جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه

ضابطه شماره ۸۸۲

ویرایش ۳۰-۰۳-۱۴۰۵

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

nezamfanni.ir

وزارت نیرو

دفتر توسعه نظام‌های فنی، بهره‌برداری و دیسپاچینگ برقآبی

waterstandard.wrm.ir

۱۴۰۵

ریاست جمهوری
سازمان برنامه و بودجه کشور
رئیس سازمان

باسمه تعالی

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	شماره : ۱۴۰۵/۱۵۵۲۳۹
	تاریخ : ۱۴۰۵/۰۴/۰۲

به استناد ماده(۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور و تبصره ذیل بند(۳-۱) ماده(۴) «سند نظام فنی‌واجرایی یکپارچه کشور»، موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۰۵۴۴/ت۶۳۷۱۹ه مورخ ۱۴۰۴/۰۳/۰۶ هیئت وزیران؛ ضابطه پیوست با مشخصات زیر ابلاغ و در«سامانه نظام فنی‌واجرایی کشور» به نشانی Nezamfanni.ir منتشر می‌شود:

عنوان:	**راهنمای طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه**
شماره ضابطه:	**۸۸۲**
نوع ابلاغ:	راهنما (به استناد بند ۲۹ ماده (۱) سند نظام فنی‌واجرایی یکپارچه کشور)
حوزه شمول:	همه قراردادهای جدیدی که از محل وجوه عمومی ویا به صورت مشارکت عمومی-خصوصی منعقد می‌شوند.
تاریخ اجرا:	۱۴۰۵/۰۷/۰۱ (مهلت بین تاریخ ابلاغ و تاریخ اجرا، به استناد بند ۳-۳ ماده (۴) سند نظام فنی‌واجرایی یکپارچه کشور و به منظور اتخاذ تمهیدات لازم برای اجرای ضابطه و ملاحظات ارجاع کار می‌باشد)
متولی تهیه، اخذ بازخورد و اصلاح:	دبیرخانه طرح «طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور» مستقر در وزارت نیرو
مرجع اعلام اصلاحات:	امور نظام فنی‌واجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور
مفاد این بخشنامه، برای قراردادهایی که قبل از تاریخ اجرای آن منعقد شده‌اند، در صورت توافق طرفین قرارداد، قابل استفاده است.	

سیدحمید پورمحمدی

رونوشت :
معاونت حقوقی ریاست جمهوری – سامانه ملی قوانین و مقررات جمهوری اسلامی ایران
امور حقوقی قوانین و مقررات
مرکز روابط عمومی، امور بین‌الملل و مدیریت دانش
دبیرخانه مرکزی سازمان

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با همکاری دفتر توسعه نظام‌های فنی، بهره‌برداری و دیسپاچینگ برقابی- شرکت مدیریت منابع آب ایران - وزارت نیرو و با استفاده از نظر کارشناسان برجسته در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است.

نظر به تخصصی بودن موضوع، مسئولیت مطالب تهیه شده، تفسیر و اصلاح آن با مجموعه مرتبط در وزارت نیرو می‌باشد. طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور اعلام خواهد کرد.

با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را منعکس فرمایید. کارشناسان مربوط 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 سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی

Email: nezamfanni@mporg.ir **web: nezamfanni.ir**

طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور

تهران، خیابان فلسطین شمالی، پایین‌تر از زرتشت، کوچه پرویز روشن، پلاک ۲۷ – شرکت مدیریت منابع آب ایران – دفتر توسعه نظام‌های فنی، بهره‌برداری و دیسپاچینگ برقابی – تلفن: ۰۲۱۴۳۶۸۰۲۶۱ و ۰۲۱۴۳۶۸۰۲۸۹

Email: waterstandard@wrm.ir **web: waterstandard.wrm.ir**

بسمه‌تعالی

پیشگفتار

هرساله و با رخداد سیلاب‌های متناوب و یا بزرگ، تعداد زیادی از پل‌ها و آبگذرها که در بستر، حریم و یا پهنه سیلابی رودخانه احداث شده‌اند، تخریب شده و یا آسیب جدی دیده که منجر به قطع راه ارتباطی، انسداد نسبی جریان و کاهش آبگذری پل، انتقال قطعات آسیب دیده پل به پایین دست و تغییرات رودخانه‌ای شده که باعث تشدید خسارات در مناطق دیگر (در پایین د ست و حتی در بالاد ست) نیز می‌گردد. با رخداد سیلاب و تخریب یا آ سیب‌دیدگی سازه‌های تقاطعی، ضـرورت احداث سـامانه‌های جایگزین موقت و سـریع الاجرا در دسـتور کار مدیریت بحران قرار می‌گیرد. عدم توجه به جانمایی سازه‌های پیش ساخته، موقتی و ا ضطراری، سبب ناهنجاری در سامانه رودخانه می‌گردد و تا جایگزینی آن با سازه دائم، گاهی اثرات آن تا سال‌ها باقی مانده و یا برای سیلاب بعدی خطرآفرین می‌گردد. جانمایی و طرح پایدار پل‌ها و آبگذرها، چنانچه با رعایت ا صول ریخت شنا سی و مهند سی رودخانه در را ستای مدیریت سیلاب انجام ن شود، باعث تخریب سازه و تشدید خسارات سیلاب می‌گردد.

با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب و آبفای وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضـوابط و معیارهای فنی صـنعت آب کشـور، تهیه «راهنمای طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سـامانه رودخانه» را با هماهنگی امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور در دستور کار قرار داد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی کشور به این معاونت ار سال نمود که پس از برر سی، بر ا ساس نظام فنی اجرایی یکپارچه، مو ضوع ماده ۳۴ قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور، ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران تصویب و ابلاغ گردید.

علی‌رغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردید، این مجموعه مصون از وجود ا شکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن این راهنما از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را منعکس فرمایند. نظرات و پیشنهادهای اصلاحی دریافت شده مورد بررسی قرار گرفته و در صورت نیاز به ا صلاح در متن راهنما، با هم‌فکری نمایندگان جامعه فنی ک شور و کار شنا سان مجرب این حوزه، ن سبت به تهیه متن اصـلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع‌رسـانی نظام فنی و اجرایی کشـور برای بهره‌برداری عموم، اعلام خواهد شـد. به همین منظور و برای تسـهیل در پیدا کردن آخرین تغییرات معتبر، در بالای صـفحات راهنما، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن صفحه نیز اصلاح خواهد شد. از این‌رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

معاون فنی، امور زیربنایی و تولیدی

بهار ۱۴۰۵

تهیه و کنترل «راهنمای طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه»
[ضابطه شماره ۸۸۲]

مجری: انجمن هیدرولیک ایران

مشاور پروژه: محسن براهیمی

اعضای گروه تهیه‌کننده:

روح‌الله احسانی	دانشگاه آزاد اسلامی بجنورد	دکترای مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی
محسن براهیمی	شرکت مهندسین مشاور آبگستران میهن انجمن هیدرولیک ایران	دکترای مهندسی عمران- مدیریت تقاضای آب
محمود جوان	دانشگاه شیراز	دکترای مهندسی آب
محمود شفاعی‌بجستان	دانشگاه شهید چمران اهواز	دکترای مهندسی عمران- هیدرولیک
محمدعامل صادقی	دانشگاه آزاد اسلامی تاکستان	دکترای سازه‌های آبی
رضا عزیزی	دانشگاه زنجان	دکترای سازه‌های آبی
حسام فولادفر	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	دکترای مهندسی رودخانه
مهشید قنبریان‌علویجه	شرکت مهندسین مشاور آبگستران میهن	کارشناسی‌ارشد مهندسی آب
سمیه کریم‌پور	مهندسین مشاور فرازآب	دکترای سازه‌های آبی
مهدی یاسی	دانشگاه تهران	دکترای مهندسی رودخانه

اعضای گروه نظارت:

محمود افسوس	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی	کارشناسی‌ارشد مهندسی هیدرولیک
فرشید فیض‌الهی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران- آب

اعضای گروه تاییدکننده (کمیته تخصصی رودخانه و سواحل طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):

محمود افسوس	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی	کارشناسی‌ارشد مهندسی هیدرولیک
نرگس دشتی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	کارشناسی مهندسی آبیاری
محمد رستمی	پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری	دکترای عمران- مهندسی آب
محمدحسین عابدی	سازمان برنامه و بودجه کشور	کارشناسی‌ارشد مهندسی تاسیسات آبیاری
حسام فولادفر	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	دکترای مهندسی رودخانه
فرشید فیض‌الهی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران- آب

مریم کرمی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	کارشناسی‌ارشد مهندسی رودخانه
محمدرضا مجدزاده طباطبائی	دانشگاه شهید بهشتی	دکترای مهندسی رودخانه
مهدی یاسی	دانشگاه تهران	دکترای مهندسی رودخانه

اعضای گروه هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه کشور):

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی و اجرایی
فرزانه آقا رمضانعلی	رییس گروه امور نظام فنی و اجرایی
سجاد حیدری	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	**۱**
فصل اول - کلیات	**۵**
۱-۱- تعاریف و مفاهیم	۷
۱-۲- مفهوم و ضرورت مطالعات مورفوهیدرولیکی	۹
۱-۳- سوابق مطالعات مورفوهیدرولیکی در طراحی پل‌ها و آبگذرها	۱۱
۱-۴- بررسی فرایند مطالعه و طراحی واجرای پل‌ها و آبگذرها از نظر قوانین و آیین‌نامه‌ها	۱۳
۱-۴-۱- ضوابط، قوانین و آیین‌نامه‌های موجود	۱۳
۱-۴-۲- مبانی حقوقی و ساختاری	۱۴
۱-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران	۱۵
فصل دوم - بررسی انواع پل‌ها و آبگذرها	**۱۷**
۲-۱- تاریخچه پل‌های ایران	۱۹
۲-۲- انواع پل‌ها	۲۰
۲-۲-۱- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر طول دهانه	۲۰
۲-۲-۲- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر سازه‌ای	۲۱
۲-۲-۳- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر مصالح	۲۳
۲-۲-۴- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر روش ساخت	۲۳
۲-۲-۵- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر کاربری	۲۳
۲-۲-۶- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر تحرک	۲۵
۲-۲-۷- سایر پل‌ها	۲۵
۲-۳- بررسی انواع آبگذرها	۲۵
۲-۳-۱- طبقه‌بندی آبگذرها از نظر مصالح	۲۵
۲-۳-۲- طبقه‌بندی آبگذرها از نظر دهانه	۲۶
۲-۳-۳- آبگذرهای بسته	۲۶
۲-۳-۴- آبگذرهای سیلابدشتی	۲۷
فصل سوم - راهنمای جانمایی، طراحی هیدرولیکی و معماری پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه	**۲۹**

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۱- ساختار پهنه رودخانه‌ها	۳۱
۳-۱-۱- آبراهه اصلی و سیلابدشت	۳۱
۳-۱-۲- حد بستر و حریم رودخانه‌های ایران	۳۲
۳-۱-۳- پهنه سیلاب و نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب	۳۴
۳-۱-۴- تفاوت حد بستر قانونی رودخانه و پهنه سیلاب	۳۴
۳-۲- امکان‌سنجی و مکان‌یابی پل‌ها و آبگذرها	۳۵
۳-۲-۱- ملاحظات حد بستر رودخانه و پهنه خطر سیل در جانمایی پل‌ها و آبگذرها	۳۶
۳-۲-۲- ملاحظات پایداری آبراهه در جانمایی پل و آبگذر	۴۰
۳-۲-۳- ملاحظات راستای آبراهه اصلی در ساختگاه پل و آبگذر	۴۱
۳-۲-۴- ملاحظات هدایت جریان آبراهه به دهانه پل و آبگذر	۴۲
۳-۲-۵- ملاحظات خاص جانمایی پل‌ها	۴۳
۳-۲-۶- ملاحظات محیط زیستی جانمایی پل‌ها	۴۴
۳-۲-۷- ملاحظات خاص جانمایی آبگذرها	۴۵
۳-۳- مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه	۵۱
۳-۳-۱- کلیات	۵۱
۳-۳-۲- تغییر در فرم رودخانه تحت تاثیر احداث سازه (پل) در بالادست و پایین‌دست	۵۴
۳-۳-۳- ابعاد رودخانه (میزان مجاز تنگ‌شدگی عرض رودخانه)	۵۷
۳-۳-۴- تاثیر پل بر ریخت‌شناسی رودخانه	۶۲
۳-۳-۵- برداشت مصالح رودخانه در مجاورت پل‌ها	۶۳
۳-۳-۶- تحلیل پایداری رودخانه	۶۴
۳-۴- مطالعات هیدرولیک رودخانه	۶۶
۳-۴-۱- مبانی هیدرولیک جریان رودخانه	۶۶
۳-۴-۲- معرفی مدل‌های رایانه‌ای برای مطالعات رودخانه‌ای	۶۷
۳-۴-۳- اقدامات مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی	۷۱
۳-۴-۴- نسبت بازشدگی پل، M	۷۲
۳-۴-۵- محاسبه ارتفاع و مسافت برگشت آب	۷۶

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۵- مطالعات آبشستگی در محدوده‌ی پل‌ها	۷۸
۳-۵-۱- محاسبات آبشستگی کل	۸۰
۳-۵-۲- نرخ زمانی آبشستگی	۸۳
۳-۵-۳- آبشستگی جریان تحت‌فشار (آبشستگی تنگ‌شدگی قائم)	۸۵
۳-۵-۴- آبشستگی موضعی پایه پل‌ها	۸۷
۳-۵-۵- آبشستگی موضعی در تکیه‌گاه پل‌ها	۹۰
۳-۶- مطالعات انتقال مواد جامد و شناور	۹۷
۳-۶-۱- انتقال مواد رسوبی	۹۷
۳-۶-۲- انتقال اجسام شناور و انسداد	۱۰۳
۳-۷- معیارهای مناسب حفاظت و تثبیت بازه‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه	۱۱۰
۳-۷-۱- مقدمه	۱۱۰
۳-۷-۲- روش‌های حفاظت و تثبیت بستر رودخانه	۱۱۳
۳-۷-۳- روش‌های کنترل فرسایش بستر	۱۱۴
۳-۷-۴- روش‌های کنترل آبشستگی بستر رودخانه در ساختگاه سازه تقاطعی	۱۱۴
۳-۷-۵- روش‌های تثبیت دیواره رودخانه در نزدیکی سازه تقاطعی	۱۱۷
۳-۷-۶- روش‌های اصلاح الگوی جریان	۱۱۸
۳-۷-۷- انتخاب روش‌های حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه	۱۱۸
۳-۸- معیارهای انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی و ظرفیت آبگذری پل‌ها و آبگذرها	۱۲۶
۳-۸-۱- راه‌حل الف- تعیین دوره بازگشت سیلاب طراحی	۱۲۸
۳-۸-۲- راه‌حل ب- تغییر معیار سیلاب طراحی آیین‌نامه ۴۱۵ در طرح سازه پل و آبگذر	۱۳۰
۳-۸-۳- توصیه‌های ریسک مبنای مورفوهیدرولیکی برای طراحی و ساخت سازه پل و آبگذر	۱۳۳
۳-۹- مطالعات محیط‌زیستی از نظر پیوستگی رودخانه	۱۳۷
۳-۹-۱- تاثیر آبگذرها و پل‌ها بر پیوستگی محیط زیستی رودخانه	۱۳۷
۳-۹-۲- حفظ پیوستگی بیولوژیکی رودخانه پس از احداث پل‌ها و آبگذرها	۱۴۱
فصل چهارم - راهنمای ساخت و اجرای پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه	**۱۵۵**
۴-۱- ملاحظات مورفوهیدرولیکی رودخانه در زمان اجرای پل و آبگذر	۱۵۷
۴-۱-۱- مقدمه	۱۵۷

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۴-۱-۲- بررسی‌های اجمالی برای اجرا	۱۵۸
۴-۱-۳- روش‌های ساخت با انحراف آب در بستر اصلی رودخانه	۱۶۳
۴-۱-۴- روش‌های ساخت بدون انحراف آب رودخانه	۱۶۶
۴-۱-۵- مراحل ساخت سازه تقاطعی	۱۶۷
۴-۲- برپایی کارگاه، ساخت و نگهداری سازه با توجه به ریسک رخداد سیل در پهنه سیلابی رودخانه	۱۷۰
۴-۳- شاخصه‌های مرحله‌بندی کار در رودخانه، امکان‌پذیری اجرا، زمان‌بندی مراحل کار و سرعت اقدامات در سامانه رودخانه	۱۷۵
۴-۳-۱- آماده‌سازی بستر کار در رودخانه	۱۷۵
۴-۳-۲- بهره‌گیری از الگوها و مشاهدات پل و پل‌بندهای تاریخی ایران و شاخصه‌های نوآورانه	۱۷۵
۴-۳-۳- برچیدن کارگاه	۱۷۶
۴-۴- ملاحظات محیط‌زیستی در زمان اجرا	۱۷۶
فصل پنجم - راهنمای بهره‌برداری، نگهداری، پایش و بازرسی، ترمیم و بازسازی پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه	**۱۷۹**
۵-۱- ارائه راهنمای پایش و بازرسی اجزای سازه‌ی پل و آبگذر	۱۸۱
۵-۱-۱- عوامل تخریب پل و آبگذر	۱۸۱
۵-۱-۲- پایش و ارزیابی	۱۸۳
۵-۱-۳- ارزیابی پایداری و کارایی محیط‌زیستی سازه تقاطعی	۱۹۱
۵-۱-۴- پایش محیط‌زیستی پل‌ها و آبگذرها	۱۹۲
۵-۲- راهنمای نگهداری سازه‌ی پل و آبگذر در مقابله با جریان در حین رخداد سیلاب	۱۹۴
۵-۲-۱- الزامات انجام نگهداری دوره‌ای	۱۹۶
۵-۲-۲- روش‌های مقابله با آبشستگی پل‌ها	۱۹۷
۵-۲-۳- روش‌های مقابله با واریزه‌های شناور برای آبگذر	۲۰۶
۵-۳- دستورالعمل پاک‌سازی دهانه پل‌ها و آبگذر قبل از فصل سیل	۲۰۹
۵-۴- ملاحظات بازرسی، پایش و نگهداری آبگذرها	۲۱۱
۵-۵- برنامه‌ریزی بازرسی	۲۱۲
۵-۵-۱- نوع ۱: برنامه بازرسی سالانه	۲۱۲

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۵-۵-۲- نوع ۲: بازرسی برای ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری برنامه‌ریزی شده	۲۱۳
۵-۵-۳- بازرسی پس از ساخت	۲۱۳
۵-۵-۴- آماده‌سازی بازرسی‌ها	۲۱۳
۵-۶- ایمنی عملیات بازرسی	۲۱۴
۵-۶-۱- خطرات ترافیک	۲۱۴
۵-۶-۲- خطرات غرق شدن	۲۱۵
۵-۶-۳- خطرات خاکریز	۲۱۵
۵-۶-۴- خطرات حیوانات و حشرات	۲۱۵
۵-۶-۵- خطر گیاهان سمی	۲۱۵
۵-۷- ایمنی تجهیزات	۲۱۶
۵-۸- ابزار و تجهیزات	۲۱۶
۵-۸-۱- ابزار بازرسی	۲۱۶
۵-۸-۲- ابزار اندازه‌گیری	۲۱۷
۵-۸-۳- ابزار کمک بصری	۲۱۷
۵-۸-۴- ابزار تهیه گزارش و مستندات	۲۱۸
۵-۹- فرایند بازرسی و راهنمای رتبه‌بندی	۲۱۸
۵-۹-۱- رتبه‌بندی آبگذرها	۲۱۹
۵-۹-۲- تعیین سطح اضطرار	۲۲۱
۵-۹-۳- فناوری‌های پیشرفته بازرسی	۲۲۲
۵-۹-۴- سایر موارد نیازمند بازرسی	۲۲۵
فصل ششم -شرح خدمات مطالعات پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه	**۲۲۷**
۶-۱- اقدامات اولیه	۲۲۹
۶-۱-۱- برنامه‌ریزی برای انجام کار	۲۲۹
۶-۱-۲- گردآوری آمار، اطلاعات، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌ها و گزارش‌ها	۲۲۹
۶-۱-۳- بازدیدها و بررسی‌های صحرایی	۲۳۰
۶-۱-۴- تهیه و ارائه گزارش اقدامات اولیه	۲۳۰
۶-۲- مطالعات پایه	۲۳۱

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۶-۲-۱- مطالعات هواشناسی و هیدرولوژی	۲۳۱
۶-۲-۲- مطالعات کاربری اراضی اطراف رودخانه	۲۳۲
۶-۲-۳- مطالعات حقوقی	۲۳۲
۶-۲-۴- مطالعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیک و منابع قرضه	۲۳۲
۶-۲-۵- مطالعات محیط‌زیستی	۲۳۳
۶-۲-۶- تهیه و ارائه گزارش مطالعات پایه	۲۳۳
۶-۳- مطالعات تخصصی	۲۳۳
۶-۳-۱- مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه	۲۳۳
۶-۳-۲- مطالعات هیدرولیک سیلاب رودخانه	۲۳۴
۶-۳-۳- مطالعات فرسایش و رسوب	۲۳۵
۶-۳-۴- تهیه و ارائه گزارش مطالعات تخصصی	۲۳۵
۶-۴- تلفیق مطالعات	۲۳۵
۶-۵- تهیه نقشه‌های اجرایی از دیدگاه مورفوهیدرولیکی	۲۳۶
۶-۶- فهرست ملاحظات دوره قبل و حین اجرا	۲۳۶
۶-۷- فهرست ملاحظات دوره بهره‌برداری و نگهداری پس از اجرا	۲۳۷
پیوست ۱- ضوابط، قوانین و آیین‌نامه‌ها و منابع مطالعات مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها	**۲۳۸**
پیوست ۲- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران	**۲۴۴**
پیوست ۳- معادلات محاسبه انواع آبشستگی و مثال‌های کاربردی	**۲۶۹**
پیوست ۴- معرفی انواع روش‌های حفاظت و تثبیت بستر و کنترل فرسایش کناره رودخانه	**۳۱۹**
پیوست ۵- روش‌های برخط برای پایش آبشستگی پل	**۳۴۱**
منابع و مراجع	**۳۴۹**

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- خلاصه مفهومی مطالعات مورفوهیدرولیکی در طرح سازه‌های تقاطعی (پل و آبگذر) ۱۰
جدول ۱-۲- محورهای آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه ۱۶
جدول ۲-۱- طبقه‌بندی انواع و مشخصات آبگذرها ۲۷
جدول ۳-۱- اندازه مواد رسوبی و پارامتر رسوب برای مصالح مختلف ۵۹
جدول ۳-۲- کمینه مقادیر توصیه شده برای دوره بازگشت‌های سیل طراحی آبشستگی و سیل کنترل طراحی آبشستگی بر مبنای دوره بازگشت سیل طراحی هیدرولیکی ۸۴
جدول ۳-۳- ضریب شکل انواع مختلف تکیه‌گاه‌ها ۹۷
جدول ۳-۴- مراحل تخمین مقادیر مواد مسدود کننده ۱۰۶
جدول ۳-۵- روش‌های حفاظت دیواره‌های رودخانه - بر اساس عملکرد سازه حفاظتی ۱۲۳
جدول ۳-۶- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه - بر اساس نوع و اندازه رودخانه ۱۲۳
جدول ۳-۷- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه بر اساس اندازه رودخانه و عوامل تخریب رودخانه ۱۲۳
جدول ۳-۸- دوره بازگشت سیلاب طراحی پل ۱۲۶
جدول ۳-۹- دوره بازگشت سیلاب طراحی آبگذر ۱۲۶
جدول ۳-۱۰- اصلاح مورفوهیدرولیکی سیلاب طراحی سازه پل ۱۳۱
جدول ۳-۱۱- اصلاح مورفوهیدرولیکی سیلاب طراحی سازه آبگذر ۱۳۲
جدول ۳-۱۲- توصیه‌های ریسک مبنای مورفوهیدرولیکی طراحی و ساخت سازه پل ۱۳۴
جدول ۳-۱۳- توصیه‌های ریسک مبنای مورفوهیدرولیکی طراحی و ساخت سازه آبگذر ۱۳۶
جدول ۵-۱- پلتفرم‌های رایگان برای شبیه‌سازی فرایندهای رسوبی در اطراف پل‌ها ۱۸۷
جدول ۵-۲- مشخصه‌های پل ۱۸۷
جدول ۵-۳- مشخصه‌های پل ۱۸۸
جدول ۵-۴- راهنمای بازرسی پایداری و ایمنی پل‌های رودخانه‌ای ۱۸۹
جدول ۵-۵- تعیین مقدار ریسک (RP) با استفاده از درجه هیدرولوژیکی و مقادیر رتبه‌دهی (RV) ۱۹۱
جدول ۵-۶- مقایسه تعدادی از روش‌های مقابله با آبشستگی پل‌ها ۱۹۸
جدول ۵-۷- برنامه مدیریتی برای شرایطی که توده‌های بزرگ واریزه‌های چوبی تشکیل می‌شود ۲۰۵
جدول ۵-۸- ماتریس روش‌های کنترل واریزه ۲۰۸
جدول ۵-۹- رتبه‌بندی سطح اضطرار برای سازه تقاطعی ۲۲۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۵-۱۰- رتبه‌بندی سطح اضطرار- از نظر آبشستگی در محیط سازه تقاطعی ۲۲۲

جدول ۵-۱۱- رتبه‌بندی سطح اضطرار- از نظر رسوبگذاری و انسداد سازه تقاطعی ۲۲۲

جدول پ.۱-۱- فهرست منابع منتخب برای مطالعات مورفوهیدرولیکی رودخانه در طرح پل‌ها و آبگذرها ۲۳۹

جدول پ.۲-۱- میزان خسارت وارد بر زیرساخت‌های کشور در سیل فراگیر اسفند ۱۳۹۷ و فروردین ۱۳۹۸ ۲۴۵

جدول پ.۲-۲- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای کشور در برابر سیل- مرحله مطالعات و طراحی ۲۴۷

جدول پ.۲-۳- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای کشور در برابر سیل- مرحله اجرا و نظارت ۲۴۹

جدول پ.۲-۴- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای کشور در برابر سیل- مرحله پایش و نگهداری ۲۴۹

جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه ۲۵۰

جدول پ. ۳-۱- ضریب تصحیح K_1، مربوط به شکل دماغه پایه‌ها ۲۸۳

جدول پ. ۳-۲- ضریب تصحیح K_2 مربوط به زاویه حمله جریان ۲۸۴

جدول پ. ۳-۳- میزان افزایش در عمق آبشستگی تعادلی پایه، K_3، مربوط به شرایط بستر ۲۸۴

