیل ابعادی و نتایج تجربی آستانه حرکت. S.F. =1.5ضریب اطمینان: C_S: ضریب پایداری سنگ (معادل ۰/۳ برای سنگ‌های گوشه‌دار، و ۰/۳۷۵ برای سنگ‌های گرد). C_V=1.25 ; C_T= 1 برای آبشکن‌ها:
۱۰	ناشناس	$D_{50} = \frac{8RS_F}{(S-1)(1-n)(\cos\theta)A}$ $A = \sqrt{\tan^2\varphi - \tan^2\theta}$	براساس تئوری تنش برشی آستانه‌ای لغزش، با فرض ناچیز بودن شیب سطح آب.

ادامه جدول ۶-۷- روش‌های برآورد اندازه سنگ‌ها برای طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ها [۲۹]

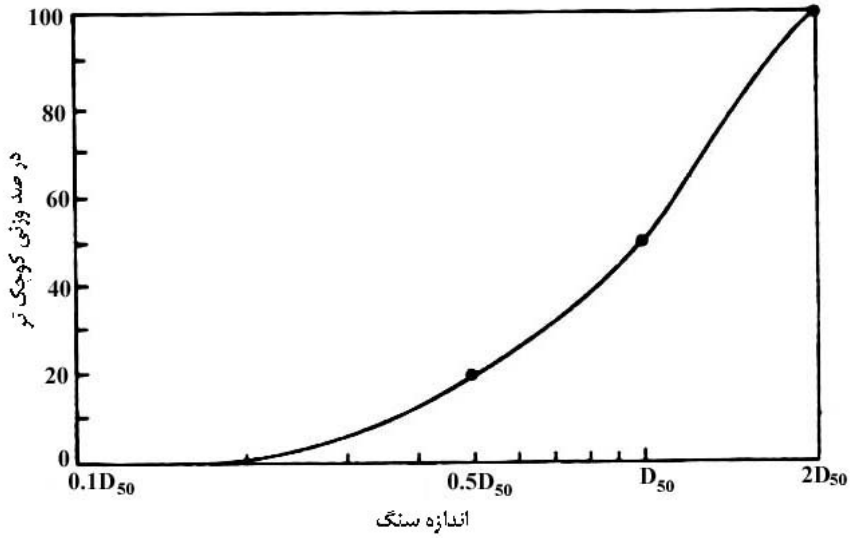
شماره	مرجع	رابطه	ملاحظات
۱۱	ناشناس	$D_{50} = C_1 \frac{0.006V^3}{(d^{\frac{1}{2}} K_2^{\frac{3}{2}})}$; $K_2 = \left[1-(\frac{\sin\theta}{\sin\phi})2\right]^{\frac{1}{2}}$; $C_1 = 1.61\left[\frac{S_F}{(S-1)}\right]^{\frac{3}{2}}$	فرض جریان غیریکنواخت تدریجی. برای جریان متلاطم شدید، ضریب اطمینان به‌کار رود.

B: عرض سطح آب، S_F: شیب انرژی یا شیب کف، d: عمق متوسط آب در بازه، Y: عمق آب در موقعیت آبشکن، V: سرعت متوسط جریان، U_d: سرعت متوسط عمقی در موقعیت آبشکن یا سرعت متوسط، U_b: سرعت در کناره رودخانه، TI: شدت تلاطم جریان در برخورد به آبشکن، τ_s: تنش برشی بستر، R_e^*: عدد رینولدز بستر، β: زاویه شیب طولی بازه رودخانه، D_{30} و D_{50} و D_{100}: اندازه ۳۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سنگ‌ها، D_{n50}: اندازه میانه معادل شکل مکعبی سنگ‌ها، n: تخلخل سنگ‌ها (۰/۲۵ تا ۰/۴)، W: جرم سنگ، ρ_S: چگالی سنگ، S: چگالی نسبی سنگ (۲/۵ تا ۲/۷)، φ: زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌ها (۴۰ تا ۴۵ درجه)، α: زاویه شیب بستر استقرار سنگ است.



شکل ۶-۲۶- الگوریتم برآورد اندازه شاخص سنگ‌ها از روش‌های مختلف جدول (۶-۷) [۲۹]

(عوامل نمودار در پاورقی جدول ۶-۷ معرفی گردیده‌اند)



شکل ۶-۲۷- منحنی دانه‌بندی سنگ‌ها در طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ها [۱۰۶ و ۱۰۷]

جدول ۶-۸- توزیع اندازه سنگ‌ها در طرح روکش سنگ‌ریزه‌ای آبشکن‌ها [۱۰۶ و ۱۰۷]

درصد کوچک‌تر (P%)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
اندازه نسبی سنگ (Dp/۰D50)	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۶۵	۰/۸۰	۱/۰۰	۱/۲۰	۱/۶۰	۱/۷۰	۱/۸۰	۲/۰۰
ملاحظات	کوچک ترین سنگ	حدود پایین	–	–	–	–	–	–	–	حدود بالا	بزرگ ترین سنگ

جدول ۶-۹- اندازه سنگ‌ریزه‌ها و ضخامت روکش تورسنگ بر حسب سرعت جریان [۸۹]

ضخامت روکش (سانتی‌متر)	محدوده اندازه سنگ‌ها (سانتی‌متر)	متوسط اندازه سنگ‌ها (سانتی‌متر)	حداکثر سرعت (متر بر ثانیه)
۱۵–۱۷	۷–۱۰	۸/۵	۴/۲
۱۵–۱۷	۱۰–۱۵	۱۱/۰	۴/۵
۲۳–۲۵	۷–۱۰	۸/۵	۵/۵
۲۳–۲۵	۷–۱۵	۱۲/۰	۶/۱
۳۰	۷–۱۲	۱۰/۰	۵/۵
۳۰	۱۰–۱۵	۱۲/۵	۶/۴
۵۰	۱۰–۲۰	۱۵/۰	۷/۶
۵۰	۱۲–۲۵	۱۹/۰	۸/۰

برای محاسبه اندازه متوسط سنگ‌ها در سبد روکش تورسنگ روش‌های مختلفی ارائه شده است. رابطه اسکارامیا و ماری[1] (۱۹۹۲) برای شرایط طراحی آبشکن‌ها به‌صورت زیر است [۱۱۰].

1- Escarameia and Mary (1992)

$$D_{n50} = (12.3TI - 1.65)\frac{(-1.48TI + 1.04)^2 U_d^2}{2g(s-1)} \quad (۴۹-۶)$$

$$D_{50} = \frac{1}{(0.84 - 0.91)} D_{n50} \quad (۵۰-۶)$$

که در این روابط:

D_{n50}: اندازه میانه معادل شکل مکعبی سنگ‌ریزه‌ها (متر)، S: چگالی نسبی سنگ، TI: شدت تلاطم جریان در برخورد به آبشکن (معادل ۰/۵)، U_d: سرعت متوسط عمقی در موقعیت آبشکن یا سرعت متوسط (متر بر ثانیه) و D_{50} اندازه ۵۰٪ سنگ‌ریزه‌ها سبد بر حسب روش مرسوم و کاربردی تعیین اندازه ذرات (متر) است. این رابطه برای استقرار تورسنگ بر روی شیب‌های (2H:1V) یا کم‌تر صادق است. برای محاسبه اندازه متوسط سنگ‌ها در سبد روکش تورسنگ D_{50} در طراحی آبشکن‌ها، رابطه پیلارزیک (۱۹۹۰) به‌صورت زیر ارائه شده است [۱۱۸].

$$D_{n50} = \frac{3}{4(1-n)(s-1)} K_t \left(\frac{D_{n50}}{Y}\right)^{0.2} \left[\left(\frac{\sin(\varphi-\beta)}{\sin\varphi}\right)\left(\cos\alpha\sqrt{1-(\tan\alpha/\tan\varphi)^2}\right]^{-1} \frac{U_d^2}{2g}\right. \quad (۵۱-۶)$$

$$D_{50} = \frac{1}{(0.84 - 0.91)} D_{n50} \quad (۵۲-۶)$$

که در این روابط:

n: تخلخل سنگ‌ریزه‌های سبد (۰/۲۵ تا ۰/۴)، S: چگالی نسبی سنگ، K_t: ضریب شدت تلاطم (برای آبشکن‌ها معادل ۲)، Y: عمق آب در موقعیت آبشکن (متر)، β: زاویه شیب طولی بازه رودخانه، α: زاویه شیب جانبی استقرار تورسنگ، φ: زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌ریزه‌های سبد (۴۰ تا ۴۵ درجه)، U_d: سرعت متوسط عمقی در موقعیت آبشکن یا سرعت متوسط (متر بر ثانیه) و g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) است. رابطه (۶-۵۱) با آزمون و خطا حل می‌گردد.

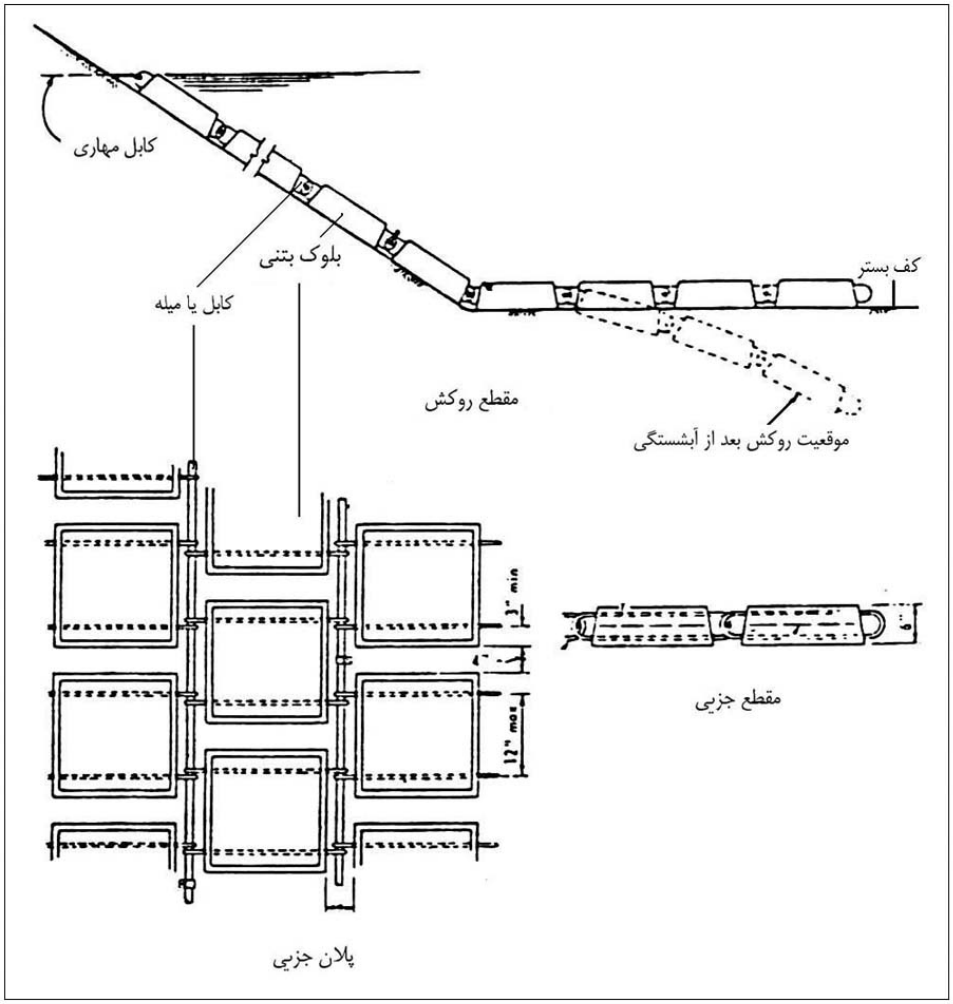
برای حفاظت پنجه در برابر آبشستگی و تامین انعطاف‌پذیری سازه، احداث پیش بندی با ضخامت حداقل ۵۰ سانتی‌متر و با طول حداقل ۲ برابر عمق آبشستگی (و بیش از ۷ برابر ضخامت آن) بر روی بستر در محل پنجه ضروری است [۳۷]. در صورت لزوم جهت پیوستگی دانه‌بندی مواد دیواره با روکش تورسنگ، کاربرد فیلتر اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. جزییات طراحی و ساخت آبشکن‌های تورسنگی در مراجع [۱۴،۸۹ و ۱۱۰] ارائه شده است.

– روکش بتنی مفصل‌دار

روکش بتنی صلب علاوه بر هزینه زیاد و پیچیدگی فنی، تخریب‌پذیر بوده و برای حفاظت سطحی آبشکن‌ها مناسب نمی‌باشد. روکش‌های نوع بالشتک‌های بتنی مفصل‌دار بوده، قابلیت انعطاف و نفوذپذیری زیادی داشته و برای حفاظت پیوسته روکش و پنجه آبشکن می‌تواند مطرح گردد. مطابق شکل (۶-۲۸)، هر بالشتک به‌صورت یک واحد بلوک‌های بتنی مسلح و پیش ساخته با ابعاد (۱۰۰×۳۵×۷/۵) سانتی‌متر می‌باشد. هر واحد روکش متشکل از بیست بالشتک با سطح کل (۱/۲×۷/۵) متر بوده، که توسط کابل یا میل گردهای گالوانیزه و مقاوم در مقابل خوردگی به‌یکدیگر لولا می‌گردند. حد فاصل بالشتک‌ها حدود ۲/۵ سانتی‌متر است، که این درز باعث شستشو مواد و فرسایش دیواره می‌گردد ازاین‌رو لبه‌های بالشتک را ترجیحا گوشه‌دار و V شکل می‌سازند تا سطح درزها از ۱۰ درصد به ۱ درصد کاهش یابد به همین دلیل کاربرد لایه فیلتر (شنی یا ژئوتکستایل) در زیر روکش بتنی ضروری می‌باشد. برای

حفاظت آبشستگی پنجه مطابق شکل (۶-۲۸)، روکش با طول حداقل ۲ برابر عمق آبشستگی احتمالی در عرض بستر موجود (مانند کف بند) گسترش می‌یابد [۱۲۸].

این روش برای شرایط سرعت‌های زیاد (بیش از ۲/۴ متر بر ثانیه) و تلاطم شدید جریان، و برای رودخانه‌های بزرگ و دایمی و با عمق آب زیاد، مناسب بوده ولی برای رودخانه‌های کوچک توصیه نمی‌شود. زیرا هزینه آن زیاد و امکانات و تجهیزات فنی و اجرایی پیچیده‌ای نیز می‌خواهد [۱۰۶ و ۱۲۸].



شکل ۶-۲۸- روکش‌های بتنی مفصل‌دار برای حفاظت پیوسته روکش و پنجه آبشکن [۱۰۴ و ۱۲۸]

- **روکش ژئوتکستایل**

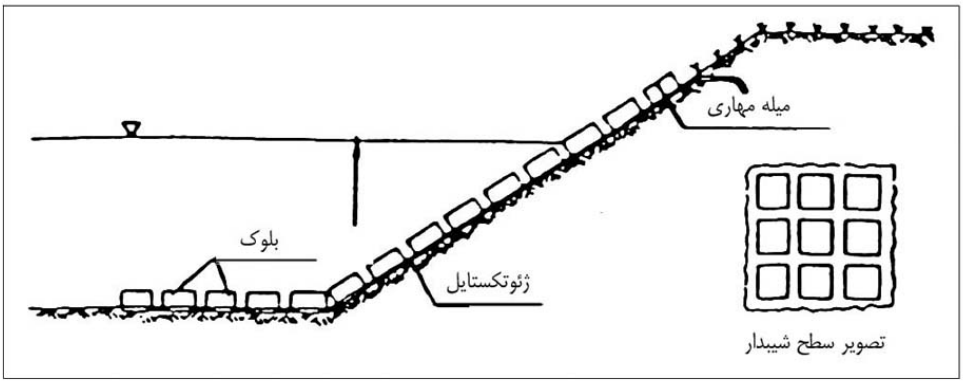
ژئوتکستایل‌ها از مواد و بافت‌های رشته‌ای پلیمری و مصنوعی ساخته می‌شوند. ژئوتکستایل‌ها برای حفاظت پیوسته روکش و پنجه آبشکن استفاده می‌شوند. برای این منظور، مخلوط ماسه و سیمان (به‌صورت بتن رقیق با مقاومت کم) تحت فشار به‌داخل روکش یا تشک فابریک تزریق و پمپاژ می‌گردد. برای حفاظت پنجه، روکش فابریک با طول حداقل ۲ برابر عمق آبشستگی احتمالی در عرض بستر موجود (مانند کف بند) گسترش می‌یابد.

قابلیت انعطاف و مقاومت کششی، نفوذپذیری و سهولت استفاده و اجرا در رودخانه‌های با جریان دایمی از مزایای این محصول صنعتی به‌شمار می‌آید.

مشخصات فنی و محدودیت‌های کاربرد ژئوتکستایل‌ها یا روکش‌های انعطاف‌پذیر مصنوعی[1] بر حسب کارخانه سازنده متفاوت بوده، و براساس شرایط مورد نیاز باید انتخاب گردد. جزییات فنی لازم برای انتخاب ژئوتکستایل، به‌تفصیل در مرجع شماره [۸۰] و همچنین در سایت اینترنتی شرکت های سازنده ارائه شده است. نمونه ژئوتکستایل‌های رودخانه‌ای در شکل (۶-۲۹) ارائه شده است.

- **روکش کیسه‌ای**

از کیسه‌های حاوی مخلوط (خاک- سیمان) یا (شن و ماسه- سیمان) می‌توان برای طراحی روکش سطحی و یا برای حفاظت پیوسته روکش و پنجه آبشکن مطابق شکل (۶-۲۲)، استفاده کرد. جزییات طراحی روش حفاظت کیسه‌ای، و مشخصات فنی ساخت و کارگذاری کیسه‌ها به‌تفصیل در بخش قبلی (۶-۲-۹-۲-الف) ارائه شده است [۱۲۰].



شکل ۶-۲۹- نمونه ژئوتکستایل‌ها برای حفاظت پیوسته روکش و پنجه آبشکن [۱۰۴]

- **روکش آسفالت**

وقتی مصالح شن و ماسه در رودخانه و فرایندهای نفتی و قیری موجود باشد، از روکش آسفالت برای حفاظت سطح دیواره آبشکن (در تراز بالا تر از سطح متوسط کم آبی) استفاده می‌شود. این نوع روکش، انعطاف‌پذیری کمی داشته و نفوذناپذیر می‌باشد. مخلوط آسفالت ماسه‌ای گرم (حدود ۸۵ درصد ماسه، ۵ تا ۷ درصد فیلر نرم سیمانی یا رسی و ۸ درصد قیر)، با ضخامت ۱۲/۵ سانتی‌متر، و بر روی شیب (۳H:۱V) استفاده می‌شود. بستر آسفالت‌ریزی نیاز به فیلتر ریز دارد. ضخامت زیاد فوق به‌دلیل میزان فرسایش آسفالت است. نتایج نشان داده که شدت فرسایش فیزیکی آن حدود ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر در سال می‌باشد. ازاین‌رو بعد از گذشت بیست سال، ضخامت مطلوب ۵ سانتی‌متر را تامین خواهد کرد [۱۲۸]. این روش برای سرعت جریان بیش از ۲ متر در ثانیه و نیز در دامنه دیوار پایین (در تراز کم‌تر از سطح متوسط کم آبی) مناسب نبوده، و به‌طورکلی دوام آن برای حفاظت سطحی آبشکن‌ها مورد تردید است. از معایب آن نفوذناپذیری سازه و احتمال تخریب آن در اثر نیروی تراوش آب بعد از وقوع سیلاب است، مگر آن‌که لوله‌های زه‌کشی یا درزها تخلیه در آن پیش‌بینی شود [۱۲۸].

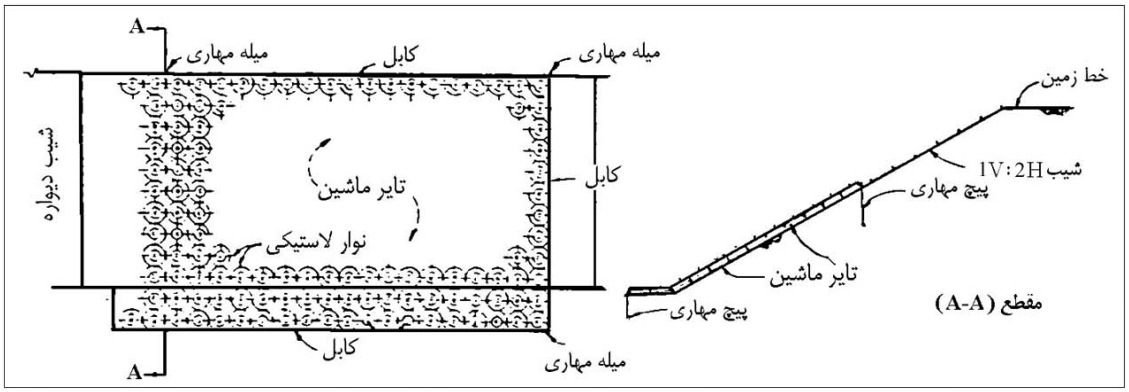
1- Flexmats

- **روکش تایر ماشین**

درصورتی‌که حفاظت پنجه و دیواره پایین آبشکن (تراز زیر سطح متوسط کم آبی) با روکش مقاوم (سنگ‌ریزه ای یا تورسنگی) انجام گردد، از لاستیک‌های اتومبیل می‌توان برای حفاظت سطح بالای دیواره استفاده نمود. در این روش مطابق شکل (۶-۳۰)، تایرهای فرسوده ماشین را کنار یکدیگر روی شیب دیواره چیده، و توسط کابل سیمی یا طناب و یا گاهی تیوب‌های فرسوده به هم وصل می‌کنند. شیب دیواره حداقل باید (2H:1V) بوده و برای جلوگیری از لغزش یا شناور شدن روکش، هر واحد از تایرهای به هم بافته را از طریق یک لنگرگاه و سکوسازی در ساحل یا روی دیواره مهار می‌کنند [۱۲۸]. حداکثر طول هر واحد ۱۳/۵ متر است که از چهار گوشه مهار خواهد شد و گاهی میخ‌های چوبی به فواصل یک متری در لابلای تایرها کوبیده می‌شود [۱۰۲]. در اثر جریان‌های متناوب سیلابی، به‌تدریج با جذب رسوبات در فضای خالی تایرها، شرایط برای تثبیت طبیعی و گیاهی روکش فراهم گردیده، قابلیت حفاظتی آن افزایش یافته و منظرگاه مناسبی نیز به‌وجود می‌آید. همچنین روکش تایرهای لاستیکی در برابر مواد جامد شناور و یخ انعطاف‌پذیری داشته و برای قایقرانی نیز ایمن‌تر می‌باشد.

- **روکش طبیعی**

از دیدگاه فنی- اقتصادی و زیست محیطی، استفاده از مصالح طبیعی در ساخت و کارکرد آبشکن‌ها مورد توجه می‌باشد. روکش حفاظت طبیعی آبشکن در سطوح مختلف ممکن است متفاوت باشد. به‌طور مثال، در پنجه و دیوار پایین از کیسه‌های توری حاوی سنگ و مصالح طبیعی و برای حفاظت سطحی دیواره و ساحل بالا از بافه‌های نی یا شاخ و برگ یا بوته استفاده گردد [۵۴]. این گونه ساختار ترکیبی آبشکن می‌تواند از نظر سازه‌ای پایدار، از نظر فنی و اجرایی ساده‌تر، از نظر اکولوژیکی و زیبایی مقبول‌تر و در عین حال اقتصادی‌تر نیز باشد. جزییات بیش‌تر در استفاده از مصالح طبیعی و طرح فنی آنها در کارهای رودخانه‌ای در مراجع شماره [۶۲، ۷۰ و ۱۴۰] ارائه شده است.



شکل ۶-۳۰- روکش حفاظتی سطح دیواره آبشکن با تایرهای فرسوده ماشین [۱۲۸]

ج- حفاظت پنجه آبشکن

دماغه آبشکن اغلب در معرض حمله جریان اصلی رودخانه بوده و آسیب‌پذیر می‌باشد. پنجه آبشکن نیز به‌طور دایم (حتی در جریان‌های کم آبی) در معرض قدرت جریان گردابی قرار داشته و فرسایش می‌یابد. آبشستگی پنجه آبشکن عامل اصلی در ناپایداری

شیب و تخریب دماغه آبشکن‌ها است. حفاظت پنجه در پیرامون دماغه آبشکن در برابر آبشستگی احتمالی برای اطمینان از پایداری آبشکن و کارکرد اصلی آن در آینده ضروری است. در غیر این‌صورت، عواقب تخریب آن در بازه رودخانه، جبران‌ناپذیر خواهد بود.

به‌طور کلی متناسب با نوع مصالح و روش اجرا، ساختار عمومی حفاظت پنجه مطابق شکل (۶-۳۱) ممکن است به پنج صورت زیر تقسیم گردد [۱۱۰]:

- احداث دیواره سپری عمودی در پنجه دیواره تا عمقی بیش از عمق آبشستگی (d_S) مانند دیواره سپری بتنی (شکل۶ -۳۱-ب)، یا دیواره سپری فلزی (شکل ۶-۳۱- الف)
- احداث کف بند افتان در محل پنجه مانند استقرار مصالح روکش دیواره بر روی بستر موجود با طول کافی برای انطباق تدریجی با تراز آبشستگی در آینده (شکل ۶-۳۱- ت) یا ادامه روکش انعطاف‌پذیر دیواره در زیر بستر تا عمق آبشستگی، انطباق تدریجی با حفره آبشستگی در آینده (شکل ۶-۳۱- پ)
- توسعه پنجه روکش دیواره تا عمقی بیش از عمق آبشستگی مانند ادامه روکش انعطاف‌پذیر در زیر بستر شکل(۶-۳۱- ج) یا ادامه تورسنگ در زیر بستر (شکل ۶-۳۱- ث)
- احداث ترانشه پنجه با عمقی کم‌تر از عمق آبشستگی، نظیر ترانشه سنگ‌ریزه‌ای در پنجه روکش بتنی (شکل ۶-۳۱- ح)، یا ترانشه سنگ‌ریزه‌ای در پنجه روکش سنگ‌ریزه‌ای (شکل ۶-۳۱- چ)
- روش‌های دیگر حفاظت پنجه، نظیر مهار کیسه‌های سنگی و مصالح طبیعی در پنجه (شکل ۶-۳۱- د) یا شمع‌کوبی در پنجه (شکل ۶-۳۱- خ)

راهکارهای عمومی و کاربردی حفاظت پنجه آبشکن‌ها به‌ترتیب در زیر ارائه می‌گردد:

- **حفاظت سنگ‌ریزه‌ای پنجه**

ساختار حفاظت سنگ‌ریزه‌ای پنجه آبشکن‌ها متناسب با شرایط رودخانه‌ها متفاوت است. گزینه‌های مختلف کاربردی برای حفاظت موثر پنجه در برابر آبشستگی به‌شرح زیر معرفی می‌گردند [۱۰۲، ۱۰۶ و ۱۲۸].

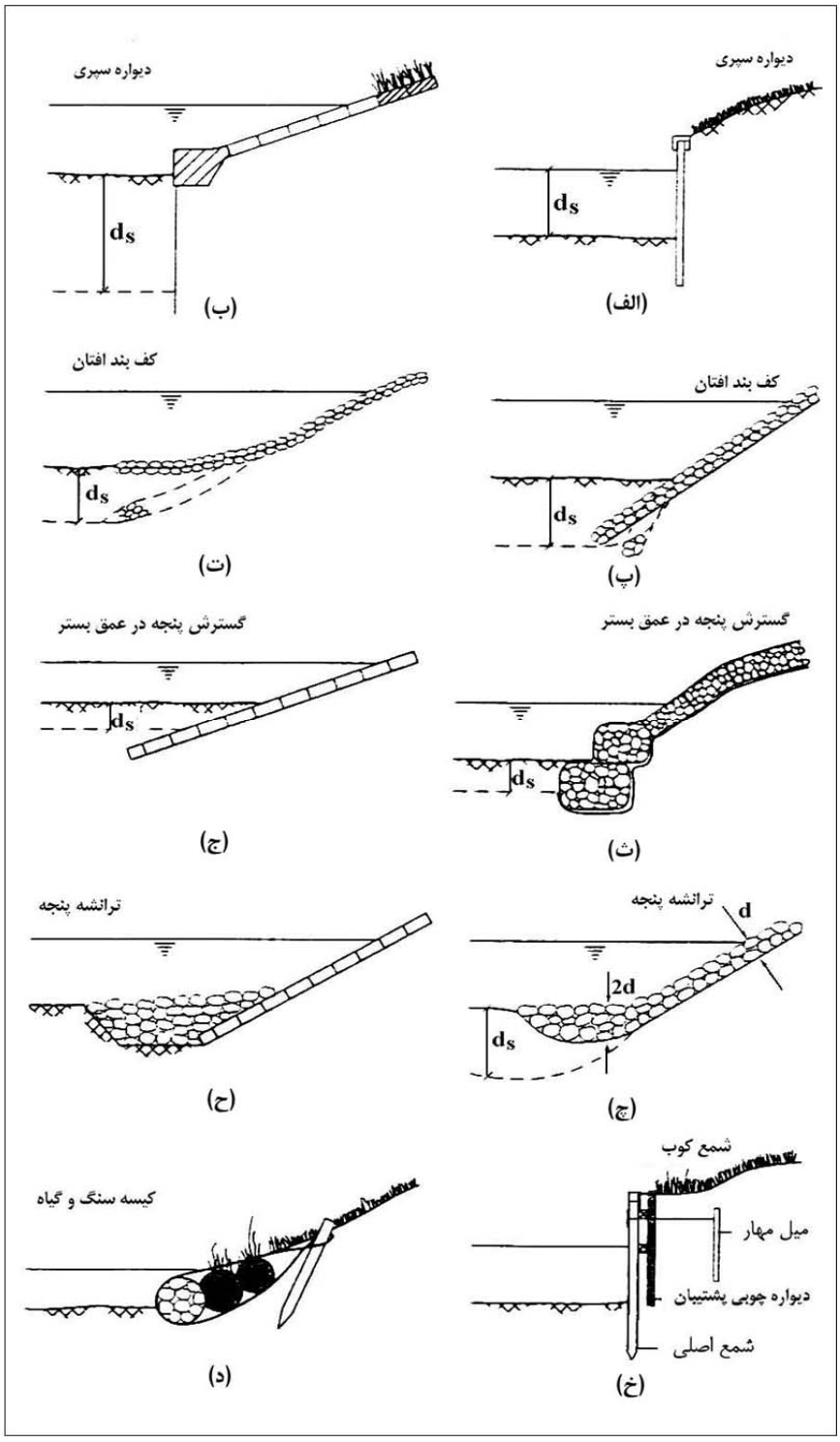
گزینه۱- در رودخانه‌های فصلی، و نیز در شرایطی که پای دیواره رودخانه و آب شکن خشک باشد، لایه روکش سنگ‌ریزه‌ای دیواره آبشکن، با همان شیب و ضخامت سنگ‌ریزی حداقل تا تراز حداکثر آبشستگی در زیر بستر باید ادامه یابد.

$$a \geq d_S \qquad (۵۳-۶)$$

که در این رابطه:

d_S: عمق حداکثر آبشستگی در دماغه یا پیرامون وجوه جانبی آبشکن و a عمق سنگ‌ریزی در زیر تراز بستر موجود است. نمونه آن در شکل (۶-۳۱- پ) نشان داده شده است.

گزینه ۲- اگر سنگ کف در محل احداث آبشکن و پنجه بالا باشد، سنگ‌ریزی تا تراز سنگ کف انجام می‌شود.



شکل ۶-۳۱- نمونه‌هایی از انواع روش‌های حفاظت دیواره و پنجه [۱۱۰]

گزینه ۳- در شرایطی که سطح جریان کم آبی رودخانه یا سطح آب زیر زمینی نزدیک به کف بستر بوده و حفاری عمیق پی تا عمق آبشستگی مقدور نباشد، در این‌صورت در پیرامون پنجه آبشکن یک ترانشه کم عمق، مطابق شکل (۶-۳۱- چ) حفر می‌گردد. عمق ترانشه (a) حداقل ۱ تا ۱/۵ متر، عرض کف ترانشه (c) حداقل معادل عمق ترانشه و شیب جانبی ترانشه در سمت رودخانه حداقل (1.5H:1V)خواهد بود. ضخامت سنگ‌ریزی از کف ترانشه (b)، حداقل معادل ضخامت لایه سنگ‌ریزی روی دیواره آبشکن (T) توصیه شده است. با توجه به عوامل تعریف شده در شکل (۶-۳۲)، ابعاد زیر را می‌توان برای حفر ترانشه پنجه و سنگ‌ریزی در نظر گرفت:

$$a = (1-1.5)\ m \qquad c \geq a \qquad b \geq T \qquad z \geq 1.5 \qquad (۵۴-۶)$$

گزینه ۴- در شرایطی که سطح جریان کم آبی رودخانه بالا بوده ولی عمق آبشستگی زیاد نباشد، حفر ترانشه پنجه لازم نخواهد بود. در این‌صورت در محل پنجه، سنگ‌ریزی مستقیما روی کف بستر موجود رودخانه انجام شده به‌طوری‌که مطابق شکل(۶-۳۱-ت) یک کف بند سنگ‌ریزه‌ای در پیرامون آبشکن ایجاد گردد. حجم سنگ‌ریزی باید به‌حدی تامین شود تا کف بند سنگ‌ریزی پنجه با عرض (L) حدود ۵ برابر و با ضخامت (b) حداقل ۱/۵ برابر ضخامت لایه سنگ‌ریزی روی دیواره آبشکن (T)، گسترش یابد. با توجه به عوامل تعریف شده در شکل (۶-۳۲)، ابعاد کف بند به‌صورت زیر خواهد بود:

$$a = 0 \qquad L = 5T \qquad b \geq 1.5T \qquad (۵۵-۶)$$

گزینه۵- در شرایطی که سطح آب رودخانه بالا بوده و عمق آبشستگی زیاد باشد ولی امکان انحراف آب از فضای کار فراهم نباشد، ترانشه پنجه در پیرامون آبشکن حفر می‌گردد. مطابق شکل (۶-۳۱- چ)، ترانشه پنجه با عمق (a) ۳ برابر، با عرض کف (c) حدود ۵ برابر ضخامت لایه سنگ‌ریزی روی دیواره آبشکن (T) و با شیب جانبی سمت رودخانه حداقل (1.5H:1V) احداث شده و تا سطح بستر موجود رودخانه سنگ‌ریزی می‌شود. با توجه به عوامل تعریف شده در شکل (۶-۳۲)، ابعاد زیر را می‌توان برای این گزینه در نظر گرفت:

$$a = 3T \qquad c = 5T \qquad b = a = 3T \qquad z \geq 1.5 \qquad (۵۶-۶)$$

گزینه ۶- در مواقعی که عمق آبشستگی موضعی به‌ویژه در دماغه آبشکن زیاد باشد، با توجه به این‌که حفر پی در پنجه آبشکن تا عمق آبشستگی پرهزینه بوده، و از نظر اجرا مشکل‌ساز است. افزایش مقاومت بستر و تنش برشی بحرانی در محل پنجه از شدت آبشستگی موضعی می‌کاهد. براساس تجربیات، گسترش کف بند سنگ‌ریزه‌ای در سطح حفره فرسایش موضعی می‌تواند عمق آبشستگی موضعی را تا حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش دهد [۱۰۲ و ۱۰۴]. در این‌صورت، ترانشه پنجه با عمقی معادل نیمی از عمق حداکثر آبشستگی موضعی احداث شده، ولی سنگ‌ریزی در این عمق تا محدوده عرضی حفره فرسایش در پیرامون آبشکن انجام می‌گیرد. در هر حال، حداقل عمق ترانشه و سنگ‌ریزی ۲ متر باید باشد. عرض حفره فرسایشی براساس عمق حداکثر آبشستگی موضعی (d_S) و زاویه قرار مواد بستری رودخانه (φ) محاسبه می‌شود. با توجه به عوامل تعریف شده در شکل (۶-۳۲)، مشخصات زیر را می‌توان در نظر گرفت:

$$a = 0.5d_S \quad a \geq 2\ m \qquad b \geq a \qquad L = c + 2zd_S \qquad (۵۷-۶\text{- الف})$$

$$c \geq 1.5\ m \quad c = 2\ m \qquad z \geq \cot g\phi \quad z \geq 1.5 \qquad (۵۷-۶\text{- ب})$$

گزینه ۷- در شرایطی که سطح آب رودخانه بالا بوده، عمق آبشستگی زیاد باشد، و امکان انحراف آب از فضای کار فراهم نگردد، حفر ترانشه پنجه در پیرامون آبشکن میسر نخواهد بود. در این‌صورت مطابق شکل (۶-۳۱-ت)، سنگ‌ریزی مستقیما در زیر آب در محدوده پنجه و بر روی کف بستر موجود رودخانه انجام می‌شود. از این‌رو، یک کف بند سنگ‌ریزه‌ای با ضخامت و عرض بیش‌تری در پیرامون آبشکن ایجاد می‌گردد. براساس شکل (۶-۳۲)، ضخامت کف بند سنگ‌ریزه‌ای (b) حدود ۲ برابر ضخامت لایه سنگ‌ریزی روی دیواره آبشکن (T) و حداقل ۲ متر باید باشد. عرض دامنه کف بند (L) در پیرامون آبشکن از روابط زیر قابل محاسبه است:

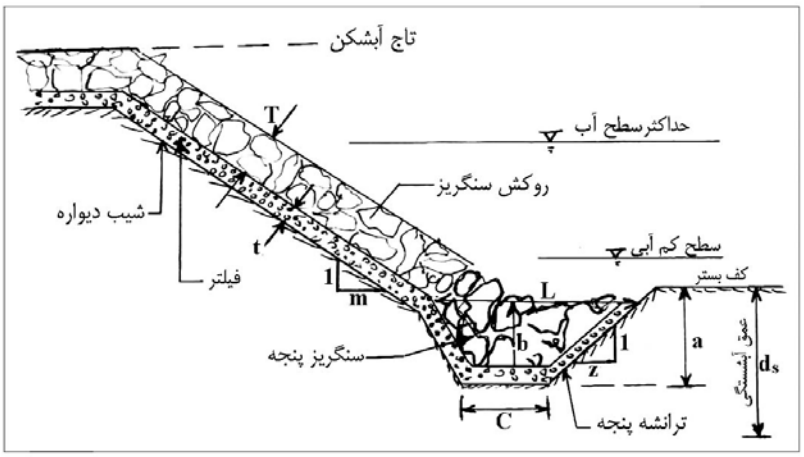
$$L_1 = 3d_S + 4 \qquad L_2 = 2d_S + 2 \qquad L_3 = 3d_S + 3 \qquad b \approx 2T \quad b > 2 \text{ m} \qquad (۵۸-۶)$$

که در این روابط:

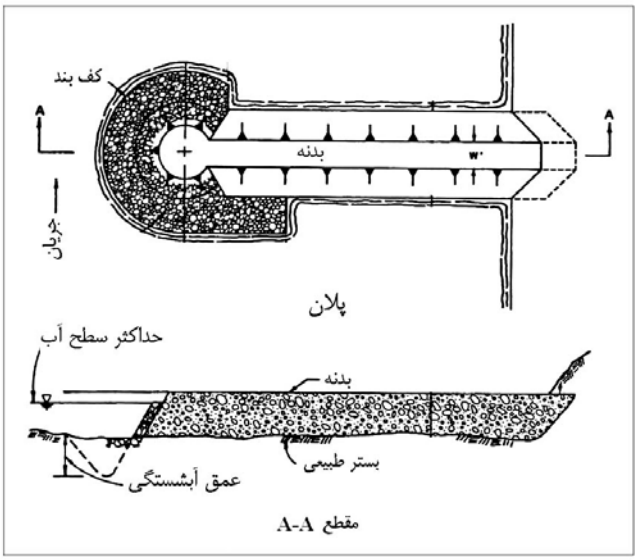
L_1: عرض کف بند در محدوده دماغه آبشکن (متر)، L_2: عرض کف بند در امتداد وجه بالا دست آبشکن (متر)، L_3: عرض کف بند در امتداد وجه پایین‌دست آبشکن (متر) و d_S عمق حداکثر آبشستگی در دماغه یا پیرامون وجوه جانبی آبشکن (متر) است.

کیفیت مصالح سنگی و ضوابط لازم برای شکل و دانه‌بندی سنگ‌ها مشابه شرایط روکش سنگ‌ریزه‌ای می‌باشد. ولی اندازه سنگ‌ها برای حفاظت پنجه حداقل ۵۰ درصد بزرگ‌تر از سنگ‌های روی دیواره آبشکن است. اگر سنگ‌ریزی پنجه در ترانشه حفر شده در پیرامون آبشکن انجام یابد، استفاده از سنگ‌های گرد گوشه و قلوه‌ای محدودیتی ندارد [۱۰۶ و ۱۲۸]. گرچه استقرار فیلتر در پایداری بستر سنگ‌ریزی موثر است، ولی نیاز به فیلتر در پنجه محدودتر بوده و ممکن است حذف گردد. در هرحال، ضوابط طرح فیلتر مشابه شرایط روکش سنگ‌ریزه‌ای بوده و در بخش بعدی ارائه شده است.

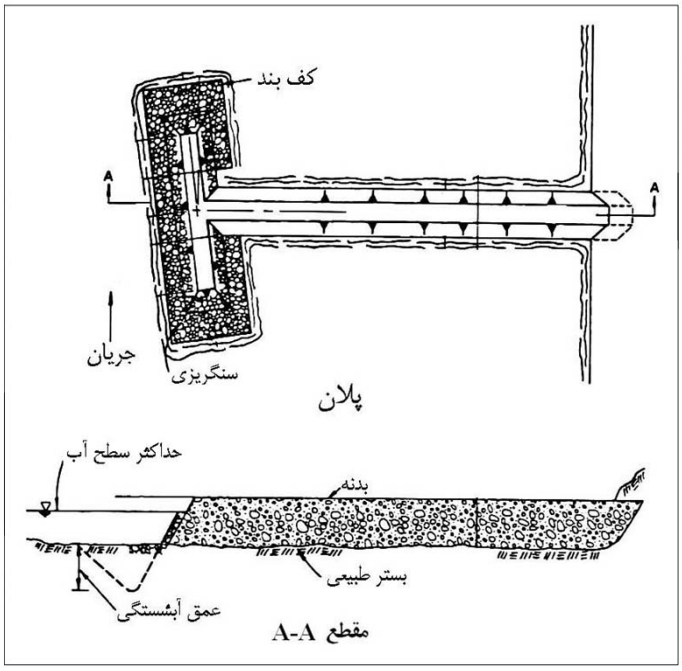
مثال‌های کاربردی از حفاظت پنجه آبشکن‌ها با مصالح سنگ‌ریزه‌ای (با استفاده از گزینه شماره ۶) در شکل‌های (۶-۳۳) و (۶-۳۴) نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۲- مشخصات هندسی حفر ترانشه در پنجه آبشکن برای روش حفاظت سنگ‌ریزه‌ای



شکل ۶-۳۳- حفاظت سنگ‌ریزه‌ای دامنه پنجه در پیرامون دماغه آبشکن مستقیم

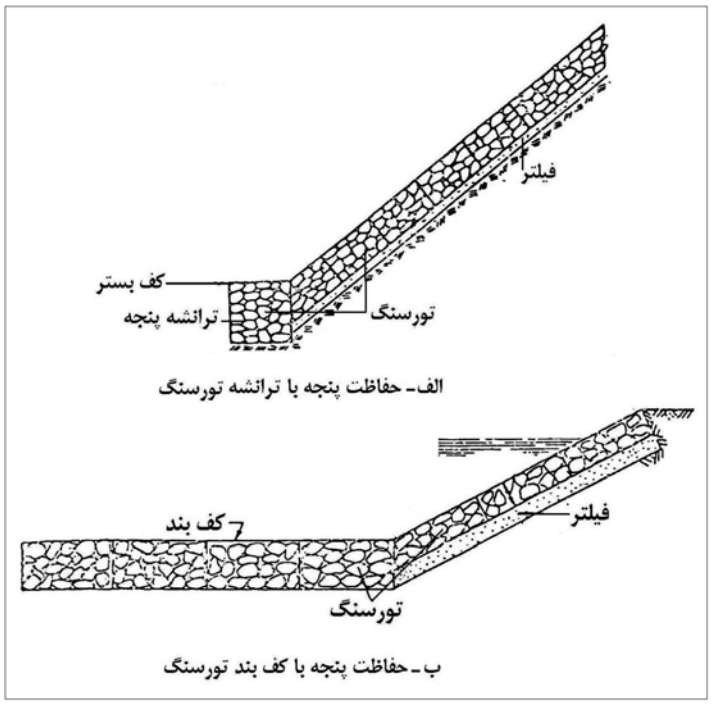


شکل ۶-۳۴- حفاظت سنگ‌ریزه‌ای دامنه پنجه در پیرامون دماغه آبشکن T شکل

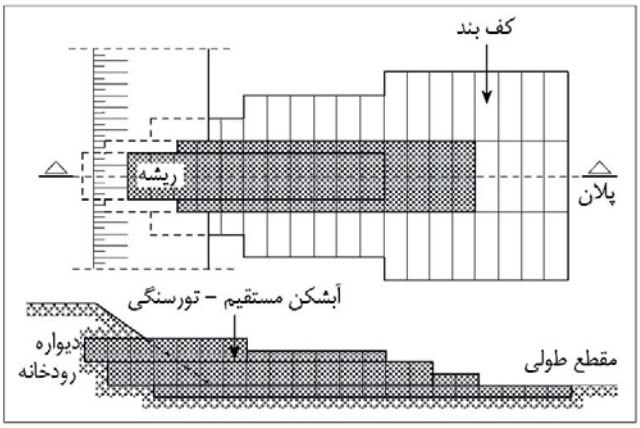
- **حفاظت تورسنگی پنجه**

برای حفاظت پنجه آبشکن‌های نوع تورسنگ جعبه‌ای یا روکشی، دو راهکار پیشنهاد شده است (۶-۳۵). راهکار اول استفاده از تورسنگ جعبه‌ای در محل پنجه، مطابق شکل (۶-۳۵- الف) است. در این روش، حفاظت پنجه در ترانشه‌ای به‌طول حداقل ۲ متر و عمقی معادل ۱/۵ تا ۲ برابر عمق آبشستگی احداث می‌شود. این روش پرهزینه بوده و اجرای آن در زیر آب ممکن نیست [۳۷].

راهکار دوم استفاده از کف بند تورسنگ در پیرامون پنجه آبشکن، مطابق شکل‌های (۶-۳۵-الف) و (۶-۳۶) است. در این روش، تورسنگ با ضخامت حداقل ۵۰ سانتی‌متر و با طول حداقل ۲ برابر عمق آبشستگی (و بیش از ۷ برابر ضخامت آن)، در کف بستر قرار می‌گیرد. انعطاف‌پذیری و قابلیت کششی سازه تورسنگ باعث انطباق تدریجی آن با تراز آبشستگی بستر در آینده می‌گردد [۳۷]. کاربرد روش حفاظت پنجه تورسنگی در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه خطر پارگی تورهای سیمی را به‌همراه دارد. جزییات بیش‌تر در طرح تورسنگ‌ها و تمهیدات لازم برای کارایی آن در مراجع شماره [۲، ۱۴، ۸۹ و ۱۱۰] ارائه شده است.



شکل ۶-۳۵- نمایش دو راهکار مختلف حفاظت پنجه با تورسنگ



شکل ۶-۳۶- استفاده از روکش تورسنگ به‌عنوان کف بند در پیرامون پنجه آبشکن [۸۹]

- **حفاظت کیسه‌ای پنجه**

برای حفاظت پنجه می‌توان ازکیسه‌های حاوی مخلوط مقاوم‌تر (خاک- سیمان) یا (شن و ماسه- سیمان) استفاده کرد (شکل۶-۲۱). کیسه‌ها در ترانشه پنجه، تا عمق آبشستگی و حداقل تا ۱/۵ متر زیر کف بستر، مانند آجر چینی در هم قفل شده و منظم چیده می‌شوند. جزییات طراحی روش حفاظت کیسه‌ای و مشخصات فنی ساخت و کارگذاری کیسه‌ها به‌تفصیل در بند (۶-۲-۹-۲-الف) ارائه شده است [۱۰۴ و ۱۲۸].

د- طرح فیلتر

برای کنترل نیروی تراوش و کاهش پدیده زیرشویی که منجر به شستشو و خروج مواد ریزدانه‌تر از دیواره رودخانه، بدنه خاکریز آبشکن و بستر رودخانه در محل پنجه آبشکن خواهد شد، استفاده از لایه فیلتر در حدفاصل مواد ریزدانه و درشت‌دانه ضروری است. کاربرد لایه فیلتر در موارد زیر باید بررسی گردد.

- بین مواد دیواره رودخانه و مصالح درشت‌دانه‌تر بدنه آبشکن
- بین مصالح بدنه آبشکن و روکش حفاظتی (نظیر روکش سنگ‌ریزه‌ای، تورسنگ و غیره)
- بین مواد بستر رودخانه و مصالح حفاظت پنجه آبشکن

فیلترها برای کارکرد موثر و ایمن آبشکن‌ها، دو خصوصیات زیر را باید دارا باشند [۱۰۶].

- از نظر پایداری: اندازه فضاهای خالی در مصالح فیلتر باید به‌حدی کوچک باشند تا از شستشو و حرکت ذرات خاک و مصالح زیرین لایه فیلتر به‌سوی خلل و فرج موجود در فیلتر جلوگیری گردد.
- از نظر آبگذری: مصالح فیلتر باید به اندازه کافی ظرفیت انتقال آب (تراوش) داشته باشد تا قابلیت زهکشی مصالح زیرین لایه فیلتر را فراهم ساخته و از تاثیر نیروی هیدرواستاتیکی آب و فشار حفره‌ای بکاهد.

به‌طور کلی دو نوع فیلتر وجود دارد: ۱- فیلتر دانه‌ای[1] (شنی) و ۲- فیلتر مصنوعی یا ژئوتکستایل[2].

- **فیلترهای شنی**

فیلترهای دانه‌ای یا شنی به‌دلیل استفاده از مصالح طبیعی و رودخانه‌ای و دوام زیاد، به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. کارکرد فیلترهای شنی بستگی به دو خصوصیات پایداری و آبگذری مناسب آن دارد. درصورتی‌که مواد زیرین درشت‌دانه و نسبتا غیرچسبنده باشد، ضوابط خاصی برای اندازه و دانه‌بندی مصالح فیلتری ارائه شده است.

مشخصات مواد لایه فیلتر[3] در مجاورت مصالح بستر[4] به‌صورت زیر پیشنهاد شده است [۱۰۲ و ۱۰۶]:

$$\frac{D_{50}(\text{Filter})}{D_{50}(\text{Base})} < 40 \quad ، \quad 5 < \frac{D_{15}(\text{Filter})}{D_{15}(\text{Base})} < 40 \quad ، \quad \frac{D_{15}(\text{Filter})}{D_{85}(\text{Base})} < 5 \qquad (۵۹-۶)$$

مشخصات مواد لایه فیلتر در مجاورت مصالح بستر یا مصالح سنگ‌ریزه‌ای به‌صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{D_{50}(\text{Riprap})}{D_{50}(\text{Filter})} < 40 \quad ، \quad 5 < \frac{D_{15}(\text{Riprap})}{D_{15}(\text{Filter})} < 40 \quad ، \quad \frac{D_{15}(\text{Riprap})}{D_{85}(\text{Filter})} < 5 \qquad (۶۰-۶)$$

1- Granular (Gravel) Filter
2- Geotextile
3- Filter
4- Base

حداقل اندازه مواد فیلتری ۵ میلی‌متر و حداکثر آن متناسب با اندازه مصالح سنگ‌ریزه‌ای می‌تواند ۷۵ تا ۹۰ میلی‌متر باشد.

درصورتی‌که مواد زیرین (در دیواره و بستر رودخانه، یا مصالح هسته آبشکن) ریزدانه و چسبنده باشد، لایه فیلتری فوق کافی نبوده، یک لایه زیرین فیلتر ریزدانه با مشخصات زیر باید قرار گیرد یا از فیلتر ژئوتکستایل استفاده گردد.

$$D_{95} > 0.074\text{mm} \quad ، \quad D_{15} \le 0.4\text{mm} \qquad (۶۱-۶)$$

براساس ضوابط فوق ممکن است بیش از یک لایه فیلتر مورد نیاز باشد. برای لایه‌های رویین، ضوابط مشروح در روابط(۶-۵۹) و (۶-۶۰) صادق خواهد بود. در شرایطی که مواد دیواره و بستر رودخانه یا مصالح بدنه اصلی آبشکن به‌حدی درشت‌دانه و با دانه‌بندی خوب باشد، اگر ضوابط زیر تامین گردد، نیاز به لایه فیلتر نخواهد بود.

$$5 < \frac{D_{15}(\text{Riprap})}{D_{15}(\text{Base})} < 40 \quad ، \quad \frac{D_{15}(\text{Riprap})}{D_{85}(\text{Base})} < 5 \qquad (۶۲-۶)$$

برای تعیین دانه‌بندی مصالح فیلتری، ابتدا منحنی دانه‌بندی مواد زیرین بستر و نیز منحنی دانه‌بندی مصالح رویین بر روی یک مختصات توزیع اندازه ذرات رسم گردیده، سپس براساس رابطه (۶-۵۹) دامنه پوش فیلتر مجاور مواد زیرین و براساس رابطه (۶-۶۰) دامنه پوش فیلتر مجاور مواد زیرمصالح رویین رسم گردیده و در نهایت از همپوشانی حاصل، پوش دانه‌بندی فیلتر مورد نیاز به‌دست می‌آید. منحنی دانه‌بندی فیلتر باید در محدوده همپوشانی فوق قرار گرفته و بهتر است موازی با منحنی دانه‌بندی مواد بستر و مصالح رویین باشد. نمونه کاربردی این روش در شکل (۶-۳۷) نشان داده شده است. در روش فوق اگر همپوشانی صورت نگیرد، کاربرد بیش از یک لایه فیلتری (به‌ترتیب از لایه ریزتر به درشت‌تر) ضروری خواهد بود [۱۰۶].

حداقل ضخامت لایه فیلتر ماسه‌ای ۱۰ سانتی‌متر، و برای فیلتر شنی ۱۵ تا ۲۲/۵ سانتی‌متراست. حداکثر ضخامت لایه فیلتر عموما ۳۰ سانتی‌متر است، ولی در شرایط مطلوب معادل نصف ضخامت مصالح روکش سنگ‌ریزه‌ای توصیه شده است [۳۷].

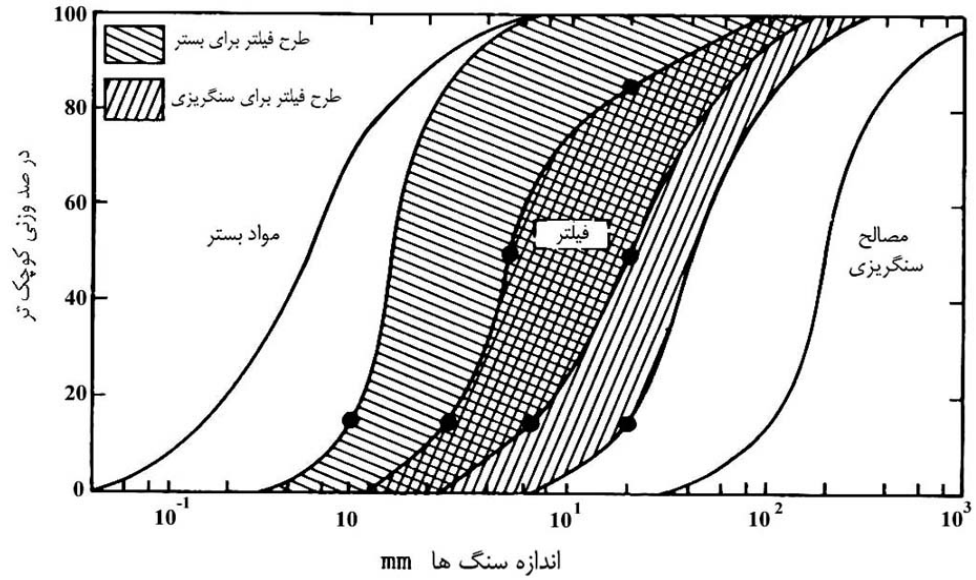
در رودخانه‌های با جریان دایمی، اگر امکان انحراف جریان رودخانه فراهم نباشد، می‌توان مواد فیلتر شنی را در داخل روکش‌های تشکی تور سیمی ریز بافت قرار داده و مانند روکش‌های تور سنگی بر روی دیواره یا کف بستر مستقر نمود [۴۵].

- **فیلترهای مصنوعی**

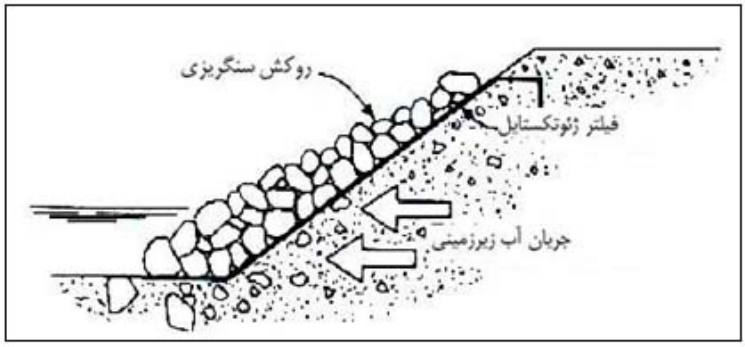
فیلترهای مصنوعی یا ژئوتکستایل‌ها از مواد و بافت‌های رشته‌ای پلیمری و مصنوعی ساخته می‌شوند. فیلترهای مصنوعی در حدفاصل مصالح دیواره یا هسته آبشکن و لایه سنگ‌ریزی، تورسنگ و غیره استفاده می‌شوند. بیش‌ترین کاربرد این نوع فیلتر فابریکی بر روی مواد ریزدانه و چسبنده است. قابلیت انعطاف و مقاومت کششی، نفوذپذیری و سهولت استفاده و اجرا در رودخانه‌های با جریان دایمی از مزایای این محصول صنعتی به‌شمار می‌آید. شکل (۶-۳۸) نمونه کاربرد فیلتر مصنوعی را در زیر روکش سنگ‌ریزه‌ای، جهت اجرا در شرایط پرآبی رودخانه نشان می‌دهد.

مشخصات فنی و محدودیت‌های کاربرد ژئو تکستایل‌ها یا روکش‌های انعطاف‌پذیر مصنوعی[1] بر حسب کارخانه سازنده متفاوت بوده، و براساس شرایط مورد نیاز باید انتخاب گردد. جزییات فنی لازم برای انتخاب ژئو تکستایل، در مراجع شماره [۷ و ۸۰] و همچنین در سایت اینترنتی شرکت های سازنده ارائه شده است.

1- Flexmat



شکل ۶-۳۷- نمونه پوش دانه‌بندی فیلتر شنی برای پایداری بستر روکش سنگ‌ریزه‌ای [۱۰۶]



شکل ۶-۳۸- کاربرد فیلتر ژئوتکستایل زیر روکش سنگ‌ریزه‌ای جهت اجرا در شرایط پرآبی رودخانه [۷]

۶-۳- حفاظت ساحل بالا و حریم رودخانه

عموما به محدوده ساحل بالا و حریم رودخانه کم‌تر از اراضی دشت ساحلی اهمیت داده می‌شود. درحالی‌که بهره‌برداری از رودخانه، پایداری یا شدت فرسایش دیواره رودخانه و ایمنی و کارکرد سازه‌های حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه (به ویژه آبشکن‌ها)، مستقیما تحت تاثیر عوامل تخریبی و نحوه کاربری نوار ساحل بالای رودخانه (یا حریم رودخانه) است. در این بخش ابتدا عوامل بیرونی فرسایش و تخریب دیواره‌ها همراه با راهکارهای تعدیل اثرهای این عوامل و سپس روش‌های مهم مدیریت حفاظت دیواره و حریم رودخانه برای ایمنی کارکرد سامانه آبشکن‌ها ارائه می‌گردد [۳۷].

۶-۳-۱- عوامل بیرونی و راهکارهای حفاظت ساحل بالا

- **کاهش نیروی تراوش دیواره‌ها:** نیروی تراوش سبب ایجاد پدیده زیرشویی و لغزش دیواره‌ها می‌گردد. وقتی سطح آب در اراضی حاشیه رودخانه بالا باشد، با احداث زهکش حایل به‌موازات رودخانه، تراوش دایمی آب از دیواره‌ها کنترل می‌گردد. اگر این پدیده ناشی از هرز آب آبیاری اراضی و یا بارش باشد، آبراه زهکش سطحی و اگر ناشی از بالا بودن سفره آب زیرزمینی نسبت به سطح کم آبی رودخانه باشد، آبراه زهکش عمیق احداث می‌گردد. پر کردن چاله‌ها و گودی‌ها در اراضی ساحلی نیز موثر می‌باشد.
- **کاهش ترک و شکاف‌ها:** خاک‌های چسبنده با کاهش رطوبت و تر و خشک شدن یا در اثر ذوب و انجماد خاک، دچار ترک و شکاف می‌شوند. در مناطق خشک از طریق پوشش گیاهی روی اراضی ساحلی و یا مالچ پاشی، تبخیر از سطح خاک را کاهش داده و شدت تغییرات دمای خاک می‌کاهند.
- **افزایش مقاومت خاک:** مقاومت توده خاک از طریق پیوند بین ذرات بالا می‌رود. برای این منظور از تزریق سیمان یا دیگر مواد چسبنده استفاده می‌شود. اخیرا نیز تکنیک مسلح کردن خاک (از طریق قراردادن صفحات توری فلزی، پلاستیکی و غیره در لایه‌های افقی خاک) توسعه یافته است. روش اخیر برای حفاظت ساحل بالا و حریم رودخانه به تنهایی توجیه ندارد.
- **کاهش نیروهای لغزشی:** نیروهای لغزشی با تعدیل زاویه شیب دیواره کاهش می‌یابند. بارگذاری روی سطح دیواره از طریق روکش‌های ساختمانی نیز مقاومت لغزشی را افزایش می‌دهد. کاشت درختان با ریشه عمیق و قائم نیز مقاومت برشی خاک را در دیواره‌های کوتاه افزایش خواهد داد. روش اخیر از نظر فنی، اقتصادی و اکولوژیکی باید مورد توجه باشد.

۶-۳-۲- مدیریت حفاظت سطح دیواره رودخانه

پوشش گیاهی در حفاظت سطح دیواره و در طول بازه احداث آبشکن‌ها روش موثر و برتری محسوب می‌گردد. ولی چون سطح دیواره به‌طور متناوب در معرض جریان سیلابی قرار می‌گیرد، ازاین‌رو باید گیاهان با ریشه‌های قوی و خزنده و با اندام بیرونی انعطاف‌پذیر و ارتجاعی انتخاب شوند. یک پوشش چمنی خوب می‌تواند سرعت جریان را روی دیواره تا ۹۰ درصد کاهش دهد. برای این منظور گیاهان علفی و کوتاه، با سطح تراکم زیاد و سریع الرشد، در ترکیب با گیاهان خشبی و درختچه‌های کوتاه و انعطاف‌پذیر، پوشش مناسبی را فراهم می‌کند. گیاهان علفی نقش حفاظت سطحی دیواره را در کوتاه مدت به‌عهده گرفته تا زمینه مناسب برای استقرار و تثبیت دراز مدت درختان در سطح و ساحل بالای رودخانه فراهم گردد [۳۷ و ۱۲۸].

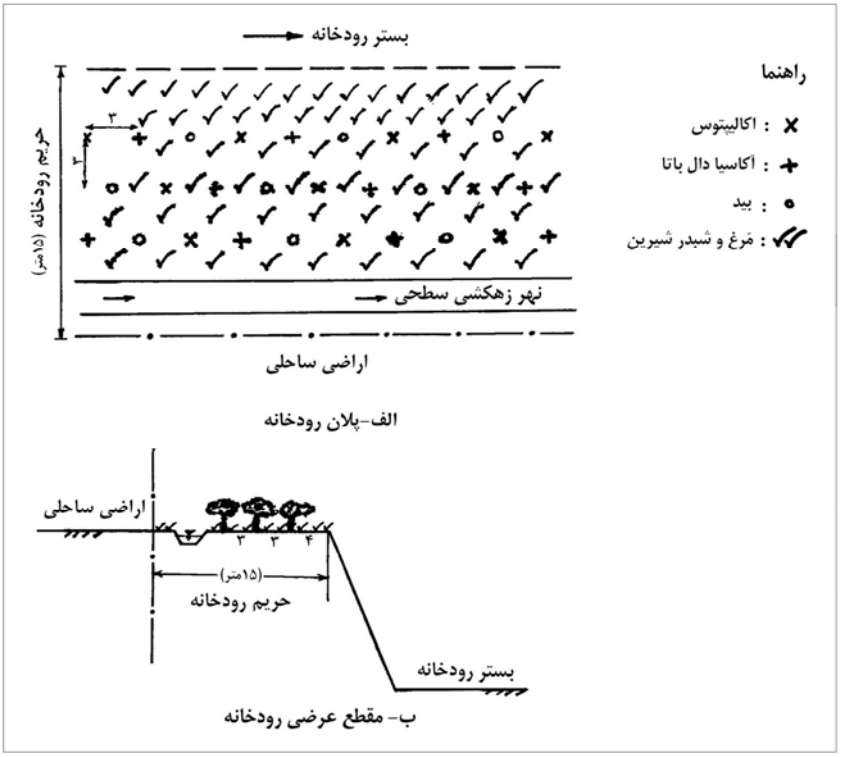
۶-۳-۳- مدیریت حفاظت اراضی ساحلی و حریم

راهکارهای اصلی در حفاظت ساحل بالا و حریم رودخانه به‌ترتیب زیر پیشنهاد گردیده است [۳۷ و ۱۲۸]:

- در ساحل بالای رودخانه، موثرترین و اقتصادی‌ترین روش، ایجاد پوشش گیاهی مناسب به‌صورت ترکیبی از گیاهان علفی، بوته‌ها و ردیف درختان است. ولی چون این بخش به‌ندرت در معرض آب قرار می‌گیرد و تبخیر سبب تجمع املاح در سطح خاک خواهد شد، لذا انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و شوری و مراقبت آنها از عوامل مهم در استقرار گیاهی به‌شمار می‌آید. همچنین پوشش گیاهی مانند یک نوار سبز از گسترش فرسایش ممانعت می‌کند. درصورتی‌که دیواره رودخانه کوتاه باشد، کاشت درختان با ریشه عمیق و قائم در ساحل بالای رودخانه می‌تواند پنجه دیواره را از خطر آبشستگی محافظت نماید.