جدول پ. ۳-۴- مقادیر تانژانت هایپربولیک X ((tanh(x)) ۲۸۸

جدول پ. ۳-۵- ضرایب مربوط به آبشستگی خروجی آبگذر در خاک‌های غیرچسبنده ۳۱۱

جدول پ. ۳-۶- ضریب C_h برای خروجی‌های بالاتر از بستر ۳۱۲

جدول پ. ۳-۷- ضریب C_s برای شیب آبگذر ۳۱۲

جدول پ.۳-۸- ضرایب مربوط به آبشستگی خروجی آبگذر در خاک‌های چسبنده ۳۱۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱- پل- بند امیر، رود کر، فارس ۲۰
شکل ۲-۲- سی و سه پل، اصفهان ۲۰
شکل ۲-۳- پل قدیم دزفول، دزفول ۲۰
شکل ۲-۴- پل‌های با تعداد و اندازه دهانه متفاوت ۲۰
شکل ۲-۵- پل تیری ۲۲
شکل ۲-۶- پل خرپایی ۲۲
شکل ۲-۷- پل خرپایی طره‌ای ۲۲
شکل ۲-۸- به ترتیب از راست به چپ: پل شاه‌تیر جعبه‌ای و ماهیچه‌دار ۲۲
شکل ۲-۹- به ترتیب از راست به چپ: پل قوسی با عرشه روگذر و اسپندرل باز و پل قوسی میان‌گذر ۲۲
شکل ۲-۱۰- به ترتیب از راست به چپ: پل معلق و پل کابل ایستا ۲۳
شکل ۲-۱۱- کاربری پل‌ها در گذشته ۲۴
شکل ۲-۱۲- پل‌های حیات وحش ۲۴
شکل ۲-۱۳- آبگذر تک‌دهانه پیش‌ساخته با تکیه‌گاه‌های دور از بستر آبراهه ۲۶
شکل ۲-۱۴- آبگذر تک‌دهانه با تکیه‌گاه‌های کناری برای حفظ سیمای طبیعی بستر ۲۶
شکل ۲-۱۵- آبگذر دو دهانه برای حفظ عرض آبراهه بزرگ ۲۶
شکل ۲-۱۶- آبگذرهای بسته با حفظ عرض آبراهه اصلی و با نمایش عمق جانمایی کف‌بند در زیر سطح بستر آبراهه ۲۷
شکل ۲-۱۷- نمونه‌های گذرگاه و آبگذر خشک در پهنه سیلابدشت آبراهه‌ها ۲۷
شکل ۳-۱- ساختار عرضی رودخانه با نمایش آبراهه اصلی، حد بستر و حریم (قانونی) و پهنه‌های سیلاب ۳۱
شکل ۳-۲- نمایش آبراهه اصلی و سیلابدشت در رودخانه‌های دشتی ۳۲
شکل ۳-۳- نقشه پهنه‌بندی حد بستر و حریم رودخانه‌های ایران ۳۳
شکل ۳-۴- نشانه‌گذاری حد بستر و حریم رودخانه‌های ایران ۳۳
شکل ۳-۵- نمونه نقشه‌های پهنه سیلاب رودخانه‌ها ۳۴
شکل ۳-۶- نقشه پهنه سیل مبنا (۱۰۰ ساله) با نمایش پهنه سیلابرو و حاشیه سیلابرو در رودخانه‌های آمریکا ۳۵
شکل ۳-۷- جانمایی راه و آبگذر زیرجاده در بستر آبراهه نیمه کوهستانی ۳۶
شکل ۳-۸- جانمایی زیرساخت‌ها (راه و راه‌آهن و فرودگاه)، بدون ملاحظات سیل در حد بستر و سیلابدشت گرگانرود ۳۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۹- گزینه‌های مختلف جانمایی پل در بستر رودخانه ۳۹
شکل ۳-۱۰- جانمایی پل‌های تاریخی قوسی در عرض مقطع پر آبراهه اصلی رودخانه‌های شهری و برون‌شهری ایران ۴۰
شکل ۳-۱۱- پل دوستی، رودخانه مرزی ئمریک، مشترک ترکیه و یونان، ۲۰۲۴ ۴۰
شکل ۳-۱۲- پل رودخانه سوان، ایالت غربی استرالیا، ۲۰۲۴ ۴۰
شکل ۳-۱۳- جانمایی نامناسب پل یا آبگذر در پیچ آبراهه و ناعمود بر راستای آبراهه ۴۲
شکل ۳-۱۴- جانمایی مناسب پل یا آبگذر در بازه مستقیم بین دو پیچ متوالی و عمود بر راستای آبراهه ۴۲
شکل ۳-۱۵- شکل پایه‌های مناسب برای تسهیل عبور مواد شناور چوبی بزرگ و شاخ و برگ‌ها ۴۳
شکل ۳-۱۶- بازه‌های پایدار آبراهه با پوشش گیاهی در کناره‌ها و بدون شواهد فرسایش ۴۵
شکل ۳-۱۷- بازه فعال فرسایشی با فرسایش کناره‌ای در مسیر مستقیم ۴۶
شکل ۳-۱۸- بازه فعال فرسایشی با شواهد فرسایش در پیچ خارجی و نمایش رسوبات بستر بدون پوشش گیاهی ۴۶
شکل ۳-۱۹- بازه‌های فعال رسوب‌گذار با شواهدی از پشته‌ها و یا جزایر شنی و ریزتر ۴۶
شکل۳-۲۰- آبگذر بزرگ برای حفظ عرض آبراهه اصلی ۴۷
شکل۳-۲۱- کاربرد نامناسب آبگذر با مجموعه لوله‌های کوچک و خطر انسداد و مخاطرات محیط‌زیستی ۴۷
شکل ۳-۲۲- آبگذر دو قلو برای حفظ عرض آبراهه بزرگ وقتی سازه تک‌دهانه امکان‌پذیر نباشد ۴۷
شکل ۳-۲۳- آبگذر تک دهانه پیش‌ساخته با تکیه‌گاه‌های دور از بستر آبراهه مناسب عبور حیوانات ۴۸
شکل ۳-۲۴- آبگذر تک‌دهانه با تکیه‌گاه‌های کناری برای عبور حیوانات و ماهیان با حفظ سیمای طبیعی بستر ۴۸
شکل۳-۲۵- آبگذر چند دهانه با پایه‌های عمیق و تکیه‌گاه‌های دور از بستر برای عبور حیوانات ۴۸
شکل ۳-۲۶- آبگذر با حفظ عرض آبراهه و گذرگاه حیوانات توسط سکوی کناری در زیر آبگذر و بیرون از بستر آبراهه ۴۹
شکل۳-۲۷- نمونه‌های گذرگاه و آبگذر خشک در پهنه سیلابدشت آبراهه‌ها ۴۹
شکل۳-۲۸- آبگذر خشک در سیلابدشت رودخانه عباس آباد در تقاطع با بزرگراه غدیر (استان البرز)، ایران ۴۹
شکل۳-۲۹- آبگذر بسته با جانمایی کف‌بند در زیر سطح بستر با حفظ شیب و بستر طبیعی ۵۰
شکل۳-۳۰- آبگذرهای بسته با حفظ عرض آبراهه اصلی و با نمایش عمق جانمایی کف‌بند در زیر سطح بستر آبراهه ۵۱
شکل ۳-۳۱- خصوصیات رودخانه‌ها در ناحیه (۱) سرشاخه‌ها (فرسایشی)، ناحیه (۲) انتقالی (فرسایش/رسوبگذار) و ناحیه (۳) رسوبگذار ۵۲
شکل ۳-۳۲- تشکیل رودخانه‌های شریانی در ناحیه ۲ ۵۳
شکل ۳-۳۳- تشکیل رودخانه پیچان‌رود در ناحیه ۳ ۵۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۳۴- شرایط الگوی جریان و رسوب در پیچ رودخانه ۵۳

شکل ۳-۳۵- جانمایی عرضی رودخانه‌های پیچانرود و جدایی پیچ رودخانه به صورت حلقوی یا نعل اسبی ۵۳

شکل ۳-۳۶- مهاجرت عرضی پیچ‌های یک رودخانه پیچانرودی ۵۴

شکل ۳-۳۷- مناطق فرسایشی و ته‌نشینی رسوبات در امتداد مسیر رودخانه ۵۵

شکل ۳-۳۸- ترازوی لین برای پاسخ احتمالی یک رودخانه به احداث یک پل یا آبگذر با ظرفیت کم ۵۶

شکل ۳-۳۹- مثلث تکوین آبراهه با اثر نسبی هیدرولوژی، زمین‌شناسی و زیست‌شناسی بر فرایندها و فرم‌های رودخانه ۵۷

شکل ۳-۴۰- رسم منحنی پایداری برای طراحی آبراهه پایدار با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS ۶۱

شکل ۳-۴۱- تغییر ابعاد رودخانه در اثر مهاجرت سر آبکند به طرف بالادست ۶۳

شکل ۳-۴۲- فرسایش در بالادست و پایین‌دست یک گودال برداشت مصالح از بستر رودخانه ۶۴

شکل ۳-۴۳- روندنمای تحلیل سطح ۱: تحلیل کیفی عوامل زمین ریخت‌شناختی ۶۵

شکل ۳-۴۴- روندنمای تحلیل سطح ۲: تحلیل مهندسی کلاسیک ۶۶

شکل ۳-۴۵- نمونه‌ای از شبیه‌سازی اطراف پایه پل با FLOW3D ۷۱

شکل ۳-۴۶- گرفتگی یکی از دهانه‌های پل توسط رسوب ۷۲

شکل ۳-۴۷- (الف) نیمرخ طولی جریان یکنواخت در عمق نرمال (Y_N) در آبراهه اصلی رودخانه که افزایش تراز سطح آب از محل پل را نشان می‌دهد (ب) نمای پلان که جدایی جریان و شکل‌گیری مقطع منقبض با عرض C_Cb را نشان می‌دهد. ۷۴

شکل ۳-۴۸- شماتیک تنگ‌شدگی با چند دهانه. رابطه طول خاکریزهای داخلی در زیر آبراهه‌ها با مساحت ناخالص بازشدگی‌ها ۷۵

شکل ۳-۴۹- پل Canns Mills، Devon: (الف) مقطع ۱، (ب) تغییرات نسبت بازشدگی M با تراز ۷۶

شکل ۳-۵۰- شماتیک مقاطع ۱ تا ۴ در روش HDS 1 برای محاسبه برگشت آب ۷۸

شکل ۳-۵۱- عمق آبشستگی پایه پل در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای به صورت تابعی از زمان ۸۰

شکل ۳-۵۲- روابط کلی برای تنش برشی و نرخ آبشستگی در مواد چسبنده ۸۲

شکل ۳-۵۳- الگوی جریان و آبشستگی پیرامون یک پایه قائم ۸۳

شکل ۳-۵۴- محاسبات آبشستگی وابسته به زمان ۸۴

شکل ۳-۵۵- پارامترهای هندسی مربوط به تنگ‌شدگی قائم ۸۶

شکل ۳-۵۶- نمایش توصیفی آبشستگی پایه پل ۸۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۵۷- نمای جانبی با نمایش عرض فوقانی حفره آبشستگی در بالادست پایه پل تراز بستر کانال بالادست با شیب حدود ۲ به ۱ به کف حفره آبشستگی می‌رسد ۹۰

شکل ۳-۵۸- آبشستگی تکیه‌گاه در یک آبراهه مرکب ۹۱

شکل ۳-۵۹- آبشستگی تکیه‌گاه پل و خاکریز دسترسی ۹۱

شکل ۳-۶۰- مشخصه‌های توزیع جریان: (الف) در فلوم آزمایشگاهی با کف تخت، (ب) تکیه‌گاه یک پل معمولی در شرایط واقعی ۹۳

شکل ۳-۶۱- طولی از خاکریز که جریان زنده را سد می‌کند ۹۵

شکل ۳-۶۲- انواع متداول تکیه‌گاه پل‌ها ۹۶

شکل ۳-۶۳- زاویه جهت‌گیری تکیه‌گاه نسبت به جریان ۹۶

شکل ۳-۶۴- انواع تکیه‌گاه پل‌ها (الف) خاکریز ریزشی، (ب) تکیه‌گاه قائم، (ج) تکیه‌گاه قائم با دیواره‌های باله‌ای ۹۷

شکل ۳-۶۵- دیاگرام شیلدز برای تعیین آستانه حرکت مصالح بستر رودخانه ۹۸

شکل ۳-۶۶- تغییرات ابعاد رودخانه در اثر مهاجرت فرسایش آبکندی به طرف بالادست رودخانه ۹۹

شکل ۳-۶۷- تشکیل پشته رسوبی در پیچ داخلی رودخانه ۱۰۰

شکل ۳-۶۸- جداشدگی جریان در اثر خاکریزی در رودخانه ۱۰۰

شکل ۳-۶۹- نمونه‌ای از پشته‌های رسوبی عرضی تشکیل شده در پایین‌دست پل در کشور ایتالیا ۱۰۰

شکل ۳-۷۰- نمونه‌ای از تعیین مقدار m ۱۰۱

شکل ۳-۷۱- انواع فرم‌های بستر در آبراهه های بستر ماسه‌ای ۱۰۲

شکل ۳-۷۲- فرم بستر دون (تلماسه‌ای) در حین عبور از محل پل، در آبراهه‌های بستر ماسه‌ای ۱۰۳

شکل ۳-۷۳- تجمع اجسام شناور در اطراف پایه پل ۱۰۴

شکل ۳-۷۴- نمونه‌هایی از انواع انسداد در ورودی آبگذر ۱۰۶

شکل ۳-۷۵- ورودی آبگذر با دیواره‌های تخلیه مواد شناور در طرفین ۱۰۹

شکل ۳-۷۶- ورودی آبگذر با تله‌های رسوبگیر و دیواره‌های تخلیه مواد شناور در طرفین ۱۱۰

شکل ۳-۷۷- چیدمان‌های مختلف دیوارهای تله رسوبگیر با (چپ) و بدون (راست) دیواره تخلیه مواد شناور ۱۱۰

شکل ۳-۷۸- حفاظت بستر پیرامونی پایه و تکیه‌گاه پل در برابر آبشستگی به روش سنگریزی ۱۱۵

شکل ۳-۷۹- کاربرد طوق در پیرامون پایه پل برای کاهش شدت آبشستگی ۱۱۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۸۰- کاربرد ریز شمع‌ها در بالادست پایه‌های پل به عنوان پیشمرگ در برابر اجسام شناور و برای کاهش شدت آبشستگی ۱۱۶

شکل ۳-۸۱- کاربرد رادیه و برید در پل‌ها و آبگذرهای راه و راه‌آهن ایران ۱۱۷

شکل ۳-۸۲- نمونه‌هایی از طرح اصلاح مسیر رودخانه‌ها در بازه ساخت سازه‌های تقاطعی (پل و آبگذر) ۱۲۰

شکل ۳-۸۳- نمونه‌هایی از طرح حفاظت و تثبیت دیواره رودخانه در محدوده ساخت پل‌ها ۱۲۲

شکل ۳-۸۴- نمایش سطوح مختلف دیواره رودخانه و ترکیب کاربرد روش‌های طبیعی و سازه‌ای ۱۲۲

شکل ۳-۸۵- نمونه روش‌های کنترل و تثبیت شیب بستر رودخانه ۱۲۲

شکل ۳-۸۶- بعضی از انواع موانعی که در محل احداث پل‌ها ایجاد می‌شود ۱۴۰

شکل ۳-۸۷- مانع پل تجن ۱۴۱

شکل ۳-۸۸- مجموعه آبگذرها و آبشار موجود در پایین‌دست، مانع گذر ماهی مهاجر به بالادست ۱۴۱

شکل ۳-۸۹- توزیع طبیعی سنگ‌های بستر رودخانه برای کمک به مهاجرت ماهی به بالادست (رودخانه سردآبرود، پایین‌دست سد انحرافی) ۱۴۲

شکل ۳-۹۰- چند نوع از آبگذرهای فولادی و بتنی ۱۴۳

شکل ۳-۹۱- آبشستگی در پایاب آبگذر و روش اصلاح آن با استفاده از سنگریزی و قرار دادن موانع بتنی ۱۴۴

شکل ۳-۹۲- سه نوع از موانع قرار داده شده در آبگذرها ۱۴۵

شکل ۳-۹۳- روش‌های دیگر قابل گذر نمودن آبگذرها ۱۴۶

شکل ۳-۹۴- نمای شماتیک راه‌ماهی حوضچه و سرریز ۱۴۸

شکل ۳-۹۵- نمونه‌ای از راه‌ماهی حوضچه و سرریز ۱۴۹

شکل ۳-۹۶- نمای شماتیک راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم ۱۴۹

شکل ۳-۹۷- نمایی از راه‌ماهی نوع بازشدگی قائم و زاویه بازشدگی ۴۵ درجه نسبت به جهت جریان ۱۴۹

شکل ۳-۹۸- نمای راه‌ماهی دنیل ۱۵۰

شکل ۳-۹۹- نمایی از راه‌ماهی دنیل ۱۵۰

شکل ۳-۱۰۰- نمای شماتیک برس ۱۵۱

شکل ۳-۱۰۱- عبور ماهی از نوع سیم در کانال ماهی- قایق‌رو ۱۵۱

شکل ۳-۱۰۲- عبور قایق از کانال ماهی- قایق‌رو در رودخانه مدوای ۱۵۲

شکل ۳-۱۰۳- استقرار برس‌های علفی در بستر رودخانه برای حفاظت از صدف‌های رودخانه‌ای ۱۵۲

شکل ۳-۱۰۴- نمایی از کانال ماهی- قایق‌رو ۱۵۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۱۰۵- کانال ماهی‌رو اجرا شده در سد آیو در سوئیس ۱۵۳

شکل ۳-۱۰۶- کانال ماهی- قایق رو در آلمان ۱۵۳

شکل ۴-۱- الگوی شماتیک مراحل پیشرفت یک پروژه‌ی حمل و نقل ۱۵۹

شکل ۴-۲- روش‌های انحراف آب در بستر رودخانه برای ساخت سازه‌های تقاطعی ۱۶۴

شکل ۴-۳- روش‌های انحراف موضعی رودخانه برای ساخت سازه‌های تقاطعی ۱۶۵

شکل ۴-۴- روش ساخت سازه تقاطعی بدون انحراف آب رودخانه ۱۶۷

شکل ۴-۵- کاربرد انواع شناور جهت ساخت سازه‌های رودخانه‌ای ۱۷۳

شکل ۵-۱- مراحل روش بازرسی ایمنی پل‌های رودخانه‌ای ۱۹۱

شکل ۵-۲- نقص شناسایی شده در حین نگهداری سازه ۱۹۵

شکل ۵-۳- هزینه تاخیر در انجام نگهداری‌ها ۱۹۶

شکل ۵-۴- محدوده انجام اقدامات نگهداری - سرویس ۱۹۷

شکل ۵-۵- عملکرد موثر منحرف‌کننده‌های واریزه ۲۰۱

شکل ۵-۶- تصویر سازه مرکب پل که به صورت ترکیب تعدادی آبگذر و سرریز منفرد، دقیقا در همان موقعیت تعریف شده است ۲۱۱

شکل ۵-۷- تراز حباب‌دار خطی برای کنترل تراز ۲۱۸

شکل پ.۲-۱- سهم خسارت زیرساخت‌های کشور در سیلاب ۱۳۹۸ ۲۴۶

شکل پ.۲-۲- سهم خسارت استان‌های کشور در سیلاب ۱۳۹۸ ۲۴۶

شکل پ.۲-۳- نقشه پراکنش پل‌های فاقد آبگذری لازم برای سیلاب در ایران ۲۴۷

شکل پ.۳-۱- سرعت سقوط ذرات ماسه‌ای با سنگینی ویژه ۲۷۳

شکل پ.۳-۲- شکل‌های متداول پایه‌های پل ۲۸۳

شکل پ.۳-۳- چهار ناحیه آبشستگی در روش FDOT ۲۹۰

شکل پ.۳-۴- شرایط سه نوع آبشستگی تکیه‌گاه ۲۹۶

شکل پ.۳-۵- شماتیک شکست ژئوتکنیکی ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه ۲۹۷

شکل پ.۳-۶- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های ریزشی در شرایط بستر متحرک ۲۹۸

شکل پ.۳-۷- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های با دیواره باله‌ای در شرایط بستر متحرک ۲۹۸

شکل پ.۳-۸- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های ریزشی در شرایط آب صاف ۳۰۱

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل پ.۳-۹- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های با دیواره باله‌ای در شرایط آب صاف	۳۰۱
شکل پ.۳-۱۰- سرعت و خطوط جریان در تنگ‌شدگی پل	۳۰۲
شکل پ. ۳-۱۱- سرعت برای SBR<5	۳۰۴
شکل پ.۳-۱۲- سرعت برای SBR> 5	۳۰۴
شکل پ. ۳-۱۳- سرعت برای SBR<5 و SBR>5	۳۰۵
شکل پ. ۳-۱۴- نمای پلان از آبشستگی تکیه‌گاه (مسئله‌های نمونه ۱ و ۲)	۳۰۶
شکل پ. ۳-۱۵- نمای پلان از آبشستگی تکیه‌گاه (مسئله‌های نمونه ۳ و ۴)	۳۰۸
شکل پ.۴-۱- نمونه کارگذاری پوشش سنگ‌چین برای تثبیت بستر	۳۲۲
شکل پ.۴-۲- نمونه کارهای انجام شده تورسنگی	۳۲۳
شکل پ.۴-۳- بلوک‌های متصل به روکش ارتجاعی	۳۲۴
شکل پ.۴-۴- بلوک‌های شش پایه	۳۲۴
شکل پ.۴-۵- بلوک بتنی روزنه‌دار	۳۲۵
شکل پ.۴-۶- بلوک بتنی حجمی روزنه‌دار	۳۲۵
شکل پ.۴-۷- نمونه‌ای از لحاف بتنی کار شده	۳۲۶
شکل پ.۴-۸- سدهای اصلاحی	۳۲۶
شکل پ.۴-۹- انواع سازه‌های اصلاح شیب	۳۲۷
شکل پ.۴-۱۰- نمونه‌هایی از سدهای اصلاحی برای حفاظت بستر فرسایشی	۳۲۸
شکل پ.۴-۱۱- حفاظت ساحل با پوشش سنگ	۳۲۹
شکل پ.۴-۱۲- تخریب پوشش سنگریزه‌ای	۳۲۹
شکل پ.۴-۱۳- دیواره تورسنگ با دو روش کنترل آبشستگی پنجه‌وش عمقی (چپ) وکف‌بند (راست)	۳۳۳
شکل پ.۴-۱۴- مشخصات آبشکن	۳۳۳
شکل پ.۴-۱۵- نمونه‌هایی از آبشکن‌های اجرا شده در رودخانه‌های مختلف	۳۳۵
شکل پ.۴-۱۶- طول بازه حفاظتی در پیچ رودخانه و نزدیک به پل	۳۳۶
شکل پ.۴-۱۷- دیواره تورسنگ در حفاظت دیواره پایین پیچ	۳۳۷
شکل پ.۴-۱۸- حفاظت طبیعی- سازه‌ای دیواره‌ی رودخانه در بالادست پل	۳۳۷
شکل پ.۴-۱۹- حفاظت طبیعی دیواره‌ی رودخانه در محل پل	۳۳۷
شکل پ.۴-۲۰- دیواره تورسنگ در حفاظت پیچ رودخانه در بالادست پل	۳۳۸

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل پ.۴-۲۱- دیواره تورسنگ در حفاظت پیچ رودخانه در بالادست پل	۳۳۸
شکل پ.۴-۲۲- صفحات مستغرق بتنی در حفاظت پیچ رودخانه در بازه‌ی پل	۳۳۸
شکل پ.۴-۲۳-آبشکن‌های کوتاه در حفاظت دیواره‌ی رودخانه در بالادست پل	۳۳۹
شکل پ.۴-۲۴- آبشکن‌ها در تثبیت راه ساحلی رودخانه تنگی، کانادا	۳۳۹
شکل پ.۴-۲۵-آبشکن‌ها در تثبیت راه ساحلی رودخانه قزل‌اوزن، ایران	۳۳۹
شکل پ. ۵-۱- اجزای مختلف یک سامانه طوقه لغزشی مغناطیسی	۳۴۳
شکل پ. ۵-۲- اجزای داخلی یک سنگ هوشمند	۳۴۴
شکل پ. ۵-۳- ساز و کار استفاده از تکنیک سنگ هوشمند	۳۴۴
شکل پ. ۵-۴- تکنیک‌های پایش آبشستگی با اهداف مرجع	۳۴۵
شکل پ. ۵-۵- اجزای یک پایشگر سوناری آبشستگی	۳۴۶
شکل پ. ۵-۶- تکنیک‌های بازرسی و اندازه‌گیری آبشستگی	۳۴۷
شکل پ. ۵-۷- (الف) مقطع میله پیزوالکتریک (ب) پایه‌های مخروطی شکل	۳۴۸
شکل پ. ۵-۸- نصب میله‌های پیزوالکتریک	۳۴۸
شکل پ. ۵-۹- تاثیر آبشستگی بر طول بیرون آمده‌ی میله از بستر رسوبی	۳۴۸

مقدمه

احداث شبکه راه‌های ارتباطی و توسعه صنعت حمل و نقل، از مهم‌ترین عوامل پیشرفت اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی هر کشور می‌باشد. معمولا در مسیر هر قطعه راه یا راه‌آهن، متناسب با شرایط منطقه تعدادی پل (اعم از رودخانه‌ای و غیر رودخانه‌ای) و آبگذر (آبرو و کالورت) ساخته می شود که هزینه هر واحد طول آن‌ها ده‌ها برابر طول مشابه راه و یا راه‌آهن متصل به آن‌هاست. از این رو مطالعه دقیق رفتار پل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ا ستفاده از ضوابط و معیارها در مراحل مختلف مطالعات، اجرا و بهره‌برداری، به لحاظ توجیه فنی و اقت صادی طرح‌ها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید)، تحلیل ریسک و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در مورد پل‌ها و آبگذرهای زیرجاده، کاســـتی‌های زیادی در آیین‌نامه‌ها و نشـــریات مختلف وجود دارد. برخی موارد عبارتند از تفاوت تعریف پل و آبگذر، دوره بازگشت سیلاب طرح، عمق آزاد، توجه به ریخت شناسی رودخانه در جانمایی، کارایی، دوام، و طرح هیدرولیکی پل، ظرفیت عبور جریان، نیروهای آب و مواد شـــناور وارد بر کوله، پایه، عرشـــه، برآورد میزان آبشستگی عمومی و موضعی و روش‌های حفاظت در برابر آبشستگی.

منابع فارسی موجود برای طرح هیدرولیکی و سازه‌ای پل‌ها، نسبت به آبگذرها بیش‌تر است. با وجود دسترسی به منابع فارسی جهت مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه و شناخت رفتار دینامیکی آن در تغییرپذیری و واکنش به تغییرات، کاربرد این دانش در گزارشات مهندسین مشاور طراح سازه‌های تقاطعی رودخانه، بسیار اندک می‌باشد. بنابراین راهنمای جامعی به زبان فار سی، برای تجمیع دانش و فن مورفولوژیکی، هیدرولیکی، مهند سی رودخانه برای جانمایی و طرح پایدار هند سی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه‌ها، و به‌عنوان پیش‌نیاز تخصصی در طراحی سازه‌ای پل‌ها و آبگذرها ضروری می‌باشد.

در تدوین «راهنمای طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه» ملاحظات زیر مورد نظر بوده است:

- کاربرد دانش و فن مهندسی رودخانه در جانمایی، طرح هندسی و پایداری سازه تقاطعی (پل‌ها و آبگذرها)
- برر سی راهنماها، د ستورالعمل‌ها،گزار شات فنی موجود در تمامی د ستگاه‌های م سئول و مرتبط با سازه‌های تقاطعی با رودخانه در ایران
- بررســـی راهنماها، دســـتورالعمل‌ها، گزارشـــات فنی موجود بین‌المللی مرتبط با طراحی، ســـاخت، نگهداری و برچیدن سازه‌های موقت و اضطراری در تقاطع با رودخانه
- تجربیات ملی و بین‌المللی در زمینه طرح و ساخت و نگهداری پل‌ها و آبگذرها
- بررسی تجربیات ملی در جانمایی و طرح هندسی سازه‌های تقاطعی تاریخی (پل، پل- بند و آبگذر)
- بررســی ملاحظات خاص دســتگاه‌های مســئول و کارفرما (به‌خصــوص: وزارت راه و شــهرســازی، وزارت نیرو و شهرداری‌ها) در طرح و ساخت سازه‌های تقاطعی

- هدف

هدف اصلی از تدوین «راهنمای طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه»، پیروی از اصول و ضوابط دانش و فن مهندسی رودخانه در طراحی پل‌ها و آبگذرها می‌باشد. راهنمای حاضر به موضوعات کلیدی مورفوهیدرولیکی شامل مورفولوژی، هیدرولیک، انتقال رسوب، آبشستگی، روگذری جریان، فرسایش کناره‌های رودخانه، انحراف مسیر جریان و رودخانه، اثرات سازه تقاطعی بر بالادست و پایین‌دست رودخانه و سایر موارد مرتبط می‌پردازد. در تدوین این راهنما، موضوعات محوری زیر مورد نظر بوده است:

۱- انواع پل‌ها (و اجزای آن شامل تکیه‌گاه، پایه‌ها و دیوارهای هادی و غیره) و آبگذرهای راه و راه‌آهن در مقیاس آبراهه‌ها و رودخانه‌های ایران
۲- مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه به‌عنوان مبانی اصلی در انتخاب و جانمایی سازه تقاطعی
۳- ملاحظات مربوط به حد بستر قانونی رودخانه و پهنه سیلاب (با دوره برگشت‌های مختلف) در جانمایی سازه تقاطعی
۴- مطالعات هیدرولیک رودخانه برای تعیین مشخصات جریان در سیلاب‌های شاخص طرح (سیل متوسط تا زیاد)، انتقال رسوب و جریان‌های واریزه‌ای (شامل مواد سنگی ریزدانه، در شت دانه و نیز قطعات چوب، شاخه‌های درختان، آشغال و غیره)، ظرفیت آبگذری، پدیده‌های سرریز از سازه و ریسک انسداد جریان
۵- ملاحظات مربوط به سیمای هندسی و معماری سازه تقاطعی، مانند «تعیین میزان مجاز تنگ‌شدگی عرض رودخانه به وسیله خاکریز»، «اثرات احداث سازه بر بازه بالادست و بازه پایین‌دست رودخانه و دامنه تاثیر آن»، «اثر احداث پل جدید در نزدیکی پل قدیمی»، «بهره‌گیری از الگوها و مشاهدات سازه‌های پل و پل- بند تاریخی ایران»
۶- ترسیم مبانی محیط‌زیستی در طرح سازه تقاطعی از نظر پیوستگی طولی و عرضی سامانه رودخانه در مهاجرت آبزیان از بالادست به پایین‌دست سازه و بالعکس، قایقرانی در رودخانه‌های قابل قایقرانی و همچنین بردا شت مصالح از بستر رودخانه
۷- شیوه‌نامه تعیین دوره بازگشت سیلاب و ظرفیت آبگذری پل‌ها و آبگذرها (با توجه به مبانی مهندسی رودخانه و پایداری بازه رودخانه، ایمنی مردم و دارایی‌های مجاور رودخانه، اهمیت کاربری سازه تقاطعی در ارتباطات منطقه، سطح خطرپذیری پل و ریسک سیلاب)
۸- شیوه‌نامه برآورد آبشستگی عمومی و تنگ‌شدگی در بازه احداث سازه و آبشستگی موضعی در پل‌ها (تکیه‌گاه و پایه‌ها) و آبگذرها
۹- روش‌های مناسب حفاظت و تثبیت بازه‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه و حفاظت پایه پل در راستای حفظ سازه تقاطعی
۱۰- شیوه‌نامه تصمیم‌سازی برای جانمایی، کارگاه ساخت و نگهداری سازه تقاطعی و توجه به شاخصه‌های مرحله‌بندی و زمان‌بندی کار در رودخانه

۱۱- ملاحظات در اجرای سازه موقت (پل یا آبگذر) در حین سیلاب و برچیدن آن برای جایگزینی با سازه اصلی
۱۲- شیوه‌نامه پایش و بازرسی اجزای سازه پل و آبگذر از نظر پایداری، آسیب‌پذیری‌ها، شواهد توسعه آبشستگی، انسداد دهانه‌ها
۱۳- ملاحظات مورفوهیدرولیکی در نگهداری و ترمیم یا بازسازی سازه پل و آبگذر

- دامنه کاربرد

راهنمای مورفوهیدرولیکی حاضر در کنار دیگر راهنماهای مربوط به پی و سازه، در مراحل مختلف پروژه‌های طراحی پل‌ها و آبگذرها، شامل مطالعات امکان‌سنجی، توجیهی و پایه، مطالعات طراحی تفصیلی، نظارت و اجرا و بهره‌برداری و نگهداری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربرد این راهنما برای کاهش آسیب‌پذیری‌ها و خطرات سیل و برای دوام و پایداری سازه پل و آبگذر حائز اهمیت است.

کاربران اصلی این راهنما، مهندسین مشاور و پیمانکاران با رشته مهندسی رودخانه و سازه‌های رودخانه‌ای و تقاطعی، تمامی دستگاه‌های دولتی و نهادهای مسئول و مرتبط با سازه‌های تقاطعی با رودخانه (مانند سازمان برنامه و بودجه کشور، وزارت نیرو، وزارت راه و شهرسازی، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نفت، وزارت کشور و شهرداری‌ها، سازمان حفاظت محیط‌زیست و وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی) هستند.

همچنین دستگاه‌های مسئول در دوره بحران رخداد سیلاب (مانند سازمان مدیریت بحران کشور و شهرداری‌ها، مدیریت بحران وزارت نفت، نهادهای نظامی و انتظامی و هلال احمر) و نهادهای مردمی نیز می‌توانند از این راهنما بهره‌برداری نمایند.

فصل ۱

کلیات

۱-۱- تعاریف و مفاهیم

در این راهنما، برای واژگان و مفاهیم کلیدی از مرجع اصلی کتاب «فرهنگ مهندسی رودخانه» از انتشارات دفتر طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور [۷۹]، همچنین از نشریات فنی و ضوابط وزارت نیرو و وزارت راه و شهر سازی ا ستفاده شده ا ست که مرجع آن در متن معرفی گردیده و آدرس آن در فهر ست منابع آمده ا ست. برخی از واژگان کلیدی به کار رفته در این راهنما، به شرح زیر می‌باشند:

آبراهه ا صلی (Main channel): مجرای ا صلی آبراهه ا ست که قابل مشاهده و تشخیص ا ست، در مواقع غیر سیلابی جریان از آن عبور می‌کند و ظرفیت مقطع پرآن نیز در آبراهه‌های دشتی در حدود سیل متوسط سالیانه است.

سیلابد شت (Floodplain): سطحی از زمین مجاور به یک آبراهه یا رودخانه است که از کرانه‌های آبراهه تا پای دیواره‌های دره ادامه داشته و در طول رخداد سیلاب بزرگ مواجه با آبگرفتگی می‌شود.

آبگذر یا آبرو (Culvert): در فرهنگ مهندسی رودخانه (وزارت نیرو)، از واژه «آبگذر» و در نشریات و حوزه راه و شهرسازی از عبارت «آبرو یا آب‌رو» استفاده می‌گردد. در تقاطع آبراهه با راه و ریل، براساس آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران [۵]، اگر مجموع دهانه باز گذر جریان آب از آبراهه تا ۶ متر با شد، آبرو نامیده می شود. در ن شریات ۲۹۲ و ۲۹۳ وزارت راه و شهرسازی، دهانه تا ۱۰ متر نیز آبرو نامیده شده است [۴۰ و ۴۱].

آبگذر بسته (Closed Culvert): سازه آبگذری که در طول گذرگاه خود دارای کف‌بند نیز هست. در این نوع، بستر طبیعی با مصالح مشابه دیواره و عر شه یا دیگر مصالح و روش‌ها تثبیت می شود. آبگذرهای پیش ساخته بتنی به‌خصوص لوله‌ای، از نوع آبگذرهای بسته هستند.

آبگذر سیلابد شتی (Floodplain culvert): آبگذری ا ست که در ارا ضی حا شیه رودخانه‌ها قرار دا شته و در زمان سیلاب به‌دلیل جریانات بالاتر از تراز لبریز رودخانه مواجه با آبگرفتگی می‌شود.

بده / بده جریان (Discharge): جریان خروجی از یک لوله یا آبراهه و یا یک حو ضه ا ست که بر حسب حجم جریان در واحد زمان بیان می‌شود. همچنین در ایران با عبارت دبی (واژه فرانسوی) نیز مشهور است.

پل (Bridge): در تقاطع آبراهه با راه و ریل، براساس آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران (ضابطه شماره ۴۱۵) [۵]، اگر مجموع دهانه باز گذر جریان آب از آبراهه بزرگ‌تر از ۶ متر باشد، پل نامیده می‌شود. در نشریات ۲۹۲ و ۲۹۳، به دهانه بیش از ۱۰ متر پل قلمداد شده است. براساس نقشه‌های تیپ نشریه ۲۹۲ و ۲۹۳ وزارت راه و شهرسازی، پل‌ها در سه گروه: ۱- دهانه‌های کوتاه (زیر ۱۰ متر)، ۲- دهانه‌های متو سط (بین ۱۰ تا ۲۰ متر) و ۳- دهانه‌های بلند (بزرگ‌تر از ۲۰ متر) تقسیم‌بندی شده است [۴۰ و ۴۱].

پل- بند (Bridge-Diversion Dam): در فرهنگ سازه‌های تاریخی آب و سازمان میراث فرهنگی، واژه «پل‌بند» برای سازه‌های رودخانه‌ای با کارکرد پل و سد انحرافی، مشهور است. مانند پل‌بند امیر بر روی رود کر واقع در استان فارس

جریان گلی / جریان غلیظ (Mud flow): جریان مواد غیرمتجانس نظیر ذرات خاک، سنگ و غیره که با مقدار زیادی آب مخلوط بوده و جریان می‌یابد. به دلیل لزجت بالا در مقایسه با آب، با سرعت بسیار کمی حرکت می‌کند. در بعضی از مراجع معادل واژه Debris flow گرفته شده است با این تفاوت که مواد انتقالی در Debris flow درشت‌تر از مواد Mudflow می‌باشد.

جریان واریزه‌ای (Debris flow): جریانی که با خود مواد مخلوطی اعم از مواد سنگی ریزدانه، درشت‌دانه و نیز قطعات چوب، شاخه‌های درختان، آشغال و غیره را حمل می‌کند. مشروط به آن‌که بیش از ۵۰ در صد ذرات حمل شده درشت‌تر از ماسه باشند.

حد بستر / بستر (قانونی) رودخانه: مطابق تعریف وزارت نیرو: بستر رودخانه (یا مسیل یا نهر طبیعی) آن قسمت از رودخانه (مسیل یا نهر طبیعی) است که رژیم جریان و هندسه آن در شرایط طبیعی (بدون اثر سازه‌های آبی، سازه‌های حفاظت رودخانه، سازه‌های تقاطعی، دخل و تصرفات و هر گونه اثرات انسان ساخت) در نظر گرفته شده و در حداکثر طغیان معمولی زیر آب می‌رود (سیل مبنای حد بستر سیلاب ۲۵ ساله است که در شرایط خاص می‌تواند بیش‌تر یا کم‌تر باشد). حد بستر رودخانه و حریم رودخانه با نشانه‌گذاری به نمایش عمومی در می‌آید.

حریم کمی / حریم فنی: مطابق تعریف وزارت نیرو: حریم آن قسمت از اراضی اطراف رودخانه (مسیل، نهر طبیعی یا سنتی، مرداب و برکه طبیعی) است که بلافاصله پس از حد بستر قرار دارد و به‌عنوان حق ارتفاق برای کمال انتفاع (حق بهره‌برداری، بدون حق مالکیت شخصی) و حفاظت کمی و کیفی آن‌ها لازم است. حریم کمی تا ۲۰ متر (تراز افقی) از حاشیه حد بستر در رودخانه‌ها است. تعیین پهنای حریم کمی و نوع کاربری‌های مجاز و غیرمجاز با توجه به دستورالعمل و تایید وزارت نیرو خواهد بود.

حریم کیفی: مطابق تعریف وزارت نیرو: حریم آن قسمت از اراضی اطراف رودخانه است که بلافاصله پس از حد بستر قرار دارد و به‌عنوان حق ارتفاق برای کمال انتفاع (حق بهره‌برداری، بدون حق مالکیت شخصی) و حفاظت کمی و کیفی آن‌ها لازم است. حریم کیفی تا ۱۵۰ متر (تراز افقی) از حاشیه حد بستر در رودخانه‌ها است. تعیین پهنای حریم کیفی و نوع کاربری‌های مجاز و غیرمجاز با توجه به دستورالعمل و تایید وزارت نیرو خواهد بود.

ریخت شناسی آبی یا هیدرومورفولوژی (Hydro-morphology): فرایند حاصل از اندرکنش و رابطه بین فرایندهای هیدرولوژیکی و زمین شکل پیکره‌های آبی و یا اندرکنش فرایندهای زمین ریختاری با آب سطحی و زیرزمینی، در اثر عوامل طبیعی و انسان- ساخت، در مقیاس زمانی و مکانی نسبتا طولانی است.

ریخت شناسی پویایی یا مورفودینامیکی (Morphodynamics): فرایند حاصل از اندرکنش ریخت شناسی آبراهه و خصوصیات دینامیکی جریان آب است که سبب تکوین ریخت‌شناسی آبراهه نیز می‌گردد.

ریخت‌شناسی یا مورفولوژی (Morphology): فرایند حاصل از اندرکنش زمین ریختاری با جریان آب و رسوب است که در اثر عوامل طبیعی و انسان‌ساخت، در مقیاس زمانی و مکانی نسبتا طولانی سبب شکل‌پذیری آبراهه می‌گردد.

مورفوهیدرولیکی (Morpho-hydraulics): پیوند بین مورفولوژی آبراهه و هیدرولیک جریان است. فرایند حاصل از اندرکنش ریخت‌شناسی آبراهه و خصوصیات جریان آب و رسوب است، که سبب تغییرات و تکوین ریخت‌شناسی آبراهه نیز می‌گردد.

۱-۲- مفهوم و ضرورت مطالعات مورفوهیدرولیکی

رودخانه تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر زمین‌شناسی منطقه، خصوصیات تشکیلات آبرفتی، مشخصات هیدرولوژیکی حوضه آبخیز، شرایط هیدرولیکی جریان و نیز نحوه بهره‌برداری بشر از آن در تعادل پویا به سر می‌برد، اما خصوصیت تغییرپذیری برخی از این عوامل سبب شده تا رودخانه حتی در کوتاه مدت و در بازه‌های مختلف آن همواره در معرض تغییر و تحول باشد. تغییرات و جابجایی‌هایی که در اثر روند طبیعی یا توسعه‌طلبی ناهنجار بشر در راستای مسیر و ابعاد هندسی رودخانه رخ می‌دهد، نتیجه منطقی عکس‌العمل سیستم رودخانه در جهت برقراری موازنه جدید می‌باشد [۲۲].

دانش و فن مهندسی رودخانه از نزدیک به پنج دهه قبل در بسیاری از کشورها مورد توجه طرح‌های عمرانی بوده است. در ایران، جایگاه استفاده از این دانش فنی در پروژه‌های غیررودخانه‌ای (مانند احداث سازه‌ها و خطوط تقاطعی مانند پل، آبگذر، سیفون، خطوط انتقال آب و نفت و گاز و برق و مخابرات) به بهانه محدودیت اعتبارات، توسط دستگاه‌های ذی‌ربط نادیده گرفته شده و یا کمرنگ است. جانمایی و طرح فنی سازه‌های متقاطع با رودخانه (به خصوص پل‌ها، آبگذرها یا آبروها) بر شرایط جریان و رسوب در رودخانه‌ها اثر دارند و نیازمند شناخت مورفوهیدرولیکی اندرکنش رودخانه و سازه بر اساس دانش مهندسی رودخانه می‌باشند. به عنوان مثال ساخت پل‌ها و آبگذرها در مسیر جریان رودخانه سبب افزایش توان جریان رودخانه، تلاطم جریان، تخریب و فرسایش، توسعه فرسایش‌های عمیق رودخانه، منشعب شدن رودخانه و همچنین فرسایش کناره‌ای در پایین‌دست می‌شود [۱۳۸]، [۱۵۶]، [۱۸۴] و [۱۸۵]. رودخانه‌ها تحت تاثیر فرسایش و رسوب‌گذاری دستخوش تغییرات مورفولوژیکی می‌شوند. از آن جمله می‌توان به تغییر راستا، جابجایی‌های عرضی و طولی، میان‌بری پیچ یا انحراف مسیر، تغییر نوع رودخانه، تغییر تراز بستر، تغییر مواد بستری و دگرگونی ویژگی‌های هندسی آبراهه (عرض- عمق- شیب- راستا) اشاره کرد [۷۸].

هرساله و با رخداد سیلاب‌های کوچک و یا بزرگ، تعداد زیادی از پل‌ها و آبگذرها که در بستر، حریم و یا پهنه سیلابی رودخانه احداث شده‌اند، تخریب شده و یا آسیب جدی دیده که منجر به قطع راه ارتباطی، انسداد نسبی جریان و کاهش آبگذری پل، انتقال قطعات آسیب دیده پل به پایین‌دست و تغییرات رودخانه‌ای شده که باعث تشدید خسارات در مناطق دیگر (در پایین‌دست و حتی در بالادست) نیز می‌گردد. با رخداد سیلاب و تخریب یا آسیب‌دیدگی سازه‌های تقاطعی، ضرورت احداث سامانه‌های جایگزین موقت و سریع الاجرا در دستور کار مدیریت بحران قرار می‌گیرد. عدم توجه به جانمایی سازه‌های پیش ساخته، موقتی و اضطراری، سبب ناهنجاری در سامانه رودخانه می‌گردد و تا جایگزینی آن با سازه دائم، گاهی اثرات آن تا سال‌ها باقی مانده و یا برای سیلاب بعدی خطرآفرین می‌گردد [۳۷].

همان‌گونه که بزرگی سیلاب در خطرپذیری سازه‌های رودخانه‌ای موثر می‌باشد، تغییرپذیری و واکنش سامانه رودخانه، حتی در سیلاب‌های کوچک‌تر نیز خطرآفرین است. جانمایی و طرح پایدار پل‌ها و آبگذرها، چنانچه با رعایت اصول ریخت‌شناسی و مهندسی رودخانه در راستای مدیریت سیلاب انجام نشود، باعث تخریب سازه و تشدید خسارات سیلاب می‌گردد.

برخلاف راهبرد طراحی سنتی که اساس آن بر پایداری سازه، راندمان هیدرولیکی و هزینه‌های اولیه ساخت سازه متمرکز است، مطالعات مورفوهیدرولیکی به اندرکنش سازه تقاطعی (مانند پل و آبگذر) و آبراهه، به‌خصوص در سیلاب‌های بزرگ می‌پردازد. اداره بزرگراه‌های ایالت مریلند (SHA) در سال ۱۹۹۲ روند طراحی جدیدی را برای محدود کردن تاثیر وجود پل‌ها و آبگذرها بر آبراهه‌های طبیعی شروع کرد. عوامل موثر در این مطالعات شامل تعیین مشخصات آبراهه‌ها در شرایط جریان پر (مانند عرض، عمق و بده) بود. در این راستا دوره‌های آموزشی مبتدی و پیشرفته برای آشنایی با مورفولوژی رودخانه توسط کارشناسان خبره برای مهندسین طراح سازه‌ها برگزار شد تا طراحی بهتر و متناسب با مورفولوژی آبراهه ارائه کنند. دستورالعمل طراحی، به‌خصوص برای آبگذرها با درنظرگیری مورفولوژی آبراهه، مجرای عبور ماهی و سایر مطالعات محیط‌زیستی به‌روزرسانی شد. دستورالعمل جدید بر نیاز به شناسایی تمام اهداف مناسب در شروع فرایند طراحی تاکید دارد تا بهترین راه‌حل جامع را ارائه کرد. مفهوم این طراحی بر حفاظت از سامانه پایدار آبراهه است، که وجود سازه باعث فرسایش و رسوب نشود. آبگذرهای متعددی بر اساس مفاهیم مورفولوژی جریان احداث شدند و عملکرد آن‌ها بسیار موفقیت‌آمیز بود. در این پروژه هماهنگی با سازمان‌های نظارتی و محیط‌زیستی برای دخیل شدن مسائل مرتبط با محیط‌زیست در طراحی و ساخت سازه انجام شد.

مراحل مطالعات مورفوهیدرولیکی برای طراحی سازه‌های تقاطعی (پل و آبگذر) در سامانه رودخانه‌ها توسط روزگن [۱۸۹] تدوین شده و در مقاله کاسیکی و دیویس [۱۵۵] گزارش شده است. از بررسی منابع مختلف، خلاصه‌ای از مفهوم و کاربرد دانش مورفوهیدرولیکی در مطالعات مربوط به سازه‌های تقاطعی در جدول (۱-۱) آمده است.

جدول ۱-۱- خلاصه مفهومی مطالعات مورفوهیدرولیکی در طرح سازه‌های تقاطعی (پل و آبگذر)

مرجع و عنوان مطالعات	توصیه‌ها برای مطالعات جامع مورفوهیدرولیکی
روزگن (۱۹۹۶)، و کاسینکی و دیویس (۲۰۰۱) کاربرد دانش مورفولوژی رودخانه در طراحی پل و آبگذر	– تعیین اهداف جامع طراحی – انجام مطالعات هیدرولوژیک – انجام مطالعات مورفولوژیکی و پایداری آبراهه – انجام محاسبات هیدرولیکی و آبشستگی – ارائه گزینه‌های ممکن برای سازه شامل اقدامات مناسب برای انحراف موقت جریان در طول احداث سازه
هو و همکاران (۲۰۱۳) توسعه طراحی آبگذر جعبه‌ای خود تمیز شونده – مرحله دوم طراحی	محدودیت‌هایی در ارتباط با قوانین محیط‌زیست وجود دارد که باید برای حفظ سیستم رودخانه رعایت شود: – حفاظت از مناطق تخم‌ریزی ماهی‌ها – دسترسی ماهیگیران یا حیوانات، نگهداری از مواد طبیعی بر روی آستانه‌های سازه هیدرولیکی – حفظ شرایط پتانسیل مورفودینامیکی رودخانه و غیره
سلویو (۲۰۱۵) از هیدرولیک تا هیدرومورفو بیودینامیک: تغییرات در مطالعات رودخانه‌ای در ۵۰ سال گذشته	– مدل‌سازی در مقیاس‌های بزرگ برای درک رابطه‌ی سازه و مجرای جریان بسیار مفید است. – سازه‌هایی با فاصله چندین کیلومتر احتمال ارتباط هیدرولیکی دارند. – تغییر در یک سازه ممکن است بر بده اوج و سرعت جریان در سازه‌های دیگر موثر باشد. – به هنگام سیلاب، گاهی هندسه جاده روی سازه از ابعاد خود سازه مهم‌تر است.

ادامه جدول ۱-۱- خلاصه مفهومی مطالعات مورفوهیدرولیکی در طرح سازه‌های تقاطعی (پل و آبگذر)

مرجع و عنوان مطالعات	توصیه‌ها برای مطالعات جامع مورفوهیدرولیکی
دوولکار و تروهرت (۲۰۱۹) شناسایی پارامترهای سازه‌ای و هیدرولیکی حساس در شبکه پل - رودخانه در شرایط سیل	– برای تجزیه و تحلیل دینامیک جریان گذرا، استفاده از هیدروگراف‌های مصنوعی علاوه بر داده‌های بده جریان در مطالعات طراحی دید خوبی از شرایط می‌دهد. – توسعه نقاط برداشت و داده‌های بده جریان در مناطق حساس در روند تصمیم‌گیری برای طراحی موثر است. – پل‌هایی که آبراهه اصلی رودخانه را محدود می‌کنند به طور طبیعی هدف تخریب قرار می‌گیرند، برای عبور جاده یا ریل از دشت سیلابی، راه حل اقتصادی‌تر نصب سازه‌های کمکی است. – ارزش احیای رودخانه، به‌ویژه در مجاورت پل‌ها بسیار مهم است. احیای نهرها و اتصال مجدد به دشت‌های سیلابی آن‌ها به طور چشمگیری در عملکرد بهتر سازه‌های متقاطع در زمان سیلاب موثر است.
مورنوکوماچو و همکاران (۲۰۲۰) شبیه‌سازی وابستگی هیدرولیکی بین پل‌ها در امتداد یک رودخانه تحت شرایط گذر سیل	– سیستم رودخانه‌ها به آب، رسوبات و پوشش گیاهی نیازمند است. – دینامیک آب، رسوبات و پوشش گیاهی توسط رشته‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد، اما چیزی از پیچیدگی آن نمی‌کاهد. – کنترل رودخانه، مدیریت و احیای رودخانه سه فاز تاریخی مهندسی رودخانه هستند. – ترکیب معقولی از رویکرد کل‌نگر و تقلیل گرایانه، راه مطلوبی برای علم رودخانه و مهندسی است.
راه‌آهن بالتیکا و اتحادیه اروپا (۲۰۲۲) دستورالعمل‌های طراحی زیرسازی راه‌آهن، قسمت (۲)- هیدرولیک، زهکشی و آبگذر	– مطالعات در این زمینه باید به صورت تلفیقی (شبیه‌سازی و تحلیلی) انجام شود. – آبگذر خودشوینده از رسوب‌گذاری و فرسایش جلوگیری کرده و شرایط مورفوهیدرولیکی محل را حفظ می‌کند.