- ایجاد پوشش گیاهی با کاشت گیاهان علفی و به‌ویژه درختان، علاوه بر کنترل فرسایش سطحی، مرز طبیعی و حریم رودخانه را تثبیت و از تجاوزات مصون می‌کند. در ایالت یوتا (آمریکا)، عملیات درختکاری به‌صورت نواری با عرض ۸ تا ۱۶ متر در حریم رودخانه بسیار موفقیت آمیز بوده است.
- کنترل تردد دام از رودخانه و ممنوعیت عبور ماشین‌آلات از نزدیکی دیواره‌ها، از اقدامات دیگر حفاظت ساحل بالا به‌شمار می‌رود. استفاده از نرده و سیم خاردار برای کنترل عبور دام و ماشین‌آلات موثر خواهد بود. برای کنترل گاو و اسب ۳ تا ۴ ردیف سیم خاردار و برای بز و گوسفند یک ردیف سیم خاردار یا طناب‌کشی کفایت خواهد کرد.
- مدیریت کاربری و کشت اراضی در حاشیه‌های رودخانه به‌منظور کاهش هرز آب سطحی، فرسایش و همچنین کنترل آلوده‌کننده‌های رودخانه موثر است.
- بهبود روش‌های آبیاری به‌منظور کاهش هرز آب آبیاری، فرسایش سطحی و نیز کاهش تلفات انتقال آب در نهرها بسیار موثر و ضروری است. در شرایط جریان کم آبی رودخانه که مصادف با فصل آبیاری نیز می‌باشد، تلفات آب آبیاری باعث اشباع شدن دیواره‌ها و ایجاد نیروی تراوش شده و با توسعه پدیده زیرشویی به‌تدریج زمینه گسیختگی دیواره‌ها را فراهم می‌سازد ازاین‌رو لازم است که اولا مسیر آبراه‌ها و نهرهای آبیاری در فاصله مناسبی از دیواره‌های رودخانه (خارج از حریم) قرار گرفته و حتی‌الامکان پوشش یافته باشند ثانیا با احداث زهکشی‌هایی به‌موازات رودخانه، آب‌های اضافی را کنترل نموده و از مواضع معینی به رودخانه هدایت نمود.

نمونه راهکار حفاظت ساحل بالا و حریم رودخانه، در سامانه آبشکن‌های شکل (۶-۳۹) نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۹- نمایش سیمای طرح مدیریت و حفاظت ساحل و حریم رودخانه [۳۷ و ۳۸]

فصل ۷

اصول فنی و مراحل ساخت آبشکن‌ها

۷-۱- کلیات

اجرای طرح ساماندهی بازه رودخانه با آبشکن‌ها از پیچیده‌ترین و دشوارترین کارهای رودخانه‌ای به‌شمار می‌آید. ازاین‌رو، برنامه کار رودخانه‌ای تنها تابع ملاحظات اقتصادی یا تنش‌های اجتماعی نبوده، بلکه محدودیت‌های انطباق با شرایط طبیعی رودخانه، امکان‌پذیری اجرای طرح و ایمنی مراحل کار در سامانه رودخانه تعیین کننده‌تر هستند. پیش‌بینی واقعی زمان پروژه، مراحل و زمان‌بندی اجرا، هزینه‌های ساخت، اثرهای منفی اجرای پروژه بر سامانه رودخانه، بهره‌برداران و محیط زیست در مرحله ساخت و جلوگیری از تخریب‌های احتمالی و گاهی فاجعه آمیز، ضروری می‌باشد.

به‌طور کلی، رعایت اصول زیر در برنامه ساخت آبشکن‌ها در سامانه رودخانه باید مورد نظر قرار گیرد:

- تعیین بازه زمانی کار و برنامه زمان‌بندی مراحل مختلف ساخت براساس شرایط جریان رودخانه، امکان‌پذیری عملیات اجرایی، کم‌ترین تاثیرات منفی بر سامانه حیاتی رودخانه و تامین حداقل نیاز بهره‌برداران و حقابه زیست محیطی
- تعیین روش انحراف آب و تامین شرایط لازم برای میدان ساخت آبشکن‌ها براساس نوع، اندازه و شرایط جریان رودخانه، مسایل زیست محیطی و اجتماعی
- تامین بودجه پروژه متناسب با برنامه زمان‌بندی و با پیش‌بینی لازم برای حوادث محتمل رودخانه‌ای
- اجرای سامانه دسترسی به رودخانه، تامین مصالح مورد نیاز و استقرار کارگاه و تجهیزات لازم قبل از شروع بازه زمانی کار در داخل رودخانه
- استفاده از استانداردها، ضوابط و تجربیات موجود و نیز ملاحظات زیست محیطی در مراحل ساخت
- پیش‌بینی روند و مراحل اجرای پروژه منطبق بر روش برنامه‌ریزی مسیر بحرانی (CPM)
- در این فصل، موارد مهم در طرح و برنامه ساخت آبشکن‌های رودخانه‌ای به‌ترتیب زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:
- نیروی انسانی فنی و کارآمد
- راه دسترسی، احداث و تجهیزکارگاه
- منابع قرضه
- ملاحظات زیست محیطی
- سامانه انحراف آب
- الگوی ساخت آبشکن‌ها
- مراحل حفاری و ساخت آبشکن
- پاکسازی و بهسازی بستر رودخانه و حفاظت دیواره بالا و حریم رودخانه
- پایش در مرحله ساخت
- زمان‌بندی اجرای طرح، متره و برآورد و تدوین برنامه اجرا

۷-۲- نیروی انسانی فنی

پیمانکار باید ترکیب نیروی انسانی فنی و کارآمد را برای مراحل مختلف کار تامین و معرفی نماید. مسوولین کارگاه و مهندسان باید از دانش و تجربیات لازم در کارهای آبی و به‌ویژه کارهای رودخانه‌ای برخوردار باشند. به‌کارگیری نیروی کار محلی در امور فنی و به‌ویژه در امور غیرفنی و نیز اجاره ماشین‌آلات محلی همراه با کاربران آن موجب تاثیرات مثبت و حمایت‌های روانی در هنگام اجرا خواهد شد. دستگاه نظارت بر اجرای طرح باید از مهندسان مجرب در کارهای رودخانه‌ای (از سوی مشاور اصلی طرح) تعیین گردد. ناظر مقیم باید نقش کلیدی در کیفیت اجرای پروژه، ارزیابی استمرار کار در شرایط بحرانی و حوادث غیرمترقبه را به‌عهده داشته و درعین حال نسبت به سختی کار و یا عدم امکان اجرا آگاه باشد.

۷-۳- راه‌های دسترسی، احداث و تجهیز کارگاه

اولین مرحله پیدا کردن راه مناسب و یا ساخت راه دسترسی به بازه رودخانه مورد نظر است. در مرحله بعد نوبت به احداث و تجهیز کارگاه می رسد که پایگاه اصلی افراد و ماشین‌آلات در طول دوره اجرای پروژه می‌باشد. موارد مهم در استقرار راه دسترسی و احداث و تجهیز کارگاه در زیر مورد بحث قرار می‌گیرند.

۷-۳-۱- راه دسترسی به رودخانه

خصوصیات کلی در انتخاب راه دسترسی برای اجرای پروژه ساماندهی رودخانه عبارت ازکم هزینه بودن ساخت و نگهداری مسیر، کم‌ترین آسیب به طبیعت و محیط زیست منطقه، عدم تنش اجتماعی و محلی و مسیر مناسب برای رفت و آمد ماشین‌آلات سنگین، است.

راه مناسب برای تردد ماشین‌آلات باید دارای مشخصات عمومی زیر باشد:

- انتخاب مسیر نباید تعارضی با مالکیت خصوصی و یا مشکلات اجتماعی محل داشته باشد. در غیر این‌صورت، اهالی به تناوب و یا نابهنگام مانع از عبور ماشین‌آلات شده، به تجهیزات آسیب وارد نموده و باعث توقف پروژه خواهند شد.
- در تقاطع راه با آبراه‌های طبیعی و یا نهرهای آبیاری و زهکشی، باید تمهیدات لازم (ساخت ابنیه‌های فنی: پل، کالورت، آبگذر و غیره) صورت گیرد. در غیر این‌صورت راه به تناوب تخریب خواهد شد.
- در آماده‌سازی بستر راه تا حد ممکن باید از حذف یا آسیب به پوشش گیاهی و درختان منطقه جلوگیری شده و حداقل دست خوردگی در حاشیه مسیر به وجود آورد تا در هنگام وقوع رگبارها و سیل، از فرسایش کناره‌ای و در نتیجه تخریب راه جلوگیری گردد.
- مواد بستر راه باید از مصالح درشت‌دانه (سنگ‌ریزه و شن درشت) باشد. خاک ریزدانه، مواد آلی و لجن در مسیر باید برداشته شود. اگر مصالح زیر ساخت مسیر برای تردد ماشین‌آلات سنگین مناسب نباشد، مصالح مناسب درشت‌دانه باید از منابع قرضه تامین گردیده و برای زیرسازی و روسازی راه استفاده گردد. در غیر این‌صورت ماشین‌آلات در گل فرو رفته و مشکلات بسیار را برای بیرون آوردن آنها همراه با صرف زمان باید متحمل شد.

- باید از سواحل با شیب ناپایدار رودخانه دوری نمودو یا شیب دیواره را اصلاح نمود. در غیر این‌صورت، بر اثر وزن ماشین‌آلات بر روی دیواره بالای رودخانه و افزایش سربار، احتمال سقوط ماشین‌آلات به رودخانه وجود خواهد داشت.

۷-۳-۲- محل احداث کارگاه

- در انتخاب محل مناسب برای احداث کارگاه باید شرایط زیر به‌طور کلی تامین گردد.
- در صورت امکان، محل احداث کارگاه باید به جاده اصلی و نیز امکاناتی از جمله برق نزدیک باشد.
- موقعیت کارگاه و استقرار ماشین‌آلات باید تا جای ممکن به فضای کار رودخانه نزدیک باشد. همچنین در دسترسی به محل پروژه، تا حد امکان از مناطق مسکونی و روستاها برحذر باشد. میزان تردد ماشین‌آلات و عوامل اجرای طرح به حداقل کاهش یافته و از تداخل با ترافیک محلی و مزاحمت مردم منطقه حتی‌الامکان پرهیز گردد. به‌هرحال مشکلات اجتماعی باید قبل از اجرای طرح با کمک فرمانداری، شورای دهستان و دهداران حل و فصل گردد.
- محل احداث کارگاه باید به‌حد کافی از رودخانه دور بوده و از نظر ارتفاعی بلند باشد، تا از ایمنی لازم در هنگام سیلاب احتمالی برخوردار باشد.
- کارگاه باید در محوطه باز با چشم‌انداز کافی احداث گردیده و از نظر ایمنی و زیست محیطی مقبول باشد.
- زمین کارگاه باید از مقاومت لازم برای رفت و آمد ماشین‌ها برخودار بوده و دچار پستی و بلندی نگردد.
- زمین احداث کارگاه باید با شیب ملایم بوده و یا تسطیح گردد.
- فضای کارگاه برای استقرار نیروی کار، ماشین‌آلات و انبار و انباشت مصالح کافی باشد.
- انتخاب محل نباید تعارضی با مالکیت خصوصی و یا مشکلات اجتماعی محل داشته باشد.

۷-۳-۳- تجهیزات کارگاه

۷-۳-۳-۱- ماشین‌آلات مورد نیاز

با توجه به حجم گسترده کار و عملیات سنگین، ماشین‌آلات و تجهیزات مورد نیاز را می‌توان به چند دسته‌ی حفار، سنگ شکن، حمل و نقل، متفرقه و شناور تقسیم نمود.

الف- ماشین‌های حفار

- **بولدزر:** بولدزر برای احداث خاکریز جهت انحراف آب، برای بهسازی بستر در بازه رودخانه و برداشت موانع، بارها و جزایر رسوبی، برای پاکسازی بستر ساخت آبشکن، برداشت خاک‌های آلی و نامناسب و گیاهان، در آوردن ریشه درختان، جابجایی سنگ‌های بزرگ، برای تسطیح و یا سکوبندی بستر ساخت بدنه آبشکن و همچنین احداث راه دسترسی و تهیه بستر محل کارگاه به‌کار می رود.
- **لودر:** لودر برای برداشت مصالح از منابع قرضه (از رودخانه و یا معادن دیگر)، بارکردن مصالح در کمپرسی‌ها برای حمل به محیط کار و همچنین برای سنگ‌ریزی به‌کار می رود.

- **گریدر:** گریدر برای تسطیح و اصلاح شیب راه دسترسی و محل احداث گارگاه استفاده می‌گردد.
- **بیل مکانیکی:** بیل مکانیکی برای حفاری ریشه آبشکن (در اتصال به دیواره رودخانه)، حفر پی بستر آبشکن در بستر رودخانه، حفر ترانشه آبشستگی در پای شیب جانبی و دماغه آبشکن و نیز استقرار مصالح روکش آبشکن به‌کار می‌رود. به‌طور کلی حفاری‌های با عرض کم و منظم وعمق زیاد با بیل مکانیکی انجام می‌گردد.
- **دراگ لاین:** در شرایطی که عملیات ساخت آبشکن‌ها در رودخانه‌های بزرگ و با وجود آب انجام گیرد، از دراگ لاین برای پاکسازی بستر و استقرار مصالح بدنه و روکش آبشکن استفاده می‌گردد.

ب- ماشین‌های سنگ شکن

وسایل و تجهیزات مکانیکی و یا دستی برای سنگ شکنی جهت تامین مصالح سنگی با اندازه و دانه‌بندی معین (برای آبشکن‌های سنگ‌ریزه‌ای) و یا تهیه فیلتر مناسب (سرند و یا سنگ شکن) لازم می‌باشد.

ج- ماشین‌آلات حمل و نقل

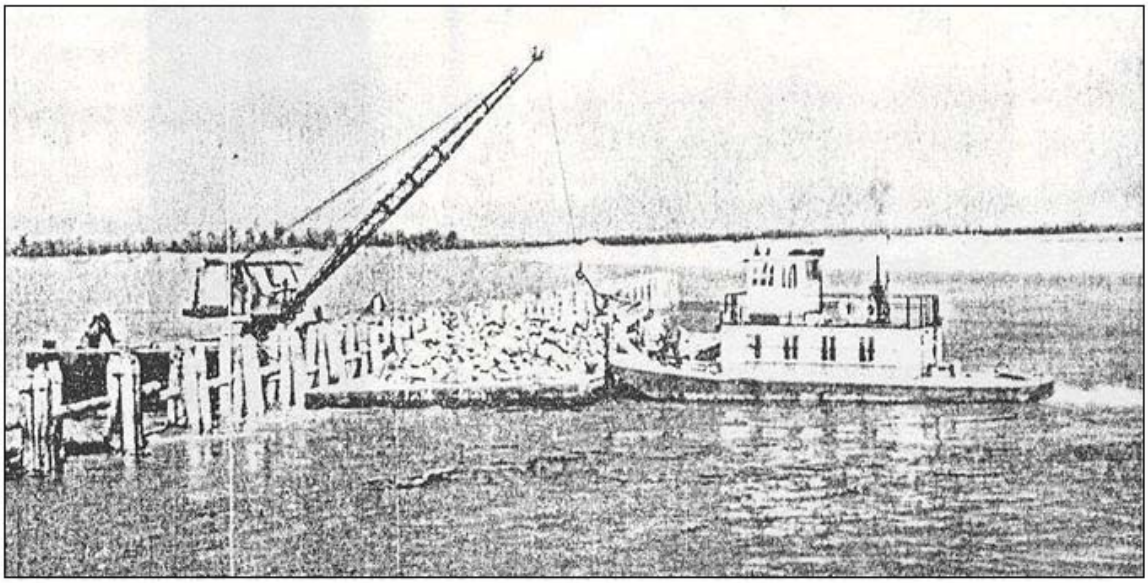
کمپرسی‌های با ظرفیت‌های مختلف برای حمل مصالح عمومی، دامپتراک برای حمل سنگ معدنی، کامیون مخصوص برای حمل بتن آماده به محل، ماشین وانت برای حمل وسایل سبک، ماشین برای رفت و آمد کارگران و ماشین‌های شاسی بلند و کمک‌دار جهت بازدیدهای اولیه و راهیابی در محل‌های صعب العبور و حاشیه رودخانه مورد نیاز خواهند بود.

د- ماشین‌ها و وسایل متفرقه

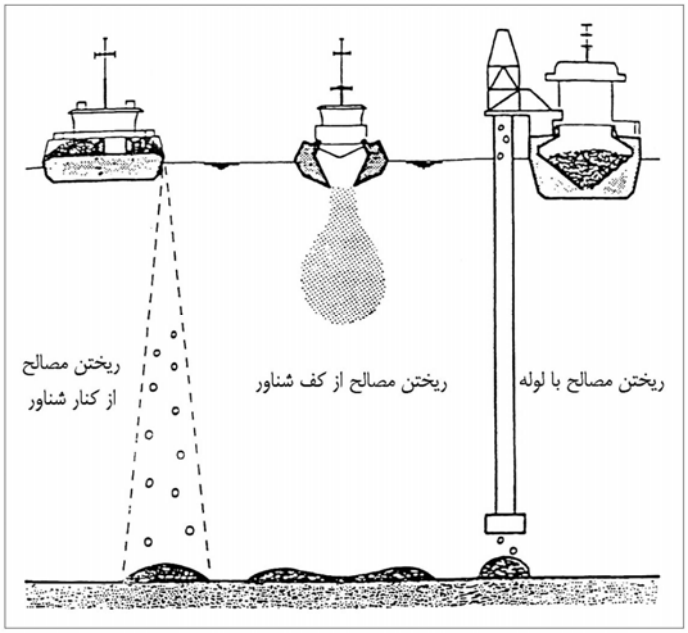
پمپ با ظرفیت‌های مختلف برای تخلیه آب‌های اضافی از محل پی و بستر ساخت آبشکن‌ها لازم خواهد بود [۱۰۲]. انواع سرند جهت تهیه فیلتر، صفحات فلزی برای سپرکوبی احتمالی، ماشین بتن ساز جهت ساخت بتن مورد نیاز و وسایل دیگر بر حسب نیاز طرح باید مورد نظر قرار گیرد.

هـ- شناورها

در رودخانه‌های بزرگ و با جریان دایمی و نیز در رودخانه‌های بزرگ مرزی، عموما امکان انحراف آب و یا انحراف رودخانه میسر نبوده، و ساخت آبشکن‌ها ناگزیر با وجود جریان آب انجام می‌پذیرد. در این شرایط، مطابق شکل‌های (۷-۱) و(۷-۲)، از شناور یا بارج به‌عنوان سکوی استقرار ماشین آلات سنگین به‌عنوان مخزن و حمل مصالح و برای استقرار مصالح در موقعیت ساخت آبشکن استفاده می‌گردد [۱۰۲ و ۱۰۴].



شکل ۷-۱- کاربرد دراگ لاین و شناور در ساخت آبشکن سنگ‌ریزه‌ای در رودخانه آرکانزاس [۱۲۸]



شکل ۷-۲- کاربرد انواع شناور جهت حمل و تخلیه مصالح برای ساخت آبشکن‌ها

۷-۳-۳-۲- محل انباشت مصالح

محل انباشت مصالح باید تا جای ممکن به محدوده احداث آبشکن‌ها نزدیک بوده و مزاحم مسیرهای دسترسی نباشد. برای این که از هر طرف مصالح قابل دسترسی بوده و لودر و ماشین‌های دیگر قدرت مانور بیش‌تری داشته باشند، محل انباشت مصالح تا حد ممکن باید در فضای باز قرار گیرد. محل انباشت مصالح ممکن است در محدوده کارگاه و یا در دسترس موقعیت کاری انتخاب شود.

این محل ممکن است در سیلابدشت رودخانه (در ساحل محل احداث آبشکن‌ها) قرار داشته و حتی به‌گونه‌ای آرایش یابد که بتواند به‌عنوان دیواره محافظ در برابر جریان سیل احتمالی قرار گیرد. در رودخانه‌های عریض و فصلی (یا در فصل کاری خشک)، ممکن است که مصالح در بستر رودخانه قرار گیرد و آرایش آن به‌گونه‌ای باشد که بدون تداخل در گردش کاری به‌عنوان خاکریز انحراف جریان نیز عمل نماید. در هر حال، موقعیت محل انباشت مصالح و فعالیت ماشین‌آلات حمل و نقل نباید به‌گونه‌ای باشد که به محیط زیست و حیات جانداران صدمه‌ای وارد نماید.

۷-۳-۳-۳- گاراژ، انبار و غیره

فضای استقرار ماشین‌آلات، انبار وسایل و مصالح خاص، تعمیرگاه، واحدهای مسکونی و دیگر امکانات با توجه به وسعت کار و زمان کاری باید در محل کارگاه وجود داشته باشد. انبار و اتاق‌های کارگری و سرویس بهداشتی برای هر کارگاهی ضروری است. دیگر امکانات مانند مخزن سوخت، تعمیرگاه و غیره با توجه به بزرگی کار و دوری از شهر لازم می‌گردد. با توجه به این‌که معمولا کارهای رودخانه‌ای لزوما در بازه زمانی خشک رودخانه و ترجیحا در یک سال باید انجام یابد، احتیاج به تجهیز کارگاه‌های بزرگ نبوده و تنها به داشتن انبار، خانه‌های کارگری، سرویس بهداشتی و چند اتاق یا اتاقک سیار اکتفا می‌گردد.

۷-۴- منابع قرضه

همان‌گونه که در بند (۶-۲-۹-۱) شرح داده شد، یکی از معیارهای اصلی در انتخاب نوع آبشکن، سهولت تامین مصالح مناسب برای ساخت آبشکن‌ها است. بررسی میدانی از تمام منابع قرضه قابل دسترسی شامل فاصله، نوع مصالح، کیفیت مصالح، حجم قابل استحصال و ارزش اقتصادی برداشت و حمل و انتقال آن به موقعیت اجرای آبشکن‌ها ضروری است. منابع قرضه باید فراوان و نزدیک با سهولت قابل برداشت و هزینه تامین و انتقال آن مناسب باشد.

انواع منابع قرضه و محل تامین آن و روش‌های کنترل کیفیت در هنگام ساخت به‌طور خلاصه در ادامه تشریح می‌گردد.

۷-۴-۱- نوع و محل تامین مصالح قرضه

نوع و محل تامین منابع قرضه با توجه به مصالح مورد نیاز عبارت است از:

۷-۴-۱-۱- معدن کوهی

معدن کوهی برای تامین قطعات سنگ بزرگ (برای بدنه و به‌ویژه روکش آبشکن)، مخلوط درشت‌دانه (برای بدنه آبشکن)، فیلتر دانه‌ای و نیز برای تامین سنگدانه جهت ساخت بتن استفاده می‌گردد.

۷-۴-۱-۲- معدن رودخانه‌ای

از رودخانه معمولا برای استحصال مخلوط درشت‌دانه برای بدنه آبشکن و یا مواد فیلتری ماسه استفاده می‌گردد. این مصالح از کف رودخانه (جزایر و بارهای رسوبی و یا رسوبات موجود در پیچ داخلی) و یا مواد حاصل از حفاری ترانشه پنجه آبشکن‌ها تامین

می‌گردد. رودخانه‌های عریض و یا شریانی با مواد بستری درشت‌دانه (شنی و درشت‌تر) از نظر تامین مصالح ایده‌آل و اقتصادی هستند. از سوی دیگر، مواد ریزدانه و یا لجنی حاصل از لایروبی در رودخانه‌های سیلابدشتی مناسب نخواهند بود.

۷-۴-۱-۳- منابع جنگلی

برای تامین تیرک‌های چوبی و ترکه‌ها به‌عنوان مصالح طبیعی و اقتصادی از جنگل استفاده می‌گردد.

۷-۴-۱-۴- منابع صنعتی و متفرقه

مصالحی مانند تورسنگ، ژئوتکستایل (به‌صورت تشک‌های کیسه‌ای یا فیلتر)، کیسه‌های شنی و مصالح دیگر از مراکز صنعتی (داخلی یا خارجی) و یا کارگاه‌های کوچک‌تر داخلی قابل دسترسی خواهد بود.

برداشت مصالح از معادن کوهی، رودخانه‌ای و یا جنگلی باید با کسب مجوز از مراجع قانونی (وزارت نیرو، منابع طبیعی، محیط زیست و استانداری) باشد. همچنین، عبور ماشین‌های حمل مصالح قرضه به محل پروژه یکی از مشکلات اجتماعی است که باید قبل از اجرای طرح با کمک شورای دهستان و دهداران حل و فصل گردد.

۷-۴-۲- کنترل کیفیت منابع قرضه

کیفیت مصالح ساخت از محل منابع قرضه قبل از اجرا باید تایید گردیده و در هنگام اجرا نیز با نظارت دستگاه نظارت به‌طور پیوسته کنترل گردد. جزییات آزمون‌های لازم برای ارزیابی کیفیت مصالح قرضه در بند (۵-۲-۲) و استانداردهای کیفیت مصالح مصرفی در مرحله ساخت آبشکن‌های رودخانه‌ای در بند (۶-۲-۹-۱) ارائه شده است. به‌طور مثال، مهم‌ترین خصوصیات کنترل کیفیت مصالح سنگی عبارت از چگالی، درصد جذب آب، آزمون مقاومت فشاری، سایش و حلالیت شیمیایی، به‌ویژه کنترل ضوابط مربوط به شکل و دانه‌بندی سنگ‌ها است.

۷-۵- ملاحظات زیست محیطی

ملاحظات زیست محیطی زیر در انتخاب روش اجرا و مراحل ساخت آبشکن‌ها باید مورد نظر قرار گیرد [۹، ۶۴ و ۱۱۰].

۷-۵-۱- جلوگیری از آلودگی آب

در مرحله انحراف آب، پاکسازی بستر بازه رودخانه، حفر پی و آماده‌سازی بستر کار و ساخت بدنه آبشکن‌ها، حتی‌المقدور باید از گل‌آلود شدن آب در هنگام عملیات جلوگیری نمود. زیرا آلودگی آب علاوه بر نابودی آبزیان، برکیفیت آب در پایین‌دست اثر داشته و مشکلات اجتماعی را نیز پدید خواهد آورد.

۷-۵-۲- جلوگیری از آسیب به زیست بوم

در احداث راه دسترسی، محل کارگاه و در میدان کار رودخانه‌ای، حتی‌المقدور باید از ناهنجاری در سامانه طبیعی (آسیب به لانه‌ها و پناهگاه پرندگان و سایر جانوران و حذف گیاهان حاشیه رودخانه) پرهیز گردد.

۷-۵-۳- زمان‌بندی اجرا

دوره زمانی اجرا به گونه‌ای باید برنامه‌ریزی گردد که حداقل تاثیرات را بر حیات آبزیان و جانوران وابسته به سامانه رودخانه داشته باشد. به‌طور مثال، زمان اجرا منطبق بر فصل تولید مثل جانوران یا رشد و نمو گیاهان نباشد. هرچند که انطباق این شرایط با سهولت اجرای کار در فصل کم آبی رودخانه مشکل است.

۷-۵-۴- محدودیت ترافیک و جلوگیری از آلودگی صوتی

سر و صدای ناشی از عملیات اجرایی باید در حد مجاز برای مناطق مسکونی اطراف و در حد ایمنی و راحتی جانداران باشد. همچنین میزان تردد ماشین‌آلات به کارگاه و محل اجرای طرح نیز باید برنامه‌ریزی گردیده و به حداقل ممکن کاهش یابد. در عین حال، پیش‌بینی لازم برای تردد مناسب مردم و احشام محلی در محدوده اجرای طرح و آبشخور رودخانه فراهم گردد.

۷-۶- آماده‌سازی بستر کار در رودخانه

با احداث راه دسترسی، ساخت و تجهیز کارگاه و تامین مصالح اولیه، مهم‌ترین مرحله کار، آماده‌سازی میدان ساخت آبشکن‌ها در رودخانه از طریق انحراف آب ، خشک کردن محدوده عملیات رودخانه‌ای و تامین شرایط اجرا با حضور جریان آب است.

آماده‌سازی بستر کار رودخانه‌ای تابعی از عواملی مانند رژیم جریان در رودخانه (دایمی یا فصلی، سیلابی یا معتدل)، اندازه رودخانه (عرض و عمق)، محدودیت طبیعی و توپوگرافی در انحراف موقت جریان رودخانه، موقعیت بازه (محدوده مسکونی شهری، روستایی، صنعتی، کشاورزی و غیره) و محدودیت‌های اجتماعی و زیستی، اهمیت رودخانه (شهری، صنعتی، مرزی و غیره) و محدودیت‌های ملی و منطقه‌ای، مدت زمان اجرای طرح و هزینه پروژه است.

ساماندهی رودخانه و ساخت آبشکن‌ها در مقایسه با احداث سدهای مخزنی و انحرافی کم هزینه بوده و بازه زمانی اجرای آن نیز کم‌تر است. ازاین‌رو، می‌توان از روش‌های کم هزینه‌تر و با ریسک بیش‌تر استفاده نمود. به‌طورکلی بازه زمانی اجرای کار در رودخانه باید در دوره کم آبی، حتی‌الامکان یک ساله و با کم‌ترین ریسک سیل انجام گیرد.

به‌طورکلی از لحاظ صعوبت کار، اجرای طرح رودخانه‌ای با شرایط وجود آب با عمق ۰/۵ تا ۱/۰ متر تفاوت چندانی با شرایط اجرا در خشکی ندارد. ولی اجرا در شرایط خشکی، سبب تامین پایداری بیش‌تر آبشکن‌ها همراه با حجم مصالح مصرفی کم‌تر خواهد بود. شرایط اجرا در اعماق بیش‌تر از یک متر نیازمند روش‌های خاص است [۱۱۰].

برای آماده‌سازی شرایط اجرای کار در رودخانه، دو روش عمومی با انحراف آب و بدون انحراف آب وجود دارد. هر یک از این دو روش بسته به شرایط خاص رودخانه و طرح و ساخت آبشکن‌ها، به گزینه‌های مختلفی به‌شرح زیر تقسیم می‌گردد:

۷-۶-۱- روش‌های ساخت با انحراف آب رودخانه

۷-۶-۱-۱- احداث دیواره هادی

در این روش، یک دیواره هادی برای انحراف جریان در بستر رودخانه از بالادست اولین آبشکن و به‌صورت عصایی مطابق شکل (۷-۳-الف) و (۷-۳-پ) ساخته می‌شود. برای هدایت جریان کم آبی رودخانه و نیز انتقال تراوشات آب از محیط کار، احداث مجرای

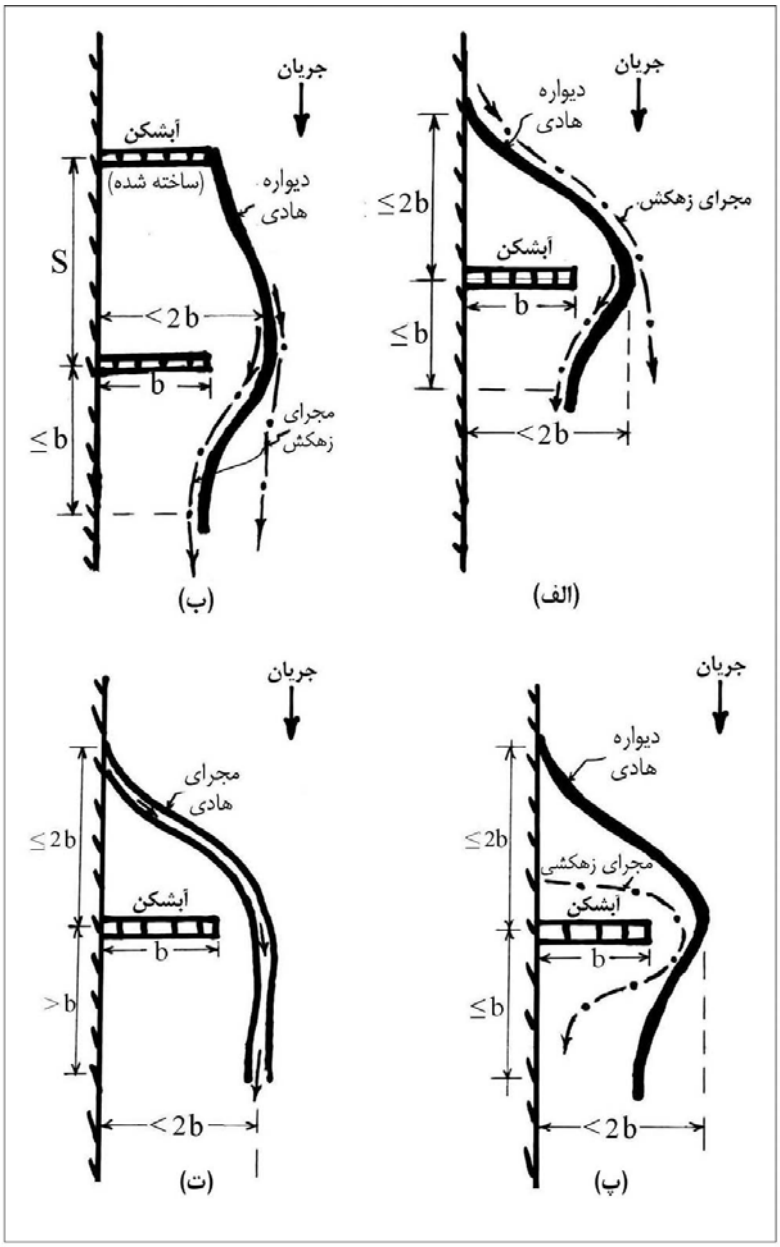
زهکشی مطابق شکل‌های فوق لازم است. گستره عرضی دیواره باید در حدی باشد که فضای کار در محل پنجه دماغه آبشکن کافی بوده، و باعث کاهش شدید عرض رودخانه و افزایش زیاد عمق آب و سرعت جریان نگردد. ارتفاع دیواره با توجه به رژیم جریان در فصل کاری و کم آبی رودخانه و با توجه به موقعیت و اهمیت طرح با احتساب حداکثر سیل با دوره برگشت ۲ تا ۵ سال تعیین می‌گردد.