۱-۳- سوابق مطالعات مورفوهیدرولیکی در طراحی پل‌ها و آبگذرها

منابع فارسی موجود برای تدوین مطالعات مورفوهیدرولیکی رودخانه و شناخت رفتار دینامیکی آن در پاسخ به جانمایی سازه‌های تقاطعی (مانند: پل‌ها و آبگذرها) و اندرکنش متقابل آن‌ها با سامانه آبراهه کافی نیست. با بررسی منابع مختلف از ایران و جهان، گزیده مهم‌ترین نشریه‌ها، راهنماها، ضابطه‌ها، دستورالعمل‌ها، کتاب‌ها و گزارشات مربوط به مطالعات مورفوهیدرولیکی در طراحی پل‌ها و آبگذرها در قالب جدول (پ.۱-۱)، در پیو ست شماره یک راهنما، معرفی و به طور خلاصه شرح گردیده است. در این جدول، ردیف‌های ۱ تا ۲۱ مربوط به منابع فارسی و ردیف‌های ۲۲ تا ۴۴ از منابع انگلیسی می‌باشد.

در دو دهه اخیر، اهمیت مطالعات ترکیبی هیدرولیکی و مورفولوژیکی مورد توجه پژوهشگران نیز بوده است. به طور نمونه، زراتی (۱۳۸۲) در کتاب با عنوان «نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل» به روش‌های ساده و کاربردی در طراحی هیدرولیک پل با ملاحظات ریخت‌شناسی پرداخته، و مثال‌های متعددی از تخریب پل‌ها را ارائه می‌نماید [۵۸]. یمانی و همکاران (۱۳۸۲) به بررسی تاثیر ساخت پل و سد بر تغییرات مورفولوژی رودخانه‌های بابل و تحول آن در جلگه ساحلی خزر پرداختند. نتایج نشان داد که رودخانه بابل در قسمت بالای جلگه تقریبا ناپایدار و فعال است، ولی بخش انتهایی پایداری نسبی دارد [۸۰]. مطالعات مشابه توسط نوحه‌گر و همکاران (۱۳۸۹) در خصوص تغییرات نیمرخ طولی و عرضی بازه بالادست رودخانه میناب انجام شد [۷۴]. رستمی و اقبالی (۱۳۹۰) در پژوهشی به بررسی تاثیر ساخت سازه پل و دیوارهای هدایت‌کننده بر تغییرات مورفولوژی و هیدرولیک جریان (مورفوهیدرولیک) در محدوده مخروط افکنه رودخانه کردان پرداختند [۵۵]. ابهری رشت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی به شبیه‌سازی اثرات ساخت سازه‌هایی

مانند پل، بزرگراه، پارک و دیواره‌های هدایت‌کننده بر پارامترهای هیدرولیکی جریان و مورفولوژی رودخانه کن پرداختند [۴۴]. فرجی کلاریجانی و همکاران (۱۳۹۵) تاثیر وجود پل بر هیدرولیک جریان و مورفولوژی رودخانه در بالادست و پایین‌دست سازه و همچنین اثر عرض پایه‌ها و شکل مقطع پایه‌های پل بر جریان رودخانه قره‌سو واقع در استان کرمانشاه را بررسی نمودند [۶۶]. جهان‌تیغ و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه هیرمند با برآورد میزان رسوبات معلق حمل شده ناشی از سیلاب‌های ورودی به این رودخانه پرداختند. بدین منظور، نمونه‌هایی از سیلاب‌های ورودی کشور افغانستان به ایران، برداشت و رسوبات معلق همراه آن‌ها برآورد و روند تغییرات غلظت رسوبات در تغییرات زمانی و مکانی مختلف به صورت میدانی در طول مسیر رودخانه سیستان مورد بررسی قرار گرفت. بازه‌های مستعد رسوب‌گذاری در طول مسیر رودخانه به وسیله تصاویر ماهواره‌ای با کیفیت بالا مشخص و تغییرات مسیر رودخانه، ضریب سینوسیته، حالت جریان رودخانه و تغییرات عرض بستر سیلابی رودخانه در بازه زمانی نیم قرن تعیین شد. براساس نتایج این پژوهش، عرض بستر رودخانه در این بازه زمانی تغییرات چشم‌گیری داشته است و ۷۳ درصد از بستر رودخانه به‌دلیل رسوب‌گذاری و ایجاد ناپایداری، قابلیت انتقال جریان آب را ندارد. در مجموع نتایج کلی این پژوهش بیانگر آن است که تغییرات شیب بستر و احداث پل، سد و غیره، از مهم‌ترین عوامل تغییر غلظت رسوب معلق و به دنبال آن تغییر در مورفولوژی رودخانه می‌باشند [۵۱]. آشناور و یاسی (۱۳۹۹) به بررسی دو حالت با و بدون وجود پل‌های رودخانه کارون در بازه شهر اهواز بر پارامترهای هیدرولیکی جریان پرداختند. نتایج نشان داد که با رعایت اصول مهندسی رودخانه می‌توان پل‌هایی با اثربخشی کم‌تر بر هیدرولیک جریان، به‌خصوص در شرایط سیلابی ساخت و یا پل‌های نامناسب موجود را جایگزین نمود [۴۸]. رستمی و همکاران (۱۴۰۰) تاثیر ساخت پل بر هیدرولیک جریان و تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه قره‌سو را در رخداد سیلاب ۱۳۹۸ شبیه‌سازی نمودند [۵۶]. نتایج نشان داد که پدیده رسوب‌گذاری غالب است و سازه‌های تقاطعی غیراصولی احداث شده با کاهش سطح مقطع جریان موجب پس‌زدگی جریان، ته‌نشست رسوبات در بالادست و کاهش ظرفیت عبور سیلاب شده‌اند. پدیده فرسایش نیز به صورت موضعی در پایین‌دست سازه‌های تقاطعی مشاهده شد که بیش‌ترین آن مربوط به پایین‌دست پل قره تپه و پل نیاز آب می‌با شد. براساس نتایج این تحقیق، اصلاح ابعاد سازه‌های تقاطعی می‌تواند در کاهش فرایند رسوب‌گذاری موثر باشد. خیری و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی اثر پل بر روی مورفولوژی و هیدرولیک جریان رودخانه در روستای جوربند، شهرستان چمستان استان مازندران پرداختند. در این تحقیق از روش فتوگرامتری توسط پهباد استفاده شد. نتایج نشان داد که ساخت پل سبب تغییرات بسیار زیادی در رودخانه، به‌خصوص در بازه پایین‌دست شده است [۵۴].

پژوهش‌های خارجی درخصوص اثرات پل بر مورفوهیدرولیکی رودخانه بیش‌تر بوده است. برای نمونه به مقالات گرگوری (۱۹۸۳) [۱۳۹]، رندال و ادوارد (۲۰۰۳) [۱۸۲]، روبرت (۲۰۰۳) [۱۸۸]، وانگ و همکاران (۲۰۱۰) [۲۰۷]، روی و شاو (۲۰۱۷) [۱۹۱]، هادی و اردیکلی‌اغلو (۲۰۱۸) [۱۴۰]، اوگراز و اونن (۲۰۲۰) [۱۷۵] و بنتو و همکاران (۲۰۲۰) [۹۶]، می‌توان مراجعه کرد.

بررسی منابع موجود در پیوست شماره یک، جدول (پ.۱-۱)، نشان می‌دهد که موضوعات مورفوهیدرولیکی رودخانه در طراحی، اجرا و نگهداری سازه‌های تقاطعی به صورت پراکنده و ناقص در حدود ۴۳ مرجع فارسی و انگلیسی آمده است ولی یک راهنمای منسجم و جامع در اختیار کارفرما و مهندسین مشاور و پیمانکارهای سازه‌های تقاطعی کشور نمی‌باشد.

۱-۴- بررسی فرایند مطالعه و طراحی واجرای پل‌ها و آبگذرها از نظر قوانین و آیین‌نامه‌ها

۱-۴-۱- ضوابط، قوانین و آیین‌نامه‌های موجود

نظام فنی و اجرایی طرح‌های عمرانی کشور، به‌کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه های نگهداری و بهره‌برداری از طرح ها را مورد تاکید قرار داده است. مجموعه ضابطه ها، دستورالعمل‌ها و راهنماهای مرتبط با موضوعات مورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی آبراهه‌ها برای مراحل مطالعه، طراحی و اجرای پل‌ها و آبگذرها در جدول (پ.۱-۱) ردیف‌های ۱ تا ۲۰، در پیوست شماره یک، معرفی شده است. همچنین روند تکوین ضوابط، قوانین و آیین‌نامه‌های موجود ایران در پیوست شماره یک نیز خلاصه و شرح گردیده است.

بر اساس گزارش جامع هیات ویژه سیلاب سال ۱۳۹۸، برخی مبانی اولیه در آیین‌نامه‌های مربوط به پل‌های ایران، همسان و یا شفاف نیستند. برخی از چالش‌های اصلی به شرح زیر است:

- تفاوت تعریف پل در نشریات مختلف دیده می شود. درحالی‌که برا ساس آیین‌نامه طرح هند سی راه‌های ایران (ضابطه ۴۱۵) [۵] مجموع دهانه آبرو به ۶ متر محدود شده و به دهانه بزرگ‌تر از ۶ متر یا مجموع دهانه بزرگ‌تر از ۶ متر، پل اطلاق می شود. در نشریات شماره ۲۹۲ و ۲۹۳ وزارت راه و شهر سازی، به دهانه تا ۱۰ متر، آبرو اطلاق شده و بیش از آن را پل قلمداد کرده است [۴۰ و ۴۱].
- در بخش مطالعات توجیهی اولیه طرح‌های احداث راه از نشریه ۴۱۳ [۲۷]، بیان شده که تخمین دهانه کلی پل‌های واقع در آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها برا ساس بده ۱۰۰ ساله و برای سایر انواع راه، با ا ستفاده از بده ۵۰ ساله باشد و یادآور شده که برای آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها، تمهیدات عدم انسداد خط برای بده سیلابی با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله بررسی شود. درحالی‌که در ضابطه ۴۱۵ [۵]، دوره بازگشت سیلاب طرح به شکل دیگری تعریف شده و از دوره ۲۵ سال، برای راه‌های فرعی تا بیشینه ۱۰۰ ساله، در راه‌های اصلی می‌باشد.
- طراحی طول پل و طول دهانه‌ها بر اساس هیدرولیک جریان، لحاظ کردن ریخت‌شناسی رودخانه در طرح هیدرولیکی پل و روش‌های حفاظت کوله‌ها و پایه‌های پل در برابر آبشستگی، در آیین‌نامه‌ها به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است.
- عمق آزاد برای طراحی تراز عر شه کم‌تر مورد بحث قرار گرفته ا ست. مثلا در ضابطه ۴۱۵ [۵] عمق آزاد برابر ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است درصورتی‌که این مقدار به نوع پوشش گیاهی منطقه بستگی دارد.
- نیروهای وارد بر عرشه در اثر عبور آب و نیروهای وارد از طرف نخاله‌های عبوری مورد توجه نبوده است.

- کمبود ظرفیت عبور آبگذر، مکان‌یابی نامناسب یا عدم کارایی آبگذر در عبور جریان باعث عواقبی مانند نشست راه، خرابی کامل راه و در حالت بحرانی نیز باعث جدا شدن آبگذر از بدنه راه و حرکت آن در جهت جریان می‌شود.
- بررسی شهرهای آسیب‌دیده در رویداد سیلابی ۱۳۹۸ به روشنی نشان دادند که آیین‌نامه‌ها ضعف‌ها و خلاءهای جدی در زمینه تعیین تراز راه‌های اصلی و شریانی، پل‌ها، هدایت آب‌های سطحی به‌ویژه در زیرگذرها و مانند آن دارند. آیین‌نامه طراحی راه‌های شهری ایران در حال بازبینی است و لازم است آیین‌نامه طرح هندسی راه‌ها [۵] نیز از این لحاظ بازبینی شود. با وجود چند سند فنی در کشور، وضعیت ضوابط مرتبط با سیلاب و هیدرولیک در راه‌سازی در مقایسه با کشورهای هم‌ریسک مانند ایالات متحده آمریکا از نظر کمی و کیفی مطلوب نیست. مدیریت بزرگراه‌های فدرال درخصوص هیدرولیک و اندرکنش سیلاب با شبکه راه، ضوابط جامع متعددی به صورت سازمان یافته تدوین نموده است که شامل ۵ ضابطه، ۱۵ سند راهبردی، ۳۱ راهنما و ۳ بانک اطلاعاتی است. تعداد این اسناد در مقایسه با ضوابط داخلی موجود قابل توجه است. همچنین اسناد داخلی بیش‌تر بر مساله آبشستگی پل‌ها تاکید دارند که تنوع و جامعیت را نشان نمی‌دهد [۳۷].

۱-۴-۲- مبانی حقوقی و ساختاری

موضوع سازه‌های تقاطعی در سامانه رودخانه (مانند پل و آبگذر) چندبخشی بوده و متناسب با آن به چندین دستگاه‌های دولتی و نهادهای مسئول مرتبط می‌باشد. دستگاه‌های اصلی دولتی و عمومی عبارتند از، وزارت راه و شهرسازی، وزارت نیرو، وزارت میراث فرهنگی و گردشگری و بنیاد مسکن انقلاب اسلامی. دستگاه‌ها و نهادهای وابسته دولتی و نهادهای مردمی در دوره بحران رخداد سیلاب عبارتند از، وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نفت، وزارت کشور، سازمان مدیریت بحران کشور و شهرداری‌ها، سازمان حفاظت محیط‌زیست، نهادهای نظامی و انتظامی، هلال احمر و نهادهای مردمی.

براساس گزارش جامع هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸ [۳۷]، عدم هماهنگی دستگاه‌های مسئول (مانند وزارت نیرو، راه و شهرسازی، جهادکشاورزی و شهرداری‌ها) در موارد مهمی مانند تفاوت حد بستر رودخانه با پهنه سیلاب ایمن، ضرورت رفع تعارضات و تجاوزات به حد بستر و حریم رودخانه‌ها و تفاوت مدیریت رودخانه (در حد بستر قانونی) با مدیریت سیلاب (در پهنه آسیب‌پذیری‌ها)، از مشکلات فنی و ساختاری کشور است. ظرفیت پل‌ها، آبگذرها و زیرگذرها از جمله مشکلات فیمابین وزارت نیرو، وزارت راه و شهرسازی و شهرداری‌ها می‌باشد که متاثر از دیدگاه‌ها و اولویت‌های اعمال شده در بودجه، توسط دولت و سازمان برنامه و بودجه کشور است. گزارش جامع هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸[۳۷]، همچنین تاکید دارد که عدم هماهنگی بین دستگاه‌های مختلف در طرح و اجرای سازه‌های تقاطعی (مانند پل‌ها و آبگذرها و یا ساخت راه‌ها و همچنین عبور لوله‌های آب و گاز از مسیر رودخانه)، باعث اخلال در رعایت کمینه‌های هیدرولیکی و مهندسی رودخانه توسط دستگاه‌های دیگر بوده است. از این‌رو، تدوین مقررات و دستورالعمل‌هایی به منظور گنجاندن مطالعات مهندسی رودخانه در شرح خدمات طرح‌های مربوطه در پروژه‌های عمرانی که در بستر، حریم و پهنه

سیلابی رودخانه و تالاب‌ها احداث می‌شوند و می‌توانند بر الگوی سیلابی تاثیر داشته باشند (مانند راه، ریل، پل، آبگذرها، آب‌نماها و سایر موارد)، باید صورت پذیرد.

موضوع سازه‌های تقاطعی از سیل و مدیریت سیلاب جدا نیست. مدیریت سیل، موضوع ملی و فرا سازمانی است که مسئولیت آن متوجه بخش‌های مختلف می‌باشد. کنترل سیل که در جزء (۱) از بند (پ)، ماده (۱۴)، قانون مدیریت بحران کشور (۱۳۹۸) [۳۵] اشاره شده، بخشی از مدیریت سیل است. دستورالعمل کنترل آب‌های سطحی (سیل) در سال ۱۴۰۲ [۱۲] تهیه و ابلاغ شد. هدف از تهیه این دستورالعمل، تعریف، تفکیک و ارائه نحوه انجام مسئولیت‌ها و شفاف سازی روابط میان متولیان و ذی‌مدخلان موضوع کنترل سیل در سطح ملی و استانی، می‌باشد. در این دستورالعمل، ساختار مدیریتی کنترل سیل و تکالیف دستگاه‌های مسئول (وزارت نیرو، وزارت راه و شهرسازی، وزارت جهادکشاورزی- سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، وزارت کشور، سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌ها و سازمان مدیریت بحران کشور) به تفکیک مشخص شده است و ایجاد ساز وکارهای لازم جهت کنترل آب‌های سطحی (سیل) در سطح ملی و استانی را به عنوان یکی از وظایف وزارت نیرو، با همکاری وزارت کشور (سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌ها) و وزارت جهاد کشاورزی برشمرده است.

۱-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران

هرساله و با رخداد سیلاب‌های کوچک و یا بزرگ، تعداد زیادی از پل‌ها و آبگذرها که در بستر، حریم و یا پهنه سیلابی رودخانه احداث شده‌اند، تخریب شده و یا آسیب جدی دیده که منجر به قطع راه ارتباطی، انسداد نسبی جریان و کاهش آبگذری پل، انتقال قطعات آسیب دیده پل به پایین‌دست و تغییرات رودخانه‌ای شده که باعث تشدید خسارات در مناطق دیگر (در پایین‌دست و حتی در بالادست) نیز می‌گردد. به عنوان نمونه، جاده‌ها، پل‌ها و آبگذرهای کشور، بخش مهمی از خسارات سیلاب‌های ۱۳۹۸ را تشکیل دادند. با توجه به شدت بسیار زیاد سیلاب‌ها و همچنین دوره بازگشت چند صد ساله آن‌ها در بعضی مناطق، برخی از خسارات وارد آمده به پل‌ها و آبگذرها اجتناب ناپذیر بوده است. با این وجود، وسعت خرابی‌ها و خسارات نشان‌دهنده عدم تاب‌آوری مناسب آن‌ها بوده است. در پیوست شماره ۲، علت آسیب‌های سیلاب‌های ۱۳۹۸ به پل‌ها و آبگذرهای کشور، به تفکیک برای سه مرحله (۱- مطالعات و طراحی، ۲- اجرا و نظارت و ۳- پایش و نگهداری)، به‌ترتیب به صورت جدول جمع‌بندی و خلاصه شده است.

از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه، محورهای اصلی و فرعی آسیب شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران در جدول (۱-۲) ارائه شده است. جزئیات این عوامل، همراه با شواهد تصویری و مستند در جدول (پ.۲-۵) از پیوست شماره ۲ ارائه شده است. آسیب‌شناسی در شرایط موجود کشور نشانگر ضرورت تهیه یک راهنما با تاکید بر عوامل مورفولوژیکی- هیدرولیکی در طرح و اجرا و نگهداری سازه‌های تقاطعی است.

جدول ۱-۲- محورهای آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری
جانمایی سازه در رودخانه	در بازه مستقیم و یا شریانی
	در بازه پیچانرودی و یا در پیچ
تناسب آبراهه با معماری و هندسه سازه	طول کل سازه- ارتفاع عرشه- نسبت عرض و ارتفاع دهانه باز سازه به آبراهه (نسبت انسداد)
	جهت برخورد آب به پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های سازه
	تبدیل جریان در بالادست و پایین‌دست سازه
	رادیه‌بندی (بستر صلب در محدوده سازه)
	ناسازگاری با محیط‌زیست در سامانه رودخانه
تغییرات رودخانه در اثر سازه	تغییر مسیر رودخانه - تغییر خط القعر رودخانه
	فرسایش و یا رسوب‌گذاری آبراهه در بازه بالادست و پایین‌دست سازه
سیل	سیل طراحی
	ظرفیت انتقال سازه، برگشت آب در بالادست سازه، روگذری و تخریب سازه
	انسداد در اثر رسوب‌گذاری، واریزه‌ها و اجسام شناور
آبشستگی	آبشستگی تکیه‌گاه‌ها
	آبشستگی پایه‌ها
	آبشستگی پایین‌دست سازه
فرسایش سازه	فرسایش فیزیکی سطح سازه در اثر برخورد و سایش توسط رسوبات، واریزه‌ها و اجسام شناور در اثر کیفیت آب
روش‌های نامناسب اجرا شده در رودخانه	انسداد بیش‌تر
	آبشستگی سازه
آسیب‌پذیری در مرحله ساخت سازه	نشست و فروپاشی
	زمان‌بندی کار و ایمنی کار و کارگاه در رودخانه و ترتیب مراحل کار در رودخانه
آسیب‌پذیری در مرحله بهره‌برداری، مرمت و بازسازی سازه بعد از سیل	انسداد آبراهه
	برداشت مصالح و لایروبی و پاک‌سازی و پایش منظم سازه‌ها
	سازه‌های موقتی بعد از سیل که سال‌ها می‌مانند.
	بازسازی و همانندسازی بعد از سیل

فصل ۲

بررسی انواع پل‌ها و آبگذرها

۲-۱- تاریخچه پل‌های ایران

پل‌ها از دیرباز وسیله‌ای برای عبور و مرور و معبری برای ایجاد ارتباط بین بخش‌های مختلف زیستگاه‌های بشری بوده‌اند و نقش اصلی مراسلاتی و ارتباطی آن، مهم‌ترین مشخصه‌ی قابل عنوان آن‌ها به شمار می‌رفته است [۷۳]. عواملی که از گذشته تاکنون باعث ایجاد پل‌ها شده است شامل دریاها و دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، دره‌ها، کوهستان‌ها و تقاطع‌های غیرهم‌سطح هستند [۲۰۹]. لازمه‌ی هر راه سریع، عبور آسان و مطمئن آن از عوارض طبیعی مثل رودخانه‌ها و دره‌ها می‌باشد که این کار توسط پل انجام می‌شود [۶۰].

در سرزمین امروزی ایران، قدیمی‌ترین پلی که آثار آن به‌جا مانده، پلی است که اورارتوها روی رود ارس (در مرز بین ایران و جمهوری آذربایجان) بنا کرده‌اند. از دوران هخامنشی دو بنا از قدیمی‌ترین ترکیب پل و بند در حدود شمال‌غربی تخت‌جمشید باقی مانده که اولی از سنگ و خاک ساخته شده و دیگری بند دختر است که دارای دو طاق جناغی می‌باشد و قسمتی از آن در صخره و بقیه از سنگ‌های بزرگ ساخته شده است. در دوره‌ی ساسانیان (قرن سوم تا هفتم بعد از میلاد)، تحول عظیمی در توسعه پل‌سازی ایران و فناوری طاق‌زنی به وجود آمد و هنوز ۷۴ پل از این دوره باقی مانده که برخی کاملا سالم هستند [۶۰]. ساخت بناهای ترکیبی پل و بند در دوره‌ی ساسانی به‌ویژه در مناطق باتلاقی و سیلابی ادامه می‌یابد و برای حفاظت بیش‌تر پایه‌ی پل‌ها، ایجاد شالوده‌های پهن در زیر آن‌ها متداول می‌شود [۶۰].

پس از اسلام تا قرن چهارم پل سازی عملا تحت تاثیر دوره ساسانی بود و با وجود پل‌های بسیار بزرگ و تماشایی (مانند پل کلهر و پل کشکان در استان لرستان)، نوآوری خاصی در آن پدید نیامد. شاید حمله مغول یکی از دلایل باقی نماندن پل‌های این دوره باشد [۷۳]. مخروبه‌های باقی مانده از پل و بند در قرن چهارم تا دوران غزنوی، سلجوقی و تیموری، گویای تحرک معماری در پل و سدسازی و توجه به برنامه‌ریزی عمرانی بوده است. از سده‌ی یازدهم و مقارن با دوره‌ی صفوی، چندین پل باقی مانده است که از نظر ظرافت و زیبایی کم‌نظیر هستند [۴۹] و بیش‌ترین پل‌های ایران در این دوره و برای ایجاد، حفظ و گسترش مسیرهای ارتباطی ساخته شدند [۷۲]. در دوره‌ی زندیه به‌دلیل آرامش نسبی، تلاش‌هایی برای آبادی و عمران صورت گرفت. در دوره‌ی قاجار چندین راه و پل احداث و یا پل‌های قدیمی مرمت شد و در قرن اخیر به‌دلیل توسعه‌ی راه و رونق اقتصادی و مقاصد نظامی، راه‌های کاروان‌رو به جاده‌های پررفت وآمد تبدیل شد و استفاده از مصالح جدید و شیوه‌های نوین ساخت، سبب تحولات عظیم در پل‌سازی شد [۴۵].

از مهم‌ترین ویژگی‌های سازه‌های آبی تاریخی (شکل‌های ۲-۱ تا ۲-۳)، انتخاب و ساخت سازه در مکان مناسب است که نشان از دانش مهندسان و معماران قدیم دارد. توجه به بستر رودخانه، مناسب بودن جای پایه‌ها و تقسیم نیروهای آب در بدنه باعث شده است که پل و بندهای تاریخی در ایران به خوبی و سالم باقی بمانند. پایه‌ی غالب پل‌ها روی صخره‌های طبیعی قرار داده شده بود، در دوره‌های بعد باز هم روی همین پایه‌ها، پل‌های جدید ساخته شدند. پایه‌های این پل‌ها عموما در قسمت بالادست نوک نیز بوده و در قسمت پایین‌دست شکل گرد داشته‌اند (مانند پل بابل بر روی رود فرات و پل آق‌قلا بر روی گرگان‌رود). از این‌رو تقسیم آب به دهانه‌ها، هدایت جریان سیل و کاهش رسوب‌گذاری به‌سادگی در این

پل‌ها انجام می‌شـــده اســـت. این دوراندیشـــی و نبوغ طراحانه نه تنها باعث دوام آثار تاریخی شـــده اســـت، بلکه مرمت و نگهداری آن‌ها پس از سوانح را نیز آ سان‌تر کرده ا ست، درحالی‌که پل‌های معا صر ایران در ب سیاری از موارد فاقد چنین جزئیاتی هستند [۸].