این روش بیش‌تر در رودخانه‌های با عمق و سرعت جریان کم و با عرض زیاد و در فصل کم آبی، برای ساخت اولین آبشکن استفاده می‌گردد. برای ساخت دیواره هادی، از مصالح خاکی یا رودخانه‌ای و مواد حاصل از حفر ترانشه زهکش می‌توان استفاده کرد. در رودخانه‌های بزرگ و دایمی (عریض و یا عمیق و با سرعت زیاد) که امکان اجرای دیواره با مصالح خاکی یا مخلوط درشت‌دانه نمی‌باشد، اجرای دیواره سنگ‌ریزه‌ای و یا جاگذاری تورسنگ‌های جعبه‌ای یا بلوک‌های بتنی توسط دراگ لاین انجام می‌یابد. در این حالت مطابق شکل (۷-۳- پ)، ممکن است که مجرای زهکشی در نوار پیرامون آبشکن (جهت زهکشی بستر ساخت آبشکن) احداث شده و با پمپاژ به فضای بیرونی کار تخلیه گردد.

با احداث اولین آبشکن، آبشکن اول به‌عنوان سازه انحراف جریان آب برای ساخت آبشکن بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این‌صورت، دیواره هادی اولیه برداشته شده و از مصالح آن برای تکمیل سامانه انحراف آب توسط آب شکن ساخته شده (با رعایت الگوی عصایی در شکل ۷-۳- ب) استفاده می‌گردد. سپس، این الگوی حفاظتی به‌ترتیب برای ساخت آبشکن‌های بعدی تکرار خواهد شد.

۷-۶-۱-۲- احداث مجرای هادی جریان کم آبی

در این روش، یک مجرای هادی مطابق شکل (۷-۳-ت) از بالادست اولین آبشکن برای انحراف و هدایت جریان کم آبی در بستر رودخانه و با فاصله کافی از آبشکن (جهت انتقال تراوشات آب از محیط کار) احداث می‌شود. ظرفیت مجرا براساس متوسط جریان در بازه زمانی کار رودخانه‌ای تعیین می‌گردد. ارتفاع کف مجرای هادی بهتر است که پایین‌تر از تراز کف ترانشه پنجه آبشکن باشد تا نقش زهکشی بستر کار را نیز به‌عهده گیرد. این روش در رودخانه‌های فصلی، با عمق و سرعت جریان خیلی کم و در فصل خشک یا کم آبی استفاده می‌گردد.



شکل ۷-۳- روش‌های انحراف آب در بستر رودخانه برای ساخت آبشکن‌ها

۷-۶-۱-۳- انحراف موقتی و موضعی رودخانه

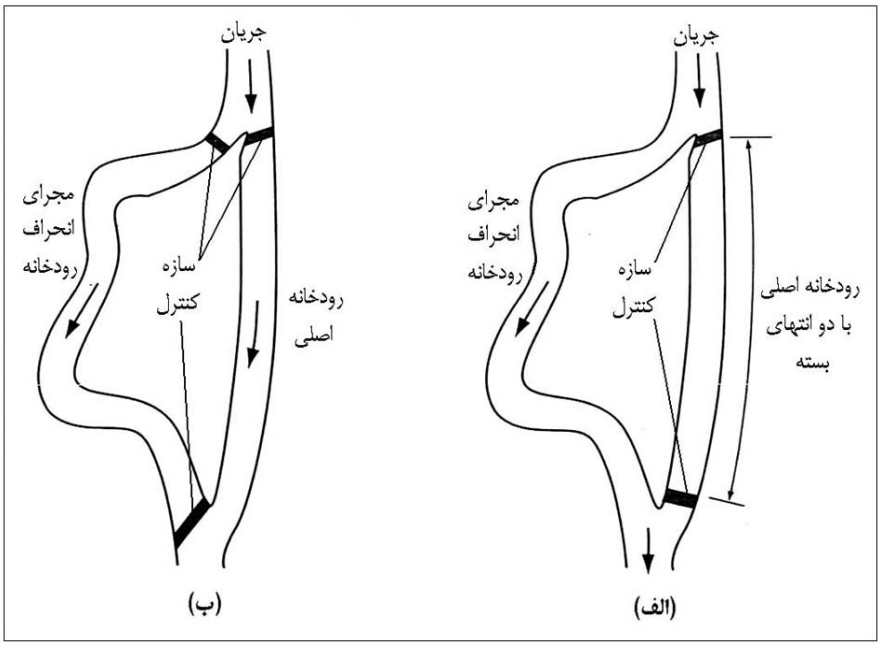
در این روش، رودخانه به‌طور موضعی و به‌صورت حلقوی مطابق شکل (۷-۴) از بالادست بازه مورد نظر منحرف شده و در فاصله‌ای در پایین‌دست مجددا به مجرای طبیعی و اصلی خویش باز می‌گردد [۶۴]. انحراف جریان ممکن است مطابق شکل (۷-۴-الف) به‌طور کامل صورت یافته و بازه اجرای کار خشک گردد. این روش بیش‌تر برای رودخانه‌های با بده پایه کم نسبت به سیل متوسط سالانه مناسب است. ساخت آبشکن‌ها به‌ویژه در دو سمت رودخانه ساده‌تر بوده و نیاز به پمپاژ آب از محل ترانشه پنجه آبشکن‌ها نیز کم‌تر شده و امکان ساخت هم‌زمان تمام آبشکن‌ها وجود خواهد داشت.

گاهی نیز ممکن است مطابق شکل (۷-۴- ب)، مجرای انحرافی تنها برای عبور جریان‌های پرآبی تا سیلابی در نظر گرفته شده، و جریان‌های کم آبی و حیاتی همچنان در رودخانه اصلی و در بازه کاری برقرار باشد. در این حالت، احداث یک مجرای هادی نظیر شکل (۷-۳- ت) برای هدایت جریان کم آبی در بستر رودخانه ضروری خواهد بود. این روش بیش‌تر برای رودخانه‌های با بده پایه بالا نسبت به سیل متوسط سالانه (تغییرپذیری کم‌تر رژیم جریان در طول سال) مناسب است [۶۴].

در هر دو صورت فوق، ظرفیت مجرای انحرافی رودخانه معادل حداکثر سیل محتمل در دوره زمانی ساخت آبشکن‌ها باید باشد. البته از آن‌جا که زمان ساخت آبشکن‌ها معمولا کوتاه بوده و ترجیحا در طول یک فصل کم آبی رودخانه باید اجرا گردد، دوره بازگشت سیل طرح انحراف نیز کوتاه خواهد بود. به‌هر حال با توجه به شرایط جریان در حوضه رودخانه، درجه اهمیت منطقه طرح و درصد ریسک مجاز پروژه در بازه زمانی ساخت، دوره بازگشت سیل محتمل و بده نظیر آن با کاربرد روش‌های هیدرولوژی تعیین می‌گردد. شکل شماره (۷-۵) انحراف موضعی رودخانه وال (هلند) را برای ساخت آبشکن‌ها، از طریق گشایش یک شاخه طبیعی و موجود نشان می‌دهد.

در طرح مجرای انحرافی، خصوصیات جریان و توان رودخانه نباید تفاوت قابل ملاحظه‌ای با شرایط نظیر در رودخانه اصلی داشته باشد در غیر این‌صورت، ناپایداری بازه جدید سبب افزایش فرسایش بستر رسوب‌گذاری در پایین‌دست شده، به ماهی‌ها و گیاهان و به ساختار زیست محیطی منطقه صدمات زیادی رسیده و کدورت آب نیز باعث کاهش کیفیت آب و غیر قابل استفاده شدن آن توسط بسیاری از جانوران می‌گردد [۶۴].

به‌طور کلی گرچه انحراف رودخانه، عملیات ساخت آبشکن‌ها را (به‌ویژه در دو سمت رودخانه) آسان می‌کند ولی خطرسازترین و پرهزینه‌ترین روش انحراف آب بوده و از محدودیت‌ها و نامطمئنی‌های طبیعی، زیستی و اجتماعی نیز برخوردار است. ازاین‌رو، حتی‌الامکان از انتخاب این روش در ساماندهی رودخانه‌ها و ساخت آبشکن‌ها باید اجتناب نمود.



شکل ۷-۴- روش‌های انحراف موضعی رودخانه برای ساخت آبشکن‌ها [۶۴]

شکل ۷-۵- انحراف موضعی رودخانه وال (هلند) از طریق یک آبراهه طبیعی برای ساخت آبشکن‌ها [۱۴۵]

۷-۶-۲- روش‌های ساخت بدون انحراف آب رودخانه

در رودخانه‌های بزرگ و دایمی (عریض، عمیق و با بده پایه زیاد) و یا در صورت وجود محدودیت‌های خاص (مانند رودخانه‌های مرزی، شهری و یا رودخانه‌های کشتیرانی)، عموما امکان انحراف رودخانه یا انحراف آب در بستر رودخانه فراهم نمی‌باشد. در این‌صورت عملیات ساماندهی و ساخت آبشکن‌ها در شرایط جریان طبیعی رودخانه در فصل کم آبی و در طول یک سال باید انجام گیرد.

در شرایط جریان آب، باید از مصالح ساختمانی با قطعات بزرگ و سنگین مانند سنگ‌های بزرگ، تورسنگ‌های جعبه‌ای، بلوک‌های بتنی (که در صورت نیاز برای تامین وزن کافی با کابل سیمی یا میله فولادی به‌هم متصل می‌گردند) یا کیسه‌های محتوی مخلوط ماسه و سیمان استفاده می‌شود. همچنین ممکن است آبشکن به‌صورت شمع‌ها یا دیواره سپری دو ردیفه (چوبی، فلزی یا بتنی)، همراه با استقرار سنگریزه‌ها در حد فاصل بین دو ردیف ساخته شود.

علاوه برآن، کاربرد فیلترهای دانه‌ای به‌صورت آزاد در آب جاری با سرعت و عمق زیاد ممکن نخواهد بود. برای این منظور، مواد فیلتری را می‌توان در تورسیمی تشکی با چشمه‌های ریز قرار داده، مانند روکش تورسنگی بر روی بستر ساخت بدنه و ریشه آبشکن مستقر نمود و در صورت لزوم از میله‌های مهاری برای استقرار موقت آن بر روی بستر استفاده کرد. گزینه دیگر می‌تواند استفاده از روکش فیلتری ژئوتکستایل باشد، که با کمک میله‌های مهاری بر روی بستر به‌طور موقت استقرار یابد. در هر دو صورت، موقعیت لایه فیلتر (تورسنگی یا ژئوتکستایل) با استقرار مصالح اصلی آبشکن تثبیت خواهد یافت.

همچنین با وجود جریان آب، عملا امکان حفر ترانشه پنجه آبشکن جهت حفاظت خاص در برابر آبشستگی فراهم نخواهد بود. در این شرایط، می‌توان از گزینه‌های (۴) یا (۷) ارائه شده در بند (۶-۲-۹-۲-ج)، و مطابق شکل (۶-۳۱- ت) و (۶-۳۱- چ) استفاده نمود. در این حالت، مصالح بیش‌تری (به‌میزان ۱/۵ تا ۲ برابر بیش‌تر از شرایط کار در خشکی)، با اندازه‌های بزرگ‌تر (حدود ۱/۵ برابر اندازه مصالح بدنه آبشکن) لازم بوده، که به‌صورت سکو در پیرامون دماغه و وجوه بالادست و پایین‌دست آبشکن قرار می‌گیرند. با

گذشت زمان و توسعه حفره آبشستگی پیرامون آبشکن، مصالح سکو به‌تدریج در بستر فرو رفته و به‌طور طبیعی استقرار یافته و حفاظت لازم در برابر آبشستگی را فراهم می‌سازد [۱۰۴].

وقتی سنگ‌ریزی از سطح آب به‌داخل آب جاری ریخته می‌شود، سنگ‌ها به‌فاصله‌ای در جهت پایین‌دست جابجا خواهند شد. میزان متوسط جابجایی سنگ‌های ریزشی (L) بر حسب عمق موضعی آب (Y)، سرعت متوسط عمقی یا سرعت متوسط (U_d) و اندازه شاخص سنگ‌ها (D) از رابطه نیمه‌تجربی زیر (در سامانه واحدی بین‌المللی) قابل ارزیابی می‌باشد [۱۰۴].

$$L = 0.25 Y U_d D^{\frac{-1}{2}} \qquad (۱-۷)$$

سنگ‌ریزی توسط دراگ لاین، بیل مکانیکی و یا ترکیبی از کمپرسی و لودر انجام می‌گیرد. در این صورت، حداقل شیب سنگ‌ریزی معادل (2H:1V) باید باشد. به‌منظور اطمینان از پایداری آبشکن، سهولت اجرا و برای نگهداری و یا بازسازی احتمالی آبشکن در رودخانه‌های بزرگ با جریان دایمی، احداث سکو بر روی شیب دامنه آبشکن در تراز سطح آب کم آبی تا متوسط می‌تواند در نظر گرفته شود. جزییات بیش‌تر در بند (۶-۲-۷-۲) ارائه شده است.

برای ساخت آبشکن‌ها بدون انحراف آب در رودخانه‌های بزرگ، یکی از سه روش اسکله‌ریزی، استفاده از شناور و روش ترکیبی به‌شرح زیر انتخاب می‌گردد. انتخاب هر یک از این سه روش به شرایط خاص رودخانه و طرح بستگی داشته و ماشین‌آلات، تجهیزات و مهارت‌های خاص خود را طلب می‌کند.

۷-۶-۲-۱- روش اسکله‌ریزی

در این روش مطابق شکل (۷-۶)، مراحل ساخت آبشکن به‌صورت گام به گام از ساحل بالای رودخانه به‌سمت میانه رودخانه انجام گیرد. شیوه اجرای کار مشابه ساخت اسکله‌ها و موج شکن‌های دریایی است. ابتدا اولین آبشکن از بالادست مورد نظر قرار می‌گیرد. بستر ریشه آبشکن با شیب ملایم و در ساحل بالا حفر و آماده گردیده و سپس بدنه آبشکن در بخش ریشه ساخته می‌شود. در مرحله بعد، تاج ریشه آبشکن سکوی مناسبی برای استقرار ماشین‌آلات بوده که امکان استقرار مصالح را در امتداد بدنه آبشکن (از پای دیواره به‌سمت میانه رودخانه) فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، ساخت آبشکن به‌صورت گام به گام تا موقعیت دماغه پیشرفت می‌کند. متناسب با عمق رودخانه و سطح آب در هنگام اجرا، ممکن است تراز تاج اسکله‌ریزی در امتداد طولی آبشکن در چند مرحله (ابتدا تا تراز سطح آب و سپس در سطوح بالای آب) ساخته شود. با ساخت اولین آبشکن، انحراف و جدایی جریان به‌طور طبیعی برای فضای پایین‌دست فراهم آمده و شرایط هیدرولیکی جریان برای اجرای آبشکن بعدی تعدیل می‌گردد که به نوبه خود برای آبشکن‌های بعدی نیز چنین خواهد بود.

با توجه به سابقه کارهای دریایی در ایران، تجربه ساخت به روش اسکله‌ریزی یا سکوبندی بیش‌تر بوده و در شرایط جریان به‌سهولت قابل انجام است. در این روش، استفاده از دراگ لاین برای کنترل بهتر مصالح ریزشی در زیر آب مناسب‌تر است.

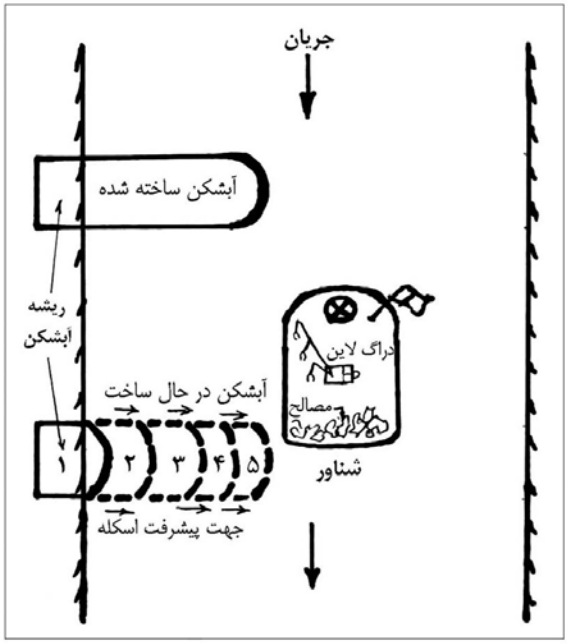
۷-۶-۲-۲- روش استفاده از شناور

در این روش، از شناور یا بارج به‌عنوان سکوی متحرک برای استقرار ماشین‌آلات و مصالح ساخت استفاده می‌شود. از شناورهای موجود، با اصلاحاتی می‌توان برای کارهای رودخانه‌ای استفاده نمود. در کاربرد شناورها جهت اجرای آبشکن‌ها در میانه رودخانه و از سطح آب موارد زیر باید مورد توجه قرار گیرد [۹۶].

- عمق آب و فضای حرکت کافی برای شناور در هنگام عملیات اجرا فراهم باشد.
- دید کافی برای ایمنی کار در هنگام اجرا فراهم باشد. شرایط مه‌آلود ممکن است برای شناور و یا تاسیسات حاشیه رودخانه خطرساز باشد.
- اگر رودخانه کاربری ترابری دارد، عملیات اجرایی باید امکان تردد شناورها را با ایمنی کامل فراهم نماید.
- شرایط جریان، موج و باد باید برای شناور مناسب بوده و باعث اختلال در عملیات استقرار مصالح در زیر آب و پایداری هندسه آبشکن نشود.
- عملیات اجرا در زیر آب با دیده بانی غواصان کنترل گردیده تا مصالح و روکش‌ها در هنگام ریختن جابجا نشوند.
- شرایط آب و هوایی در حوضه بالادست رودخانه (احتمال طوفان و سیلاب) تحت کنترل دایمی باشد.

۷-۶-۲-۳- روش ساخت ترکیبی

در این روش مطابق شکل (۷-۶)، ترکیبی از عملیات اسکله‌ریزی از خشکی (ساحل بالای رودخانه) با اجرا از درون آب (با استفاده از شناور) به‌کار گرفته می‌شود. انتخاب روش ترکیبی بستگی به شرایط رودخانه، امکانات موجود و محدودیت زمانی در اجرای سریع آبشکن‌ها دارد.



شکل ۷-۶- روش ساخت آبشکن‌ها بدون انحراف آب رودخانه به روش اسکله‌ریزی گام به گام

۷-۷- الگوی ساخت آبشکن‌ها

آرایش و الگوی ساخت آبشکن‌ها با توجه به اصول و توصیه‌های زیر انتخاب و برنامه‌ریزی می‌گردد.

- همه آبشکن‌ها لزوما به‌طور هم‌زمان ساخته نمی‌شوند.
- ابتدا اولین ردیف آبشکن در بالادست بازه رودخانه باید به‌طور کامل ساخته شود. آبشکن اول به‌طور مستقل کارایی خود را در سامانه رودخانه خواهد داشت.
- آبشکن‌های دیگر به‌ترتیب از بالادست به پایین‌دست ساخته شوند. در این‌صورت، سامانه آبشکن‌های احداثی در هر مرحله اجرا به‌طور مستقل از کارایی لازم برخوردار خواهد بود.
- اگر آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه طرح گردیده، ساخت آبشکن‌ها باید به‌ترتیب از بالا به پایین‌دست و در دو سمت مقابل، در طی یک فصل کاری انجام یابد. ساخت آبشکن‌ها در یک سمت در سال اول و تکمیل ساخت آبشکن‌های سمت مقابل در فصل کاری سال بعد، ممکن است برای سمت مقابل (به‌ویژه در رودخانه‌های شریانی) خطرساز بوده و یا از نظر اجتماعی با مشکلات همراه باشد.
- رعایت توالی ساخت آبشکن‌ها در یک فصل کاری ضروری نیست. ممکن است که آبشکن‌ها با توجه به روش انحراف آب و یا دسترسی به ماشین‌آلات و مصالح، با الگوهای مختلف (مانند الگوی یک در میان، زیگزاگی و مختلط) اجرا گردد.
- الگوی ساخت باید انعطاف‌پذیر باشد. به‌دلیل نامطمئنی‌های طرح از نظر پتانسیل رسوب‌گذاری، گاهی پیشنهاد می‌شود که آبشکن‌های میانی ابتدا به‌صورت یک در میان اجرا گردد. سپس با ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها در طی چند سیل (و حداکثر با گذشت دو سال) نسبت به لزوم ساخت آبشکن‌های باقی‌مانده و یا اصلاح آرایش آنها تصمیم گرفت.
- الگوی ساخت باید بهینه و درعین حال مطمئن باشد. گاهی ممکن است که هم‌زمان با ساخت اولین آبشکن بالادست، مراحل پاکسازی و حفاری بستر ساخت آبشکن‌های پایین‌دست همراه با حفاظت ریشه و پنجه آبشکن‌ها انجام یابد. در این حالت با توقف کار یا با پایان فصل کاری رودخانه، خسارات قابل توجهی به اقدامات انجام شده وارد نگردیده و در عین حال پایداری بستر رودخانه و بستر ساخت آبشکن‌ها برای مراحل اجرای بعدی در فصل کاری آینده تامین می‌گردد.

شکل (۷-۷) ساخت آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه راین در هلند را نشان می‌دهد. برای ساخت سامانه آبشکن‌ها (با توجه به نوع رودخانه، روش انحراف آب و دسترسی به ماشین‌آلات و مصالح) الگوها و آرایش‌های مختلفی به شرح زیر به‌کار می‌رود:

۷-۷-۱- ساخت اولین ردیف آبشکن‌ها

اولین ردیف آبشکن‌ها در بالادست بازه رودخانه باید به‌طور کامل در ابتدا ساخته شود. ساخت آبشکن‌ها در دو سمت مقابل باید در طی یک فصل کاری انجام یابد. ساخت اولین آبشکن یا اولین ردیف آبشکن‌ها، تجربه لازم را برای مدیریت ساخت دیگر آبشکن‌ها فراهم ساخته و در مرحله بعدی اجرا نیز به‌عنوان سازه انحراف آب برای ساخت آبشکن پایین‌دست موثر خواهد بود. آبشکن اول به‌طور مستقل کارایی کامل خود را در سامانه رودخانه داشته و در صورت توقف اجرا، کارکرد آن راهنمای خوبی برای اصلاح طول، فاصله، امتداد، شکل دماغه و شدت حفاظت پنجه در برابر آبشستگی در مراحل بعدی اجرا، خواهد بود.

۷-۷-۲- الگوی ساخت یک در میان

در این الگوی ساخت مطابق شکل (۷-۸)، آبشکن‌های ردیف اول و آخر در نظر گرفته شده، ولی آبشکن‌های میانی (واقع در حد فاصل اولین و آخرین ردیف) به‌صورت یک در میان اجرا می‌گردند. روند اجرا به‌صورت ساخت اولین ردیف آبشکن‌ها و سپس ساخت ردیف‌های یک در میان از بالادست به‌سمت پایین‌دست خواهد بود. این روش در شرایطی که آبشکن‌ها در یک سمت و یا در دو سمت رودخانه قرار گیرند، کاربرد دارد. اگر آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه طرح گردیده، ساخت آبشکن‌های هر ردیف در دو سمت مقابل، در طی یک فصل کاری باید انجام یابد (شکل ۷-۸).

فرضیه اصلی در انتخاب این نوع الگوی ساخت، نامطمئنی‌های موجود در برآورد بار رسوبی رودخانه و پتانسیل رسوب‌گذاری در میدان آبشکن‌ها، کاهش شدت تاثیرات بر بازه رودخانه و امکان تعدیل زمان اجرا و هزینه‌های ساخت است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود، آبشکن‌های میانی ابتدا به‌صورت یک در میان اجرا و سپس با ارزیابی کارکرد آنها در طی چند سیل (و حداکثر با گذشت دو سال) نسبت به لزوم ساخت آبشکن‌های باقی‌مانده و یا اصلاح آرایش آنها تصمیم گرفت. همچنین در شرایطی که طول فصل کاری و امکانات فنی و بودجه برای اجرای کامل طرح در دوره یکساله محدود باشد، ازاین‌روش می‌توان استفاده نمود. به‌عبارت دیگر، سیمای کلی طرح در مرحله اول ساخت و در زمان کم‌تری جانمایی می‌شود. سپس در مرحله دوم، نسبت به تکمیل یا اصلاح طرح اقدام می‌گردد.

این الگو برای رودخانه‌های با بار رسوبی زیاد و مواد زیاد شناور جامد و گیاهی، مناسب و توصیه می‌شود. ولی در رودخانه‌های با کاربری کشتیرانی، فاصله زیاد بین آبشکن‌ها ممکن است مانع از توسعه عمق مورد نیاز شناورها باشد.

۷-۷-۳- الگوی ساخت زیگزاگی

این روش در شرایطی که آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه قرار گیرند، کاربرد دارد. در این الگوی ساخت مطابق شکل (۷-۸)، آبشکن‌های سمت مقابل به‌طور هم‌زمان ساخته نشده و با تناوب زیگزاگی آرایش می‌یابند.

فرضیه اصلی در انتخاب این نوع الگوی ساخت، تعدیل زمان اجرا و هزینه‌های ساخت است. به‌طوری‌که تنها نیمی از آبشکن‌ها در مرحله اول و در طول یک فصل کاری یک‌ساله اجرا شده و تکمیل و یا اصلاح طرح منوط به ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها در طی چند سیل (و حداکثر با گذشت دو سال) می‌گردد.

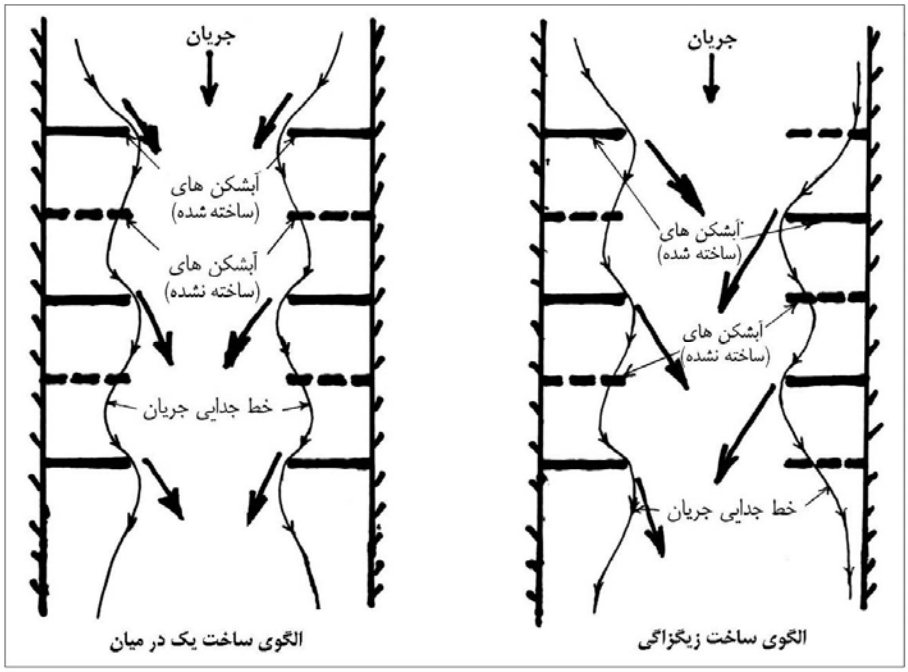
این الگوی ساخت ممکن است که برای رودخانه‌های عریض، کم عمق و شریانی، و یا رودخانه‌های مارپیچی با نسبت عرض به عمق زیاد مناسب باشد. ولی مطابق شکل (۷-۸) در رودخانه‌های با کاربری کشتیرانی، به‌دلیل امکان توسعه پیچانرودی مسیر خط‌القعر (یا خط کشتیرانی)، و شستشوی رسوبات در حد فاصل آبشکن‌ها مناسب نخواهد بود.

۷-۷-۴- الگوی ساخت مختلط

در ساماندهی یک بازه رودخانه با آبشکن‌ها، ممکن است که ترکیبی از الگوهای ساخت یک در میان و یا زیگزاگی استفاده گردد. در شرایطی که بازه رودخانه مورد نظر ترکیبی از مسیرهای مستقیم و پیچ‌ها بوده و تغییرات عرضی در طول بازه زیاد باشد، از الگوی‌های متفاوت در هر زیر بازه می‌توان استفاده کرد. به‌طور مثال در بازه‌های با عرض کم‌تر و یا با راستای مستقیم، الگوی ساخت

یک در میان و در یک سمت رودخانه مناسب خواهد بود. در پیچ رودخانه‌های عریض، ممکن است از الگوی زیگزاگی برای ساخت آبشکن‌ها در دو طرف رودخانه استفاده گردد.

شکل ۷-۷- سیمای ساخت و کارکرد آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه راین، هلند



شکل ۷-۸- الگوهای ساخت آبشکن‌ها در رودخانه

۷-۸- مراحل ساخت آبشکن‌ها

۷-۸-۱- حفاری بستر آبشکن

عملیات آماده‌سازی بستر ساخت آبشکن‌ها باید با حداقل به‌هم خوردگی بستر و آن هم تنها در محدوده احداث آبشکن‌ها صورت گیرد. برای این منظور باید از ماشین‌آلات مناسب و از مدیریت بهینه جهت انتخاب بهترین راه دسترسی به‌داخل رودخانه و بستر کار استفاده نمود. برای یک حفاری مناسب در بستر رودخانه جهت ساخت آبشکن باید مراحل زیر را به‌ترتیب اجرا نمود:

۷-۸-۱-۱- پاکسازی بستر و دیواره رودخانه

برای ساخت آبشکن‌ها باید محدوده اطراف آن را از گیاهان و آشغال و نخاله‌ها پاکسازی نمود. زیرا این مواد که بیش‌تر منشا آلی دارند باعث نشست پی و ایجاد شکاف در بدنه آبشکن بعد از ساخت خواهند شد.

۷-۸-۱-۲- برداشت لایه‌های ضعیف و نشست‌پذیر

ظرفیت باربری کم، ریزدانه بودن لایه‌ها و یا قابلیت انحلال و روانگرایی مواد سطحی و زیر سطحی باعث نشست‌های نامتجانس، زیرشویی و ناپایداری آبشکن خواهد شد. لایه‌های ضعیف تا حد امکان باید برداشت گردد. مواد زیر سطحی نامناسب (از نوع خاک‌های آلی و یا لای، باتلاقی، واگرا و یا رگه‌های گچی در نیمرخ خاک) باید برداشت گردیده و یا در صورت عمیق بودن به‌نحو مقتضی اصلاح و تحکیم یابد. به‌طور مثال با ریختن مخلوط درشت‌دانه قلوه‌سنگ و تخته سنگ (بدون مواد ریزدانه) و ایجاد تراکم نسبی، در صورت نیاز با افزودن آهک یا مواد سیمانی (بتن غرقابی) بستر مناسبی ایجاد کرد. روش‌های دیگر تحکیم بستر بسته به اهمیت پروژه و نوع و مصالح آبشکن می‌تواند مورد نظر قرار گیرد.

۷-۸-۱-۳- اصلاح شیب دیواره رودخانه

در بازه مورد نظر ممکن است دیواره طبیعی رودخانه ناپایدار، پای شیب فرسایش یافته و یا زاویه شیب زیاد باشد. برای جلوگیری از لغزش شیب و فرسایش دیواره در آینده (که ممکن است باعث خالی شدن اطراف ریشه آبشکن، فرار آب از پشت آبشکن و جدا شدن ریشه آبشکن از دیواره گردد)، بهتر است که قبل از شروع حفاری بستر، شیب دیواره‌ها اصلاح و به‌طور طبیعی پایدار گردد. در شرایطی که ارتفاع دیواره رودخانه زیاد باشد، اصلاح شیب ممکن است همراه با سکوبندی باشد.

۷-۸-۱-۴- آماده‌سازی بستر آبشکن

جهت کاهش عمق و گستره حفاری، کم‌تر شدن هزینه عملیات حفاری و ساخت بدنه آبشکن و حفظ بستر طبیعی رودخانه، بهتر است بستر رودخانه در امتداد آبشکن به‌صورت پلکانی و سکوبندی آماده گردد.

۷-۸-۱-۵- حفر ترانشه دیواره

آبشکن سازه‌ای است که از دو طرف (دیواره رودخانه و کف بستر) با زمین تماس داشته و جهت ایمنی باید در دیواره و بستر قفل گردد. اگر هر یک از این اتصالات ضعیف یا قطع گردد، سبب ناپایداری کلی آبشکن خواهد شد.

قفل‌شدگی ریشه آبشکن به‌ویژه برای حفاظت در مراحل اولیه کارکرد آبشکن، یک اقدام اساسی است. مشخصات عمومی حفاظت ریشه آبشکن، جهت تعیین عمق و گستره عرضی و طولی حفر ترانشه دیواره، در بند (۶-۲-۳) ارائه گردید. ترانشه دیواره رودخانه از نظر سهولت اجرا بهتر است به‌صورت سکوبندی حفر گردد، تا عمق کافی برای استقرار مواد فیلتری و مصالح روکش حفاظتی فراهم گردد.

۷-۸-۱-۶- حفر ترانشه آبشستگی

ترانشه پنجه در پیرامون آبشکن زمینه اصلی برای قفل‌شدگی بدنه آبشکن در کف بستر را فراهم می‌کند. ایمنی آبشکن در برابر خطر آبشستگی در پیرامون آبشکن (در محل دماغه و در امتداد وجه بالادست و پایین دست آبشکن) از مسایل مهم است. عمق و گستره عرضی ترانشه پنجه براساس برآورد عمق آبشستگی و پایداری مواد زیر سطحی و انتخاب گزینه مناسب حفاظت پنجه آبشکن (در بند ۶-۲-۹-۲-ج) تعیین می‌گردد. در شرایط اجرای کار در خشکی و یا کم آبی، ترانشه پنجه حفر و آماده می‌گردد. برای این کار عموما از بیل مکانیکی برای حفر ترانشه یا عمق مورد نیاز استفاده می‌گردد.

۷-۸-۲- اجرای آبشکن

یکی از موارد اجرایی مهم در ساخت آبشکن‌ها، ترتیب مراحل ساخت آبشکن‌ها است. در این صورت می‌توان برنامه‌ریزی‌های مدیریتی را برای استفاده بهینه از زمان و استفاده از ماشین‌آلات به‌منظور کاهش هزینه طرح، اجرای به موقع و منطبق با زمان‌بندی طرح انجام داد. ترتیب مراحل زمانی اجرای یک آبشکن به‌شرح زیر است:

۷-۸-۲-۱- اجرای ترانشه آبشستگی

روش‌های حفاظت پنجه آبشکن‌ها در بند (۶-۲-۹-۲-ب) تشریح گردیده است. با حفر و آماده‌سازی ترانشه پنجه در پیرامون آبشکن، حفاظت پنجه (در محل دماغه و در امتداد وجه بالادست و پایین‌دست آبشکن) براساس گزینه مناسب با اطمینان از قفل‌شدگی بدنه آبشکن در کف بستر انجام می‌گردد. علاوه بر آن در صورت لزوم، فیلتر مناسب در کف ترانشه براساس مشخصات مواد زیر سطحی و مصالح حفاظتی و ضوابط ارائه شده در بند (۶-۲-۹-۲-د) تعیین می‌گردد.

۷-۸-۲-۲- اجرای ریشه آبشکن

قفل‌شدگی ریشه آبشکن در دیواره و یکپارچگی سازه‌ای آن با بدنه آبشکن یک اقدام اساسی است. مشخصات عمومی حفاظت ریشه آبشکن، در بند (۶-۲-۳) ارائه گردیده است. با حفر و آماده‌سازی ترانشه دیواره رودخانه (ترجیحا به‌صورت سکوبندی)، ریشه آبشکن با مصالح اصلی هسته بدنه، مواد فیلتری و مصالح روکش حفاظتی اجرا می‌گردد. این مرحله همراه با قسمت اول (اجرای ترانشه آبشستگی) و یا بعد از آن انجام می‌شود.

۷-۸-۲-۳- اجرای بدنه آبشکن

با اجرای ریشه و حفاظت پنجه پیرامون آبشکن در دو مرحله قبل، موقعیت قرارگیری آبشکن به‌طور کامل مشخص و زمینه برای اجرای بدنه آبشکن آماده می‌گردد. بدنه آبشکن ممکن است از مصالح همگن یا از مصالح ترکیبی ساخته شود. به‌طورکلی، ساخت

آبشکن‌ها با مصالح همگن (در ریشه، بدنه، پنجه و روکش آبشکن) به‌معنای پایداری بیش‌تر سازه نبوده و عموما نیز غیراقتصادی می‌باشد. این نوع ساختار بیش‌تر در رودخانه‌های بزرگ و دایمی (که امکان انحراف کامل آب فراهم نباشد) و عموما با استفاده از سنگ‌های با اندازه بزرگ، تورسنگ جعبه‌ای یا قطعات بزرگ بتنی انتخاب می‌گردد. آبشکن‌هایی که با هسته مخلوط درشت‌دانه رودخانه‌ای یا مصالح پرکننده دیگر (نظیر کیسه‌های خاکی)، و با روکش حفاظتی مقاوم طرح و ساخته می‌شوند، می‌تواند پایدار بوده و اقتصادی‌تر نیز باشد. انواع مصالح ساخت بدنه آبشکن، کیفیت مصالح و ضوابط فنی لازم، در بند (۶-۲-۹) ارائه شده است. ساختار بدنه آبشکن بستگی به نوع مصالح و روش ساخت متفاوت بوده و برای هر گزینه به‌طور مجزا و تفصیلی در بند (۶-۲-۹-۲-الف) تشریح گردیده است.

۷-۸-۲-۴- اجرای فیلتر و روکش

درصورتی‌که هسته اصلی بدنه آبشکن از مصالح مخلوط خاکی ساخته شده باشد، نیاز به فیلتر و روکش حفاظتی خواهد بود. در این مورد، فیلتر و روکش حفاظتی هم‌زمان با ساخت بدنه آبشکن، با اجرای لایه به لایه از سطح پایین انجام می‌گردد. روش ساخت مشابه با اجرای لایه به لایه سدهای کوچک خاکی است.

۷-۸-۲-۵- اجرای تاج آبشکن

مرحله پایانی، اجرای تاج آبشکن با مصالح فیلتری و روکش حفاظتی بدنه است. ارتفاع و عرض تاج آبشکن به‌ترتیب براساس ضوابط ارائه شده در بندهای (۶-۲-۶) و (۶-۲-۷) تعیین می‌گردد. در مرحله اول ساخت، ممکن است به‌دلیل کاهش تاثیرات سریع ریخت‌شناسی و یا نامطمئنی طرح در توجیه اقتصادی، تاج آبشکن تا درصدی از ارتفاع نهایی طراحی شده اجرا شود. ارتفاع باقی‌مانده ممکن است با مصالح طبیعی و یا با تثبیت زیست‌محیطی تامین و تکمیل گردد. در هر صورت، توصیه می‌شود که تاج آبشکن حداقل تا نزدیکی ارتفاع دیواره اصلی رودخانه اجرا شود. به‌هرحال روش اجرای مرحله‌ای تاج آبشکن ریسک‌پذیر بوده و به‌دلیل خطرات احتمالی ناشی از استغراق آبشکن‌ها (درست بعد از ساخت) و تخریب ریشه و بدنه، باید با توجیه کافی برای کارفرما همراه باشد.

۷-۹- پاکسازی و بهسازی بستر رودخانه

بعد از انجام مراحل اجرا در هر فصل کار و نیز در پایان پروژه، بقایای خاکریزهای انحراف آب و مقدار قابل توجهی مواد حاصل از حفاری‌ها باقی می‌ماند. پاکسازی بستر برای جلوگیری از ناهنجاری‌های جریان در آینده و ایمنی کارکرد آبشکن‌ها ضروری است. دور کردن مصالح باقی‌مانده عموما وقت و هزینه زیادی را در بر دارد. این مصالح ممکن است در فضای حد فاصل آبشکن‌ها و کناره دیواره رودخانه پخش گردد، به‌طوری‌که برای مراحل ساخت تکمیلی استفاده گردد، یا به تثبیت طبیعی کناره رودخانه کمک نماید.

۷-۱۰- حفاظت دیواره بالا و حریم رودخانه

ایمنی و کارکرد آبشکن‌ها مستقیما تحت تاثیر عوامل تخریبی و نحوه کاربری نوار ساحل بالای رودخانه (یا حریم رودخانه) است. در مراحل ساخت پروژه، حفاظت و تثبیت ساحل بالا و حریم رودخانه نباید کمرنگ، حذف و یا به مرحله بهره‌برداری و نگهداری پروژه انتقال داده شود. اصول و راهکارهای اجرایی حفاظت حریم رودخانه به تفصیل در بند (۶-۳) ارائه شده است.

۷-۱۱- پایش در مرحله ساخت

پایش و نظارت فنی در هر مرحله از پروژه ضروری بوده و علاوه بر کنترل کیفی اجرای کار و مشخصات فنی طرح، می‌توان اطلاعات خوبی را در مورد طراحی و اجرا و یا مشکلات و نقایص کار به‌دست آورد. کنترل اجرا و احتمال اصلاحات لازم در طرح (قبل از ساخت کامل آبشکن‌ها)، از مشکلات آینده طرح و نیز از هزینه می‌کاهد.

موارد پایش و ابزار و روش‌های پایش در طرح آبشکن‌های رودخانه‌ای به تفصیل در فصل (۸) ارائه شده است. در مرحله ساخت (به‌ویژه در شرایطی که از رویکرد مرحله‌ای استفاده شده و یا زمان‌بندی طرح بیش از یکسال است)، پایش فنی در موارد زیر ضروری است.

۷-۱۱-۱- رعایت موارد فنی و اجرایی، و پیمان خصوصی

در تمام مراحل ساخت، توصیه‌های فنی و اجرایی مکتوب در شرح خدمات فنی پروژه، در پیمان خصوصی و بر روی نقشه‌های اجرایی (در مجموعه اسناد مناقصه) باید توسط پیمانکار اجرا و توسط دستگاه نظارت کنترل و تایید گردد. هرگونه تغییر و یا اصلاح لازم در مراحل اجرا باید با تایید نظر مشاور و کارفرما صورت یابد.

۷-۱۱-۲- کنترل دانه‌بندی و تراکم مصالح بدنه، فیلتر و روکش آبشکن، و روش اجرا

عدم توجه به کیفیت کار منشا مشکلاتی نظیر نشست، ترک و ناپایداری شیب آبشکن خواهد بود. وجود این مشکلات، در عین حال تاثیر عوامل و ناکاستی های دیگر را در ارزیابی نهایی اجرا تحت الشعاع قرار می‌دهد.

۷-۱۱-۳- کنترل نشست بدنه آبشکن‌ها

نشست بدنه ناشی از مقاومت کم بستر و یا تراکم ناکافی بدنه آبشکن بوده و سبب ایجاد و توسعه ترک‌های کششی در تاج و بدنه آبشکن خواهد گردید.

۷-۱۱-۴- کنترل پایداری شیب آبشکن

پایداری شیب متاثر از نوع و کیفیت مصالح، روش ساخت هسته اصلی بدنه، طرح فیلتر و روکش حفاظتی، شیب دیواره‌ها و یا آبشستگی پنجه آبشکن در محل دماغه و وجوه بالادست و پایین‌دست خواهد بود.

۷-۱۱-۵- کنترل آبشستگی

ارزیابی عمق و گستره آبشستگی پنجه آبشکن در محل دماغه و وجوه بالادست و پایین‌دست، در اثر جریان و یا وقوع سیل، برای کنترل پایداری آبشکن ضروری خواهد بود.

- **جذب رسوبات**

ارزیابی عمق و گستره رسوب‌گذاری در میدان کارکرد آبشکن‌های احداثی، در اثر جریان و یا وقوع سیل، برای کنترل کارایی آبشکن‌ها ضروری خواهد بود.

در پایان مرحله ساخت، ابزار پایش مطابق با راهنمای ارائه شده در فصل (۸)، برای ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها در مرحله بهره‌برداری و نگهداری نصب می‌گردد.

۷-۱۲- تدوین برنامه اجرا

در طرح ساماندهی رودخانه، مجموعه اسناد مناقصه (شامل نقشه‌های اجرایی، متره و برآورد، زمان‌بندی اجرای کار و پیمان عمومی و خصوصی) از سوی مشاور به کارفرما جهت تایید ارائه می‌گردد. مراحل و برنامه اجرای پروژه با توجه به ایمنی طرح، اتمام به‌موقع کار و با توجه به شرایط رودخانه، وضعیت اقلیمی حوضه، مصالح و تکنولوژی کار و محدودیت‌ها، باید از قبل تعیین و دقیق گردد. فعالیت های لازم جهت اجرا و تکمیل پروژه، برنامه زمان‌بندی اجرای کار توسط مشاور تهیه و اقدامات ماقبل و مابعد آن پیش‌بینی می‌گردد. جزییات اجرایی مراحل کار باید در اسناد مناقصه و شرایط پیمان خصوصی ارائه گردیده و به تایید کارفرما برسد. پس از انتخاب پیمانکار و شروع عملیات اجرایی، پیمانکار با توجه به امکانات و شرایط موجود مبادرت به اصلاح و تکمیل جدول زمان‌بندی و یا روند اجرا نموده، و برنامه کنترل پروژه را به‌صورت برنامه مسیر بحرانی (CPM) تهیه و جهت تصویب به کارفرما ارائه خواهد نمود. در صورت لزوم مهندسی ارزش نیز می‌تواند در بهینه‌سازی طرح اجرایی (کاهش زمان اجرا و هزینه‌های پروژه) و یا ارزیابی مشکلات پیش‌بینی نشده و راهکارهای پیشنهادی، موثر واقع گردد.

فصل ۸

مدیریت کارکرد و نگهداری آبشکن‌ها

۸-۱- کلیات

پس از ساخت و اجرای سامانه آبشکن‌ها و دیگر گزینه‌های تکمیلی در طرح ساماندهی بازه مورد نظر، پایش و ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها، پاسخ‌گویی طرح به اهداف مورد نظر، کنترل معیارهای طراحی، برنامه نگهداری و راهکارهای مناسب اصلاح و یا ترمیم، برای ایمنی و تداوم کارکرد سامانه آبشکن‌ها لازم و ضروری خواهد بود.

ارزیابی اولیه طرح ساماندهی، متعاقب وقوع اولین سیل بزرگ و یا بعد از دو سیل متوسط و یا با گذشت دو سال از اجرای طرح باید مورد نظر قرار گیرد. تناوب زمانی ارزیابی‌های بعدی نیز بر همین اساس و یا با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی اولیه و متعاقب اقدامات احتمالی انجام یافته، می‌تواند برنامه‌ریزی گردد. برای این منظور پایش سامانه رودخانه، روش‌ها و ابزار لازم باید در طرح جامع ساماندهی رودخانه پیش‌بینی شده باشد.

در این فصل، موارد مهم در طرح و برنامه پایش و نگهداری سامانه آبشکن‌های رودخانه‌ای به‌ترتیب زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- آسیب‌ها و خطرات احتمالی در سامانه آبشکن‌ها
- روش‌ها و ابزار پایش آبشکن‌ها
- ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها
- مدیریت نگهداری آبشکن‌ها شامل راهکارهای اساسی و اقدامات اضطراری
- مدیریت استقرار پوشش گیاهی در میدان آبشکن‌ها و در حریم رودخانه

۸-۲- آسیب‌ها و خطرات احتمالی

با گذشت دوره زمانی ارزیابی (متعاقب یک سیل بزرگ یا دو سیل متوسط و بعد از دو سال)، شناسایی آسیب‌های وارد به بازه ساماندهی شده و امکان بروز خطرات احتمالی در آینده، برای مدیریت و نگهداری رودخانه و سامانه آبشکن‌ها ضروری است.

بازبینی و ارزیابی شرایط رودخانه را می‌توان به چهار بخش بستر اصلی رودخانه، دیواره‌های رودخانه، سامانه آبشکن‌ها و ساختار سازه‌ای آبشکن، به‌شرح زیر تفکیک نمود.

۸-۲-۱- بستر اصلی رودخانه

۸-۲-۱-۱- مارپیچی شدن جریان اصلی

احداث آبشکن‌ها سبب افزایش توان جریان ثانویه شده به‌ویژه در پیچ‌ها جریان حلزونی را توسعه می‌بخشد (شکل ۸-۱). از اثرهای احتمالی کارکرد آبشکن‌ها در مراحل اولیه، مارپیچی شدن ناخواسته بستر اصلی جریان، مطابق شکل (۸-۲) است. دلایل احتمالی وقوع این پدیده ممکن است عدم کفایت طول و فاصله بین آبشکن‌ها، راستای مستقیم و طولانی بازه، پیچ رودخانه، عدم تقارن آرایش آبشکن‌ها در دو سمت رودخانه و اجرای الگوی یک در میان به‌ویژه الگوی زیگزاگی آبشکن‌ها باشد. مارپیچی شدن بستر اصلی جریان ممکن است مانع از تثبیت رسوبات در میدان آبشکن‌ها شده و برای کشتیرانی خطرساز باشد.

۸-۲-۱-۲- توسعه بارها و جزایر رسوبی

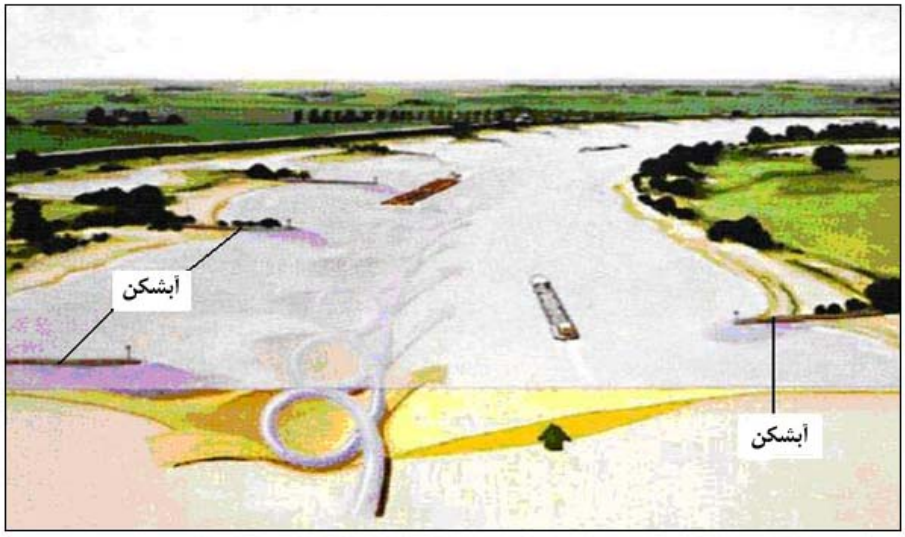
مارپیچی شدن ناخواسته جریان باعث توسعه بارهای رسوبی در بستر اصلی رودخانه، مطابق شکل (۸-۲) می‌گردد. علاوه بر عوامل مذکور در بند قبل، توسعه و تداوم زمانی جریان‌های ثانویه باعث گسترش تدریجی بارهای رسوبی و تثبیت آنها به‌صورت جزایر در میانه بستر خواهد شد.

۸-۲-۱-۳- حمله جریان به میدان آبشکن‌ها

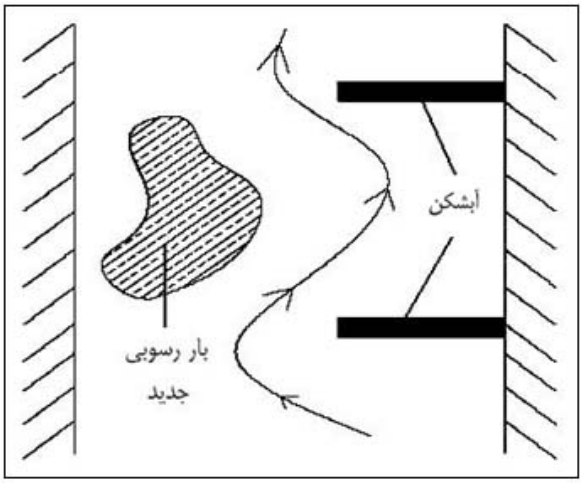
مارپیچی شدن ناخواسته جریان به‌ویژه در مواقع سیلابی مطابق شکل (۸-۲)، باعث هدایت و حمله جریان به میدان آبشکن‌ها و شستشوی رسوبات ته نشست شده پیشین خواهد شد. در این‌صورت، فضای بین آبشکن‌ها فاقد رسوبات و پوشش گیاهی بوده و دیواره تخریب شده که نشانگر عدم کارایی آبشکن‌ها است.

۸-۲-۱-۴- هندسه نامناسب جریان

تغییرات توپوگرافی بستر رودخانه باعث تغییر در توزیع عمق، سرعت و عرض سطح آب در طول و عرض بازه گردیده و ممکن است سبب حمله جریان به مواضع جدید گردد. تاثیر این تغییرات به‌نوبه خود ممکن است در بازه پایین‌دست به‌صورت رسوب‌گذاری و یا فرسایش‌های جدید مشاهده گردد. تاثیرات ریخت‌شناسی آبشکن‌ها بر روی هندسه جریان به تفصیل در فصل (۴) ارائه شده است.



شکل ۸-۱- توسعه جریان حلزونی در بستر اصلی رودخانه بعد از احداث آبشکن‌ها



شکل ۸-۲- توسعه جریان مارپیچی و بارهای رسوبی در بستر اصلی رودخانه بعد از احداث آبشکن‌ها

۸-۲-۲- دیواره رودخانه

موقعیت‌های مختلف دیواره رودخانه به‌ترتیب زیر ممکن است که در معرض فرسایش و تخریب قرار گیرند.

۸-۲-۲-۱- فرسایش دیواره در سمت آبشکن‌ها

- در محدوده احداث آبشکن فرسایش دیواره در امتداد کارگذاری آبشکن‌ها نشانگر عدم کفایت جانمایی و آرایش آبشکن‌ها بوده که سرانجام به ناپایداری آبشکن‌ها و خطر مضاعف رودخانه‌ای منجر خواهد شد. این عارضه در محل پیچ خارجی خطرسازتر خواهد بود.
- بعد از آخرین آبشکن تغییر هندسه رودخانه و جریان همچنین بازگشت خط جدایی جریان به کناره رودخانه از عوامل احتمالی فرسایش دیواره پایین‌دست سامانه آبشکن‌ها به‌شمار می‌رود (شکل ۸-۳).

۸-۲-۲-۲- فرسایش دیواره رودخانه در سمت مقابل

در اثر طول زیاد آبشکن و یا عرض کم رودخانه و نیز در ناحیه خروجی پیچ رودخانه، انحراف جریان به سمت ساحل مقابل می‌تواند باعث فرسایش شدید در ساحل روبرو گردد.

۸-۲-۳- سامانه آبشکن‌ها

سامانه آبشکن‌ها بر اثر عوامل متعدد ممکن است کارایی موثر را نداشته باشند. از آن جمله می‌توان به دو مورد اشاره کرد:

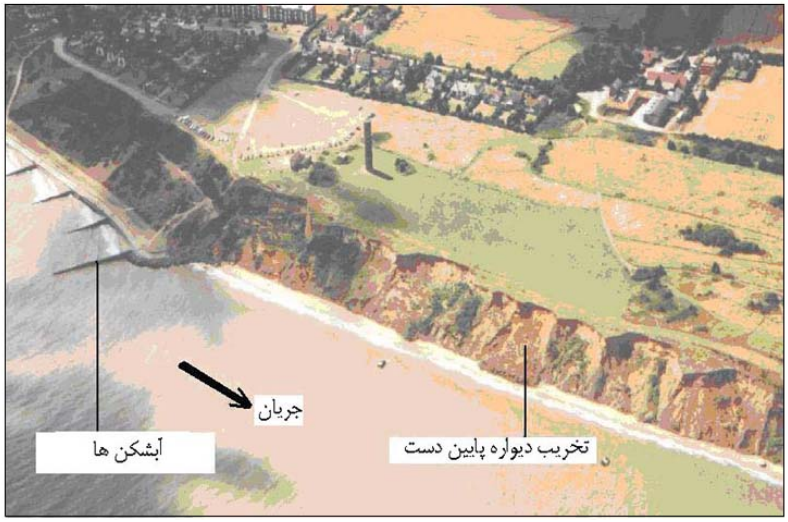
۸-۲-۳-۱- فقدان رسوب‌گذاری مورد انتظار در میدان آبشکن‌ها

با وقوع اولین سیل بزرگ و یا بعد از دو سیل متوسط و یا با گذشت دو سال از اجرای طرح ساماندهی توسعه رسوبات در بالادست اولین آبشکن، در حد فاصل آبشکن‌ها و در پایین‌دست آخرین آبشکن، همراه با استقرار پوشش گیاهی مورد انتظار است. در غیر

این‌صورت، سامانه آبشکن‌ها از کارایی مورد نظر برخوردار نبوده و نیازمند بازنگری است. شکل (۸-۴) نشان می‌دهد که آرایش آبشکن‌های برای یکنواختی شدت رسوب‌گذاری در میدان آبشکن‌های متوالی مناسب نبوده است [۸۲ و ۱۰۳].

۸-۲-۳-۲- شستشوی رسوبات از میدان آبشکن‌ها

حمله جریان بر میدان آبشکن‌ها و یا استغراق آبشکن باعث شستشوی رسوبات ته نشست پیشین می‌گردد. استغراق آبشکن در نتیجه عدم کفایت ارتفاع آبشکن، نشست آبشکن و یا وقوع سیل بزرگ‌تر از انتظار طرح پدید می‌آید. در این صورت، شرایط مشابه جریان ریزشی از سرریز تخت بوده و حمله جریان متلاطم شدید به میدان آبشکن‌ها باعث شستشو رسوبات از میدان آبشکن، توسعه آبشستگی در محل پنجه و آسیب عمومی به آبشکن‌ها خواهد شد.



شکل ۸-۳- تخریب دیواره رودخانه در پایین‌دست سامانه آبشکن‌ها

شکل ۸-۴- توسعه مناسب رسوبات در پایین‌دست آبشکن C و ناکارایی آبشکن‌های D و E [۱۸۲]

۸-۲-۴- ساختار سازه‌ای آبشکن‌ها

نیروهای جریان و پدیده آبشستگی و ضعف ساختار اولیه از عوامل مهم ناپایداری آبشکن‌ها بوده که می‌تواند منجر به تخریب سازه آبشکن گردد. ناپایداری آبشکن‌ها را می‌توان در چهار بخش زیر جستجو نمود:

۸-۲-۴-۱- نشست تاج آبشکن

انعطاف‌پذیری سازه آبشکن (به‌عنوان عامل طبیعی)، مقاومت ناکافی بستر، تراکم و قفل‌شدگی نامناسب مصالح ساخت بدنه آبشکن، ناپایداری شیب جانبی و آبشستگی (به‌عنوان عوامل طرح) از عوامل نشست و یا ایجاد ترک‌ها در تاج آبشکن هستند، که باید مورد بازبینی قرار گیرند. در شرایط صلب بودن سازه، نشست تاج به‌مفهوم تخریب کل آبشکن به‌حساب می‌آید.

۸-۲-۴-۲- تخریب پنجه و دماغه آبشکن

آبشستگی در محل پنجه و پیرامون دماغه آبشکن و یا حمله مستقیم جریان اصلی به دماغه آبشکن، سبب کوتاهی آبشکن گردیده و بخش ضعیف‌تر بدنه را در معرض حمله اصلی جریان قرار می‌دهد. از این‌رو با تخریب دماغه آبشکن، انتظار تداوم روند تخریبی کل آبشکن و حمله جریان به دیواره رودخانه را باید داشت (شکل ۸-۵).

شکل ۸-۵- توسعه آبشستگی موضعی و تخریب پنجه آبشکن کیسه‌ای، رودخانه سرخس [۴۵]

۸-۲-۴-۳- ناپایداری بدنه و شیب‌های جانبی

مصالح نامناسب در ساخت بدنه، مصالح و روش اجرا در سطوح جانبی آبشکن (روکش حفاظتی)، آبشستگی پنجه در وجه بالادست و پایین‌دست و یا شیب نامناسب دیواره، از عوامل ناپایداری شیب جانبی آبشکن هستند.

۸-۲-۴-۴- آسیب ریشه آبشکن

موقعیت نامناسب اولین آبشکن، ناپایداری و ارتفاع ناکافی دیواره رودخانه در بالادست، عدم اتصال و قفل‌شدگی آبشکن به دیواره از عوامل تخریب ریشه آبشکن هستند. آسیب ریشه منجر به تخریب بدنه آبشکن و شستشوی رسوبات کناره‌ای می‌گردد (شکل ۸-۶). حضور و تراوش آب از نهرهای آبیاری در ساحل بالای رودخانه، تردد ماشین‌آلات و دام و ورود آبراهه‌های فرعی از عوامل خارجی آسیب به ریشه آبشکن‌ها به‌شمار می‌آیند.

شکل ۸-۶- تخریب ریشه آبشکن در اثر انحراف سیلاب اسفند ۱۳۶۵، رودخانه حله، برازجان [۴۵]

۸-۳- پایش سامانه آبشکن‌ها

طرح پایش و ارزیابی کارکرد سامانه آبشکن‌ها برای ایمنی طرح ضروری است. اهداف و ابزار اصلی طرح پایش به‌طور خلاصه شامل موارد زیر می‌باشد.

- بررسی میدانی و برداشت داده‌ها از بازه ساماندهی شده
- ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها متناسب با اهداف مورد نظر، عمر مفید پروژه، و ریسک مورد انتظار طرح
- کنترل مبانی و ضوابط طراحی آبشکن‌ها و اثرهای ریخت‌شناسی، زیستی و اجتماعی طرح
- بهبود و اصلاح ضوابط و استانداردهای طراحی
- تامین اطلاعات لازم جهت واسنجی و تایید مدل فیزیکی و یا مدل‌های ریاضی بازه مورد نظر

موارد، مراحل، روش‌ها و ابزار پایش در طرح ساماندهی رودخانه با آبشکن‌ها به‌طور خلاصه در زیر ارائه می‌گردد.

۸-۳-۱- جمع‌آوری اطلاعات رودخانه قبل از طرح ساماندهی

قبل از این‌که بازه اصلاح شده مورد پایش و بررسی قرار گیرد، لازم است تا نقشه‌ها، عکس‌ها و مشخصات عمومی رودخانه قبل از طرح ساماندهی جمع‌آوری گردد. این اطلاعات مبنای بررسی تاثیرات ریخت‌شناسی، هیدرولیکی و زیستی احداث آبشکن‌ها بر سامانه رودخانه و ارزیابی درجه دستیابی به اهداف طرح می‌باشد.

۸-۳-۲- بررسی میدانی بازه ساماندهی شده

ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها متناسب با اهداف مورد نظر، عمر مفید پروژه و ریسک مورد انتظار طرح نیاز به بررسی میدانی و برداشت داده‌ها از طریق بازدیدهای ادواری و تهیه گزارش‌های مستند و عکس می‌باشد. بازدیدها پس از رخداد هر سیل، متعاقب گزارش‌های محلی و در هرحال با تناوب مناسب (فصلی یا سالانه)، باید صورت گیرد.

در این بازدیدها باید شرایط پایداری بستر و دیواره‌های رودخانه، تغییرات جدید در بستر و موقعیت توسعه بارها و جزایر رسوبی، وضعیت پایداری آبشکن‌ها و دیگر موارد آسیب‌پذیر مذکور در بند (۸-۲) به‌طور کیفی و مستند گزارش گردد. همچنین، ابزاربندی پایش به‌صورت نصب وسایل اندازه‌گیری، اندازه‌گیری‌های ادواری از الگوی جریان در میدان تاثیر آبشکن‌ها و روش مناسب پایش (متناسب با شرایط محل و هماهنگ با شورای محلی) و غیره باید براساس بررسی محلی برنامه‌ریزی گردد.

۸-۳-۳- نصب وسایل اندازه‌گیری

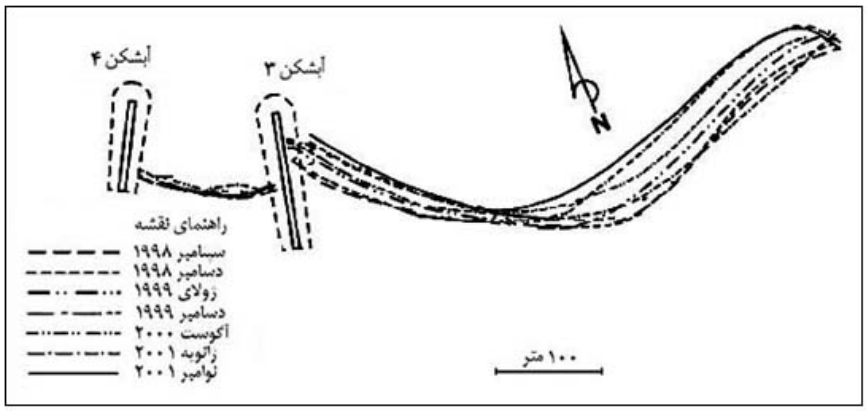
گام اول، ایجاد شبکه کنترل ارتفاعی و احداث نقاط کنترل مطمئن و دایمی در نزدیکی رودخانه است. برای این منظور، محور راه‌های آسفالته، تیر و دکل خطوط حیاتی و ساختمان‌های دایمی در محل، مطمئن‌ترین کنترل‌ها به‌شمار می‌روند. ابزاربندی طرح پایش به‌صورت نصب وسایل اندازه‌گیری برای ارتفاع سطح آب، عمق فرسایش و رسوب‌گذاری در میدان تاثیر آبشکن‌ها و شدت تخریب ساحل رودخانه می‌تواند تجهیز گردد. اشل‌های معمولی برای اندازه‌گیری هم‌زمان سطح آب و کف بستر در بالادست بازه، در میدان آبشکن‌ها و در پایین‌دست بازه نصب می‌گردند. با نصب میل‌های مهاری شاخص در ساحل بالا می‌توان تغییرات دیواره اصلی رودخانه را در آینده پایش نمود.