شکل ۲-۱- پل- بند امیر، رود کر، فارس

شکل ۲-۲- سی و سه پل، اصفهان

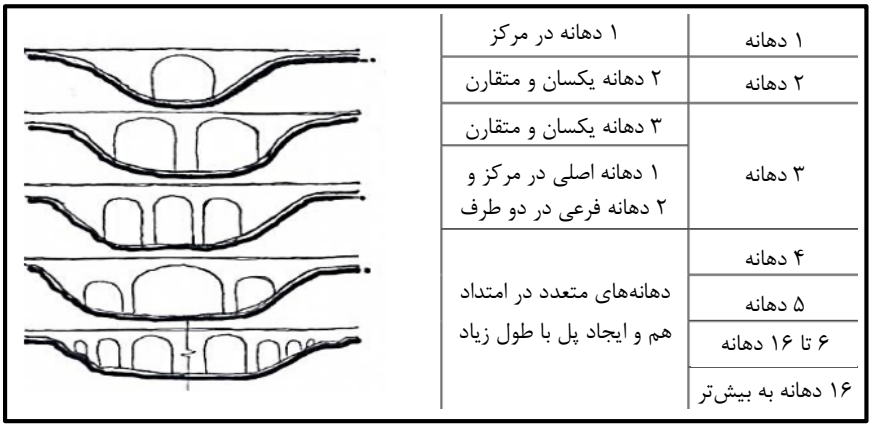
شکل ۲-۳- پل قدیم دزفول، دزفول

۲-۲- انواع پل‌ها

پل‌ها از جهات مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. بدون در نظر گرفتن ترتیب، انواع طبقه‌بندی پل‌ها به شرح زیر است:

۲-۲-۱- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر طول دهانه

طول دهانه از عوامل تاثیرگذار بر طول و و سعت پل می‌با شد. دهانه پل‌ها به سه گروه تقسیم می شوند: ۱- دهانه‌های کوتاه (زیر ۸ متر)، ۲- دهانه‌های متوســـط (بین ۸ تا ۶۰ متر) و ۳- دهانه‌های بلند (بزرگ‌تر از ۶۰ متر) [۵۹ و ۶۰]. بر اساس نقشه‌های تیپ نشریه ۲۹۲ و ۲۹۳ وزارت راه و شهرسازی، پل‌ها در سه گروه ۱- دهانه‌های کوتاه (زیر ۱۰ متر)، ۲- دهانه‌های متوســـط (بین ۱۰ تا ۲۰ متر) و ۳- دهانه‌های بلند (بزرگ‌تر از ۲۰ متر) تقســـیم‌بندی شـــده اســـت [۴۰ و ۴۱]. غالب پل‌ها دارای تقارن و یا انتظام کلی حاکم بر فرم بنا نیســـتند و فقط تکرار اجزاء، عامل هماهنگی و تقارن آن اســـت. شکل و دهانه‌های پل ممکن ا ست متاثر از عوامل مختلفی با شد و طول پل با توجه به تعداد دهانه‌های آن مورد برر سی قرار می‌گیرد [۶۴]. در شکل (۲-۴)، پل‌های با تعداد و اندازه دهانه‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- پل‌های با تعداد و اندازه دهانه متفاوت

۲-۲-۲- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر سازه‌ای

منظور از طبقه‌بندی سازه‌ای، مشخص نمودن و تقسیم‌بندی کردن سیستم‌هایی است که وظیفه تحمل، انتقال نیرو و سرپا نگه داشتن پل را بر عهده دارند. طاحونی (۱۳۸۳) پل‌ها را از نقطه نظر سیستم سازه‌ای، در هشت گروه به شرح زیر طبقه‌بندی نموده است [۶۴]:

۱- **پل‌های صفحه‌ای:** در مورد دهانه‌های کوچک (کم‌تراز ۱۰ متر) استفاده از پل‌های صفحه‌ای (دال توپر یا توخالی) معمول است. این پل‌ها اغلب از بتن مسلح ساخته می‌شوند [۵۳].

۲- **پل تیری:** تیر عضو سازه‌ای افقی می‌باشد که بارهای قائم را با تحمل خمش انتقال می‌دهد. پل تیری قدیمی‌ترین و ارزان‌ترین طرح پل محسوب می‌شود [۹۲]. در ساده‌ترین حالت، یک پل تیری شامل یک تیر افقی است که در طرفین توسط پایه‌های پل مهار شده است (شکل ۲-۵).

۳- **پل‌های خرپایی:** خرپا سازه‌ای است که از کمینه ۵ واحد مثلثی، متشکل از اعضای مستقیم تشکیل شده است و انتهای آن در مفاصلی که گره نامیده می شود، به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۲-۶). برخی از انواع پل‌های خرپایی عبارتند از پل خرپایی کمانی، کوهانی، عرشه‌ای، میان‌گذر، کوتاه، شبکه‌ای و پل خرپایی ویچرت[۱].

۴- **پل‌های طره‌ای (کنسولی):** طره سازه‌ای است که به صورت افقی به داخل فضا پیش‌آمدگی داشته و تنها در یک انتها مهار شده است (شکل ۲-۷). پل طره‌ای یا پل کنسولی، پلی است که با استفاده از طره ساخته شده است. این پل با استفاده از کشندهایی که ممکن است تیرهای ساده یا خرپا باشند کار می‌کند [۱۳۵].

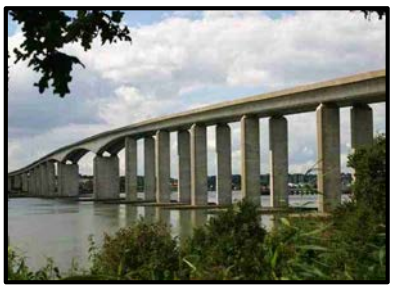
۵- **پل شاه‌تیری:** شاه‌تیر، تیر بزرگی است که اغلب از ورق‌های متعدد ساخته می شود. این ورق‌ها معمولا به هم پرچ یا جوش می‌شوند. پل شاه‌تیری از جمله رایج‌ترین و ساده‌ترین نوع پل می‌باشد. در پل‌های شاه‌تیری (شکل ۲-۸) اغلب از تیرهای فولادی و بتنی استفاده می شود که این تیرها تکیه‌گاه افقی اصلی پل بوده و از تیرهای کوچک‌تر روی عرشه پشتیبانی می‌کند [۱۳۵].

۶- **پل‌های قوسی (طاقی):** قوس، عضو سازه‌ای انحنادار می‌باشد که بر روی یک بازشو قرار گرفته است و به عنوان تکیه‌گاه عمل می‌نماید. پل قوسی، شکلی نیم‌دایره مانند دارد و سازه‌ی باربر اصلی آن به شکل کمان است [۵۰]. قوس پل‌ها را می‌توان به پنج گونه تقسیم کرد: ۱- قوس با جان پر ۲- قوس با جان باز، ۳- قوس چندضلعی، ۴- قوس کش‌دار و ۵- قاب با پایه‌ی مورب [۵۹]. انواع دیگری از قوس نیز عبارتند از قوس مفصلی، گیردار، قوس ناقص، قوس منقطع و قوس بندبند. برخی از انواع مختلف پل‌های قوسی عبارتند از پل قوسی با عرشه روگذر، پل قوسی میان‌گذر یا عبوری، پل قوسی خرپایی و پل قوسی گره‌خورده (بند کمانی). نمونه‌های پل قوسی در شکل (۲-۹) نشان داده شده است [۵۹].

۱- Wichert

۷- **پل‌های کابلی:** پل‌های کابلی یکی از پرکاربردترین سازه‌ها برای ارتباط دهانه‌های متوسط تا بزرگ می‌باشند [۱۳۳]. پل‌های تقویت شده با کابل را می‌توان به دو گروه پل‌های معلق و پل‌های متکی بر کابل (کابل ایستا) تقسیم‌بندی نمود. نمونه‌های پل کابلی در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است [۴۶].

۸- **پل‌های قابی:** پل‌های قابی اغلب از بتن مسلح ساخته می شوند [۵۱]. در ضابطه شماره ۲۹۴ سازمان برنامه و بودجه کشور با عنوان «نقشه‌های همسان پل‌ها و عرشه پل‌های راه دهانه ۱۰ تا ۲۵ متر»، پل قابی با دو دهانه ۲۵ متری معرفی شده است. عرشه این پل دو عنصری بوده و شامل دال بتن مسلح و پنج شاه‌تیر پیش‌ساخته است [۴۲]. تک پایه آن از سه ستون لوبیایی شکل تشکیل شده که در بالا به تیر سرستون متصل است.



شکل ۲-۵- پل تیری

شکل ۲-۶- پل خرپایی

شکل ۲-۷- پل خرپایی طره‌ای

شکل ۲-۸- به ترتیب از راست به چپ: پل شاه‌تیر جعبه‌ای و ماهیچه‌دار

شکل ۲-۹- به ترتیب از راست به چپ: پل قوسی با عرشه روگذر و اسپندرل باز و پل قوسی میان‌گذر

شکل ۲-۱۰- به ترتیب از راست به چپ: پل معلق و پل کابل ایستا

۲-۲-۳- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر مصالح

مصالح به‌کار رفته در بنای پل، عامل موثری در استحکام و استقامت در برابر سوانح طبیعی و ایستایی بنا در طول سال‌های متمادی بوده است [۶۷]. انتخاب مصالح مصرفی برای ساخت پل، علاوه بر شرایط جوی، به امکانات محلی موجود بستگی دارد [۵۳]. از طرفی در هر کشوری متناسب با سطح دانش، تجربه و پیشرفت فناوری از مصالح و دست‌سازهای بشر استفاده می‌کنند [۶۷]. به طور کلی پل‌ها از نظر نوع مصالح مصرفی به شش گروه طبقه‌بندی می شوند: ۱- پل‌ها با مصالح بنایی و بتن غیرمسلح، ۲- پل‌های بتن مسلح (درجا و پیش ساخته)، ۳- پل‌های بتن پیش‌تنیده (پیش‌کشیده، پس‌کشیده)، ۴- پل‌های فولادی، ۵- پل‌های مرکب فولاد و بتن و ۶- پل‌های آلومینیومی (مورد استفاده کم) [۶۴].

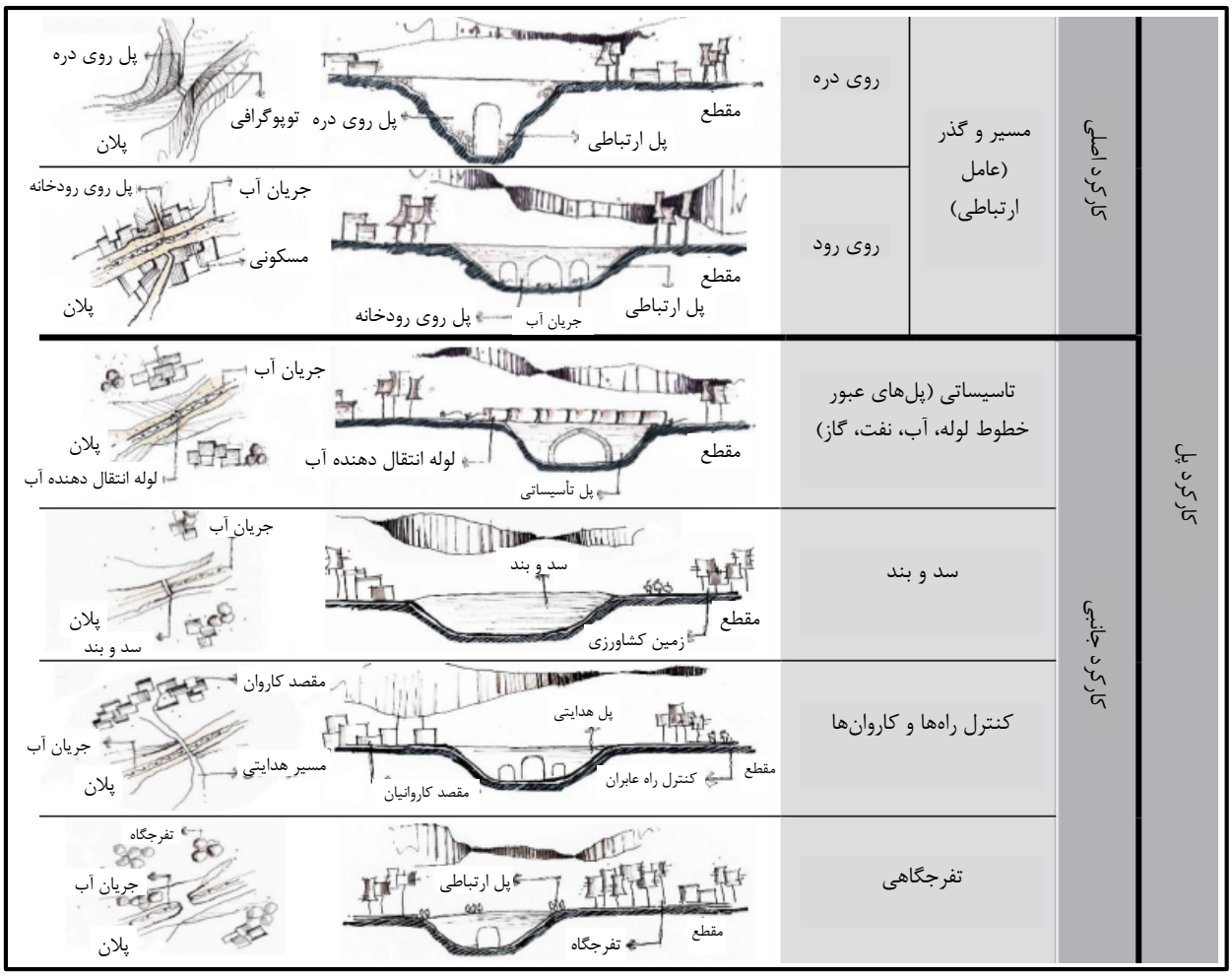
۲-۲-۴- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر روش ساخت

به طور کلی پل‌ها را از نظر شیوه ساخت، می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی نمود: ۱- اجرای درجا با قالب‌بندی کامل، ۲- اجرای پیش‌ساخته (الف- نصب با جرثقیل بر روی پایه‌ها و ب- نصب به شیوه‌ی هل دادن بر روی پایه‌ها) و ۳- اجرای طره‌ای [۶۴].

۲-۲-۵- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر کاربری

در گذشته پل‌هایی که ساخته می‌شدند، کارکردهای اساسی و گاه متفاوتی داشتند و می‌توانستند کارکردهای جانبی مختلفی به خود بگیرند (شکل ۲-۱۱). عبور و مرور کارکرد ا صلی پل‌ها بود. در پل‌های ایرانی ترکیبی از چندین عملکرد نیز به چشم می‌خورد [۷۲]. با گذر زمان، پل‌های متعددی با عملکرد و کارکردهای متفاوت احداث گردید. کاربری پل‌ها را می‌توان در هشت گروه طبقه‌بندی نمود: ۱- پل‌های عابر پیاده، ۲- پل‌های جاده، ۳- پل‌های راه‌آهن، ۴- پل‌های روگذر- زیرگذر شاهراه‌ها، ۵- پل‌های عبور خطوط لوله آب، نفت، گاز و غیره، ۶- پل‌های تجاری، ۷- پل‌های دو طبقه و ۸- پل های رودخانه‌ای [۶۴]. این پل ها می‌توانند از نوع رودخانه‌ای باشند و یا این‌که بر روی زمین ناهموار (غیر رودخانه‌ای) ساخته شوند.

اخیرا پل‌های عبور حیات وحش (پل‌های ســـبز یا پل‌های حیات وحش) برای کمک به عبور امن جانوران از موانعی مانند جاده‌ها، خطوط راه‌آهن یا سایر سازه‌های انسانی طراحی و ساخته شده‌اند (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۱- کاربری پل‌ها در گذشته

شکل ۲-۱۲- پل‌های حیات وحش

۲-۲-۶- طبقه‌بندی پل‌ها از نظر تحرک

پل‌ها را از نقطه نظر تحرک، می‌توان در سه گروه زیر طبقه‌بندی نمود:

- **پل‌های ثابت:** پل‌های ثابت پل‌هایی هستند که با لنگر انداختن در محل، یک گذر ثابت و ایمن را از طریق رودخانه، دره، خط ریلی، جاده یا هر مانع دیگری فراهم می‌کنند [۱۳۵]. اکثر پل‌ها، پل‌های ثابت هستند به این معنی که هیچ قسمت متحرکی ندارند و تا زمانی که تخریب شوند در یک مکان باقی می‌مانند [۹۲].
- **پل‌های موقت:** این پل‌ها سازه‌های موقت با زمان اجرای کوتاه و با هزینه کم می‌باشند [۱۳۵] و [۹۲].
- **پل‌های متحرک:** این پل‌ها دارای عرشه‌های متحرک هستند که اغلب با برق کار می‌کنند [۹۲]. ترال و همکاران پل‌های متحرک را براساس فراوانی آن‌ها در سه دسته‌ی پل‌های باسکولی (الاکلنگی)، چرخان و عمودی د سته‌بندی می‌کنند و بیان می‌کنند که از مجموع پل‌های متحرکی که ساخته می شوند، ۶۵ در صد آن‌ها پل‌های با مکانیزم باسکولی هستند [۱۹۹].

۲-۲-۷- سایر پل‌ها

انواع دیگری از پل‌ها به لحاظ ساختار ایستایی، گوناگونی مصالح و شکل و اندازه طراحی و ساخته شده‌اند. تعدادی از این پل‌ها که امروزه به‌دلیل کاربرد کم‌تر، ناشناخته مانده‌اند عبارتند از: ۱- پل‌های سنگی، ۲- پل‌های طبیعی، ۳- پل‌های سرپوشیده، ۴- پل‌های ماه، ۵- پل‌های نواری تنش‌دار، ۶- پل‌های قطعه‌ای، ۷- پل‌های حمل‌ونقل، ۸- پل دهانه آزاد چوبی و ۹- پل ترستل[۱].

۲-۳- بررسی انواع آبگذرها

آبگذرها از نظر شکل هندسی، اندازه، مصالح و روش ساخت و جانمایی آن‌ها در آبراهه‌ها به انواع مختلف تقسیم می‌شوند.

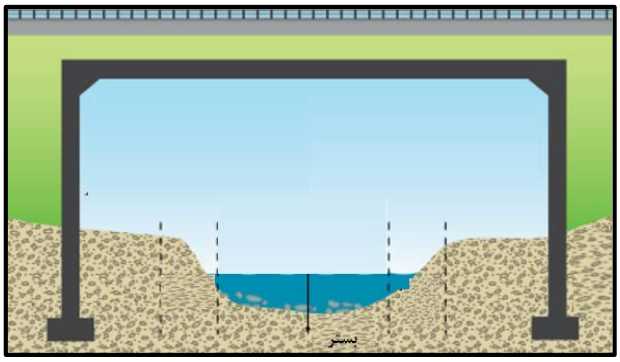
۲-۳-۱- طبقه‌بندی آبگذرها از نظر مصالح

مواد اصلی برای ساخت آبگذرها عبارتند از فولاد، صفحه فولادی سازه‌ای[۲] ، لوله‌ای فولادی موجدار[۳]، لوله‌های آلومینیومی، بتن، پلی‌اتیلن با چگالی بالا[۴]. در برخی موارد، کانال‌های بتنی برای ا ستفاده به‌عنوان آبگذر تو صیه می شوند. از بتن مسلح نیز در ساخت آبگذرها استفاده می‌شود. آبگذرها یا در محل ساخته می‌شوند و یا به صورت پیش‌ساخته تهیه شده و در محل نصب می‌شوند. از نظر جنس و شکل مجرا، برخی از انواع مختلف آبگذر در جدول (۲-۱) طبقه‌بندی شده‌اند.

۱- Trestle
۲-SSP
۳- CSP
۴- HDPE

۲-۳-۲- طبقه‌بندی آبگذرها از نظر دهانه

برای حفظ عرض آبراهه طبیعی، آبگذرها به صورت تک دهانه یا چند دهانه هستند. انواع آبگذرها از نظر تعداد دهانه و جانمایی در آبراهه در شکل (۲-۱۳) تا (۲-۱۵)، و در جدول (۲-۱) نشان داده شده است.



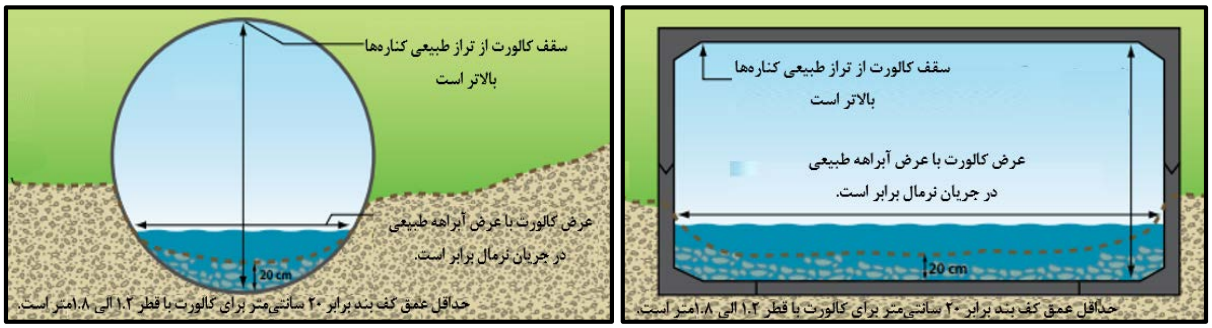
شکل ۲-۱۳- آبگذر تک‌دهانه پیش‌ساخته با تکیه‌گاه‌های دور از بستر آبراهه

شکل ۲-۱۴- آبگذر تک‌دهانه با تکیه‌گاه‌های کناری برای حفظ سیمای طبیعی بستر

شکل ۲-۱۵- آبگذر دو دهانه برای حفظ عرض آبراهه بزرگ

۲-۳-۳- آبگذرهای بسته

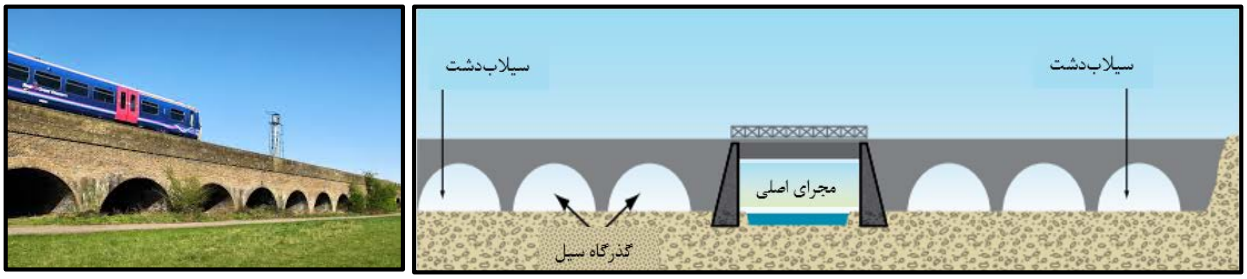
سازه‌های آبگذری که در طول گذرگاه علاوه بر سقف و دیواره‌ها دارای کف‌بند نیز هستند، آبگذر بسته نامیده می‌شوند. آبگذرهای پیش‌ساخته بتنی و به‌خصوص لوله‌ای از نوع آبگذرهای بسته هستند (شکل ۲-۱۶).



شکل ۲-۱۶- آبگذرهای بسته با حفظ عرض آبراهه اصلی و با نمایش عمق جانمایی کف‌بند در زیر سطح بستر آبراهه

۲-۳-۴- آبگذرهای سیلابدشتی

برای عبور راه و ریل از سیلابد شت رودخانه، گذرگاه‌هایی برای حفظ پیو ستگی طولی سیلابد شت در انتقال جریان سیلابی و عبور حیوانات و انسان و خودروهای محلی و کشاورزی در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۲-۱۷) از «آبگذرهای معمولی خشک» یا «آبگذرهای سیلابدشتی» در خاکریز راه و ریل در پهنه سیلابدشت استفاده می‌گردد.