برای اطلاعات بده جریان آب و انتقال رسوب، احداث ایستگاه آب‌سنجی عموما به تنهایی توجیه‌پذیر نیست. تا حد امکان باید با کاربرد روش‌های ساده و ممکن، اندازه‌گیری و یا برآورد بده و بار رسوبی انجام یابد. ارتباط این نتایج با نتایج نظیر از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های آب‌سنجی، برای بسط اطلاعات مفید است. اخیرا توسعه ابزار دقیق برای اندازه‌گیری در مقیاس رودخانه‌ها مورد نظر قرار گرفته، که نمونه آن دستگاه فراصوتی برای اندازه‌گیری بار معلق رودخانه است [۱۰۰].

۸-۳-۴- نقشه‌برداری تناوبی

ساده‌ترین و عملی‌ترین روش ارزیابی، نقشه‌برداری از بستر بازه رودخانه و تهیه نقشه توپوگرافی در دوره‌های زمانی مختلف است. مقایسه نقشه‌های متناوب، شکل و گستره عرضی و عمقی تغییرات بستر (رسوب‌گذاری و یا فرسایش)، نحوه رسوب‌گذاری و فرسایش در میدان آبشکن‌ها، درجه کارایی آبشکن‌ها و یا مخاطرات جدید را نشان خواهد داد [۱۱۱]. دوره‌های زمانی مناسب شامل زمان

اجرای طرح آبشکن‌ها قبل و بعد از سیلاب‌های شاخص و تناوب مناسب (سالانه یا چند سالانه) می‌باشد. شکل (۸-۷) تغییرات زمانی بستر و تاثیرات درازمدت آبشکن‌ها را با مقایسه هفت نقشه توپوگرافی متوالی، در یک دوره سه ساله نشان می‌دهد. آبنگاری کف بستر رودخانه‌های بزرگ و با جریان دایمی نیز مشابه عملیات آبنگاری کف مخازن سدها با استفاده از سامانه قایق، GPS و عمق سنج‌های فراصوتی، امروزه در ایران به‌راحتی قابل انجام است.



شکل ۸-۷- تغییرات بستر در بازه آبشکن‌ها براساس نقشه‌های توپوگرافی متناوب [۱۱۱]

۸-۳-۵- بررسی الگوی جریان در مجرای اصلی رودخانه

بررسی الگوی جریان در مجرای اصلی راهنمای خوبی برای تعیین راستای خط‌القعر و مسیر اصلی جریان، مواضع حمله جریان به میدان آبشکن‌ها، حضور و گستره جریان‌های گردابه‌ای و موقعیت و گستره بارهای رسوبی در بازه رودخانه است. برای این منظور از مواد رنگی، گوی‌های شناور گرد و کوچک و یا از ذرات کاه می‌توان استفاده نمود. با استفاده از قایق، این مواد از بالادست بازه آبشکن‌ها به‌طور نسبتا یکنواخت در چند نوار عرضی منتشر شده و نحوه انتشار مواد از طریق مشاهده و عکسبرداری قابل ردیابی می‌باشد. استفاده از روش و مواد مشابه، راهکار مناسبی برای بررسی تغییرات الگوی جریان در میدان تاثیر آبشکن‌ها است.

کاربرد سرعت سنج صحرایی سه بعدی (با مکانیزم فراصوتی) و دستگاه فراصوتی برای اندازه‌گیری توزیع بار معلق در گستره رودخانه در رودخانه البی (آلمان) مورد آزمون قرار گرفته است [۱۱۹]. از این وسایل برای بررسی اثر کشتیرانی بر ساختار جریان و رسوب‌گذاری و همچنین دوباره معلق شدن رسوبات ناشی از حرکت امواج در میدان آبشکن‌ها استفاده شده است.

۸-۳-۶- ارزیابی پایداری بازه اصلاح شده

پایداری بازه اصلاح شده با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از برنامه پایش و با کاربرد روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی ارائه شده در فصل (۴) قابل ارزیابی است. علاوه بر آن، داده‌های اندازه‌گیری شده از برنامه پایش بازه رودخانه (مانند ارتفاع سطح آب، عمق و گستره رسوب‌گذاری و یا فرسایش، الگوی جریان، مواضع حمله جریان، شدت جریان و بار رسوبی) به‌عنوان شواهد تجربی می‌تواند برای مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی و واسنجی و تایید این مدل‌ها استفاده گردد. در این‌صورت می‌توان سناریوهای مختلف (نظیر شرایط رودخانه قبل و بعد از ساماندهی در زمان‌های مختلف تحول بستر رودخانه و تاثیر اقدامات احتمالی) را در مدل بررسی و مقایسه نمود.

۸-۳-۷- ارزیابی پایداری سازه آبشکن

کنترل ادواری پایداری سازه آبشکن و مقایسه ابعاد هندسی موجود با ابعاد نظیر آن در مرحله ساخت ضروری است. این ابعاد شامل طول آبشکن، عرض و ارتفاع تاج آبشکن، شیب جانبی در وجوه بالادست، پایین‌دست و دماغه آبشکن و همچنین عمق آبشستگی در پنجه و پای دیواره آبشکن می‌باشد. وسایل اندازه‌گیری ساده بوده و شامل متر، شاخص، شابلون تعیین شیب و دوربین نقشه‌برداری است.

وضعیت پایداری روکش حفاظتی آبشکن تابع مصالح و روش ساخت، ارتفاع آبشکن، شیب جانبی در جریان‌های وقوع یافته است. ارزیابی پایداری سطحی آبشکن به‌صورت ادواری ضروری است. به‌طور مثال برای روکش سنگ‌ریزه‌ای، تغییر در شیب کارگذاری، تغییر در اندازه و دانه‌بندی سنگ‌های پوششی، درجه قفل‌شدگی سنگ‌ها و وجود لغزش لایه‌ای سنگ‌ریزه‌ها و یا غلطش منفرد سنگ‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. برای کنترل دانه‌بندی در سطح نمونه روکش، از روش صحرایی شمارش سنگ‌ها و اندازه متوسط سه بعدی هر یک از سنگ‌ها استفاده می‌گردد. این روش مشابه دانه‌بندی لایه سطحی بستر رودخانه‌های درشت‌دانه است که در بند (۵-۲-۲- ۵) تشریح گردیده است.

۸-۳-۸- ارزیابی کارایی آبشکن‌ها

برای ارزیابی کارایی آبشکن‌ها، باید پایش و اندازه‌گیری‌های دقیق، متناوب و مطمئنی داشت که این امر پایه و اساس مدیریت نگهداری از آبشکن‌ها و دستیابی به اهداف طرح به‌حساب می‌آید. ایمنی سازه آبشکن در برابر آبشستگی و حمله جریان، توسعه رسوبات در حد فاصل آبشکن‌ها و رویش طبیعی گیاهان در کناره‌ها بهترین شواهد کارایی موثر آبشکن‌ها در حفاظت دیواره‌های رودخانه هستند. تامین عمق آب کافی، هدایت خطاالقعر و مسیر جریان اصلی در میانه بستر و عدم حضور بارهای رسوبی میانی، بیانگر کارایی آبشکن‌ها در بهبود قابلیت کشتیرانی رودخانه است. توسعه جامعه گیاهی مطلوب، تنوع حیات آبزیان شاخص و افزایش ظرفیت خود پالایی آب و غلظت اکسیژن محلول، بهترین شواهد در کارایی زیستی آبشکن‌ها به‌شمار می‌آیند. دستیابی به اهداف طرح با گذشت حداقل دو سیل متناوب و یا با گذشت حدود دو سال مورد انتظار است در غیر این‌صورت، جانمایی و کارایی موثر طرح مورد سوال خواهد بود.

۸-۳-۹- ارزیابی دیواره و حریم رودخانه

مقایسه شرایط دیواره‌های رودخانه، قبل و بعد از ساماندهی و در دوره‌های زمانی مختلف ضروری است. موارد مهم در ارزیابی وضعیت دیواره و حریم رودخانه (در بازه بالادست در محدوده سامانه آبشکن‌ها، در بازه پایین‌دست و در دو سمت رودخانه) به این شرح می‌باشد:

۸-۳-۹-۱- شیب دیواره

شیب کم‌تر دیواره، ته نشست رسوبات در پای شیب و رویش گیاهی روی دیواره، نشان دهنده حداقل کارایی آبشکن‌ها است. برعکس، چنانچه شیب دیواره زیادتر گردیده، پای شیب فرسایش یافته و یا غارکنی شده باشد، نشانگر عدم کارایی آبشکن‌ها حتی در جریان کم آبی است.

۸-۳-۹-۲- رویش گیاهان

میزان رویش گیاهی و حضور گیاهان دایمی بر روی دیواره و ساحل بالای رودخانه، بهترین شاهد برای حفاظت کناره‌ها است.

۸-۳-۹-۳- وضعیت حریم رودخانه

تغییر کاربری اراضی در نوار ساحلی رودخانه، نزدیکی و تراوش آب از نهرهای سنتی آبیاری و تردد دام و ماشین‌آلات از عوامل تخریب و تجاوز به حریم رودخانه به‌شمار می‌روند. در ایران، به بهانه آزاد سازی اراضی ساحلی پس از احداث آبشکن‌ها شدت تاثیر این عوامل بر حریم و حتی بستر طبیعی و قانونی رودخانه افزایش می‌یابد به طوری که ریشه و حتی بدنه آبشکن آسیب‌پذیر می‌گردد.

۸-۳-۱۰- بررسی شرایط زیست بوم رودخانه

ارزیابی تاثیرات زیست محیطی طرح ساماندهی و مقایسه آن با شرایط پیشین ضروری است. برای این منظور، شاخص‌های طبیعی (نظیر تنوع گونه‌های گیاهی، وسعت پوشش گیاهی رودخانه، نوع و تعداد ماهیان) و نیز شاخص‌های فیزیکی (نظیر غلظت رسوب، غلظت املاح و مهم‌تر از همه غلظت اکسیژن محلول در آب) به‌طور هم‌زمان در بازه بالادست، در بازه اصلاح شده و در بازه پایین‌دست رودخانه اندازه‌گیری و ارزیابی می‌گردد. مقایسه این داده‌ها در هر دوره زمانی، ماتریس ارزیابی ارزش زیستی رودخانه را فراهم می‌سازد.

نمونه بررسی وضعیت زیست بوم در رودخانه ناتیکوک (امریکا) انجام یافته که تغییرات حیات ماهیان و پوشش گیاهی رودخانه پایش گردیده است [۸۵]. اطلاعات بیش‌تر در مراجع شماره [۹، ۸۵، ۱۰۰، ۱۲۲ و ۱۲۳] ارائه شده است.

۸-۴- بهره‌برداری و نگهداری از آبشکن‌ها

پس از ساخت و اجرای سامانه آبشکن‌ها (و یا دیگر گزینه‌های تکمیلی) در بازه مورد نظر، برنامه پایش متناوب و مطمئن و برنامه و مدیریت نگهداری از این سامانه برای کارایی مناسب آبشکن‌ها لازم است. اقدامات ضروری برای بهره‌برداری و نگهداری آبشکن‌ها به‌طور خلاصه شامل موارد زیر می‌باشد:

۸-۴-۱- پاکسازی موانع

تجمع موانعی نظیر تنه و شاخه درختان، مواد شناور، تایر ماشین و غیره در مجرای اصلی جریان می‌تواند باعث ناهنجاری و تخریب‌های موضعی آبشکن‌ها گردد. انجام پاکسازی قبل از فصل سیلابی رودخانه و بعد از هر سیلاب ضروری بوده و برای اولین آبشکن مهم‌تر است.

۸-۴-۲- بهسازی بستر

بعد از سیلاب، به‌طور ناخواسته ممکن است جزایر و بارهای رسوبی در بازه آبشکن‌ها (در میانه بازه و به‌ویژه در سمت ساحل مقابل) و یا در بازه‌های بالادست و پایین‌دست ایجاد و توسعه یابد. جزایر رسوبی نه تنها از ظرفیت انتقال جریان سیلابی می‌کاهند، بلکه ممکن است اثرهای منفی بر کارکرد آبشکن‌ها (به‌صورت انحراف حمله جریان به میدان آبشکن‌ها) و نیز حمله جریان به سمت

دیواره‌های رودخانه در مواضع دیگر داشته باشند. بهسازی بستر در قبل از فصل سیلابی رودخانه، در صورت نیاز می‌تواند از شدت عوارض نامطلوب بکاهد.

۸-۴-۳- ترمیم و بازسازی موضعی

بعد از سیلاب، تخریب‌های موضعی بر روی آبشکن‌ها (ریشه، پنجه، تاج، شیب جانبی و روکش بدنه) و در دیواره‌های رودخانه (به‌ویژه در بالادست و پایین‌دست سامانه آبشکن‌ها) باید ترمیم و در صورت لزوم مقاوم‌سازی گردد.

۸-۴-۴- بهسازی طرح آبشکن‌ها

کارایی سامانه آبشکن‌ها بعد از وقوع چند سیل متناوب (حداقل ۲ سیل) و یا با گذشت دو تا چهار سال و همچنین بعد از یک سیل استثنایی و یا بعد از گزارش تخریب‌های جدی، باید مورد بازنگری اساسی قرار گیرد. در این مرحله ممکن است آرایش آبشکن‌ها (طول و فاصله، شکل دماغه، ارتفاع تاج و غیره) اصلاح شده، مواضع آسیب‌پذیر (پنجه، ریشه، شیب بدنه و غیره) مقاوم‌سازی شده و در صورت لزوم از گزینه‌های حفاظت تکمیلی برای هدایت جریان و پایداری بازه استفاده گردد. موارد اصلی در بهسازی آرایش و طرح آبشکن‌ها به ترتیب در زیر ارائه شده است.

۸-۴-۴-۱- ساخت آبشکن میانی

درصورتی‌که فاصله بین آبشکن‌ها زیاد تشخیص داده شده یا برخی آبشکن‌ها آسیب جدی دیده و یا طول آبشکن بر اثر تخریب دماغه کوتاه شده باشد، احداث آبشکن‌های میانی می‌تواند راه حل مناسبی باشد. ارزیابی الگوی جریان و گستره رسوب‌گذاری و یا فرسایش بهترین راهنما برای جانمایی آبشکن‌های میانی است. همچنین درصورتی‌که الگوی ساخت یک در میان آبشکن‌ها در مرحله اول اجرا شده باشد، لزوم ساخت آبشکن‌های میانی در مرحله دوم ساخت می‌تواند بررسی گردد.

۸-۴-۴-۲- اصلاح دماغه آبشکن

درصورتی‌که دماغه آبشکن در اثر جریان آسیب دیده باشد یا هدایت و انحراف جریان از میدان آبشکن‌ها به خوبی صورت نگیرد، اصلاح دماغه از نظر شکل (از فرم مستقیم به فرم L یا T شکل) و شیب جانبی و نیز مصالح مقاوم‌تر، می‌تواند مورد نظر قرار گیرد. این گزینه در عمل ساده‌تر و اقتصادی‌تر از احداث آبشکن‌های میانی می‌تواند باشد.

۸-۴-۴-۳- تغییر طول آبشکن

تغییر طول شامل کاهش و یا افزایش طول آبشکن می‌باشد. در موارد زیر طول آبشکن باید اصلاح گردد:

- درصورتی‌که رسوب‌گذاری در میدان آبشکن‌ها در حد مورد انتظار نباشد و یا انحراف و هدایت جریان به خوبی صورت نگیرد، گزینه افزایش طول می‌تواند مطرح گردد. این گزینه به عنوان جایگزین هر یک از دو گزینه قبلی و یا در ترکیب با آنها می‌تواند مورد نظر باشد. در هر حال، طول آبشکن‌ها در راستای بازه باید به طور یکنواخت افزایش یابد تا از تغییرات سریع در هندسه جریان و تلاطم زیاد جلوگیری گردد.

- درصورتی‌که شدت آبشستگی در مجرای اصلی زیاد باشد و یا حمله جریان متوجه دیواره مقابل گردد، ممکن است طول آبشکن کوتاه‌تر شود. در این‌صورت مقاوم‌سازی پنجه و دماغه آبشکن در برابر آبشستگی باید مورد نظر قرار گیرد.
- اگر طول آبشکن در اثر تخریب‌های متوالی کاهش یابد، مقاوم‌سازی پنجه و دماغه و نیز روکش بدنه آبشکن نیاز خواهد بود.

۸-۴-۴-۴- اصلاح تراز تاج آبشکن

درصورتی‌که تراز تاج آبشکن کم بوده و مشکلات ناشی از استغراق در سیلاب‌های متناوب و محتمل وجود داشته باشد، افزایش تراز تاج مورد نظر قرار گیرد. در این‌صورت، نیاز به افزایش تراز دیواره ساحلی رودخانه (برای جلوگیری از دور زدن آب و تخریب ریشه آبشکن) و تعدیل شیب جانبی (برای پایداری آبشکن) باید مورد بررسی قرار گیرد. از سوی دیگر ممکن است برای افزایش ظرفیت انتقال سیلاب رودخانه، تراز تاج آبشکن کاهش داده شود و به سمت رودخانه شیب‌دار یا پلکانی گردد. در این حالت، ریسک استغراق آبشکن در سیلاب‌های بزرگ‌تر پذیرفته شده است.

۸-۴-۴-۵- اصلاح شیب جانبی آبشکن

درصورتی‌که شیب جانبی در دماغه و در امتداد وجوه بالادست و پایین‌دست بدنه آبشکن ناپایدار گردد، تعدیل شیب و درصورت لزوم اصلاح شیب همراه با مقاوم‌سازی روکش بدنه آبشکن ضروری خواهد بود.

۸-۴-۴-۶- حفاظت‌های موضعی و خاص

حفاظت‌های موضعی لازم حداقل در سه مورد زیر باید مورد نظر قرار گیرد:

- **دیواره بالا و حریم رودخانه:** درصورتی‌که اثرهای فرسایش پیشرونده در ساحل بالا و حریم رودخانه‌ایمنی آبشکن‌ها را تهدید کند، حفاظت حریم رودخانه ضروری خواهد بود. حفاظت ممکن است به‌صورت افزایش تراز دیواره ساحلی، تثبیت زیستی حریم و دیواره (با کاشت گیاهان علفی و درختان)، احداث موانع فیزیکی (سیم خاردار و نرده‌کشی) و هدایت زه آب‌ها (با احداث زهکش سطحی در نوار بالای رودخانه) باشد. جزییات طرح حفاظت دیواره‌ها و حریم رودخانه در فصل (۶-۳) ارائه شده است.
- **موقعیت ورود یا انشعاب آبراهه جانبی:** درصورتی‌که تخریب آبشکن‌ها و یا عدم کارایی آن‌ها متاثر از آبراهه‌های جانبی ورودی به رودخانه و یا آبگیرهای مستقیم رودخانه باشد، اصلاح مسیر آبراهه و حفاظت دیواره‌های آن ضروری است. برای این منظور هدایت جریان از طریق احداث دیواره‌های هادی و باله‌ای شکل و مقاوم‌سازی بستر و دیواره آبراه‌ها می‌تواند مورد نظر باشد.
- **موقعیت سازه‌های موجود در رودخانه:** درصورتی‌که اثرهای سازه‌های آبی و تقاطعی در رودخانه (نظیر پل، خطوط حیاتی، رمپ قایق، سرریز، سیفون و غیره) بر کارکرد آبشکن‌ها منفی باشد، اقدامات حفاظتی ضروری است. این اقدامات به طور مثال شامل تثبیت کف بستر در پایین‌دست سرریز و حفاظت دیواره در بالادست سرریز است.

۸-۴-۵- ارزیابی خصوصیات جریان و توپوگرافی بستر

داده‌های اندازه‌گیری شده از برنامه پایش بازه رودخانه (نظیر تراز سطح آب، عمق و گستره رسوب‌گذاری و یا فرسایش، الگوی جریان، مواضع حمله جریان، شدت جریان و بار رسوبی) به‌عنوان شواهد تجربی برای مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی و واسنجی و تایید این مدل‌ها استفاده می‌گردند. در این‌صورت می‌توان سناریوهای مختلف در اصلاح و یا تکمیل طرح ساماندهی را در مدل بررسی و مقایسه نمود.

۸-۴-۶- کارهای اضطراری

در شرایط وقوع غیرمترقبه سیل (یا پیش‌بینی وقوع سیلاب بزرگ)، اقدامات اضطراری و سریع باید در جهت کاهش خسارت جانی و مالی صورت پذیرد. این اقدامات شامل آماده‌سازی مواد و مصالح لازم و کافی در نزدیکی رودخانه، تجهیز سریع ماشین‌آلات مورد نیاز، مدیریت هماهنگ بحران در منطقه و روش‌های مناسب کار می‌باشد. کاهش تخریب دیواره‌ها، جلوگیری از انحراف جریان رودخانه و ترمیم و بازسازی آبشکن‌ها، ممکن است در روزهای تعطیل و یا در طول شب ضروری باشد.

بعد از وقوع سیل و فروکش نمودن شدت سیلاب، عکسل‌العمل وقوع یافته در دیواره رودخانه و آبشکن‌ها، ضروری است. در غیراین‌صورت با احتمال وقوع سیلاب بعدی، خسارات وارد شده ممکن است جبران‌ناپذیر باشد.

۸-۵- مدیریت استقرار پوشش گیاهی

اندام بیرونی گیاهان در حفاظت سطحی و ریشه آنها در تسلیح خاک و رسوبات نقش مهمی در تثبیت طبیعی و پایداری دارند. پایداری و کارایی موثر سامانه آبشکن‌ها در رودخانه با استقرار طبیعی پوشش گیاهی ممکن است. اقدامات و اصلاحات فیزیکی و ایجاد پوشش گیاهی مناسب، راهکار مناسبی برای توسعه کارایی آبشکن‌ها بوده و از نظر ریخت‌شناسی و زیست محیطی نیز ارزشمند است. جزییات حفاظت زیستی و طبیعی در سامانه رودخانه در بند (۶-۳) ارائه شده است. مدیریت ایجاد و استقرار پوشش گیاهی در چهار بخش زیر می‌تواند اعمال گردد:

۸-۵-۱- تسهیل رسوب‌گذاری در میدان آبشکن‌ها

استقرار و توسعه پوشش گیاهی در میدان آبشکن‌ها از شستشوی رسوبات ته نشست شده جلوگیری کرده و مقاومت بیش‌تری برای تله اندازی رسوبات در کناره‌ها فراهم می‌سازد. در فضای حد فاصل بین آبشکن‌ها، کاشت گیاهان سازگار با شرایط غرقابی از نوع علفی با تراکم زیاد و ریشه افشان و عمیق (نظیر مرغ و ارزن وحشی) و از نوع درختچه‌های کوتاه با ریشه بسیار عمیق و با تاج افشان و انعطاف‌پذیر (نظیرگز و خرزهره) مناسب بوده است.

۸-۵-۲- حفاظت تاج آبشکن

برای جلوگیری از فرسایش تدریجی تاج آبشکن در اثر امواج، عبور سیل و عوامل فیزیکی، ایجاد پوشش گیاهی بر روی تاج آبشکن موثر بوده است. همچنین از استقرار پوشش گیاهی به عنوان یک راهکار طبیعی برای افزایش تدریجی‌تراز تاج آبشکن استفاده گردیده است.

۸-۵-۳- تثبیت دیواره بالا و حریم رودخانه

تثبیت دیواره و حریم رودخانه برای ایمنی ریشه آبشکن، به‌ویژه برای شرایط جریان مستغرق ضروری است. کاشت گیاهان علفی متنوع (برای حفاظت سطحی) و درختچه و درختان با ریشه عمیق و اندام بیرونی انعطاف‌پذیر (برای تسلیح خاک) مناسب است. انواع گیاهان مناسب و روش استقرار آنها در ساحل بالا و حریم رودخانه در فصل (۶-۳) ارائه شده است.

۸-۵-۴- ارزش زیست محیطی و زیباشناسی طرح

امروزه توجه به ارزش‌های زیست محیطی برای توسعه حیات پایدار و زیباسازی رودخانه، از مبانی کارهای رودخانه‌ای به شمار می‌آید. توسعه پوشش گیاهی در بازه رودخانه، افزون بر افزایش کارایی و پایداری آبشکن‌ها، از نظر ارزش‌های اکولوژیکی و حیاتی برای مجموعه ساکنین سامانه رودخانه (آبزیان، جانوران نوار ساحلی و وابسته و انسان) و نیز زیباشناسی باید مورد توجه قرار گیرد.

فصل ۹

مدل‌های رودخانه‌ای

۹-۱- کلیات

مطالعات رودخانه‌ای و بررسی پدیده‌های جریان در شرایط طبیعی و موجود و نیز در شرایط اصلاح و ساماندهی رودخانه بسیار پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است. به طورکلی چهار روش زیر در کارهای رودخانه‌ای متداول می‌باشد [۵۲]:

- استفاده از دانش فنی و تجربه در پروژه‌های اجرا شده رودخانه‌ای، که روشی سنتی و ریسک‌پذیر است.
- ساخت و مطالعه بر روی مدل فیزیکی رودخانه با مقیاس مناسب برای تعمیم نتایج بررسی به رودخانه اصلی، که امکان‌پذیر و مطمئن‌تر بوده ولی زمان‌بر و پرهزینه است.
- کاربرد مدل‌های ریاضی در شبیه‌سازی جریان رودخانه، که ساده‌تر، ارزان‌تر ولی نامطمئن‌تر می‌باشد.
- کاربرد ترکیبی مدل‌های ریاضی و فیزیکی برای بهینه‌سازی مطالعات رودخانه‌ای.

در روش چهارم، ابتدا با استفاده از مدل ریاضی طرح اولیه در ساخت مدل فیزیکی رودخانه تهیه گردیده، سپس با واسنجی و تایید کارکرد مدل فیزیکی و درجه انطباق آن با مدل ریاضی، گزینه‌های دیگر با استفاده از مدل ریاضی ارزیابی می‌گردد و سرانجام نتایج حاصل از مدل‌سازی به رودخانه تعمیم داده می‌شود [۳۴ و ۵۲].

دانش علمی و فنی در مهندسی رودخانه هنوز به حدی تکامل نیافته که مدل‌های ریاضی پاسخگوی مطمئن برای طرح‌های رودخانه‌ای باشند. از این‌رو، هنوز کاربرد مدل‌های فیزیکی مطمئن‌ترین راهکار در مهندسی رودخانه به شمار می رود [۱۴۸].

۹-۲- مدل‌های فیزیکی رودخانه

مدل‌سازی فیزیکی رودخانه، بررسی یک پدیده و یا پیش‌بینی رفتار رودخانه از طریق ساخت یک مدل مشابه کوچک‌تر و مطالعه آن در مدل است. مدل‌های رودخانه‌ای از نظر اهداف و کاربرد به گروه‌های زیر تقسیم می‌گردند [۳۴].

- از نظر نوع مدل، به دو گروه بستر ثابت و بستر متحرک
- از نظر مقیاس، به دو گروه تغییر فرم نیافته و تغییر فرم یافته
- از نظر رژیم جریان، به دو گروه جریان پایدار (با بده ثابت) و جریان ناپایدار (با بده متغیر)
- از نظر انتقال رسوب، به دو گروه جریان آب (بدون بار رسوبی) و جریان آب و رسوب

در مدل، تشابه هیدرولیکی (هندسی، سینماتیکی و یا دینامیکی) تا حد ممکن باید فراهم گردیده و شرایط مرزی (هندسه بستر آبراهه و دیواره‌های جانبی و تاسیسات و موانع موجود) و شرایط جریان بالادست تا پایین‌دست بازه رودخانه مورد نظر با روش مناسب مقیاس شوند [۵۲]. در فرآیند مدل‌سازی فیزیکی چهار مرحله وجود دارد: طراحی و ساخت مدل، واسنجی مدل براساس اطلاعات موجود، ارزیابی و تایید مدل براساس اطلاعات موجود و کاربرد مدل برای شرایط دیگر [۳۴ و ۵۲].

۹-۲-۱- مدل‌های تغییر فرم نیافته

در مدل‌های فیزیکی تغییر فرم نیافته از مقیاس طبیعی استفاده می‌گردد که در آن مقیاس هندسی در سطح افق $(L_H)_r$ و در سطح قائم $(L_V)_r$ یکسان است [۳۴].

$$(L_H)_r = (L_V)_r = L_r \qquad (۱-۹)$$

مطالعات موضعی شرایط جریان و کارکرد سازه‌های اصلاح مسیر رودخانه (مانند آبشکن‌ها، صفحات مستغرق، دیواره‌های شمع‌کوب) و نیز سازه‌های هیدرولیکی در محیط رودخانه (مانند سرریزها، دریچه‌ها، سدهای انحرافی و یا مخزنی و سازه‌های وابسته) در مدل تغییر فرم نیافته صورت می‌گیرد. به طورمثال، بررسی ساختار جریان چرخشی پیرامون آبشکن‌ها در مدل بستر ثابت و مطالعه آبشستگی در پیرامون آبشکن‌ها در مدل بستر متحرک با مقیاس طبیعی امکان‌پذیر است [۵۲].

۹-۲-۲- مدل‌های تغییر فرم یافته

مدل‌های رودخانه‌ای لزوما از نوع تغییر فرم یافته هستند. عموما نسبت طول و عرض رودخانه به عمق آب و نیز به ارتفاع زبری و فرم بستری در رودخانه بسیار زیاد است. بنابراین ساخت مدل با مقیاس طبیعی از نظر فضای کار امکان‌پذیر نبوده و یا از دقت هیدرولیکی لازم برخوردار نخواهد بود [۳۴]. در مدل تغییر فرم یافته، مقیاس افقی و قائم متفاوت است. در مدل‌های رودخانه‌ای هر چند جریان با سطح آزاد است ولی علاوه بر نیروی ثقل، نیروی لزجت و یا جریان متلاطم کامل رودخانه باید شبیه‌سازی گردد. ازاین‌رو، نسبت مقیاس قائم به مقیاس افقی (e) لزوما از یک بزرگ‌تر بوده و متناسب با اهداف و نوع رودخانه ممکن است در محدوده ۳ تا ۱۲ انتخاب گردد [۵۲].

$$(L_V)_r > (L_H)_r \qquad e = [(L_V)_r / (L_H)_r] > 1 \qquad (۲-۹)$$

بررسی تاثیر طرح ساماندهی و سازه‌های حفاظتی (مانند آبشکن‌ها) بر روی جریان و پتانسیل تغییرات در بازه طولانی‌تر رودخانه در مدل بستر ثابت و تغییر فرم یافته و بر روی انتقال رسوب و تغییرات ریخت‌شناسی در بستر و راستای بازه رودخانه در مدل بستر متحرک و تغییر فرم یافته امکان‌پذیر است [۵۲].

۹-۲-۳- مدل‌های فیزیکی بستر ثابت

مدل‌های فیزیکی بستر ثابت برای مطالعه کمی خصوصیات جریان براساس هندسه ثابت آبراهه ساخته می‌گردند. مدل بستر ثابت رودخانه برای اندازه‌گیری عوامل جریان (مانند برآورد عمق آب، توزیع سرعت، تنش برشی و فشار)، ارزیابی کمی نیمرخ سطح آب در جریان‌های مختلف، تشخیص مواضع بحرانی و فرسایشی و خطرآفرین، بررسی امکان تغییرات احتمالی در سامانه رودخانه در نتیجه ساماندهی رودخانه، احداث پل، سد و یا سازه‌های حفاظتی، و نیز طراحی مدل مناسب بستر متحرک رودخانه به کار می‌آید [۱۰۲]. از مزایای مدل‌های بستر ثابت، می‌توان به سادگی ساخت و مطالعه، سهولت کنترل و تغییر هندسه مدل، ارزیابی کمی عوامل جریان، زمان کم‌تر در هر مرحله ارزیابی و دقت آن اشاره نمود [۵۲].

۹-۲-۳-۱- اصول طراحی مدل بستر ثابت

اصول طراحی مدل رودخانه‌ای با بستر ثابت و تغییر فرم یافته به ترتیب زیر خلاصه می‌گردد [۵۲]:

- برقراری تشابه فرودی
- اطمینان از برقراری جریان متلاطم کاملا زبر در مدل به عنوان شرط لازم در رفع خطای تاثیر مقیاس
- انتخاب مقیاس مناسب افقی براساس محدودیت‌های فیزیکی

- انتخاب مقیاس مناسب قائم براساس جریان متلاطم کامل و دقت کاربرد وسایل اندازه‌گیری
- مدل کردن زبری و مقاومت جریان براساس اطلاعات شاهد از نیمرخ سطح آب در رودخانه

جریان در رودخانه‌ها عموما متلاطم کامل و زبر است. برای اطمینان از وقوع جریان متلاطم کامل در مدل و اجتناب از خطای تاثیر مقیاس، معیارهای متفاوتی توسط دانشمندان مختلف در جدول (۹-۱) ارائه شده است.

جدول ۹-۱- معیارهای جریان متلاطم کامل در مجاری روباز [۵۲].

مرجع	معیار
دی-رایس	$R_e = \frac{Vh}{\nu} > 400 - 800$
راسل	$R_e = \frac{VR}{\nu} > 1000$
چاو	$R_e = \frac{VR}{\nu} > 500$
هندرسون	$R_e^* = \frac{U^* K_s}{\nu} > 100$
یالین	$R_e^* = \frac{U^* K_s}{\nu} > 70$

R: شعاع هیدرولیکی، R_e: عدد رینولدز، R^*_e: عدد رینولدز بستر، S: شیب انرژی، h: عمق آب،
U^*: سرعت برشی، **ν**: لزجت سینماتیکی، K_s: ارتفاع معادل زبری، g: شتاب ثقل

۹-۲-۳-۲- مقیاس مدل بستر ثابت

مقیاس افقی مدل رودخانه‌ای $(L_H)_r$ براساس محدودیت‌های فیزیکی (فضای مدل‌سازی، ظرفیت تامین آب برای پمپاژ و غیره) انتخاب می‌گردد. مقیاس قائم مدل $(L_V)_r$ براساس ضوابط جدول (۹-۱) و به‌ویژه معیار پیشنهادی هندرسون (جهت اطمینان از وقوع جریان متلاطم کامل در مدل)، دقت اندازه‌گیری‌ها در مدل، دقت مورد نظر در طرح، نسبت‌های پیشنهادی تغییر فرم مدل ($e= (L_V)_r / (L_H)_r$) از مطالعات پیشین (نسبت مقیاس افقی به مقیاس قائم) و با قضاوت مهندسی انتخاب می‌گردد [۳۴ و ۱۰۴].

برای مدل بستر ثابت رودخانه‌های معمولی و غیر جذر و مدی مقیاس افقی در محدوده (۱:۱۰۰۰ تا ۱:۱۰۰) و عموما (۱:۵۰۰ تا ۱:۱۰۰)، مقیاس قائم در محدوده (۱:۱۰۰ تا ۱:۲۰)، نسبت تغییر فرم مدل در محدوده (۲ تا ۱۰) وعموما (۳ تا ۶) پیشنهاد شده است. برای مدل بستر ثابت رودخانه‌های ساحلی و مصب رودخانه‌ها به دلیل عرض بسیار زیاد و عمق خیلی کم، مقیاس افقی در محدوده (۱:۲۵۰۰ تا ۱:۳۰۰)، مقیاس قائم در محدوده (۱:۱۵۰ تا ۱:۵۰) و نسبت تغییر فرم مدل در محدوده (۶ تا ۱۰) پیشنهاد شده است [۳۶ و ۴۴]. همچنین در انتخاب نهایی مقیاس، رعایت حداقل عرض مدل معادل ۰/۶ متر، حداقل عمق آب در مدل معادل ۲۰ میلی‌متر، دقت اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب در حد ۲٪ و دقت اندازه‌گیری دیگرعوامل جریان تا ۵٪ پیشنهاد شده است [۴۴ و ۵۲].

براساس تشابه فرودی (Fr)، مقیاس سرعت (V)، مقیاس زمان (T)، مقیاس بده (Q) و مقیاس ضریب زبری مانینگ (n)، به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\lambda F_r = 1 \qquad (۳-۹)$$

$$\lambda Q = (L_V)_r^{\frac{1}{2}} \quad (۴-۹)$$

$$\lambda Q = (L_V)_r^{\frac{3}{2}} (L_H)_r \quad (۵-۹)$$

$$\lambda T = (L_V)_r^{\frac{1}{2}} (L_H)_r \quad (۶-۹)$$

$$\lambda n = (L_V)_r^{\frac{2}{3}} (L_H)_r^{\frac{-1}{2}} \quad (۷-۹)$$

که در این روابط λ نسبت عامل در مدل به رودخانه است.

رابطه (۹-۷) نشان می‌دهد که بستر مدل زبرتر از بستر رودخانه خواهد بود. از نظر فیزیکی عموما مدل کردن زبری بستر با مقیاس رابطه (۹-۷) مناسب نبوده و شدت و توزیع زبری در بستر مدل از طریق واسنجی مدل با اطلاعات شاهد از نیمرخ سطح آب در رودخانه تعیین می‌گردد. در عمل برای زبر کردن بستر مدل فیزیکی از شن، قلوه‌سنگ، تورسیمی و یا عناصر مقاومت دیگر استفاده می‌شود [۵۲ و ۱۰۴].

۹-۲-۴- مدل‌های فیزیکی بستر متحرک

مدل‌های فیزیکی رودخانه‌ای با بستر متحرک برای مطالعه تاثیر متقابل خصوصیات جریان و قابلیت تغییر هندسه فیزیکی مجرای جریان در اثر فرسایش یا رسوب‌گذاری در شرایط رژیم طبیعی رودخانه یا تحت تاثیر سازه‌های ساماندهی به کار می‌روند. از موارد کاربرد این مدل‌ها می‌توان به تغییرات ریخت‌شناسی در راستا و بستر رودخانه، ارزیابی مواضع فرسایشی، رسوب‌گذاری و آبشستگی در کف و دیواره‌ها و ارزیابی گزینه‌های ساماندهی رودخانه و تاثیر سازه‌های حفاظتی بر بستر، دیواره‌ها و در سیلابدشت رودخانه اشاره نمود [۱۰۴ و ۱۰۷].

۹-۲-۴-۱- اصول طراحی مدل بستر متحرک

مدل بستر متحرک علاوه بر اصول طراحی مدل بستر ثابت در بند (۹-۲-۳-۱)، باید قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان جریان رودخانه، حرکت مواد بستری و انتقال رسوب را داشته باشد. دراین‌صورت مقیاس مدل، شیب بستر، شیب دیواره‌ها و نوع مواد بستری (اندازه و وزن مخصوص) باید به گونه‌ای باشد تا قابلیت حرکت و انتقال مواد رسوبی را فراهم نماید. از این‌رو، مدل‌های بستر متحرک نه تنها تغییر فرم یافته هستند بلکه ممکن است مقیاس شیب و مواد بستری آنها از مقیاس هندسی مدل متفاوت باشد. به‌هرحال، انتخاب نوع و مقیاس مواد بستری از مشکلات اساسی مدل‌های بستر متحرک است. به همین دلیل، تشابه کامل هندسی و تشابه فرودی بین مدل و رودخانه امکان‌پذیر نیست [۵۲ و ۱۰۲].

با وجود عدم حصول تشابه کامل، کاربرد رابطه تشابه فرودی (۹-۳) اجتناب‌ناپذیر است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در اعداد فرود کم (در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴)، خطای حاصل از عدم تساوی عدد فرود در مدل و رودخانه قابل قبول است [۱۰۲]. اصول تشابه انتقال رسوب در مدل بستر متحرک با مقطع عریض رودخانه، با روابط زیر تبیین می‌گردد [۵۲ و ۱۰۲].

$$\lambda F_S = (L_V)_r^2 (L_H)_r^{-1} \lambda\alpha^{-1} \lambda d^{-1} = 1 \quad (۸-۹)$$

$$\lambda R_e^* = (L_V)_r^2 (L_H)_r^{-1} \lambda d^2 = 1 \quad (۹-۹)$$

$$\lambda q_S = 1 \quad (۹-۱۰)$$

که در این روابط:

F_s: تابع بدون بعد شیلدز، R^*_e: عدد رینولدز بستر، q_s: بار رسوبی در واحد عرض، d: اندازه مواد بستری، $\alpha=(S_g-1)$: چگالی نسبی مستغرق مواد بستری، S_g: چگالی نسبی مواد بستری، $(L_H)_r$: مقیاس افقی، $(L_V)_r$: مقیاس قائم و λ نسبت عامل در مدل به رودخانه است.

در مدل بستر متحرک، عدم حصول تشابه کامل هندسی و تشابه فرودی، همراه با محدودیت اندازه‌گیری دقیق عوامل جریان در حال تحول و تغییر فرم بستر سبب می‌گردد تا ارزیابی نتایج مدل بیش‌تر به‌صورت کیفی بوده و یا در شرایط تعادل دینامیکی بستر میسر باشد. از این‌رو، مدل بستر متحرک عموما در تکمیل مطالعات و همگام با مدل بستر ثابت رودخانه ساخته می‌شود [۵۷ و ۱۰۲]. همچنین طرح، ساخت و کارکرد مدل بستر متحرک لزوما با آزمون و خطا همراه بوده و زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد.

۹-۲-۴-۲- مقیاس مدل بستر متحرک

به‌طورکلی انتخاب مقیاس در مدل بستر متحرک تابع ضوابط و معیارهای مدل بستر ثابت و تغییر فرم یافته در بند(۹-۲-۳-۱)، قابلیت انتقال رسوب بستری، و روابط (۹-۱۱) و (۹-۱۵) است. به‌طور خاص، برای مدل بستر متحرک یک بازه طولانی رودخانه مقیاس افقی در محدوده (۱:۱۰۰۰ تا ۱:۱۰۰) و عموما (۱:۵۰۰ تا ۱:۱۰۰)، مقیاس عمودی در محدوده (۱:۱۰۰ تا ۱:۲۰)، نسبت تغییر فرم مدل در محدوده (۱ تا ۹) و عموما کم‌تر از ۵ پیشنهاد شده است [۳۴ و ۵۲]. برای ارزیابی کارکرد آبشکن‌ها، مدل با نسبت تغییر فرم کم‌تر از ۳ یا ۵ و برای بررسی عوارض موضعی نظیر آبشستگی پیرامون آبشکن‌ها، مدل با نسبت تغییر فرم در محدوده (۱ تا ۲) پیشنهاد شده است [۳۴، ۵۲ و ۹۸].

براساس تشابه فرودی، و تشابه انتقال رسوب در روابط (۹-۸) تا (۹-۱۰)، مقیاس عوامل مهم در مدل بستر متحرک به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [۳۴ و ۱۰۲].

$$\lambda\alpha = \lambda d^{-3} \quad (۹-۱۱)$$

$$\lambda T_h = (L_V)_r^{\frac{-1}{2}} (L_H)_r \quad (۹-۱۲)$$

$$\lambda T_S = (L_V)_r (L_H)_r \quad (۹-۱۳)$$

$$(L_H)_r = \lambda\alpha^{\frac{5}{3}} \lambda F_r^{-6} \quad (۹-۱۴)$$

$$(L_V)_r = \lambda\alpha^{\frac{7}{6}} \lambda F_r^{-3} \quad (۹-۱۵)$$

$$\lambda V = (L_V)_r^{\frac{1}{2}} \quad (۹-۱۶)$$

$$\lambda Q = (L_V)_r^{\frac{3}{2}} (L_H)_r \quad (۹-۱۷)$$

که در این روابط:

F_r: عدد فرود، T_h: زمان جریان آب، T_s: زمان انتقال رسوب و λ نسبت عامل در مدل به رودخانه است. دیگر عوامل قبلا تعریف شده است.

رابطه (۹-۱۱) بیانگر ارتباط میان اندازه مواد بستری (d) با شاخص نوع مواد بستری در مدل ($\alpha=S_g$ -1) است. از این‌رو می‌توان در مدل رودخانه‌های با بستر ریزدانه و ماسه‌ای از مواد درشت‌تر ولی سبک‌تر و در مدل رودخانه‌های با بستر درشت‌دانه از مواد ریزتر ولی سنگین‌تر استفاده نمود. مواد مختلف در مدل‌سازی بستر رودخانه استفاده می‌گردد ولی باید به سایش و انحلال مقاوم بوده و چگالی نسبی آن (S_g) برای غلبه به کشش سطحی حداقل ۱/۱ باشد [۷۱]. منحنی دانه‌بندی مواد بستری در مدل نیز تا حد ممکن باید موازی با منحنی دانه‌بندی مواد بستری رودخانه باشد. برای اصول مدل‌سازی بستر متحرک به مراجع [۳۴، ۵۲،۷۱، ۹۸ و ۱۰۴] مراجعه گردد.

۹-۳- مدل‌های ریاضی رودخانه‌ای

مدل‌های ریاضی با استفاده از روابط ریاضی و عموما با روش حل عددی، تحت شرایط اولیه و مرزی معین، قابلیت بررسی جریان رودخانه‌ای را دارند. بررسی قابلیت مدل‌های مختلف برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان در یک بازه رودخانه‌ای مانند عمق، سرعت و تنش برشی در کناره‌های رودخانه از نیازهای اساسی در طرح‌های مهندسی رودخانه است. با این وجود از نظر کاربردی، نیاز حداقل به اطلاعات صحرایی، حجم محاسباتی اندک و درجه اعتماد کاربرد مدل‌های ریاضی در شرایط رودخانه‌های طبیعی اهمیت دارد.

۹-۳-۱- محاسن مدل‌های ریاضی

- انعطاف‌پذیری در انطباق با شرایط مرزی و هندسه طبیعی رودخانه (پوشش شبکه محاسباتی)
- قابلیت ایجاد شرایط متنوعی از جریان در رودخانه (تعدد آزمون سیلاب‌ها)
- قابلیت ایجاد شرایط متنوعی از گزینه‌های ساماندهی و تاثیر حضور سازه‌های مختلف
- عدم تاثیر مقیاس در طراحی مدل برخلاف مدل‌های فیزیکی
- دقت کافی در مواردی که مدل سابقه کاربردی و جهانی داشته باشد
- سرعت بالا و کاهش هزینه در شبیه‌سازی جریان

۹-۳-۲- محدودیت‌های مدل‌های ریاضی

- معادلات حاکم برای شرایط مختلف جریان (نظیر جریانات متلاطم، گردابی، ثانویه و...) هنوز کاملا توسعه نیافته است.
- حل ریاضی برخی معادلات دیفرانسیل اصلی هنوز توسعه نیافته است.
- نیازمند مهارت زیاد در روش حل عددی، پایداری حل و اندازه بهینه شبکه محاسباتی و انطباق آن با هندسه مرزی رودخانه و سازه‌های وابسته است.
- جهت توسعه مدل، واسنجی و تایید و ارزیابی کارکرد آن، هنوز نیازمند شواهد فیزیکی مستند و دقیق از رودخانه‌ها و یا مدل‌سازی فیزیکی است.

مدل‌های ریاضی رودخانه‌ای از نظر اهداف و کاربرد به گروه‌های زیر تقسیم می‌گردند [۵۲ و ۱۰۴]:

الف- از نظر بعد به پنج گروه:

- مدل یک بعدی (معادلات جریان یک بعدی در راستای اصلی جریان حل شده و متوسط عوامل جریان در هر مقطع عرضی محاسبه گردیده و توزیع عرضی یا عمقی سرعت در نظر گرفته نمی‌شود.)
- مدل شبه دو بعدی (محدوده عرضی راستای اصلی جریان به تعدادی از لوله‌های جریان و به موازات یکدیگر تقسیم می‌گردد. معادلات یک بعدی در راستای لوله‌های جریان حل شده، و متوسط عوامل جریان در هر مقطع در جهت عرضی نیز محاسبه می‌گردد.)
- مدل دو بعدی (معادلات دیفرانسیل دو بعدی در سامانه مختصات سطح افق یا سطح قائم با استقرار شبکه عددی حل می‌گردد)
- مدل سه بعدی (معادلات دیفرانسیل سه بعدی در سامانه مختصات طول، عرض و عمق با استقرار شبکه عددی حل می‌گردد)
- مدل شبه سه بعدی (معادلات دیفرانسیل دو بعدی با مختصات طول و عرض در سطوح متوالی افقی در امتداد عمق با استقرار شبکه عددی حل می‌گردد)

ب- از نظر انتقال رسوب به دو گروه:

- مدل جریان یا مدل بستر ثابت (بستر ثابت یا بستر پایدار – حل معادلات جریان آب)
- مدل بستر متحرک یا مدل ریخت‌شناسی (بستر قابل فرسایش- حل معادلات جریان آب و انتقال رسوب)

ج- از نظر رژیم جریان به سه گروه:

- مدل جریان پایدار (با بده ثابت و منفرد- حل معادلات پایدار) - جریان ناپایدار (با بده متغیر یا آبنگار جریان- حل معادلات ناپایدار)
- مدل جریان شبه پایدار (آبنگار جریان به گام‌های زمانی متوالی، با بده ثابت در هر گام تبدیل شده - حل معادلات پایدار جریان و یا معادلات ناپایدار رسوب برای بده‌های ثابت متوالی)

۹-۳-۲-۱- مدل‌های یک بعدی

مدل‌های یک بعدی خصوصیات جریان را فقط در راستای عمومی جریان بررسی می‌کنند. این مدل‌ها با بهره‌گیری از حداقل اطلاعات صحرایی و حجم محاسباتی اندک، در بیش‌تر موارد کاربردی نتایج قابل اعتمادی را از متوسط خصوصیات جریان در مقاطع عرضی (سرعت، عمق، تنش برشی، و...) ارائه می‌نماید. به‌هرحال مدل‌های یک بعدی نمی‌توانند ساختارهای جریان ثانویه در پیچ‌ها و اندرکنش بین نواحی کم‌عمق و عمیق از رودخانه را شبیه‌سازی کنند. لذا کاربرد این مدل‌ها برای رودخانه‌های سیلابدشتی به‌ویژه در نوار تداخل جریان بین مجرای اصلی و بستر سیلابی دقیق نخواهد بود. هنوز درجه اعتماد کاربرد مدل‌های ریاضی پیچیده‌تر در رودخانه‌های طبیعی در مقایسه با مدل‌های یک بعدی مورد سوال می‌باشد [۱۴۶].

برخی مدل‌های یک بعدی با کاربرد عمومی در مهندسی رودخانه در زیر معرفی و توصیه می‌گردد.

- **مدل HEC–RAS**

مدل HEC–RAS مدل یک بعدی است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی انجمن مهندسی ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته و در طرح‌های مهندسی رودخانه در سطح جهان از اعتبار و اطمینان کافی برخوردار است. مدل HEC–RAS در سال ۱۹۹۳ جایگزین مدل HEC–2 گردید. در حال حاضر، قابلیت شبیه‌سازی جریان پایدار یا جریان ناپایدار در شرایط بستر ثابت با نسخه شماره ۴ مدل (HEC–RAS 4.0) فراهم می‌باشد. در این مدل معادلات در حالت جریان پایدار به روش استاندارد گام به گام و در حالت ناپایدار به روش تفاضل‌های محدود ضمنی حل می‌گردند. مدل می‌تواند در جریان زیر بحرانی، فوق بحرانی و یا ترکیبی، عوامل جریان و نیمرخ سطح آب را محاسبه کند. این مدل توانایی تحلیل هیدرولیکی پل، کالورت، سرریز، دیواره‌های ساحلی و سازه‌های متقاطع دیگر، همچنین قابلیت محاسبات آبشستگی پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل و دیگرسازه‌ها را دارد [۱۳۳]. بخش انتقال رسوب مدل HEC–RAS از ماه نوامبر ۲۰۰۶ فعال شده و از ماه می ۲۰۰۷ به طور آزمایشی در اختیار عموم قرار گرفته است. مدل آزمایشی قابلیت محاسبه ظرفیت انتقال رسوب را از شش روش مختلف هیدرولیکی و براساس متوسط خصوصیات جریان در هر زیر بازه دارد. نسخه کامل این مدل با قابلیت ارزیابی شدت فرسایش و رسوب‌گذاری و شبیه‌سازی یک بعدی تغییرات فرم بستری به‌زودی فراهم خواهد گردید.

عمومیت کاربرد مدل HEC–RAS، درجه اعتماد به نتایج آن، سادگی کاربری مدل، ارزانی و سهولت دسترسی به مدل و راهنمای کاربری آن، از امتیازات این مدل است. برای کارایی بهتر توصیه می‌گردد که در بازه‌های مارپیچ رودخانه، مقاطع عرضی باید به هم نزدیک باشند تا پلان بازه در مدل واقعی‌تر معرفی شده، و دقت محاسبات مدل افزایش یابد. در شرایط حضور آبشکن‌ها در رودخانه، خط کنترل ساحلی منطبق بر راستای دماغه آبشکن‌ها (همانند دیواره ساحلی طولی) به مدل معرفی می‌گردد. دراین‌صورت، متوسط خصوصیات جریان انحراف یافته به بستر اصلی رودخانه محاسبه می‌گردد.

- **مدل MIKE-11**

مدل یک بعدی MIKE-11 توسط انستیتو هیدرولیک دانمارک (DHI) جهت شبیه‌سازی جریان آب و انتقال رسوب در رودخانه‌ها و مجاری آبرفتی توسعه یافته است. این مدل برای جریان پایدار و ناپایدار، برای جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی و شرایط بستر ثابت و متحرک می‌تواند به‌کار رود [۶۱]. مدل با وجودی که یک بعدی است، در رودخانه‌های سیلابدشتی با مقطع مرکب به‌صورت شبه دو بعدی عوامل هیدرولیکی را محاسبه می‌نماید. مدل همچنین قادر است محاسبات انتقال رسوبات چسبنده و غیرچسبنده را انجام داده، و اثرهای سازه‌های مختلف در مسیر آبراهه را در نظر گیرد [۶۱]. سابقه کاربری و درجه اعتماد عمومی به مدل خوب، ولی نسخه اصلی آن بسیار گران است.

- **مدل HEC-6**

مدل یک بعدی جریان آب و انتقال رسوب HEC-6 توسط انجمن مهندسی ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته است. این مدل تغییرات بستر رودخانه‌ها و مخازن سدها را در دراز مدت یا در جریان یک سیل منفرد چند ساعته یا چند روزه، در شرایط جریان

جریان پایدار یا ناپایدار شبیه‌سازی می‌کند. جریان ناپایدار در مدل به روش شبه پایدار در هر گام زمانی از آبنگار حل می‌گردد. همچنین فرآیند تشکیل لایه محافظ سطحی بستر قابل ارزیابی است [۱۳۰].

۹-۳-۲-۲- مدل‌های شبه دو بعدی

مفهوم شبه دو بعدی، کاربرد و حل معادلات یک بعدی انرژی و اندازه حرکت و یا معادلات پیوستگی رسوب یک بعدی با استفاده از فرضیه استقرار لوله‌های جریان (به موازات و همسایگی یکدیگر) در گستره عرضی رودخانه است. در این‌صورت خصوصیات جریان و انتقال رسوب برای هر یک از لوله‌های جریان در عرض رودخانه محاسبه می‌شود [۱۳۷]. ازاین‌رو، توزیع عرضی عوامل جریان و رسوب را می‌توان ارزیابی نمود.

مهم‌ترین مدل شبه دو بعدی با کاربرد عمومی در مهندسی رودخانه مدل BRI-STARS است که در ادامه معرفی می‌گردد.

– مدل BRI-STARS

مدل BRI-STARS مدل شبه دوبعدی و شبه پایدار جریان آب و انتقال رسوب است که توسط سازمان فدرال بزرگراه‌های آمریکا (FHWA) در سال ۲۰۰۰ توسعه یافته است. نسخه اول این مدل به نام GSTARS در سال ۱۹۸۶ برای اداره عمران اراضی آمریکا (USBR) تهیه گردید. سپس نسخه جدیدتر آن با قابلیت شبیه‌سازی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه با نام GSTARS2/0 توسط یانگ و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه گردید. سرانجام این مدل در سال ۲۰۰۰ تحت محیط Windows با قابلیت‌های گرافیکی و تکمیل معادلات (از جمله آبشستگی) تحت نام BRI–STARS توسط FHWA ارائه گردید [۱۳۷]. اصول نظری و قابلیت‌های نسخه (BRI–STARS 3.3) با نسخه جدیدتر مدل (GSTARS 3.0) مشابه است، ولی کاربرد مدل BRI–STARS بیش‌تر است.

در مدل BRI-STARS از معادلات یک بعدی انرژی و اندازه حرکت مشابه مدل HEC-RAS و معادلات پیوستگی رسوب یک بعدی و روابط مختلف بار رسوبی مواد چسبنده و غیرچسبنده استفاده شده است. مدل می‌تواند محاسبات نیمرخ سطح آب را در شرایط جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی بدون گسستگی انجام دهد. از تئوری لوله جریان برای محاسبات هیدرولیکی به روش شبه دو بعدی استفاده شده است. به طوریکه با استفاده از فرضیه استقرار لوله‌های جریان در عرض رودخانه، قابلیت محاسبه خصوصیات جریان را در چند زیر مقطع عرضی برای شرایط جریان پایدار یا ناپایدار (با روش تحلیل شبه پایدار) دارد. این مدل همچنین بار رسوبی، تغییرات نیمرخ طولی بستر در اثر فرسایش یا رسوب‌گذاری، تغییرات عرضی رودخانه، هیدرولیک پل و آبشستگی موضعی را محاسبه می‌کند [۱۳۷].

BRI-STARS، یک مدل ریخت‌شناسی ساده با انعطاف‌پذیری زیاد است. با یک لوله جریان، مدل تبدیل به یک مدل یک بعدی می‌شود. هنگامی‌که از زیر برنامه روندیابی رسوب استفاده نشود، مدل محاسبات هیدرولیکی را برای بستر ثابت انجام می‌دهد. هنگامی‌که از زیر برنامه توان حداقل رودخانه استفاده نشود، مدل محاسبات جریان و یا تغییرات کف بستر را برای رودخانه با عرض ثابت انجام می‌دهد. شبیه‌سازی فرآیندهای رسوب‌گذاری و آبشستگی موضعی با این مدل در رودخانه می‌سی‌سی‌پی در نزدیکی سنت لوئیز موفقیت آمیز گزارش شده است [۱۳۷].

توسعه کاربرد مدل، درجه اعتماد نسبی به نتایج آن، سادگی کاربری، سهولت دسترسی و راهنمای کاربری آن، و محاسبه توزیع عرضی عوامل جریان آب و رسوب رودخانه از امتیازات مدل BRI-STARS است. با این وجود نتایج مطالعات مستقل نشان می‌دهد که برخلاف مدل HEC-RAS، مدل BRI-STARS در حصول به پایداری حل ریاضی نسبت به موقعیت و فاصله مقاطع عرضی (به‌ویژه که مدل قابلیت میان یابی مقاطع را ندارد)، نسبت به انتخاب اندازه مناسب گام زمانی آبنگار (در روش تحلیل شبه پایدار)، نسبت به شدت غیریکنواختی جریان، نسبت به انتخاب تعداد لوله‌های جریان (در شرایط تحلیلی بستر متحرک)، نسبت به شدت بار رسوبی ورودی به بازه و نسبت به انتخاب روابط بار رسوبی بسیار حساس است. براساس این مطالعات، برای ارزیابی بار رسوبی کم‌تر از پنج لوله جریان، برای بررسی تغییرات کف بستر حداکثر سه لوله و برای تغییرات عرضی بستر انتخاب یک لوله جریان مناسب‌تر است [۱۳۷].

۹-۳-۲-۳- مدل‌های دو بعدی

در مدل دو بعدی، معادلات دو بعدی جریان نظیر معادلات ناویر- استوکس به کار رفته که علاوه بر سرعت عرضی و تلاطم جریان، اثرهای اصطکاک و مقاومت جریان نیز در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌های دوبعدی سطح افق (متوسط عمقی)، از توزیع سرعت در جهت قائم و شتاب‌های عمودی صرفنظر می‌شود. ازاین‌رو اثرهای جریان‌های ثانویه حلزونی در فرسایش بستر و دیواره‌ها نادیده گرفته می‌شود. اما جهت شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌های مارپیچی و سیلابدشتی (با مقطع مرکب) قابلیت انطباق بهتری دارند [۱۳۰].

برخی مدل‌های دو بعدی با کاربرد عمومی در مهندسی رودخانه در زیر معرفی و توصیه می‌گردد.

- **مدل FAST-2D**

مدل دوبعدی سطح افق FAST-2D در موسسه هیدرومکانیک دانشگاه کارلسروهه آلمان توسعه یافته و با داده‌های تجربی در آزمایش‌های بستر ثابت و بستر متحرک و نیز شرایط رودخانه‌ای مورد آزمون قرار گرفته است. این مدل به زبان برنامه‌نویسی فرترن ۷۷ نوشته شده است و قابلیت اجرا با نسخه‌های جدید فرترن را نیز دارد [۱۵۱].

ویژگی‌های اصلی انتخاب مدل FAST-2D عبارت است از:

- برنامه FAST-2D برای حل معادلات حاکم بر جریان از طریق روش حجم محدود همراه با شبکه‌بندی بازه مورد مطالعه با خطوط منحنی الخط، استفاده می‌کند. لذا برای رودخانه‌های طبیعی با شکل هندسی پیچیده و با حضور سازه‌های هیدرولیکی و به‌ویژه آبشکن‌ها به سهولت قابل انطباق است.
- این مدل معادلات بیضوی را با مدل تلاطم استاندارد $K-\varepsilon$ به‌کار می‌گیرد که برای تحلیل جریان‌های چرخشی اطراف سازه‌های هیدرولیکی و به‌ویژه آبشکن‌ها ضروری است.
- FAST-2D برنامه‌ای است انعطاف‌پذیر به زبان فرترن، که قابلیت اصلاح و تطبیق با وضعیت‌های مختلف جریان پایدار و ناپایدار را دارد.

- مدل دوبعدی FAST-2D در مدل‌های فیزیکی رودخانه‌ای در شرایط بستر ثابت و بستر متحرک توسط یاسی (۱۹۹۷) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان داد که مدل اصلاح شده FAST-2D قابلیت لازم برای محاسبه خصوصیات جریان پیرامون آبشکن‌ها در بستر تخت و یا بستر ناهموار را با حضور آبشکن‌ها دارد [۱۴۷].
- کاربرد این مدل برای دامنه وسیعی از جریانات رودخانه راین (با حضور آبشکن‌ها و دیگر سازه‌های رودخانه‌ای) رضایت بخش بوده است [۱۴۱ و ۱۴۲].
- مقایسه نتایج محاسبات عوامل مشترک جریان (مانند عمق متوسط، سرعت متوسط، تنش برشی متوسط و عدد فرود) از مدل یک بعدی HEC-RAS و مدل دو بعدی FAST–2D در شرایط فیزیکی یکسان در رودخانه نازلو (ارومیه) نشان داد که: الف- هر چه تغییرات جریان در طول بازه رودخانه کم‌تر باشد، نتایج دو مدل FAST-2D و HEC-RAS مطابقت بیش‌تری با هم دارند، ب- درصد نسبی تفاوت برآورد دو مدل در بده‌های بالا، کم‌تر از بده‌های پایین است، ج- ارتفاع سطح آب محاسبه شده با مدل FAST–2D نسبت به مدل HEC-RAS کم‌ترین خطا را در مقایسه با عوامل دیگر دارد و د- مدل FAST–2D تمامی عوامل هیدرولیکی (غیر از ارتفاع سطح آب) را به‌طور متوسط ۱۸ درصد کم‌تر از مدل HEC-RAS برآورد می‌کند [۲۸].
- نتایج اندازه‌گیری و تحلیل عوامل مشترک جریان در مدل فیزیکی رودخانه نازلو با نتایج نظیر شبیه‌سازی شده از مدل FAST-2D در شرایط اولیه و مرزی مشترک و در مقیاس طبیعی رودخانه مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. متوسط خطای نسبی برآورد مدل FAST-2D برای ارتفاع سطح آب ۵/۵ درصد و برای سرعت متوسط ۱۶ درصد بود [۲۵ و ۴۴].

- مدل TELEMAC

مدل ریاضی دو بعدی سطح افق TELEMAC2D، از سال ۲۰۰۰ توسط آزمایشگاه ملی هیدرولیک و زیست محیطی- وزارت نیرو فرانسه (LNHE-EDF) توسعه یافته، و به‌تدریج توسط سازمان فدرال پژوهش و مهندسی رودخانه آلمان (BAW) آلمان تکمیل گردیده و به‌طور گسترده‌ای در مطالعات رودخانه‌ای استفاده می‌گردد [۸۶]. در این مدل، معادلات متوسط عمقی سنت ونانت با فرض جریان کم عمق، شیب کم و توزیع هیدرواستاتیکی فشار به روش اجزای محدود به‌صورت عددی حل می‌گردد. شرایط مرزی رودخانه طبیعی با پیچیدگی‌های توپوگرافی و نیز هندسه سازه‌های رودخانه‌ای با انطباق و تغییر اندازه شبکه نامنظم مثلثی قابل معرفی به مدل می‌باشد. نتایج کاربرد و انطباق این مدل ریاضی با مدل‌های فیزیکی بازه‌های مختلف رودخانه فرا مرزی راین و شاخه‌های اصلی آن در اروپا (برای شبیه‌سازی شرایط کشتیرانی، کنترل سیلاب و به‌ویژه کارکرد آبشکن‌ها) مناسب گزارش شده است [۸۶].

- مدل RMA–2 (TABS)

مدل دو بعدی سطح افق جریان پایدار و ناپایدار است که توسط گروه مهندسان ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته است. این مدل اثرهای دینامیکی باد، اصطکاک بستر و تلاطم را در نظر می‌گیرد. کاربرد این مدل به‌ویژه در رودخانه‌های سیلابدشتی با مقطع مرکب بسیار مناسب گزارش شده است [۱۳۱].