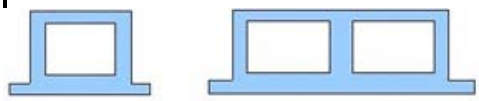
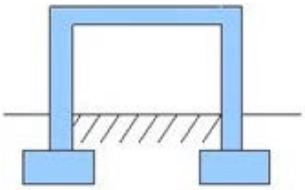
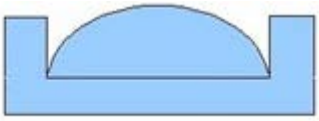


شکل ۲-۱۷- نمونه‌های گذرگاه و آبگذر خشک در پهنه سیلابدشت آبراهه‌ها

جدول ۲-۱- طبقه‌بندی انواع و مشخصات آبگذرها [۹۳] و [۱۰۳]

نوع آبگذر	مصالح ساخت	کاربری	ویژگی‌ها	شکل آبگذر
آبگذر لوله‌ای (تک یا چند دهانه)	فلز موج‌دار، بتن و بتن مسلح، چدن، گل رس پخته، پلی‌اتیلن، پلی اتیلن مسلح	آبگذر لوله‌ای برای کارهای زهکشی بسیار کوچک، عبور از خاکریز جاده یا راه‌آهن استفاده می‌شود. این نوع شامل یک یا چند لوله است که در کنار هم قرار گرفته‌اند. جنس آن‌ها از فولاد صاف، فلز موج‌دار یا مواد بتنی است. قطر آبگذر لوله‌ای بین ۳۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر است و اغلب ارزان‌ترین گزینه است. هدف اصلی از این سازه، عبور آب از زیر جاده‌ها است. برای سواحل رودخانه‌های کوهستانی یا مرتفع، آبگذرهای گرد مناسب‌ترین هستند.	با استحکام دلخواه و طراحی ترکیبی، ضخامت و تقویت مناسب ساخته می‌شوند. اقتصادی هستند. هرگونه تنش کششی و فشاری را تحمل می‌کنند. عیب اصلی آبگذرهای لوله‌ای این است که به‌دلیل وجود مواد آلی، باکتری‌ها و انتشار گازهای مضر، در قسمت تاج خوردگی (به خصوص در لوله‌های فولادی) ایجاد می‌شود.	چند دهانه تک دهانه

ادامه جدول ۲-۱- طبقه‌بندی انواع و مشخصات آبگذرها [۹۳] و [۱۰۳]

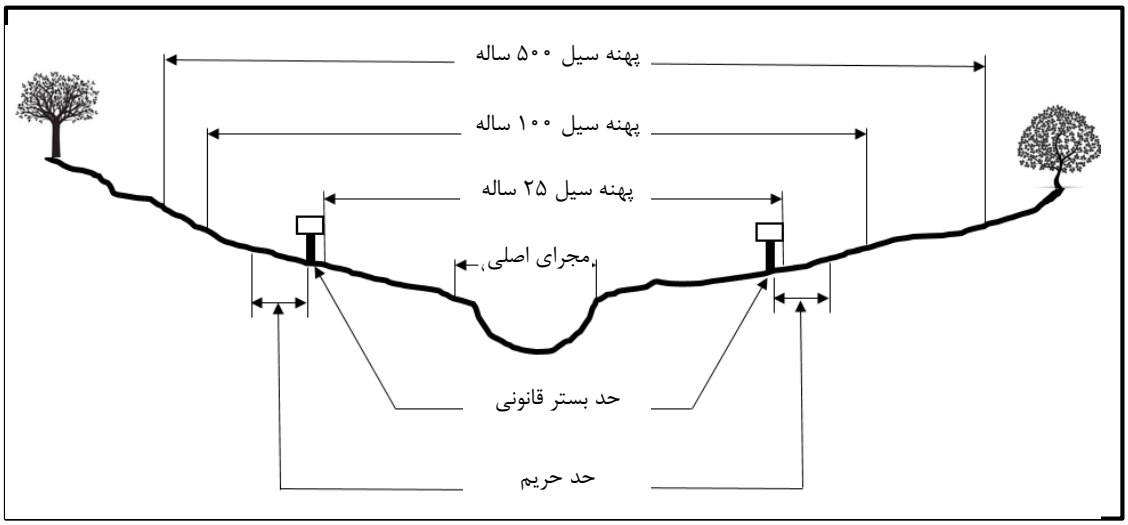
نوع آبگذر	مصالح ساخت	کاربری	ویژگی‌ها	شکل آبگذر
آبگذر قوسی بدون کف	فلز موج‌دار، بتن	برای آبراهه‌های بزرگ مناسب است و معمولا مجرای کوتاهی دارد. در جریان‌های کم، برای حرکت ماهی‌ها شرایط مناسبی فراهم می‌کند و نیاز به پر شدن جاده کم‌تری دارد.	صرفه‌جویی در هزینه ساخت و ساز سریع راندمان هیدرولیکی خوب معماری زیبا و هماهنگ با محیط	
آبگذر جعبه‌ای (تک یا چند دهانه)	بتن مسلح	آبگذرهای جعبه‌ای در شرایط خاکی سست و برای دهانه بزرگ ارجحیت دارد. برای انتقال رواناب‌های کوتاه مدت از آبگذر جعبه‌ای استفاده می‌شود. معمولا کف مصنوعی دارد. این آبگذر فضای بیش‌تری را برای حیات وحش نسبت به آبریزهای لوله‌ای بزرگ فراهم می‌کند. طراحی این آبگذر بر اساس جریان پیوسته است (جریان هم‌عرض با آبراهه). در مناطقی که خطر فرونشست وجود دارد این نوع آبگذر به کف‌بند خوب و قوی نیاز دارد.	مقرون به صرفه هستند. ساختار قاب سفت و سخت و در ساخت بسیار ساده است. برای نهرهایی با پوشش گیاهی کوتاه و خاک ضعیف مناسب است. دال پایینی آبگذر جعبه‌ای فشار وارده به خاک را کاهش می‌دهد. آبگذرهای جعبه‌ای به‌دلیل صلبیت معمولا نیازی به فونداسیون جداگانه ندارد. در موارد خاص با فونداسیون ضعیف استفاده می‌شود.	
آبگذر- پل	بتن مسلح	آبگذر- پل به سازه‌هایی گفته می‌شود که قطری معادل ۱۵۰۰ میلی‌متر یا بیش‌تر دارند. این سازه‌ها همچنین شامل چندین آبگذر با قطر معادل حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر یا بیش‌تر است.	از نظر سازه‌ای بسیار محکم است. برای عبور بار ترافیکی زیاد مناسب است. هزینه احداث بالاتری نسبت به سایر آبگذرها دارد	
آبگذر جعبه‌ای- قوسی	بتن مسلح، فلز موج‌دار، سنگ و مصالح بنایی	آبگذر قوسی لوله‌ای آبگذری با مقطع نیم‌دایره است. وقتی با پوشش کم عمق نصب شود، عملکرد مناسبی دارد. بتن مسلح، فلزات موج‌دار یا سنگ مصالحی هستند که برای آبگذرهای قوسی استفاده می‌شوند.	دوام بالا دوره ساخت کوتاه و نصب آسان توانایی تغییر شکل	

فصل ۳

راهنمای جانمایی، طراحی هیدرولیکی و معماری پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه

۳-۱- ساختار پهنه رودخانه‌ها

ساختار پهنه رودخانه‌ها عموما شامل آبراهه اصلی (مجرای اصلی) برای عبور جریان‌های کم تا سیلاب‌های کوچک و سیلابدشت برای عبور جریان‌های سیلابی بزرگ‌تر است. حد بستر و حریم نیز به عنوان یک شاخصه فنی- حقوقی در داخل ساختار پهنه رودخانه جانمایی می‌شود. ساختار عرضی رودخانه در مقطع عرضی در شکل (۳-۱) نشان داده شده و در زیر تشریح می‌گردد.



شکل ۳-۱- ساختار عرضی رودخانه با نمایش آبراهه اصلی، حد بستر و حریم (قانونی) و پهنه‌های سیلاب

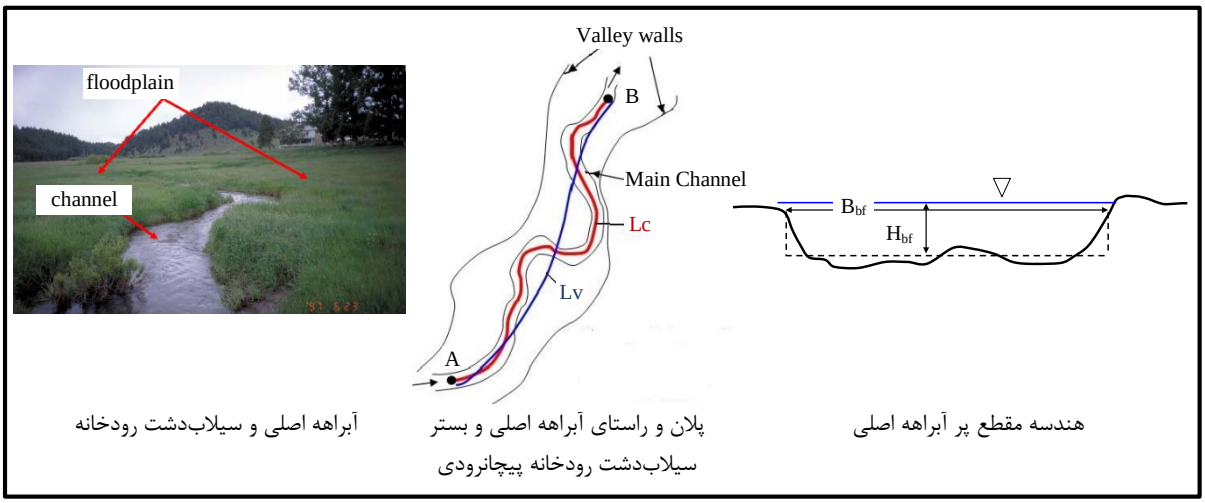
۳-۱-۱- آبراهه اصلی و سیلابدشت

آبراهه اصلی[۱]، مجرای اصلی رودخانه است که قابل مشاهده و تشخیص است و در مواقع غیرسیلابی جریان از آن عبور می‌کند. سیلابدشت[۲]، سطحی از زمین مجاور به یک آبراهه است، که در یک یا دو بال آن از لبه آبراهه تا پای دیواره‌های دره ادامه داشته و در طول رخداد سیلاب بزرگ مواجه با آبگرفتگی می‌شود.

در رودخانه‌های دشتی (بازه‌های پایین‌دست حوضه، در دشت‌های نسبتا هموار با شیب کم و راستای پیچانرودی، با مواد بستری ماسه‌ای و ریزدانه)، مطابق شکل (۳-۲)، ظرفیت مقطع پر آبراهه اصلی عموما در حدود سیل متوسط سالانه (دوره بازگشت دو سال) است ولی ممکن است در دامنه سیل با دوره بازگشت ۱/۴ تا ۵ ساله نیز باشد [۶۱ و ۶۲ و ۷۹]. سیلاب بزرگ‌تر از ظرفیت مقطع پر، در پهنه سیلابدشت در دو بال رودخانه جاری می‌شود. در بازه‌های بالادست حوضه آبریز، آبراهه‌های کوهستانی، شریانی و مستقیم، عموما فاقد سیلابدشت هستند و ظرفیت مقطع پر آن‌ها در حد سیلاب‌های بزرگ می‌باشد [۷۸].

۱- Main Channel

۲- Floodplain



شکل ۳-۲- نمایش آبراهه اصلی و سیلابدشت در رودخانه‌های دشتی

۳-۱-۲- حد بستر و حریم رودخانه‌های ایران

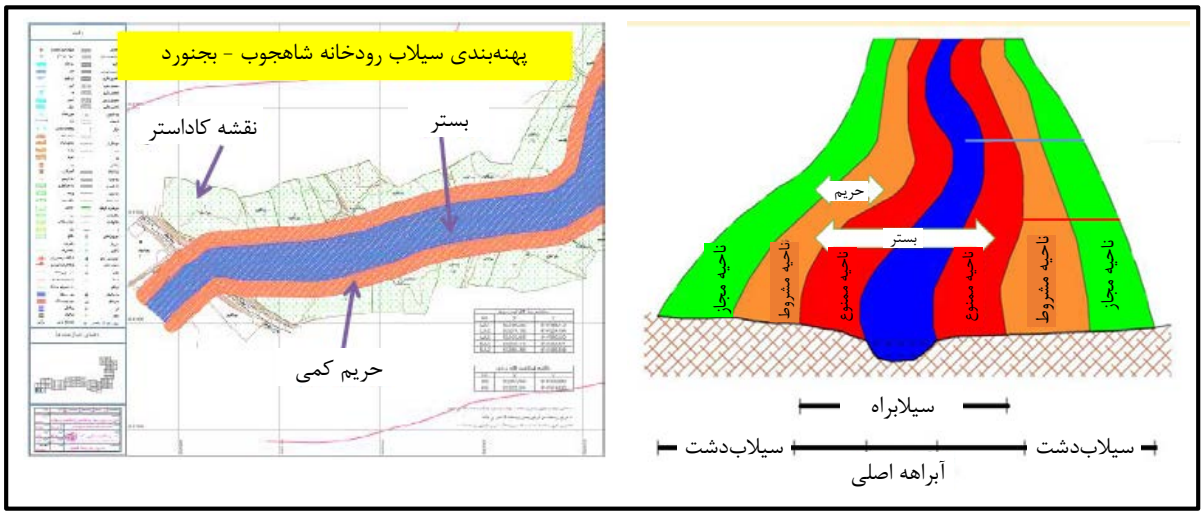
بر اساس قانون اساسی، بستر رودخانه‌ها (مسیل‌ها و انهار طبیعی) اعم از این‌که دارای آب دائم یا فصلی باشند، از انفال هستند و در اختیار حکومت اسلامی می‌باشند. مطابق قانون توزیع عادلانه آب (۱۳۶۱) [۳۴] و آیین‌نامه اجرایی آن (۱۳۷۹)، وزارت نیرو و بالتبع آن شرکت‌های تابعه آب منطقه‌ای، مسئولیت حفاظت و بهره‌برداری حد بستر و حریم رودخانه‌ها را به عهده دارد. تعیین حد بستر و حریم رودخانه با وزارت نیرو است.

حد بستر (قانونی) رودخانه‌های ایران، آن قسمت از رودخانه (مسیل یا نهر طبیعی) است که رژیم جریان و هندسه آن در شرایط طبیعی (قبل از اثرات و مداخلات انسانی در چند دهه اخیر) در نظر گرفته شده و در حداکثر طغیان معمولی (سیل مبنای حد بستر) زیر آب می‌رود. پهنه حد بستر رودخانه عموما برای سیل ۲۵ ساله طبیعی تعیین می شود ولی قانون اجازه داده است که در صورت ضرورت، سیل کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از سیل ۲۵ ساله مبنا قرارگیرد. برای اطلاعات بیش‌تر در خصوص تعریف و روش تعیین «حد بستر» رودخانه‌های ایران به ضابطه ۳۰۷ سازمان برنامه و بودجه کشور، نشریه شماره ۲۰۲ طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور [۱] و فرهنگ مهندسی رودخانه [۷۹] مراجعه گردد. حد بستر رودخانه، با نشانه‌گذاری در دو طرف رودخانه به نمایش عمومی در می‌آید. در برخی شرایط (مانند رودخانه‌های کوهستانی و در دامنه‌های با شیب تند و پایدار) ممکن است که نشانه گذاری لازم نباشد. نوع کاربری‌های مجاز و غیرمجاز در حد بستر در راهنمای تعیین کاربری‌های مجاز در بستر و حریم رودخانه‌ها (نشریه شماره ۲۰۳ طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، ۱۴۰۰) [۲۱] تعیین گردیده است.

حریم رودخانه‌های ایران، آن قسمت از اراضی اطراف رودخانه است که بلافاصله پس از حد بستر قرار دارد و برای حفاظت کمی و کیفی آن‌ها لازم است. حریم کمی (فنی) در نواری به عرض بیشینه ۲۰ متر (در تراز افقی) از حد بستر، در دو طرف رودخانه قرار می‌گیرد. برای روش تعیین پهنای «حریم کمی» رودخانه‌های ایران، به دستورالعمل تعیین حریم کمی رودخانه‌ها مراجعه گردد [۹].

حریم کیفی در نواری به عرض بیشینه ۱۵۰ متر (در تراز افقی) از حد بستر، در دو طرف رودخانه قرار می‌گیرد. برای روش تعیین پهنای «حریم کیفی» رودخانه‌های ایران به دستورالعمل تعیین حریم کیفی رودخانه‌ها و آب‌های سطحی (وزارت نیرو، ۱۳۸۴) [۱۰] مراجعه گردد. برای تعیین نوع کاربری‌های مجاز و غیرمجاز در حریم کمی و حریم کیفی به نشریه شماره ۲۰۳ با عنوان «راهنمای تعیین کاربری‌های مجاز در بستر و حریم رودخانه‌ها» [۲۱] و به طور خاص برای کاربری‌ها در حریم کیفی به ضابطه شماره ۷۸۲ سازمان برنامه و بودجه کشور با عنوان «دستورالعمل ناحیه‌بندی استقرار کاربری در حریم کیفی منابع آب سطحی» مراجعه گردد [۱۱].

نقشه حد بستر و حریم رودخانه، نشانگر پهنه مالکیت عمومی و حاکمیت دولت بر نوار رودخانه است که برای مدیریت رودخانه و سیل و طرح‌های ساماندهی رودخانه در اختیار برنامه‌ریزان و ذی‌نفعان قرار می‌گیرد. نمونه نقشه پهنه‌بندی رودخانه‌های ایران در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. حد بستر با نشانه‌گذاری‌های متوالی (اصلی و فرعی) در طول رودخانه و در دو سوی آن و حریم کمی رودخانه با تابلو به نمایش عمومی در می‌آید (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۳- نقشه پهنه‌بندی حد بستر و حریم رودخانه‌های ایران

نشانه (رپر) اصلی حد بستر و حریم کمی ابهررود — نشانه (رپر) فرعی حد بستر شاهرود

شکل ۳-۴- نشانه‌گذاری حد بستر و حریم رودخانه‌های ایران

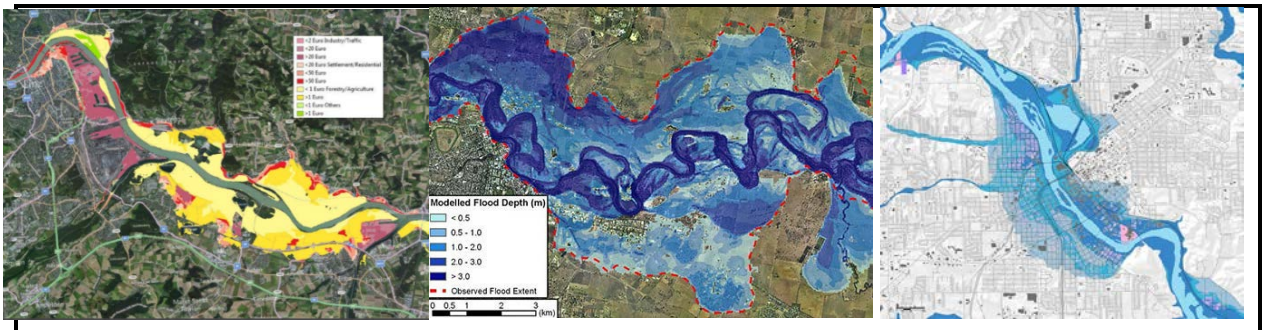
۳-۱-۳- پهنه سیلاب و نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب

پهنه و نقشه سیلاب رودخانه، گستره‌ای از اراضی اطراف رودخانه در شرایط هندسه موجود آن (با وجود سازه‌های آبی، سازه‌های حفاظت رودخانه، سازه‌های تقاطعی، دخل و تصرفات و هر گونه اثرات انسان ساخت) است که با رخداد یک سیل معین (با بده و دوره بازگشت مورد نظر) زیر آب می‌رود.

نقشه خطر سیلاب از ترکیب نقشه پهنه سیلاب (سطح پوشیده شده از سیلاب با دوره بازگشت مورد نظر) با شاخص‌های خطر هیدرولیکی (مانند عمق جریان، سرعت و جهت جریان سیل، و یا ترکیبی از پارامترهای جریان) تهیه می‌شود.

نقشه خطرپذیری (ریسک) سیلاب، نشان دهنده توزیع سطحی اثرات منفی بالقوه سیل در دوره بازگشت‌های مختلف در منطقه است. این نقشه با استفاده از عواملی مانند تعداد ساکنین منطقه درگیر با سیل، نوع فعالیت‌های اقتصادی منطقه متاثر از سیلاب، تاسیسات موجود در منطقه، اهمیت تاسیسات، آسیب ناشی از انتشار آلودگی و سایر موارد، تهیه شده و میزان خسارت محتمل و آسیب‌پذیری‌ها را نشان می‌دهد.

راهنمای تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب (ضابطه شماره ۸۲۱ سازمان برنامه و بودجه کشور) [۲] برای همسان‌سازی روش‌های مطالعه پهنه‌بندی سیل رودخانه تدوین شده و به عنوان یک دستورالعمل به دستگاه‌های مسئول و وابسته و نیز مهندسین مشاور و پیمانکاران ابلاغ شده است. نمونه نقشه‌های پهنه سیلاب رودخانه در شکل (۳-۵) نمایش داده شده است. این نقشه‌ها اطلاعات سیلاب در یک منطقه را برای مدیریت سیل و شرایط بحرانی ناشی از وقوع آن، به صورت نقشه‌های گویا و کاربردی در اختیار برنامه‌ریزان و ذی‌نفعان قرار می‌دهد.



نقشه پهنه (پهنه‌بندی) سیلاب | نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب | نقشه پهنه‌بندی خطرپذیری سیلاب

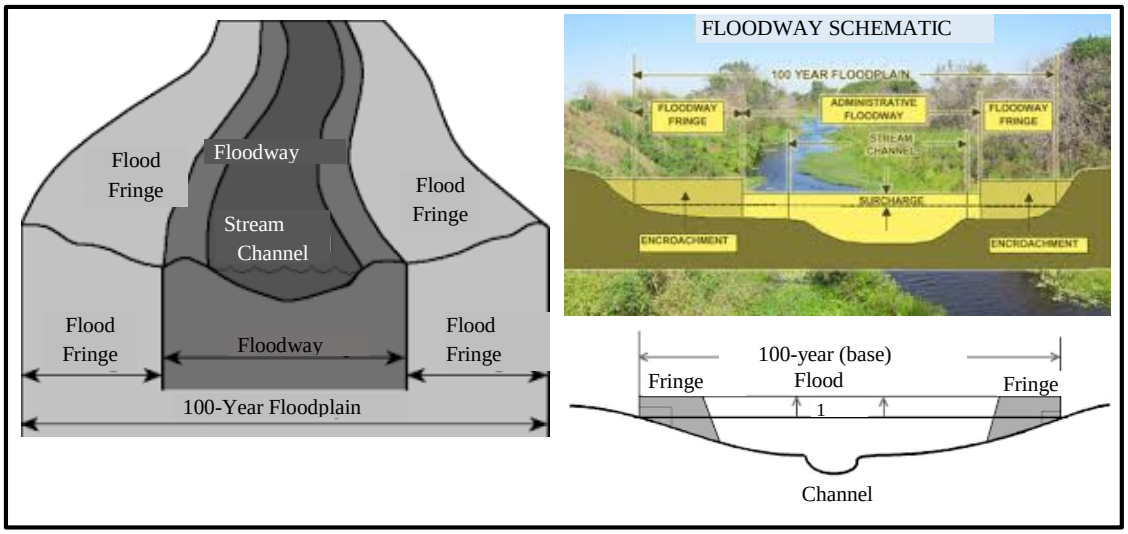
شکل ۳-۵- نمونه نقشه‌های پهنه سیلاب رودخانه‌ها

۳-۱-۴- تفاوت حد بستر قانونی رودخانه و پهنه سیلاب

حد بستر رودخانه (پهنه سیلاب ۲۵ ساله در شرایط طبیعی- قبل از اثرات و مداخلات انسانی در چند دهه اخیر) یک عرصه برای حاکمیت عمومی و مدیریت دولتی است. وزارت نیرو مسئولیت حفاظت، بهره‌برداری و کنترل و بازرسی کاربری‌های غیر مجاز در این بستر را به عهده دارد. از این‌رو، حد بستر قانونی رودخانه، یک پهنه طبیعی آزاد از مالکیت‌های خصوصی و دولتی، تعارضات و تجاوزات و کاربری‌های غیرمجاز جهت ایمن سازی عبور سیلاب‌های متناوب (مجموعه سیلاب‌های تا دوره بازگشت ۲۵ ساله طبیعی) و کاهش خسارات بر رودخانه و بر جان مردم و دارایی‌های کشور

است [۳۰]. گستره فراتر از حد بستر و حریم قانونی، همچنان بستر کبیر رودخانه (سیلابدشت رودخانه) است که همواره خطر سیلاب با دوره بازگشت بیش از ۲۵ ساله و آسیب‌پذیری را به همراه دارد. عدم توجه به تفاوت حد بستر با پهنه سیلاب (پهنه خطر سیل و پهنه خطرپذیری سیل) در مراحل طراحی و اجرا پروژه‌ای عمرانی، موجب تعارضات و تداخلات در مدیریت سیل و آسیب‌پذیری در ایران خواهد بود.

در سایر کشورهای دنیا، مفهومی تحت عنوان انفال به عنوان مرز مالکیت حکومت و یا حد بستر رودخانه مطرح نیست اما برای مدیریت کاربری در سیلابدشت رودخانه، بر اساس نقشه‌های سیلاب، ضوابط و قوانین بازدارنده و قوی وجود دارد. به طور مثال، بنگاه مدیریت بحران فدرال آمریکا (FEMA)، پهنه سیل مبنا را با دوره بازگشت صد ساله تعریف می‌نماید [۱۰۷ تا ۱۱۳]. این پهنه به دو بخش، سیلابرو[۱] و حاشیه سیلابرو[۲] تقسیم می‌گردد (شکل ۳-۶). سیلابرو به پهنه آبراهه اصلی و سیلابدشت آن گفته می‌شود که بتواند جریان سیلاب پایه ۱۰۰ ساله را بدون افزایش قابل ملاحظه‌ای در تراز آب (با بیشینه ۳۰ سانتی‌متر) عبور دهد. حاشیه سیلابرو، در کناره بیرونی پهنه سیلابرو قرار گرفته و جریان در آن به صورت ورقه‌ای و با سرعت کم است (شکل ۳-۶). محدودیت‌های کاربری در پهنه سیلابرو با شرایط حد بستر و در حاشیه سیلابرو با شرایط حریم رودخانه‌های ایران مشابهت دارد [۱۰۷ تا ۱۱۳].



شکل ۳-۶- نقشه پهنه سیل مبنا (۱۰۰ ساله) با نمایش پهنه سیلابرو و حاشیه سیلابرو در رودخانه‌های آمریکا [۱۰۷ تا ۱۱۳]

۳-۲- امکان‌سنجی و مکان‌یابی پل‌ها و آبگذرها

تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی مناسب و جانمایی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه، گذشته از سایر عوامل فنی و ملاحظات مهندسی، نیازمند توجه به حد بستر رودخانه و ملاحظات مورفوهیدرولیکی آن است. موارد زیر برای جانمایی در مرحله طراحی سازه تقاطعی یا در مرحله بازسازی پل‌ها و آبگذرهای آسیب دیده در سیلاب ارائه می‌گردد.

۱- Floodway

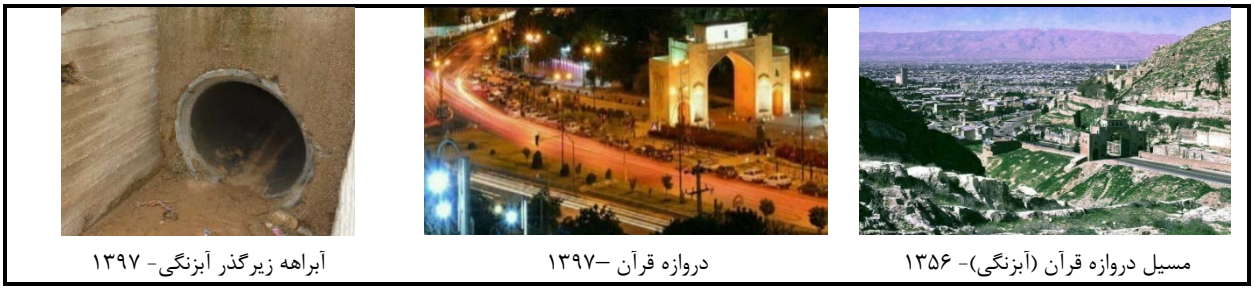
۲- Flood fringe

۳-۲-۱- ملاحظات حد بستر رودخانه و پهنه خطر سیل در جانمایی پل‌ها و آبگذرها

جانمایی نامناسب پل‌ها و سایر سازه‌های تقاطعی در آبراهه اصلی و سیلابدشت رودخانه‌ها از عوامل اصلی آسیب به زیرساخت‌های کشور است. مهم‌ترین دلیل آسیب‌پذیری این سازه‌ها، نادیده گرفتن ریخت‌شناسی رودخانه، توان جریان سیلاب برای تغییرات و ساخت‌وسازهای غیرقانونی یا توافقی در حد بستر رودخانه می‌باشد.

در رودخانه‌های کوهستانی، تجربه ساخت جاده خرم‌آباد به پل‌دختر در دره رود کشکان (با ایجاد ترانشه در دامنه و ریختن خاک در بستر رودخانه)، که در سیلاب ۱۳۹۸ بیش از ۶۰ کیلومتر از آن تخریب شد و یا حذف آبراهه زنگی در نزدیکی دروازه قرآن شیراز (شکل ۳-۷)، نباید تکرار شوند.

در مناطق جلگه‌ای مانند دشت خوزستان و گرگان، جانمایی راه‌ها و آبگذرها در سیلابدشت‌ها و شکل و تعداد آبگذرها نباید باعث افزایش سطح آب در یک طرف و تخریب یا افزایش شدت سیلاب شود. پل‌ها و آبگذرها در این شرایط باید در ارتفاع بالاتر از سطح آب باشند تا تاثیر منفی نداشته باشند. تجربه‌هایی مانند جانمایی نامناسب راه و راه‌آهن در حد بستر و سیلابدشت گرگانرود که در سیلاب ۱۳۹۸ دچار آسیب شد و منجر به بازشدگی‌های ضروری گردید (شکل ۳-۸)، یا ساخت ریل دوم اهواز- اندیمشک با ارتفاع کم عرشه و آبگذرهای ناکافی، نباید تکرار شوند [۸ و ۳۷].



مسیل دروازه قرآن (آبزنگی)- ۱۳۵۶ دروازه قرآن –۱۳۹۷ آبراهه زیرگذر آبزنگی- ۱۳۹۷

شکل ۳-۷- جانمایی راه و آبگذر زیرجاده در بستر آبراهه نیمه کوهستانی

شکل ۳-۸- جانمایی زیرساخت‌ها (راه و راه‌آهن و فرودگاه)، بدون ملاحظات سیل در حد بستر و سیلابدشت گرگانرود

براساس ماده ۲ قانون توزیع عادلانه آب [۳۴]، احداث هر سازه‌ای مانند پل و آبگذر بر روی آبراهه طبیعی و در حد بستر و حریم، نیاز به مجوز از سوی وزارت نیرو و تایید شاخصه‌های اصلی طراحی (مانند جانمایی و ابعاد سازه) دارد. برخی ملاحظات و نکات مرتبط با مدیریت و حفاظت رودخانه در حد بستر و حریم و جانمایی سازه پل و آبگذر در پهنه خطر سیلاب به‌شرح زیر می‌باشد:

۱- حد بستر قانونی که مرزهای پهنه سیلاب ۲۵ ساله در دو سمت رودخانه است، کمینه اطمینان از عبور جریان‌های رودخانه را تامین می‌کند. مطابق شکل (۳-۹)، موقعیت پل‌ها بر روی رودخانه در سه حالت زیر امکان‌پذیر است و شواهد زیادی برای هر یک از این سه حالت وجود دارد.

الف- جانمایی پل در داخل حد بستر قانونی رودخانه (شکل ۳-۹- الف): در این صورت طول دهانه پل کم‌تر از حد بستر قانونی است. ممکن است که دهانه پل در درون آبراهه اصلی یا در عرض مقطع پر آبراهه اصلی و یا با فاصله کمی از دیواره‌های آبراهه اصلی قرارگیرد. در این حالت، ظرفیت انتقال پل به سیلاب‌های کوچک‌تر (بسیار کم‌تر از سیل ۲۵ ساله) محدود می شود و خطرپذیری بالایی برای پل پذیرفته شده است. البته ممکن است با تمهیداتی از طریق افزایش ارتفاع پل و پیرو آن افزایش کوله‌ها و پایه‌های پل و ساخت خاکریز و دیواره‌های ساحلی (که با افزایش تراز آب رودخانه در اثر تنگ شدگی ضرورت دارد)، مشکل عبور سیلاب‌های فراتر از ۲۵ سال برطرف شود، ولی به خاطر پس‌زدگی آب و افزایش نیروهای وارد از جریان به سازه پل و پیکره رودخانه در بالادست و پایین‌دست، خطر تهدید پایداری پل همواره وجود خواهد داشت.

تجربیات تاریخی دوره معاصر ایران در ساخت پل بر روی آبراهه اصلی از رودخانه‌های شهری و برون‌شهری در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. خصوصیات مشترک در طرح این پل‌های تاریخی عبارتند از: ۱- پل در عرض مقطع پر آبراهه اصلی جانمایی شده است. ۲- تراز عرشه پل از سطح بالای دیواره چپ آبراهه به شکل قوسی تا محور میانی پل افزایش یافته و سپس به تراز بالای دیواره راست آبراهه اصلی باز می‌گردد. ۳- جریان‌های کم تا سیلاب‌های متناوب در حد مقطع پر، از زیر پل عبور کرده و ارتفاع بالای پل (نسبت به تراز دیواره‌های آبراهه) شرایط را برای انتقال رسوبات درشت دانه و عبور مواد جامد معلق و شناور (به‌خصوص تنه درختان) فراهم می‌سازد. ۴- پل مانع پیوستگی آبراهه اصلی با سیلابدشت رودخانه نبوده و سیلاب‌های فراتر از تراز مقطع پر، از سیلابدشت دو طرف رودخانه نیز جاری می‌شوند. در چند دهه اخیر هرگاه پیوستگی پل تاریخی از سیلابدشت رودخانه از طریق ساخت دیواره‌های ساحلی در دو سوی آبراهه اصلی قطع گردید، دهانه‌های دو سوی پل تخریب شدند و مشکلات فراوانی برای مرمت این آثار تاریخی و پایداری پل‌ها به‌وجود آمد که هنوز نیز ادامه دارند. نمونه‌های آن در شکل (۳-۱۰) برای پل‌های تاریخی در رودخانه‌های سیمینه رود، زنجانرود و گرگانرود نمایش داده شده است.

ب- جانمایی پل در مرز حد بستر قانونی رودخانه (شکل ۳-۹- ب): در این حالت، جنبه‌های حقوقی برای جلوگیری از ایجاد مانع در بستر طبیعی رودخانه رعایت شده و اطمینانی نسبی از حفظ جریان و ظرفیت عبور رسوبات در سیلاب‌های ۲۵ ساله و کم‌تر به دست می‌آید. با این حال، سیلاب‌های بزرگ‌تر از ۲۵ سال می‌توانند باعث افزایش ارتفاع و سرعت جریان و عبور آب از روی عرشه پل شوند. افزایش ارتفاع پل و ساخت خاکریزها و دیواره‌های ساحلی در بالا و پایین‌دست پل می‌تواند این مشکل را حل کند اما تاثیرات آن بر سازه پل و بستر رودخانه باید به‌دقت ارزیابی شود تا از پایداری اطمینان حاصل شود.

ج- جانمایی پل در پهنه سیلابی فراتر از حد بستر قانونی رودخانه (شکل ۳-۹- ج): در این حالت، بهترین شرایط برای پایداری سازه پل و ساختار رودخانه فراهم است و خطرات ناشی از دخالت در رودخانه به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

شواهد نشان می‌دهد که انتخاب طرح پل‌ها حتی در یک رودخانه یا یک محدوده شهری می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال، دو طرح پیشنهادی جدید در شکل (۳-۱۱) (مشابه گزینه ج) و شکل (۳-۱۲) (مشابه گزینه ب) را می‌توان در نظر گرفت.

گزینه (الف) برای رودخانه‌های سیلابدشتی که آبراهه اصلی پایداری دینامیکی دارد، با شرایط زیر مناسب است:

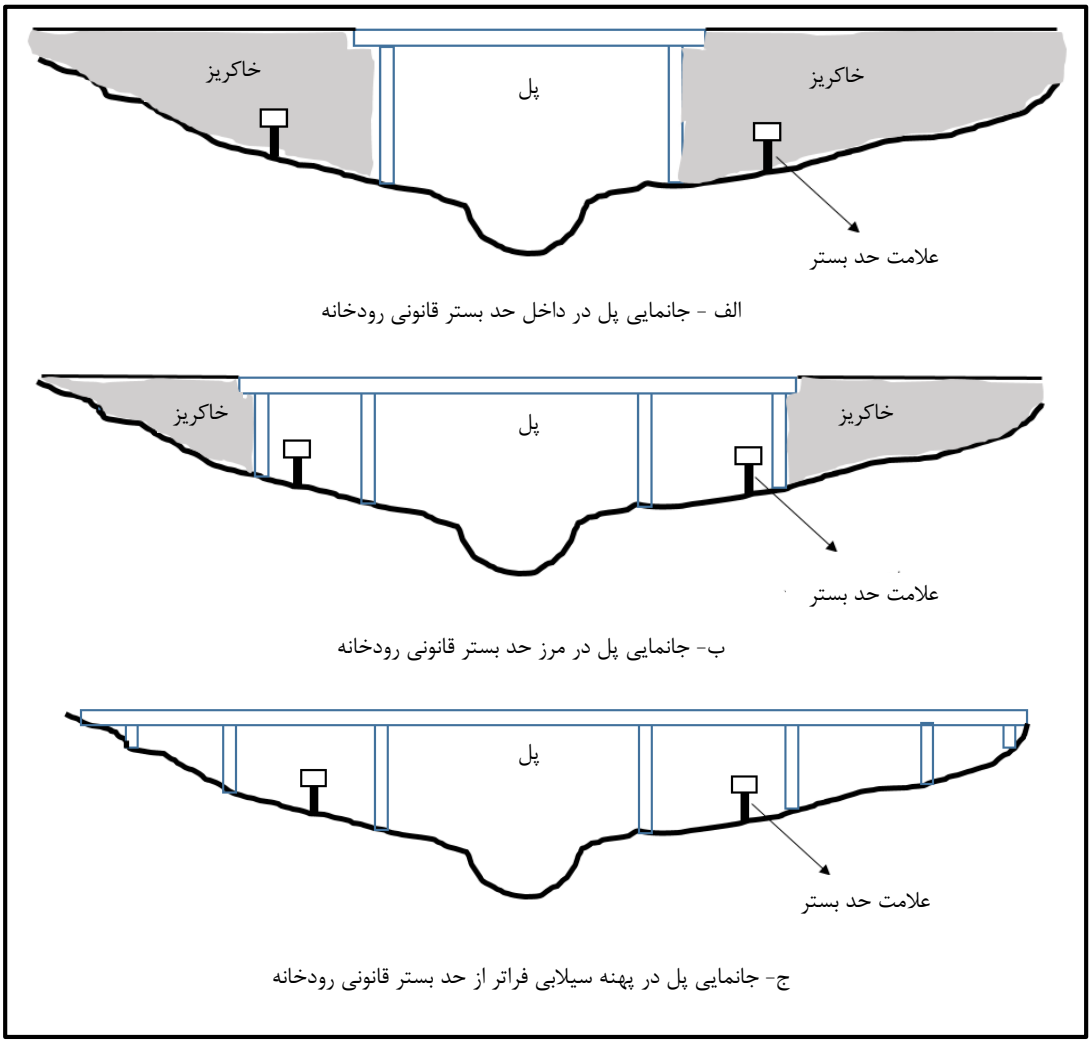
- دهانه پل باید خارج از آبراهه اصلی باشد.
- عرشه پل باید بالاتر از دیواره‌های آبراهه باشد تا عبور رسوبات و مواد جامد تسهیل شود.
- دهانه باز پل بتواند پیوستگی آبراهه اصلی با سیلابدشت رودخانه را تامین نماید. در صورت محدودیت برای پیوستگی، عرشه و دستک‌ها و خاکریزهای طرفین پل باید در برابر جریان‌های سیلابی مقاوم و پایدار باشند.

گزینه‌های (الف) و (ب) برای رودخانه‌های شریانی و ناپایدار مناسب نیستند زیرا ریسک تغییرات عرضی رودخانه و آسیب‌پذیری پل افزایش می‌یابد.گزینه (ج) برای عبور سیلاب‌های بزرگ‌تر از سیل ۲۵ ساله به‌ویژه در رودخانه‌های پیچانرودی ناپایدار، بهتر است. همچنین گزینه‌های میانی بین (ب) و (ج) نیز ممکن است، ولی تصمیم نهایی به عواملی مانند ریسک سیل، اهمیت راه و تحلیل اقتصادی بستگی دارد.

۲- رعایت قانون حد بستر و حریم رودخانه‌ها در بخش کاربری‌های مجاز و غیرمجاز در حد بستر و حریم و اهمیت پهنه‌بندی خطر سیل، باید در مراحل مطالعات، ساخت و اجرا مورد نظر قرار گیرد.

۳- برای تصمیم سازی کارهای رودخانه‌ای، نقشه‌های حد بستر و حریم و همچنین نقشه‌های پهنه و خطر سیل لازم است. حد بستر و حریم و پهنه خطر سیلاب رودخانه، بایستی به عنوان مبانی جانمایی در طرح‌های احداث راه، راه‌آهن، فرودگاه و ساخت پل‌ها و آبگذرها رودخانه‌ای در نظر گرفته شوند.

۴- با توجه به این‌که نقشه‌های سیل براساس شرایط ریخت‌شناسی آبراهه اصلی و کاربری سیلابدشت رودخانه در زمان تهیه آن به دست آمده است، به دلیل تغییرات احتمالی رودخانه در پهنه سیلابی، لازم است که نقشه‌های حد بستر و نقشه‌های سیل در زمان مطالعات و اجرای پروژه به‌روزرسانی شده و دوباره به تایید برسد.



الف - جانمایی پل در داخل حد بستر قانونی رودخانه

ب- جانمایی پل در مرز حد بستر قانونی رودخانه

ج- جانمایی پل در پهنه سیلابی فراتر از حد بستر قانونی رودخانه

شکل ۳-۹- گزینه‌های مختلف جانمایی پل در بستر رودخانه

پل تاریخی سید بهاالدین، زنجان رود، پایین‌دست شهر زنجان

پل تاریخی آق قلا، گرگانرود- استان گلستان

شکل ۳-۱۰- جانمایی پل‌های تاریخی قوسی در عرض مقطع پر آبراهه اصلی رودخانه‌های شهری و برون‌شهری ایران

شکل ۳-۱۱- پل دوستی، رودخانه مرزی ئمریک، مشترک ترکیه و یونان، ۲۰۲۴

شکل ۳-۱۲- پل رودخانه سوان، ایالت غربی استرالیا، ۲۰۲۴

۳-۲-۲- ملاحظات پایداری آبراهه در جانمایی پل و آبگذر

اثرات سازه‌های تقاطعی بر سامانه رودخانه، متقابل و دو سویه است. از این‌رو در طراحی پل‌ها و آبگذرها، رعایت اصول حاکم بر هر دو بخش پایداری و حفاظت رودخانه و پایداری سازه تقاطعی اهمیت دارد.

آبراهه‌های طبیعی تحت تاثیر روند فرسایش و رسوب‌گذاری، حرکت و جابجایی دارند. از آن جمله می‌توان به تغییر در راستا، جابجایی‌های عرضی و طولی، میان‌بری پیچ یا انحراف مسیر، تغییر نوع رودخانه، تغییر تراز بستر، تغییر مواد بستری و دگرگونی ویژگی‌های هندسی آبراهه (عرض- عمق- شیب -راستا) اشاره کرد. این فرایند طبیعی ممکن است منجر به آسیب سازه تقاطعی شود. از این‌رو، ریخت شناسی رودخانه در شرایط موجود و پیش‌بینی تغییرات آن در بازه زمانی انجام مطالعات و ساخت و اجرای سازه ضروری است. بنابراین، مطالعات مهندسی رودخانه در طرح‌ها و پروژه‌های راه، ریل، پل‌ها، آبگذرها و آب نماها باید مورد استفاده قرار گیرد.

برخی ملاحظات مهم در پایداری رودخانه و سازه‌های تقاطعی به شرح زیر است:

۱- جانمایی سازه پل و آبگذرها تا حد امکان باید در بازه‌های نسبتا مستقیم و پایدار باشد تا نیاز به ساماندهی و اصلاح مسیر رودخانه نباشد.

۲- از بازه‌های فرسایشی به ویژه در دیواره خارجی پیچ آبراهه، تا حد امکان باید پرهیز شود. در صورت ضرورت ساخت سازه در یک بازه فعال فرسایشی، باید ارزیابی مورفولوژیکی برای کاهش روند رسوب‌گذاری و یا برنامه پاکسازی دوره‌ای سازه پیشنهاد گردد.

۳- از جانمایی سازه در بازه‌های رسوب‌گذار، تا حد امکان باید اجتناب کرد. رسوب‌گذاری در بازه‌هایی که شیب دره کاهش می‌یابد، در مخروط‌افکنه‌ها، در تلاقی آبراهه‌های فرعی (با شیب بیش‌تر و با بار رسوبی درشت‌تر) با آبراهه اصلی و در پایین‌دست بازه‌های فرسایشی، رخ می‌دهد. در اثر تجمع رسوبات در دهانه سازه، ظرفیت انتقال جریان کاهش یافته و پس‌زدگی آب، خطر سیل را افزایش خواهد داد. در این‌صورت علاوه بر آسیب رساندن به اکولوژی رودخانه، نیاز به لایروبی منظم داشته و هزینه‌های نگهداری را افزایش می‌دهد.

۴- چنانچه جانمایی سازه در بازه ناپایدار رودخانه اجتناب‌ناپذیر باشد، می‌بایست اصلاح مسیر و تثبیت دیواره‌های آبراهه اصلی، در طول بیش‌تری از بالادست و پایین‌دست سازه مورد نظر قرارگیرد و تاثیر ساخت سازه بر هیدرولیک جریان و انتقال رسوب و تغییرات رودخانه ارزیابی گردد.

۵- در طرح اصلاح مسیر و تثبیت دیواره‌های آبراهه اصلی، سطح و شکل ظاهری آبراهه و مصالح طبیعی بستر برای حفاظت از زیستگاه و شرایط عبور ماهی حفظ شوند.

۳-۲-۳- ملاحظات راستای آبراهه اصلی در ساختگاه پل و آبگذر

برخی ملاحظات مهم در جانمایی سازه‌های تقاطعی سازه نسبت به پلان آبراهه به شرح زیر است:

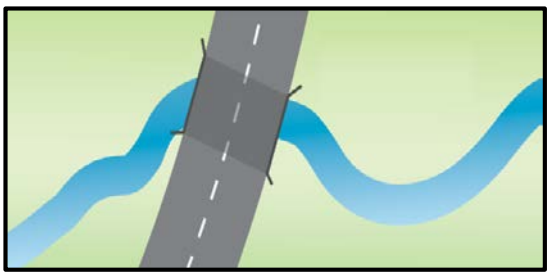
۱- جانمایی سازه پل و آبگذرها، حتی‌المقدور در بازه‌های مستقیم رودخانه با طول کافی (کمینه ۲۰ برابر عرض آبراهه اصلی) و با شیب ملایم انتخاب گردد تا تقارن جریان و انتقال رسوب و عبور اجسام شناور در عرض دهانه برقرار باشد.

۲- در رودخانه‌های پیچانرودی، جانمایی سازه پل و آبگذرها حتی‌المقدور در بازه مستقیم بین دو پیچ معکوس و متوالی انتخاب گردد تا شدت تلاطم جریان کم‌تر باشد و تقارن بیش‌تری در جریان و انتقال رسوب و عبور اجسام شناور برقرار شود (شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴).

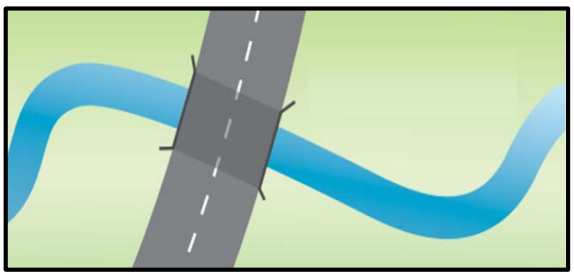
۳- در رودخانه‌های پیچانرودی، در صورت اجبار برای احداث سازه پل و آبگذرها در پیچ رودخانه، ترجیحا محل سازه پل و آبگذر در ناحیه خروجی پیچ جانمایی گردد تا با گذر از ناحیه ورودی و میانی پیچ از انرژی جریان و شدت تلاطم کاسته شده باشد.

۴- از احداث پل و آبگذر در پیچ آبراهه، به دلیل غیریکنواختی توزیع جریان و انتقال رسوب در عرض باید اجتناب کرد. در صورت اجبار برای جانمایی سازه در پیچ رودخانه، حفاظت و تثبیت دیواره خارجی پیچ در طولی معادل کمینه دو برابر عرض آبراهه اصلی در بالادست سازه تا فاصله کمینه یک برابر عرض در پایین‌دست سازه ضروری است [۲۱۰].

۵- در صورت اجبار برای جانمایی سازه پل‌های بزرگ و حیاتی در پیچ رودخانه، به دلیل عدم تقارن جریان آب و انتقال رسوب (حمله جریان به دیواره خارجی و رسوب‌گذاری در کناره داخلی پیچ)، بهتر است که هندسه دهانه‌ها در عرض آبراهه یکنواخت و همسان نباشد و سازگار با خصوصیات نامتقارن در پیچ آبراهه طراحی گردد. در این شرایط، برای اطمینان از کارایی طرح، ساخت مدل‌سازی فیزیکی یا کاربرد مدل‌های عددی توصیه می‌گردد.



شکل ۳-۱۳- جانمایی نامناسب پل یا آبگذر در پیچ آبراهه و ناعمود بر راستای آبراهه



شکل ۳-۱۴- جانمایی مناسب پل یا آبگذر در بازه مستقیم بین دو پیچ متوالی و عمود بر راستای آبراهه

۳-۲-۴- ملاحظات هدایت جریان آبراهه به دهانه پل و آبگذر

برخی ملاحظات مهم در جانمایی سازه تقاطعی نسبت به پلان آبراهه و هدایت جریان به‌سوی دهانه سازه، به شرح زیر است:

۱- در جانمایی و جهت سازه پل و آبگذرها، هدایت مستقیم جریان به سمت دهانه باز سازه اهمیت دارد زیرا انحراف جریان و هدایت آن به پشت سازه، موجب بروز خسارت خواهد گردید.

۲- جانمایی سازه پل و آبگذر، بایستی با کمینه کاهش مقطع عبوری جریان در آبراهه اصلی باشد. عرض تنگ‌شدگی آبراهه اصلی باید ظرفیت انتقال جریان سیل ماکزیمم مورد نظر را داشته باشد. با این وجود کاهش بیش از ۳۰ درصد عرض توصیه نمی‌شود [۱۸۶]، [۱۰۰] و [۲۲].

۳- جانمایی دهانه‌های اصلی سازه پل و آبگذر در بستر آبراهه اصلی، با دیواره‌های هادی مناسب و بدون تاثیر در بستر موثر جریان، مورد نظر قرارگیرد. برای این‌منظور به نشریه شماره (گ-۷۳۶) مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی مراجعه شود [۲۰].

۴- جانمایی و جهت سازه پل و آبگذر طوری انتخاب شود که خط مرکزی جریان در آبراهه اصلی (محور مرکزی آبراهه اصلی) بر محور سازه عمود باشد. درصورتی‌که راستای راه و عرشه پل لزوما عمود بر راستای آبراهه اصلی

نبا شد (پل‌های بیه‌دار)، بهتر ا ست که پایه‌های پل و کوله‌ها در امتداد آبراهه ا صلی جانمایی گردند و زاویه بیه برای عرشه پل با کوله‌ها و پایه‌ها برقرار باشد.

۵- طرح و جانمایی پایه‌های درون جریان برای تسهیل عبور مواد جامد و شناور، به‌خصوص ترکه و چوب‌ها مناسب باشـند. پایه‌ها خطر به دام افتادن مواد چوبی بزرگ را افزایش می‌دهد که به نوبه خود می‌تواند شـدت سـیل را افزایش داده و سازه را در معرض خطر خرابی قرار دهد. در شکل (۳-۱۵)، پایه‌های پل برای سهولت عبور مواد چوبی بزرگ و شاخ و برگ‌ها، صاف و بدون زاویه ساخته شده‌اند.

به طورکلی احداث سازه‌های مقابله با جریان‌های واریزه‌ای در بالاد ست پل و آبگذر تو صیه می شود. ولی برای جلوگیری از ان سداد پل و آبگذرها در آبراهه‌های کوه ستانی با حو ضه جنگلی، سازه تقاطعی هم‌عرض با آبراهه اصلی، بدون پایه برای پل‌ها (یا یک دهانه برای آبگذرها) و با افزایش حداقل ۲۰ درصد در ارتفاع طراحی معمول عرشه (همانند پل‌های قوسی تاریخی)، توصیه می‌شود.

شکل ۳-۱۵- شکل پایه‌های مناسب برای تسهیل عبور مواد شناور چوبی بزرگ و شاخ و برگ‌ها

۳-۲-۵- ملاحظات خاص جانمایی پل‌ها

افزون بر موارد مطروحه در بندهای ۳-۲-۱ تا ۳-۲-۴، دیگر ملاحظات در مکان‌یابی و جانمایی پل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱- رودخانه‌های شریانی، عموما عریض و کم عمق با شیب و قدرت زیاد و به صورت چند رشته‌ای ناپایدار هستند. جانمایی پل باید در طول بیش‌تری از عرض بستر موجود رودخانه انجام یابد. بهتر ا ست که تقارن در باز شدگی دهانه‌های پل رعایت گردد زیرا مسـیر رشـته‌های جریان و جزایر و بارهای رسـوبی در بسـتر ناپایدار بوده و در سـیلاب‌های مختلف رفتار غیرقابل پیش‌بینی دارند. چنانچه پل با طول کم‌تر مورد نظر باشـد، اصـلاح مسـیر رودخانه (کاهش عرض، همراه با افزایش ضـریب پیچانرودی و کاهش شـیب) و تثبیت دیواره‌های رودخانه در خط ساحلی ا صلاح شده، ضروری می‌با شد. درغیراین صورت، تجربیات گذ شته (مانند تخریب تکیه‌گاه پل و انحراف جریان به خارج از بدنه و دهانه‌های ا صلی پل در سیلاب ۱۳۹۸رودخانه‌های ک شکان و سیمره ا ستان لرستان و ایلام)، تکرار خواهند شد.

۲- جانمایی سازه پل باید برای هر دو مرحله ساخت و بهره‌برداری (نگهداری) قابل د سترس، منا سب و اقت صادی باشد. همچنین فضای کافی برای احداث کارگاه، راه دسترسی از کارگاه به محل سازه وجود داشته باشد.

۳- در جانمایی پل و آبگذر، فاصله از محل برداشت مصالح بستر رودخانه باید رعایت گردد. براساس دستورالعمل وزارت نیرو، حریم پل برای برداشت‌های مجاز مصالح رودخانه‌ای از کمینه ۵۰۰ متر بالادست تا ۱۰۰۰ متر در پایین‌دست سازه است. برای پل‌های مهم بر روی رودخانه‌های بزرگ، کمینه فاصله بالادست نیز به ۱۰۰۰ متر افزایش می‌یابد [۱۴].

۴- در جانمایی پل و آبگذر، فاصله آزاد از هرگونه عوارض و یا اقدامات مزاحم برای امکان عملیات لایروبی و پاکسازی بستر رودخانه و دهانه پل و آبگذر باید رعایت گردد. براساس دستورالعمل وزارت نیرو، این فاصله از کمینه ۵۰۰ متر بالادست تا ۱۰۰۰ متر در پایین‌دست سازه می‌باشد ولی برای پل‌های مهم بر روی رودخانه‌های بزرگ، کمینه فاصله بالادست نیز به ۱۰۰۰ متر افزایش می‌یابد [۱۴]. با این وجود، نتایج تجربی سازه‌های تقاطعی مشابه (مانند آبشکن‌ها) برای کاهش اثرات تغییرات بستر آبراهه و برگشت آب نشان می‌دهد که حریم سازه تقاطعی با کمینه طولی معادل ۴ برابر عرض بالای آبراهه اصلی از بالادست تا ۱۰ برابر آن در پایین‌دست سازه باید در نظر گرفته شود. از دو معیار فوق، هرکدام که بیش‌تر باشد باید در نظر گرفته شود.