- **مدل HIVEL-2D**

HIVEL-2D مدل دوبعدی جریان است که، توسط گروه مهندسان ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته است. این مدل قابلیت ارزیابی جریان پایدار را تحت شرایط زیر بحرانی، فوق بحرانی و یا ترکیبی دارد. کاربرد مدل برای شبیه‌سازی جریان در مجاری با سرعت زیاد، برای جهش آبی و موج‌های ایستا و برای نیمرخ سطح آب در پیچ‌ها مناسب گزارش شده است [۱۳۱].

- **مدل MIKE 21**

مدل دو بعدی MIKE-21 توسعه نسخه یک بعدی MIKE-11 است که برای شبیه‌سازی سامانه رودخانه‌های سیلابدشتی، دریاچه‌ها و سواحل و نیز بررسی تاثیرات لایروبی رودخانه‌ها و به‌ویژه ناحیه مصب رودخانه‌ها مناسب گزارش شده است [۶۱]. این مدل که توسط انستیتو هیدرولیک دانمارک (DHI) توسعه یافته است، قادر است محاسبات انتقال رسوبات چسبنده و غیرچسبنده را انجام داده و اثرهای سازه‌های مختلف در مسیر آبراهه را در نظر گیرد. سابقه کاربری و درجه اعتماد عمومی به مدل خوب، ولی نسخه اصلی آن بسیار گران است.

۹-۳-۲-۴- مدل‌های سه بعدی

مدل‌های سه بعدی با کاربری عمومی و قابل اعتماد در رودخانه‌ها، بسیار اندک هستند. از این میان، می‌توان از سه مدل جریان سه بعدی CCHE-3D، FLOW3D، و FLUENT نام برد. نتایج بررسی مستقل نشان داد که قابلیت شبیه‌سازی مشخصات ناحیه جریان چرخشی در پیرامون آبشکن‌ها با مدل سه بعدی CCHE-3D بهتر از مدل دو بعدی FAST-2D نبوده است [۱۴۷]. توصیه کاربرد مدل‌های دیگر سه بعدی برای شرایط حضور سازه‌هایی نظیر آبشکن‌ها در رودخانه، نیاز به ارزیابی بیش‌تر و انتشار مطالعات قابل اعتماد جهانی دارد.

منابع و مراجع

۱- استاندارد مهندسی آب کشور ۱۱۳، (۱۳۷۷) ، "فرهنگ مهندسی رودخانه"، نشریه استاندارد شماره ۱۱۳، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۲- استاندارد مهندسی آب کشور ۲۱۴، (۱۳۸۰) ، "راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری گوره‌ها"، نشریه استاندارد شماره ۲۱۴، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۳- استاندارد مهندسی آب کشور ۲۴۲، (۱۳۸۰) ، راهنمای مهار سیلاب رودخانه (روش‌های سازه‌ای)، نشریه استاندارد شماره ۲۴۲، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۴- استاندارد مهندسی آب کشور ۲۴۸، (۱۳۸۱) ، "فرسایش و رسوب‌گذاری در محدوده آبشکن‌ها"، نشریه استاندارد شماره ۲۴۸، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۵- استاندارد مهندسی آب کشور ۲۶۷، (۱۳۸۲) ، "راهنمای مهار فرسایش و حفاظت رودخانه‌ها"، نشریه استاندارد شماره ۲۶۷-الف، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۶- استاندارد مهندسی آب کشور ۳۰۷، (۱۳۸۴) ، "راهنمای پهنه بندی سیل و تعیین حد بستر و حریم رودخانه"، نشریه استاندارد شماره ۳۰۷، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۷- استاندارد مهندسی آب کشور ۳۳۲، (۱۳۸۴) ، "راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری پوشش‌ها درکارهای مهندسی رودخانه"، نشریه استاندارد شماره ۳۳۲، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۸- استاندارد مهندسی آب کشور ۳۳۶، (۱۳۸۴) ، "راهنمای برداشت مصالح رودخانه‌ای"، نشریه استاندارد شماره ۳۳۶، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۹- استاندارد مهندسی آب کشور ۸۰، (۱۳۷۹) ، "دستورالعمل ارزیابی زیست محیطی طرح‌های مهندسی رودخانه"، نشریه استاندارد شماره ۸۰، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۱۰- استاندارد مهندسی آب کشور ۱۰، (۱۳۷۱) ، "راهنمای مطالعات طرح‌های کنترل سیلاب"، کتاب شماره ۱۰، دفتر استانداردها و معیارهای فنی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۱۱- بهرامی، ا.، (۱۳۸۳) ،" بررسی صحرایی پدیده آبشستگی در اطراف آبشکن‌های رودخانه‌ای"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز.

۱۲- بیگی، ح.، (۱۳۸۵) ، "دیواره‌های شمع کوب در رودخانه‌ها"، سمینار کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، تحت راهنمایی دکتر مهدی یاسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۱۳- تلوری، ع.، (۱۳۸۳) ، "اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه"، انتشارات وزارت جهاد کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران.

۱۴- جوان، م. و همکاران، (۱۳۶۹) ، "طرح و آنالیز و اجرای سازه‌های توری‌سنگی (گابیون)"، دفتر مطالعات آب حاسب کرجی، معاونت امور آب وزارت جهاد سازندگی، ایران، ۷۰۲ ص.

۱۵- حبیبی، م. و حسینی ا.، (۱۳۸۰) ، "معیارهای طراحی آبشکن‌ها براساس آخرین تحقیقات انجام شده"، نخستین همایش ملی سازه‌های کنترل فرسایش و باز یافت اراضی در رودخانه‌ها و مسیل‌ها، خرم آباد.

۱۶- حسنلو، م.ر.، وفاخواه، م. و رابط، ع.، (۱۳۸۱) ،" بررسی عملکرد اپی های احداثی بر روی رودخانه زنجان‌رود"، ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

۱۷- حسینی ا.و حبیبی، م.، (۱۳۸۴) ، "ارزیابی فنی آبشکن‌های احداث شده برای حفاظت از اراضی سواحل زنجان رود"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه کرمان، کرمان.

۱۸- رزمجو، م.ق.، (۱۳۸۱) ، "تاثیر فاصله آبشکن‌های باز بر روی آبشستگی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۱۹- زندنیا، ف.، (۱۳۸۳) ، "مقایسه خصوصیات جریان در شرایط بستر ثابت با دو مدل (HEC-RAS و BRI-STARS) و ارزیابی تغییرات بستر با مدل (BRI-STARS) در رودخانه‌های با بستر درشت‌دانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، تحت راهنمایی دکتر مهدی یاسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۲۰- سپهوند، ک.خ.، (۱۳۸۱) ، "بررسی تاثیر اپی بر حاشیه رودخانه سزار"، ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲۱- شریفی منش، ح.، (۱۳۷۳) ، "بررسی و مقایسه میزان آبشستگی اطراف آبشکن‌های باز با استفاده از مدل هیدرولیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲۲- طالب بیدختی، ن.، (۱۳۸۰) ، "ساماندهی رفتار رودخانه و بررسی روش‌های مختلف حفاظت سواحل رودخانه"، بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، شیراز.

۲۳- طالب بیدختی، ن. و همکاران، (۱۳۸۲) ،" فرهنگ تخصصی فرسایش و رسوب"، انگلیسی- فارسی، کمیته تخصصی فرسایش و رسوب، دفتر مطالعات و ارزیابی آبریزها، معاونت آبخیزداری، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، تهران.

۲۴- عباسی، ع. ا. و همکاران، (۱۳۷۵) ، "بررسی تاثیر طول، فاصله و شکل آبشکن گابیونی در حفاظت سواحل رودخانه‌ها"، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران.

۲۵- عزیزپناه، ب.، (۱۳۸۴) ، "مقایسه خصوصیات جریان در مدل فیزیکی با نتایج مدل‌های ریاضی یک بعدی، شبه دوبعدی و دوبعدی در یک بازه رودخانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، تحت راهنمایی دکتر مهدی یاسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۲۶- فتحی، ا.، (۱۳۷۱) ، "بررسی میزان آبشستگی در اطراف اپی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲۷- کمان به‌دستان، ا. ع.، (۱۳۸۱) ، "ارزیابی عملکرد چند طرح اجرا شده آبشکن جهت حفاظت سواحل به‌وسیله آبشکن‌های احداث شده در رودخانه‌های کرخه، کشکان و زهره"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تاسیسات آبیاری، گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

۲۸- ماجدی، م.، (۱۳۸۴) ، "مقایسه نتایج شبیه‌سازی خصوصیات جریان پایدار با مدل یک بعدی HEC-RAS و مدل دوبعدی FAST-2D در بازه رودخانه نازلو"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، تحت راهنمایی دکتر مهدی یاسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۲۹- محمدی، ص. و یاسی، م.، (۱۳۸۲) ، "ارزیابی روش‌های برآورد اندازه شاخص سنگ در حفاظت سنگ‌ریزه‌ای دیواره رودخانه"، دومین کنفرانس دانشجویی منابع آب و خاک، بخش آبیاری، دانشگاه شیراز، شیراز.

۳۰- مهندسین مشاور سازه پردازی، (۱۳۸۰) ،" راهنمای طراحی و ساخت دیواره‌های مهار سیلاب (گوره‌ها)"، انتشارات آوای نور، تهران، ۲۲۸ ص.

۳۱- مهندسین مشاور یکم، (۱۳۶۵) ، "طرح تثبیت دیواره رودخانه حله"، گزارش مطالعاتی سازمان آب منطقه‌ای فارس.

۳۲- میری، م.، (۱۳۷۸) ، "بررسی و مقایسه عملکرد آبشکن‌های بسته و باز یک ردیفه و دو ردیفه با استفاده از مدل هیدرولیکی"، دومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه علم و صنعت، تهران.

۳۳- نصرالهی، ع.، (۱۳۸۰) ،" بررسی اثر درصد بازشدگی روی آبشستگی اطراف آبشکن‌های باز"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۳۴- نیک صفت، غ.، (۱۳۸۰) ، "تئوری و کاربرد مدل‌های هیدرولیکی در طراحی سازه‌های آبی"، نشریه شماره ۴۰، انتشارات کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.

۳۵- نیک محضری، ر، (۱۳۷۹) ، "کاربرد مدل یک بعدی واسنجی شده HEC-RAS در محاسبات نیمرخ سطح آب رودخانه نازلو"، پایان نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، تحت راهنمایی دکتر مهدی یاسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۳۶- ولی زاده، م.، (۱۳۸۵) ، "بررسی ساختار جریان و مطالعه آبشستگی در اطراف آبشکن‌ها در حالت مستغرق در کانال مرکب"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز.

۳۷- یاسی، م.، (۱۳۶۷) ، "اصلاح مسیر و حفاظت دیواره‌های رودخانه‌های سیلابی با روش‌های طبیعی- ساختمانی"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری، دانشگاه شیراز، شیراز.

۳۸- یاسی، م.، (۱۳۶۸) ، "اصلاح مسیر و حفاظت دیواره رودخانه فهلیان"، گزارش نهایی، کمیته آب جهاد فارس، وزارت جهاد سازندگی، شیراز.

۳۹- یاسی، م.، (۱۳۷۷) ، "بررسی خصوصیات جریان و توپوگرافی کف بستر پیرامون یک آبشکن"، پنجمین سمینار مهندسی رودخانه‌ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

۴۰- یاسی، م.، (۱۳۷۷) ، "مدل ریاضی جریان چرخشی پیرامون آبشکن‌های رودخانه‌ای"، پنجمین سمینار مهندسی رودخانه ایران"، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

۴۱- یاسی، م.، (۱۳۷۸) ، "ارزیابی محاسبه توزیع تنش برشی بستر در ناحیه جریان چرخشی"، دومین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه علم و صنعت، تهران، تهران.

۴۲- یاسی، م.، (۱۳۸۳) ، "روش‌های طبیعی- سازه‌ای در ساماندهی رودخانه‌ها"، اولین کارگاه علمی- تخصصی روش‌های بیومهندسی در ساماندهی رودخانه‌ها، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران.

۴۳- یاسی، م.، (۱۳۸۴) ، "دیدگاه نوین در مهندسی رودخانه"، ششمین همایش مدیران مهندسی رودخانه شرکت های آب منطقه‌ای سراسر کشور، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۴۴- یاسی، م.، (۱۳۸۴) ،" طراحی، ساخت و مطالعه مدل فیزیکی طرح ساماندهی رودخانه نازلو- در بازه پل نازلو- با استفاده از سازه آبشکن"، گزارش نهایی طرح پژوهشی ۸۲/ک/۵، معاونت پژوهشی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴۵- یاسی، م.، (۱۳۸۵) ، "مهندسی رودخانه پیشرفته"، مطالب درسی کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴۶- یاسی، م.، خواجه ای، ا. و خانی، ج.، (۱۳۸۰) ، "مقایسه خصوصیات جریان در بستر طبیعی و بستر اصلاح شده در بازه پل نازلو- رودخانه نازل"و، اولین کنفرانس پژوهشی منابع آب و خاک استان آذربایجان غربی، دانشگاه ارومیه، ایران.

۴۷- یاسی، م. و عزیزپناه، ب.، (۱۳۸۵) ، "مقایسه خصوصیات جریان در مدل فیزیکی با نتایج مدل‌های ریاضی یک بعدی، شبه دوبعدی و دوبعدی در یک بازه رودخانه، مجله تحقیقات منابع آب ایران"، جلد ۶، شماره ۳، ص ۸۹-۷۸.

۴۸- ب- منابع خارجی

49- Ahmad، M.، (1951)، "Spacing and projection of spurs for bank protection"، Civil Engineering and Public Work Review، London; March، 172-74; and April، 256-258.

50- Ahmad، M.، (1953)، "Experiments on design and behaviour of spur dikes"، Proc.، Minnesota Int. Hydraulic Convection، the University of Minnesota، Minnesota، 145-159.

51- Alberta Transportation، (2005)، "Groynes and spurs"، M23 Factsheet، Canada.

52- Anderson، A.G.، and Davenport، J.T. ، (1968)، "The use of submerged groins for the regulation of alluvial streams. Current Problems in River Training and Sediment Movement"، Hungarian Academy of Science Symposium، Budapest، Hungary، pp. 1-8.

53- ASCE، (2000)، "Hydraulic modeling"، Concepts and practices، ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 97، American Society of Civil Engineering (ASCE)، Virginia، USA، 540p.

54- Beckstead، G.، (1975)، "Design considerations for stream groynes"، Alberta Dept. of the Environment، Technical Services Division، Edmonton، Canada.

55- Bondurant، D.C.، (1975)، "Sediment control methods- Stream channels"، in Chapter 5 of Sedimentation Engineering، ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice، No. 54، New York.

56- Carling، P. A.، F. Kohmann.، and E. Golz، (1996)، "River Hydraulics"، sediment transport and training works، their ecological relevance to European rivers، Archive Hydrobiology Supplement، Vol. 113، No. 10، 129-146

57- Charlton، F.G.، (1982)،" River stabilization and training in gravel-bed rivers"، in Chapter 23 of Gravel Bed Rivers، Edited by R.D. Hey، et al.، John Wiley and Sons Ltd.، Chichester، England، 875 p.

58- Chen، F.Y.، and Ikeda، S.، (1997)، "Horizontal separation flows in shallow open channels with spur dikes"، Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering، Vol. 15، No. 2، 15-30.

59- Chen، Y.H. et al. (1985)، "Salt River channelization project"، model study، Journal Hydraulic Division، ASCE، Vol. 111، No. 2، 267-283.

60- Copeland R. R.، (1983)، "Bank protection techniques using spur dikes"، Hydraulics Laboratory، U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station، Vicksburg، Mississippi.

61- CRC for Catchment Hydrology، (1998)، "A rehabilitation manual for Australian streams"، 2 Volumes، Edited by I. Rutherfourd et al.، Department of Civil Engineering، Monash University، Australia، 550 p.

62- DHI، (1992)، "Hydraulic Manual of Mike 11 Mode"، a microcomputer based modelling system for rivers and channels، Danish Hydraulic Institute (DHI)، Denmark.

63- Donat، M.، (1995)، "Bioengineering techniques for streambank restoration"، A review of Central European practices، Watershed Restoration Project Report No. 2، University of British Colombia، Austria.

64- DSS Large Rivers، (2000)، "A decision support system for interactive flood management and landscape planning in river systems"، Decision Support System (DSS) for Large Rivers، the Netherlands.

65- Fisher، K. and Ramsbottom، D.، (2001)، "River diversions"، A design guide، HR-Wallingford Laboratory، Thomas Telford Publishing Ltd.، London، UK، 176 p.

66- Fisher، K. R.، (1992)، "Morphological effects of river improvement works"، Recommended procedures، Report No. SR 300، HR Wallingford، UK.

67- Fisher، K. R.، (1995)، "Manual of sediment transport in rivers"، Report No. SR 359، HR Wallingford، UK.

68- Fukuoka، S.، (1989)،"Groins and vanes developed basing upon a new concept of bank protection"، Proc.، National Conference on Hydraulic Engineering، ASCE، New Orleans، La، 224-229.

69- Garde، R.J.، Subramanya، K. and Nambudripad، K.D.، (1961)، "Study of scour around spur-dikes"، Journal Hydraulic Division، ASCE، Vol. 87، No. HY6، 23-38.

70- Gill، M.A.، (1972)، "Erosion of sand beds around spur dikes"، Journal Hydraulic Division، ASCE، Vol. 98، No. HY9، 1587-1602.

71- Gray، D.H.، and Leiser، A.T.، (1982)، "Bio-technical slope protection and erosion control"، Van Nostrand Reinhold Company Inc.، N.Y.، USA.

72- Henderson، F.M.، (1966)، "Open channel flow"، The Macmillan Company، New York.

73- Hoffmans، G.J.C.، and Verheij، H.J.، (1997)، "Scour manual"، Bulkema، Rotterdam.

74- Ikeda، S.، Izumi، N. and Ito، R.، (1991)، "Effects of pile dikes on flow retardation and sediment transport"، Journal Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 117، No. 11، 1459-1478.

75- Izumi، N. et al.، (1991)، "Experimental and theoretical studies of bank erosion in rivers and its prevention by low-cost means"، Project Report No.320، ST. Anthony Falls Hydraulic Lab.، University of Minnesota، Minneapolis، Minnesota.

76- Jansen، P.Ph. et al.، (1979)، "Principles of river engineering، the non-tidal alluvial rivers"، Pitman Publishing Ltd.، London.

77- Jia، Y. and Wang، S.S.Y.، (1993)، "3D numerical simulation of flow near a spur dike"، Advances in Hydro-Science and -Engineering، Vol. I، 2150-2155.

78- Joglekar، D.V.، (1971)، "Manual on river behavior control and training"، Central Board of Irrigation and Power، Publication No. 60، India.

79- Kinory، B. Z.، and J.، Mevorach، (1984)، "Manual of surface drainage engineering"، Vol. 1 and 2، Elsevier Amesterdam، 523p.

80- Klingeman، P.C.، and Bradley، J.B.، (1976)،" Willamette river basin streambank stabilization by natural means"، Water Resources Research Institute، Oregon State University، Corvallis، Oregon، USA.

81- Koerner، R.M.، (1994)، "Designing with geosynthetics"، Balkema Book Co.، USA.

82- Kothyari، U.C.، and Ranga Raju، K.G.، (2001)، "Scour around spur dikes and bridge abutments"، Journal Hydraulic Research، IAHR، Vol. 39، No. 4، 367-374.

83- Kuhnle، R.A.، Alonso، C.V.، and Shields، F.D. Jr.، (1999)، "Geometry of scour holes associated with spur dikes"، Journal Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 125، No. 9، 972-978.

84- Kuhnle، R.A.، Alonso، C.V.، and Shields، F.D. Jr.، (2002)، "Local scour associated with Angled spur dikes"، Journal Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 128، No. 12، 1087-1093.

85- Kwan، T.F.، and Melville، B.W.، (1994)، "Local scour and flow measurements at bridge abutments"، Journal Hydraulic Research، IAHR، Vol. 32، No. 5، 661-673.

86- Lacey، R.W.، Millar، J.، and Robert، G.، (2004)، "Reach scale hydraulic assessment of instream salmonid habitat restoration"، Journal of The American Water Resources Association Vol. 40، 1631-1644.

87- Lege، T. et al.، (2003)، "2D finite- element modeling of the lower Rhine River"، The German QNET-CFD Network Newsletter، Vol. 2، No. 2، 29-33.

88- Leopold، L.B.، and Wolman، M.G.، (1957)، "River channel patterns، Braided، meandering and straight"، US Geo. Survey، Paper No. 282-C.

89- Li، R.M.، and Simons، D.B.، (1982)، "The geomorphological and hydraulic analysis of mountain streams"، in Chapter 15 of Gravel Bed Rivers، Edited by R.D. Hey، et al.، John Wiley and Sons Ltd.، Chichester، England، 875 p.

90- Maccaferri، (2004)، "River training works"، Groynes، Maccaferri Office، S.P.A. Bologna، Italy.

91- May، R.، (1998)، "Promoting the application of research in building and civil engineering"، Research Focus Issue No. 34.

92- Mayerle، R.، Toro، F.M.، and Wang، S.S.Y.، (1995)، "Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes"، Journal Hydraulic Research، IAHR، Vol. 33، No. 2، 243-256.

93- Maza Alvarez، J.A.، (1989)، "Design of groynes and spur dikes"، Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering، New Orleans، Louisiana، August 14-18، 296-301.

94- Melville، B.W.، (1992)، "Local scour at bridge abutments"، Journal Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 118، No. 4، 615-631.

95- Melville، B.W.، (1995)، "Bridge abutment in compound channels"، Journal Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 121، No. 12.

96- Melville، B.W.، (1997)، "Pier and abutment scour"، Integrated approach، Journal Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 123، NO. 2.

97- Miller، M.C. et al.، (1983)، "Physical modeling of spurs for bank protection"، Proceedings of River's 83 Conference، USA، 996-1007.

98- Nanson، G.C.، and Hickin، E.J.، (1983)، "Channel migration and incision on the Beatton River"، Journal Hydraulic Division، ASCE، Vol. 109، No. 3، 327-337.

99- Novak، P. and Cabelk، J.، (1982)، "Models in hydraulic engineering"، Pitman Book Company، P. 166.

100- Pattanaik، A.، (1966)، "The effect of groynes in rivers"، Ph.D. thesis presented to the University of Manchester، London.

101- Pavanelli، D.، and Bigi، A.، (2005)، "A New Indirect Method to estimate Suspended Sediment Concentration in a River Monitoring Programme"، Biosystems Engineering، Vol. 92، No. 4، 513–520.

102- Perdok، U. H.، (2002)، "Application of timber groynes in coastal engineering"، M.Sc. Thesis. TU delft university of Technology.

103- Petersen، M.S.، (1986)، "River engineering، Prentice-Hall"، Englewood Cliffs، N.J.، 390p.

104- Przedwojski، B.، (1995)، "Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes"، Journal. Hydraulic Research، IAHR، Vol. 33، No. 2، 257-273.

105- Przedwojski، B.، Blazejewski، R.، and Pilarczyk، K.W.، (1995)، "River training techniques"، Fundamental، Design and Application، A.A. Balkema، Rotterdam، The Netherland.

106- Rajaratnam، N. and Nwachukwu، B.A.، (1983)، "Flow near groyne-like structures"، Journal. Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 109، No. 3، 463-480.

107- Richardson، E.V. et al.، (1975)، "Highways in the river environment"، "Hydraulic and environmental design considerations"، Training and design manual، U.S. Department of Transportation، Federal Highway Administration، Washington D.C.

108- Richardson، E.V.، Stevens، M.A. and Simons، D.B.، (1975)، "The design of spurs for river training"، Proc. 16th Congress، IAHR، Basil، Vol. 2، 382-388.

109- Roger، A.، Kuhnle، C.، and Sheildsjr، D.، (2002)، "Local scour associated with angled spur dikes"، Journal. Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 128، No. 2.

110- RRC، (1997)، "Narrowing of an over-widened channel using low cost groynes"، River Avon، In Chapter 3 of Manual of River Restoration Techniques، Published by the River Restoration Centre (RRC)، England.

111- Scarameia، M.، (1998)، "River and channel revetments، HR-Wallingford Laboratory"، Thomas Telford Publishing Ltd.، London، UK، 245 p.

112- Schoonees، J.S.، Theron، and A.K.، Bevis، D.، (2006)، "Shoreline accretion and sand transport at groynes inside the Port of Richards Bay"، Science direct، Coastal Engineering.

113- Schumm، S.A.، (1984)، "Channel morphology، Symposium on River Meandering"، Colorado State University، Fort Collins، Colorado.

114- Scott، M.K.، (1984)، "Streambank protection by use of spur dikes"، A project Report Submitted to the Dept. of Civil Engineering، Oregon State University، Corvallis، Oregon، USA.

115- Seed، D.، (1997)، "River training and channel protection"، HR Wallingford، Report SR480، England.

116- Shen، H.W.، (1984)، "Rivers and related problems، Symposium on River Meandering"، Colorado State University، Fort Collins، Colorado.

117- Shields F. D. Jr.، Ch. M. Cooper، S. S. Knight، (1995)، "Experiment in stream restoration"، Journal of Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 121، No. 6.

118- Simons، D.B.، (1971)، "River and canal morphology"، in Chapter 20 River Mechanics، Vol. 2، Edited by H.W. Shen، Fort Collins، Colorado.

119- Stevens، M.A. et al.، (1975)، "Non-equilibrium river form"، J. of Hydraulic Division، ASCE، Vol. 101، No. 3، 557-566.

120- Sukhodolov، A. et al.، (2004)، "Case study، turbulent flow and sediment distributions in a groyne field"، Journal of Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 130، No. 1.

121- Suzuki، K.، Michiue، M. and Hinokidani، O.، (1987)، "Local bed form around a series of spur-dikes in alluvial channels"، Proc. XXII Congress، IAHR، Lausanne، 316-321.

122- Swan River Trust، (2005)، "Miscellaneous structures"، Policy Report No. SRT/DE19، Australia.

123- TerHaar J. and Herricks، E.، (1989)، "Management and development of aquatic habitat in agriculture drainage systems"، WRC Res. Rep. No. 212، Project No. G1560-05، University of Illinois، Urbana، Ill.، PB90-173790.

124- Tiner R. W.، (2004)، "Remotely-sensed indicators for monitoring the general condition of natural habitat in watersheds"، an application for Delaware’s Nanticoke River watershed، Journal Ecological Indicators، 227–243.

125- Tingsanchali، T. and Maheswaran، S.، (1990)، "2-D depth-averaged flow computation near groyne"، Journal Hydraulic Engineering، ASCE، Vol. 116، No. 1، 71-86.

126- United Nations Economic Commission for Asia and the Far East، (1953)، "River training and bank protection"، Flood Control Series No. 4، Bangkok.

127- USACE، (1978)، "Design and construction of levees"، Engineering manual No. 1110-2-1913، U.S. Army Corps of Engineers (USACE)، Washington D.C.، USA، 138 p.

128- USACE ، (1980)، "Detailed project report for flood control and environmental assessment Sespe Creek at Fillmore"، Ventura County، California، U.S. Army Corps of Engineers Los Angeles District.

129- USACE، (1981)، "The streambank erosion control evaluation and demonstration Act of 1974 Section 32"، Public Low 93-251، U.S. Army Corps of Engineers (USACE)، Final Report to Congress، Waterways Experiment Station، Vicksburg، Mississippi.

130- USACE، (1991)، "Design of pile foundation"، Engineering Manual، Washington D.C.، USA.

131- USACE، (1991)، "Scour and deposition in rivers and reservoirs"، HEC-6، User Manual، U.S. Army Corps of Engineers، Waterways Experiment Station، Vicksburg، Mississippi.

132- USACE، (1993)، "River hydraulics. Engineering manual No.1110-2-1416، U.S. Army Corps of Engineers (USACE)"، Washington D.C.، USA، pp. 178-210.

133- USACE، (1994)، "Channel Stability Assessment for Flood Control Projects"، Eng. Manual No. 1110-2-1418، U.S. Army Corps of Engineers (USACE)، Washington D.C.، USA، pp. 48-110.

134- USACE، (2002)، "Hydraulic Reference Manual of HEC- RAS 3.1"، Washington، D.C.

135- USACE، (2003)، "Help file of HEC-RAS 3.1.1 software"، Washington، D.C.

136- USAE-ERDC، (1999)، "Channel rehabilitation، Processes، design، and implementation"، U.S. Army Engineer Research and Development Center (USAE-ERDC)، Vicksburg، Mississippi، USA، 290 p.

137- USAE-WES، (1997)، "The WES stream investigation and streambank stabilization handbook"، U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (USAE-WES)، Vicksburg، Mississippi، USA، 340 p.

138- USDT-FHA، (2000)، BRI-STARS، "Bridge Stream Tube Model for Alluvial River Simulation"، User’s Manual، U.S. Department of Transportation، Federal Highway Administration.

139- Vries، M. de، (1993)، "River engineering"، Lecture note F10، Delft University of Technology، Faculty of Civil Engineering، The Netherlands.

140- Walker، A. M. et al.، (2006)، "Monitoring the incidence of escaped farmed Atlantic salmon"، Salmo salar L.، in rivers and fisheries of the United Kingdom and Ireland، current progress and recommendations for future programmes، ICES Journal of Marine Science، 1201-1210

141- Watson، C.C. et al.، (1999)، "Channel rehabilitation، Processes، design and implementation"، USACE، Engineer research and Development Center، Vicksburg، Mississippi.

142- Wenka، Th. et al.، (1991)، "Depth- average calculation of flow in river reaches with flood control and regulation structures"، Proc. XXV Congress، IAHR. Tokyo، Japan، 127-138.

143- Wenka، Th.، Rodi، W.، and Nestmann، F.، (1993)، "Depth-averaged calculation of flow in river reaches with flood control and sediment regulation structures". Proc. XXV Congress، IAHR، Tokyo، Japan، 156-187.

144- WGWM، (1991)، "Guidelines for stabilizing waterways"، Prepared by the Working Group on Waterway Management (WGWM)، Published for Standing Committee on Rivers and Catchments، Rural Water Commission of Victoria، Victoria، Australia، 301 p.

145- Winkely، B.R.، (1982)، "Response of the lower Mississippi to river training and realignment". in Chapter 24 of Gravel Bed Rivers، Edited by R.D. Hey، et al.، John Wiley and Sons Ltd.، Chichester، England، 875 p.

146- WL-Delft Hydraulics، (2005)، "Morphological effects of groyne lowering along a floodplain during floods"، WL-Delft Hydraulics، Report No. Q303، the Netherlands.

147- Wright، N.G.، (2001)، "Conveyance Implications For 2-D and 3-D Modelling"، Report Prepared for HR Wallingford and the Environment Agency، U.K.

148- Yasi، M.، (1997)، "Flow and Bed Topography behind a Groyne"، Ph.D. Thesis، Department of Civil Engineering، Monash University، Melbourne، Australia، 340p.

149- Yasi، M.، (2006)، "Uncertainties in the simulation of bed evolution in recirculating flow area behind groynes"، Iranian Journal of Science and Technology (IJST)، Transaction B، Technology، Vol. 30، No. B1، Shiraz University، Shiraz، Iran.

150- Yasi، M. and Keller، R. J.، (1998)، "Major uncertainties in the prediction of bed elevation behind a groyne"، 12th International Conference on Computational Methods in Water Resources. Crete، Greece، June 1998، 535-542.

151- Yossef، M. F. M.، (2002)، "The effect of groynes on rivers"، Literature Review، Delft University of Technology، Delft Cluster Project No. 03-03-04، the Netherlands.

152- Zhu، J.، (1991)، "FAST-2D، A computer program for numerical simulation of two-dimensional incompressible flows with complex boundaries"، Report No. 690، University of Karlsruhe، Germany.

خواننده گرامی

دفترنظام 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 تألیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه پیوست 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.

دفترنظام فنی اجرایی

Islamic Republic of Iran
Vice presidency for Strategic Planning and Supervision

Guideline for Design Construction and Maintenance of River Groynes

No.516

Office of Deputy for Strategic Supervision	Ministry of Energy
Bureau of Technical Execution System	Bureau of Engineering and Technical Criterias for Water and Wastewater
http://tec.mporg.ir	**http://seso.moe.org.ir**

2010

این نشریه

با عنوان «راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای» با هدف تجمیع دانش علمی و فنی کاربرد آبشکن‌ها در ساماندهی رودخانه‌ها تهیه گشته، همچنین در تدوین این راهنما از استانداردها، کتاب‌ها و دستاوردهای پژوهشی و کاربردی ایران و مجامع معتبر جهانی استفاده شده است. در فصول مختلف این راهنما، به موضوعاتی مانند اهداف و روش‌های ساماندهی رودخانه‌ها، گزینه‌های حفاظت و تثبیت کناره‌ها، اهداف کاربری آبشکن‌ها، تاثیرات ریخت‌شناسی سامانه آبشکن‌ها، مبانی جانمایی و ضوابط طراحی آبشکن‌ها، اصول فنی و روش‌های ساخت، پایش و مدیریت نگهداری آبشکن‌ها در سامانه رودخانه، پرداخته شده است. این راهنما برای آموزش در سطوح دانشگاهی، برای کارشناسان واحد مهندسی رودخانه در سازمان آب منطقه‌ای، اداره راه و ترابری، جهاد کشاورزی، آبخیزداری، سازمان حفاظت محیط زیست، معاونت عمرانی استانداری، ستاد حوادث غیرمترقبه و شهرداری‌ها و همچنین به‌عنوان دستورالعمل فنی برای شرکت‌های مهندسان مشاور و پیمانکاران مورد استفاده قرار می‌گیرد.