۵- آسیب زیرساخت‌ها در جریان سیل اگر با تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه همراه باشد، باید از شتاب‌زدگی در همانندسازی سازه‌های آسیب‌دیده (مانند پل‌ها، آبگذرها و دیواره‌های ساحلی محدوده اثر آن‌ها) جلوگیری کرد. برای بازسازی سازه اصلی، اصلاح و یا تغییر در جانمایی سازه و هندسه آن برای اطمینان از پایداری و ایمنی آن در برابر سیلاب‌های بعدی باید مورد نظر قرارگیرد.

۳-۲-۶- ملاحظات محیط زیستی جانمایی پل‌ها

افزون بر بالا، ملاحظات خاص نظر محیط‌زیستی در مکان‌یابی و جانمایی پل‌ها به شرح زیر است.

۱- جانمایی سازه پل حتی‌المقدور در بازه نسبتا کم‌عمق و با سرعت کم در جریان سیلابی، به‌دور از مناطق تخم‌ریزی ماهی و با فاصله مناسب از دهانه ورودی و خروجی تالاب، دریاچه یا دریا باشد.

۲- پل‌های عبور حیات وحش که گاهی با نام پل‌های سبز نیز شناخته می شوند، ساختارهایی هستند که به طور خاص برای کمک به عبور امن جانوران از موانعی مانند جاده‌ها، خطوط راه‌آهن یا سایر سازه‌های انسانی طراحی و ساخته شده‌اند (شکل ۲-۱۲). در ایران پل‌های عبور حیات وحش (حتی برای یوزپلنگ ایرانی و گونه‌های خاص) هنوز ساخته نشده است. در محدوده شاهرود تا سبزوار که عبور آهو و گوزن و غیره وجود دارد و تابلوهای هشدار عبور حیوانات از جاده نصب شده، تلفات سالانه حیات وحش قابل توجه است. در حال حاضر، تنها مسیرهای عبور حیات‌وحش از آبگذرهای هدایت آب‌های سطحی در زیر جاده است که تنها در مواقع خشک سال قابل استفاده است. در خوزستان، ساخت آبگذر به طورخاص برای عبور حیوانات اهلی روستاییان انجام شده است.

مزایای پل‌های حیات وحش عبارتند از: ۱- کاهش تصادفات جاده‌ای، ۲- حفظ تنوع زیستی با ایجاد ارتباط میان زیستگاه‌های دو سوی راه و ۳- حفاظت از گونه‌های خاص و در معرض خطر

ویژگی‌های طرح پل‌های عبور حیات وحش عبارتند از:

- طراحی طبیعی: این پل‌ها با خاک، گیاهان و درختان پوشانده می‌شوند تا شبیه محیط طبیعی شوند و جانوران به استفاده از آن‌ها ترغیب شوند.
- عرض مناسب: عرض پل بسته به نوع و تعداد گونه‌های جانوری منطقه تعیین می‌شود. گونه‌های بزرگ‌تر و گروه‌های متنوع به پل‌های عریض‌تر نیاز دارند.
- محل مناسب: پل‌ها در مسیرهای مهاجرت یا نقاط پرتردد جانوران ساخته می‌شوند.
- ایمنی و حفاظ‌ها: دیوارها یا موانع کنار پل‌ها کمک می‌کنند که جانوران به سمت مسیر درست هدایت شوند.

۳-۲-۷- ملاحظات خاص جانمایی آبگذرها

برای مکان‌یابی و جانمایی آبگذرها در سامانه رودخانه، افزون بر موارد مطروحه در بندهای ۳-۲-۱ تا ۳-۲-۴، معیارها و ملاحظات خاص زیر نیز باید مورد نظر قرارگیرد.

۳-۲-۷-۱- پایداری آبراهه در ساختگاه آبگذر

۱- آبگذرها تا حد امکان در بازه‌های نسبتا مستقیم و پایدار آبراهه جانمایی گردند (شکل ۳-۱۶).

شکل ۳-۱۶- بازه‌های پایدار آبراهه با پوشش گیاهی در کناره‌ها و بدون شواهد فرسایش

۲- از بازه‌های فعال فرسایشی به‌ویژه در دیواره خارجی پیچ آبراهه پرهیز شود. نشانه‌های فرسایش فعال عبارتند از:

- شواهد فرسایش به‌ویژه در دیواره خارجی پیچ‌های آبراهه‌های کوچک (شکل ۳-۱۷)
- رسوب‌گذاری (مواد درشت شن، سنگریزه و سنگفرش)، بدون پوشش گیاهی (شکل ۳-۱۸)
- شیب تند آبراهه (۰/۱ تا ۳ درصد و بالاتر)

شکل ۳-۱۷- بازه فعال فرسایشی با فرسایش کناره‌ای در مسیر مستقیم

شکل ۳-۱۸- بازه فعال فرسایشی با شواهد فرسایش در پیچ خارجی و نمایش رسوبات بستر بدون پوشش گیاهی

۳- از جانمایی آبگذرها در بازه‌های رسوب‌گذار تا حد امکان اجتناب کرد. شاخص‌های بازه‌های رسوب‌گذار عبارتند از:
- رسوب‌گذاری در بستر رودخانه‌ها مانند پشته‌های رسوبی و جزایر (شکل ۳-۱۹)
- اندازه رسوبات بستری کوچک‌تر از شن و ماسه
- شیب کم آبراهه یا جایی که شیب در بازه‌ی کوتاهی از زیاد به کم تغییر می‌کند.

شکل ۳-۱۹- بازه‌های فعال رسوب‌گذار با شواهدی از پشته‌ها و یا جزایر شنی و ریزتر

۳-۲-۷-۲- راستای آبراهه اصلی در ساختگاه آبگذر

جانمایی آبگذرها در بازه مستقیم و با راستای عمود بر آبراهه مناسب است (شکل ۳-۱۳). تا حد امکان باید از ساخت آبگذر در پیچ آبراهه و به صورت مایل پرهیز نمود (شکل ۳-۱۴). در غیراین‌صورت، باید اقدامات جبرانی (مانند دهانه بزرگ‌تر، دهانه‌های اضافی با پایه‌ها و غیره) انجام گیرد.

۳-۲-۷-۳- عرض آبراهه اصلی و دهانه آبگذر

آبگذر باید عرض آبراهه اصلی را حفظ کند. اصول و مبانی زیر برای حفظ عرض آبراهه طبیعی و انتخاب انواع آبگذرهای تک دهانه و چند دهانه است.

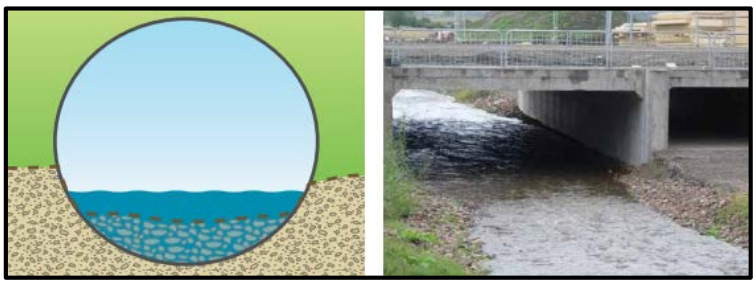
۱- عرض آبگذر و یا تعداد دهانه‌های آبگذر به‌گونه‌ای انتخاب شود تا پهنای آبراهه طبیعی حفظ شود و فرسایش موضعی (آبشستگی) بستر و کناره یا رسوب‌گذاری در سازه متقاطع به کمینه ممکن برسد.

۲- عرض لازم برای حفظ عمق و سرعت آب مناسب برای عبور ماهیان فراهم شود. اگر آبراهه اصلی در زیر آبگذر بیش از حد عریض باشد، خطر ایجاد جریان‌های آهسته و کم عمق را افزایش می‌دهد که مانع از شنا کردن ماهی‌ها از طریق آبگذر شده و ممکن است منجر به رسوب‌گذاری و کاهش ظرفیت جریان در سازه و افزایش خطر

سیل شود. اگر آبراهه اصلی در زیر آبگذر خیلی باریک باشد، ممکن است منجر به جریان‌های سریع‌تری شود که ماهی‌ها قادر به شنا کردن در برابر آن نیستند و ممکن است فرسایش را افزایش دهد و به سازه آسیب برساند. در صورت لزوم می‌توان یک آبراهه مرکب در زیر آبگذر ایجاد کرد تا عمق آب کافی را در جریان‌های کم حفظ کند.

۳- بهتر است از آبگذرهای تکی بزرگ‌تر به جای چندین آبگذر یا لوله کوچک‌تر استفاده شود (شکل ۳-۲۰). آبگذر بزرگ‌تر هم برای حفظ حیات وحش رودخانه و هم جلوگیری از خطرات ناشی از انسداد با مواد جامد، مناسب‌تر ا ست. چندین لوله کوچک‌تر احتمال ر سوبگیری و ا نسداد بیش‌تری دارد که خطرات نا شی از سیل را افزایش می‌دهد و مانع از حرکت رسوبات رودخانه به پایین‌دست می‌شود (شکل ۳-۲۱).

۴- آبگذرهای دوقلو فقط باید در مواردی استفاده شوند که جانمایی سازه تک‌دهانه بزرگ امکان‌پذیر نباشد (شکل ۳-۲۲). اگر از آبگذر دوقلو استفاده شود، عرض آبراهه اصلی همچنان باید حفظ شود.

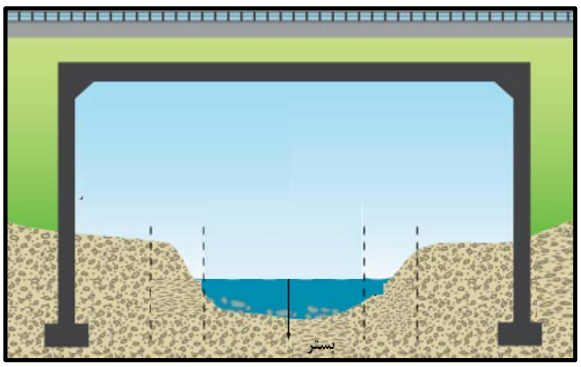


شکل۳-۲۰- آبگذر بزرگ برای حفظ عرض آبراهه اصلی

شکل۳-۲۱- کاربرد نامناسب آبگذر با مجموعه لوله‌های کوچک و خطر انسداد و مخاطرات محیط‌زیستی

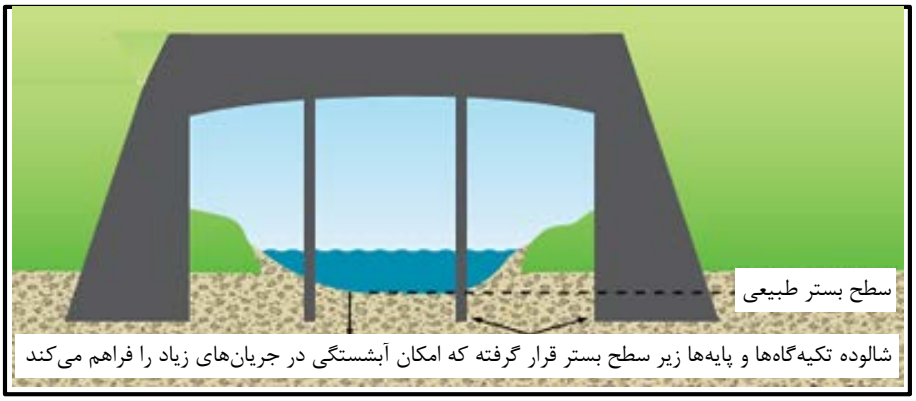
شکل ۳-۲۲- آبگذر دو قلو برای حفظ عرض آبراهه بزرگ وقتی سازه تک‌دهانه امکان‌پذیر نباشد

۵- برای پیو ستگی زی ستگاه کناره آبراهه، اگر تکیه‌گاه‌ها خارج از آبراهه ا صلی رودخانه با شند، یکپارچگی م سیر جریان حفظ شـده و نیاز به حفاظت بسـتر و کناره‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر آن مانعی برای عبور ماهی ایجاد نمی‌شود و عبور حیوانات از آبگذر را فراهم می‌نماید (شکل‌های ۳-۲۳ تا ۳-۲۵).



شکل ۳-۲۳- آبگذر تک دهانه پیش‌ساخته با تکیه‌گاه‌های دور از بستر آبراهه مناسب عبور حیوانات

شکل ۳-۲۴- آبگذر تک‌دهانه با تکیه‌گاه‌های کناری برای عبور حیوانات و ماهیان با حفظ سیمای طبیعی بستر



شکل۳-۲۵- آبگذر چند دهانه با پایه‌های عمیق و تکیه‌گاه‌های دور از بستر برای عبور حیوانات

۶- باید فا صله بین تکیه‌گاه‌های دو طرف سازه آبگذر تا حد امکان زیاد با شد تا زیستگاه ساحلی حفظ شود. گاهی راهروی سـاحلی در بدنه تکیه‌گاه یا کناره آن، برای عبور حیوانات در شـرایط جریان غیرسـیلابی جانمایی می‌گردد (شکل ۳-۲۶).

۷- در صورتی‌که نمی‌توان پیو ستگی زی ستگاه کناره آبراهه را در زیر آبگذر حفظ کرد، م سیر عبور حیوانات باید از طریق احداث سکو برای عبور از زیر آبگذر (شکل ۳-۲۶) یا ایجاد یک تونل در مجاورت آبگذر (شکل ۳-۲۷)، فراهم گردد. به طور کلی آبگذرهای منا سب پستانداران باید با در نظرگرفتن سمورها طراحی شوند هرچند که برای پستانداران بزرگ‌تری مانند گورکن، ممکن ا ست آبگذرهای بزرگ‌تری مورد نیاز با شد. کمینه ارتفاع سکو باید ۶۰ سـانتی‌متر باشـد. عرض سـکو یا تونل به طول تقاطع بسـتگی دارد اما باید کمینه ۶۰ سـانتی‌متر برای تونل‌ها و ۴۵ تا ۶۰ سانتی‌متر برای سکوها در نظر گرفته شود. برای پستانداران بزرگ‌تر نیاز به عرض بیش‌تری

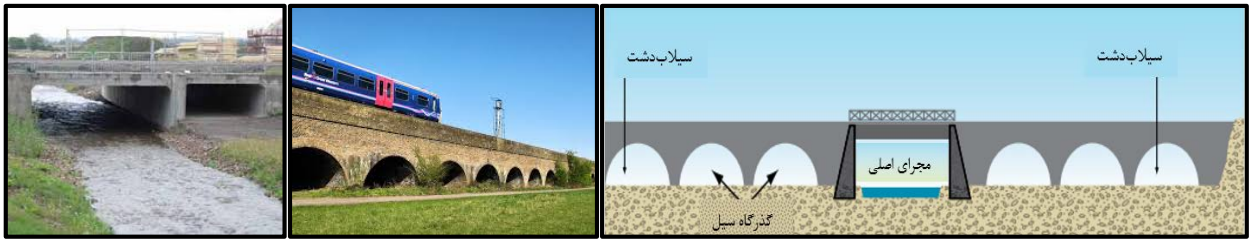
می‌باشد [۹۳ و ۹۴ و ۱۴۵]. تونل‌ها و سکوهایی که بالاتر از ارتفاع کناره طبیعی آبراهه قرارگیرند، باید دارای راه دسترسی از سطح زمین به سمت آن‌ها باشند.

شکل ۳-۲۶- آبگذر با حفظ عرض آبراهه و گذرگاه حیوانات توسط سکوی کناری در زیر آبگذر و بیرون از بستر آبراهه

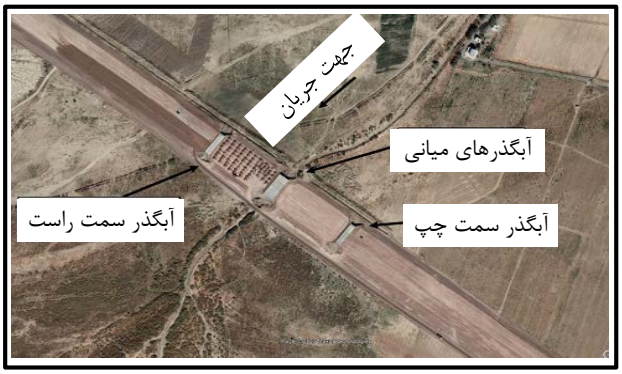
۳-۲-۷-۴- آبگذرها در سیلابدشت رودخانه

سیلابدشت‌ها نقش مهمی در سامانه رودخانه ایفا می‌کنند. برای عبور راه و ریل از سیلابدشت، باید از ایجاد خاکریز یکپارچه که مانند سد عمل می‌کنند، اجتناب کرد. به‌جای آن باید گذرگاه‌هایی برای عبور جریان سیلابی، حیوانات، انسان‌ها و وسایل محلی در نظرگرفته شود. اگرچه این کار هزینه اولیه را افزایش می‌دهد، اما باعث کاهش خسارات جانی و مالی در هنگام سیل و کاهش تنش‌های محیط‌زیستی و اجتماعی می‌شود. در این راستا، مطابق شکل (۳-۲۷)، از «آبگذرهای معمولی خشک» یا «آبگذرهای سیلابدشتی» در خاکریز استفاده می شود. جانمایی و میزان بازشدگی در خاکریز راه، نیازمند مطالعات مورفولوژی و ریسک سیل می‌باشد.

نمونه‌ای از این سازه در سیلابدشت رودخانه عباس‌آباد (تقاطع با بزرگراه غدیر) در شکل (۳-۲۸) نشان داده شده است. در طراحی هیدرولیکی آبگذرها باید به تقویت اطراف آن‌ها برای جلوگیری از آبشستگی توجه شود.



شکل۳-۲۷- نمونه‌های گذرگاه و آبگذر خشک در پهنه سیلابدشت آبراهه‌ها



شکل۳-۲۸- آبگذر خشک در سیلابدشت رودخانه عباس آباد در تقاطع با بزرگراه غدیر (استان البرز)، ایران

۳-۲-۷-۵- ملاحظات خاص در آبگذرهای بسته

سازه‌های آبگذری که در طول گذرگاه خود دارای کف‌بند نیز هستند (بستر طبیعی با مصالح مشابه دیواره و عرشه یا دیگر مصالح و روش‌ها تثبیت می‌شود)، آبگذر بسته نامیده می‌شوند. آبگذرهای پیش‌ساخته بتنی و به‌خصوص لوله‌ای، از نوع آبگذرهای بسته هستند. در بسترهای با مقاومت کم، عموما از آبگذرهای بسته با مقطع مستطیلی استفاده می‌شود. بستر صلب و غیرطبیعی آبگذر، خطر بالایی برای عبور ماهیان و حرکت پستانداران دارد.

برای جانمایی آبگذرهای بسته، علاوه بر اصول و مبانی بالا، رعایت موارد تکمیلی زیر نیز ضروری می‌باشد:

۱- تراز کف، شیب طبیعی و مواد بستر آبراهه باید حفظ شود. برای این منظور، کف‌بند آبگذر باید در زیر سطح بستر طبیعی دفن شود (شکل‌های ۳-۲۹ و ۳-۳۰). کف‌بند باید به اندازه کافی عمیق دفن شود تا در اثر فرسایش بستر در جریان‌های زیاد، پدیدار نشود.

براساس توصیه های راهنمای فنی CIRIA-C689، مطابق شکل (۳-۳۰)، کمینه مقادیر پیشنهادی برای عمق جانمایی کف آبگذر بسته از سطح بستر طبیعی، به شرح زیر است [۹۳]. در برخی شرایط ممکن است که کف‌بند عمیق‌تر نیز باشد.

- برای آبگذرهای با قطر داخلی یا ارتفاع کم‌تر از ۱/۲ متر: کمینه ۱۵ سانتی‌متر زیر سطح بستر طبیعی
- برای آبگذرهای با قطر داخلی یا ارتفاع ۱/۲ تا ۱/۸: کمینه ۲۰ سانتی‌متر
- برای آبگذرهای با قطر داخلی یا ارتفاع بیش‌تر از ۱/۸ متر: کمینه ۳۰ سانتی‌متر

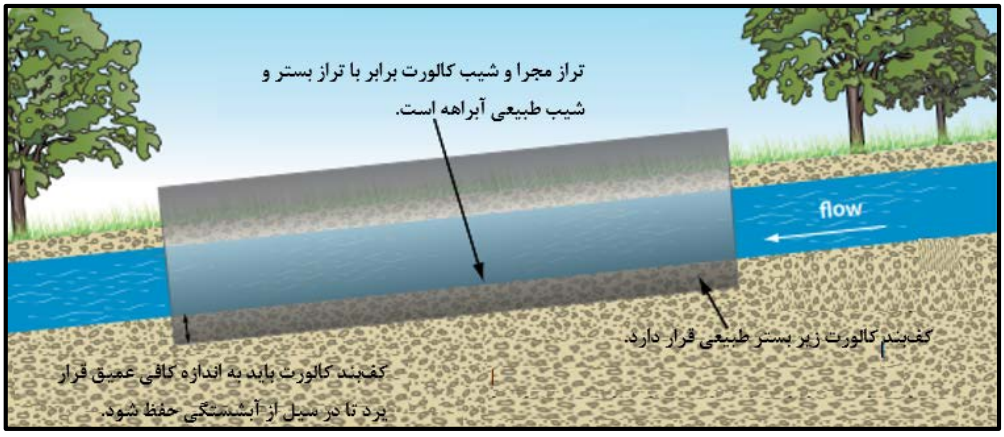
۲- عرض آبراهه طبیعی باید حفظ شود. اندازه آبگذر باید مناسب گذر جریان‌های سیلابی و انتقال بار رسوبی کف باشد.

۳- کف آبگذر از نظر شکل، عرض و زبری برای همه گونه‌های ماهی در حوضه آبریز آبراهه قابل عبور باشد.

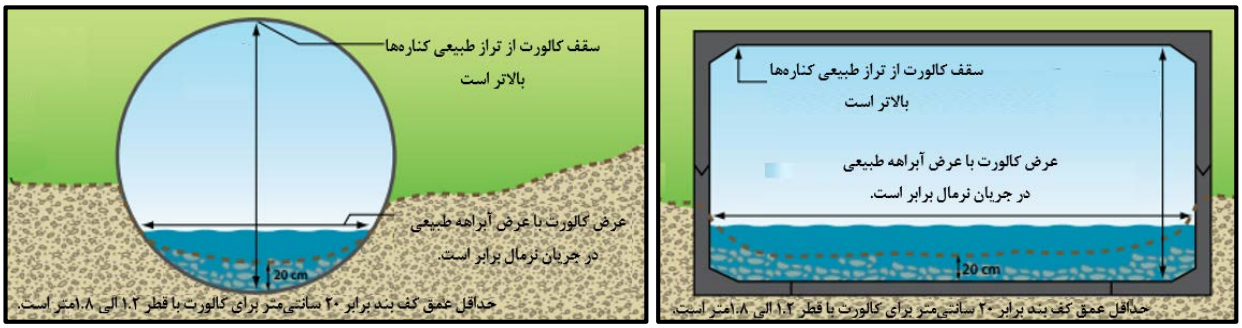
۴- هیچ مانع فیزیکی برای عبور ماهی وجود نداشته باشد. راه عبور برای حیوانات (به خصوص) پستانداران فراهم شود.

۵- باید عمق آب کافی و سرعت مناسب جریان برای مهاجرت آبزیان (به بالادست و پایین‌دست) حاصل شود.

۶- در آبگذرهای طولانی و برای آبزیان خاص، ممکن است به مکان‌های استراحت (ایستخری) در داخل سازه و یا در بالادست و پایین‌دست سازه نیاز باشد.



شکل ۳-۲۹- آبگذر بسته با جانمایی کف‌بند در زیر سطح بستر با حفظ شیب و بستر طبیعی



شکل۳-۳۰- آبگذرهای بسته با حفظ عرض آبراهه اصلی و با نمایش عمق جانمایی کف‌بند در زیر سطح بستر آبراهه

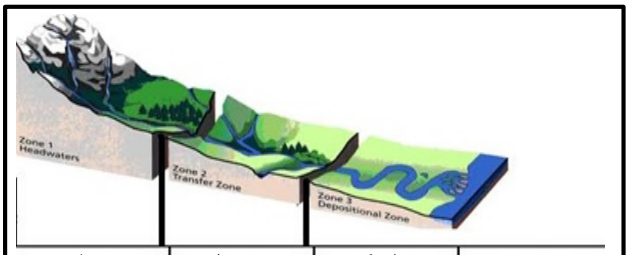
۳-۳- مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه

۳-۳-۱- کلیات

شکل و ابعاد رودخانه‌ها در طول زمان به دلیل عوامل مختلفی مانند خصوصیات حوضه آبریز (زمین شناسی، شیب، پوشش گیاهی و بارش) و همچنین ساخت و سازهای انسانی تغییر می‌کند. علمی که این تغییرات را بررسی و پیش‌بینی می‌کند، ریخت‌شناسی رودخانه نامیده می‌شود. این علم به مهندسین کمک می‌کند تا طراحی، اجرا و نگهداری سازه‌های مرتبط با رودخانه‌ها (مانند پل‌ها و آبگذرها) را به‌گونه‌ای انجام دهند که از خسارت‌های ناشی از تغییرات احتمالی در شکل رودخانه جلوگیری کنند.

تغییرات رودخانه ممکن است در دوره‌های طولانی (هزاران تا میلیون‌ها سال) رخ دهد، مانند تغییرات ناشی از تکتونیک و زمین‌لرزه‌های شدید یا سیلاب‌های بسیار بزرگ. اما در بیش‌تر پروژه‌های عمرانی که عمر آن‌ها کم‌تر از ۲۰۰ سال است، این تغییرات بلند مدت معمولا مدنظر نیستند. برای این پروژه‌ها، تغییرات شکل و راستای رودخانه در طول عمر پروژه (مثلا۵۰ تا ۲۰۰ سال) اهمیت دارد که به دلیل شرایط جریان و رسوب، ممکن است به صورت طبیعی یا تحت‌تاثیر فعالیت‌های انسانی رخ دهند.

رودخانه‌ها معمولا از نواحی کوهستانی شروع شده و به نواحی پست و در نهایت به دریا می‌ریزند. شکل (۳-۳۱) خصوصیات رودخانه‌ها را در سه ناحیه مختلف با ویژگی‌های شیب، خاک، پوشش گیاهی و آب و هوا نمایش می‌دهد.



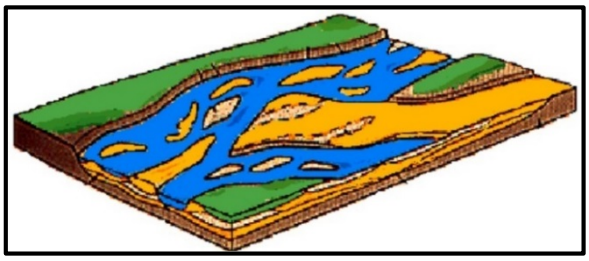
شیب	خیلی کم (در ده هزار)	متوسط (در هزار)	زیاد (درصد)
سرعت	خیلی کم	متوسط	زیاد
دبی	خیلی زیاد	متوسط	کم
عمق آب	زیاد	متوسط	کم
عرض رودخانه	متوسط	زیاد	کم
نسبت عرض به عمق	متوسط	زیاد	کم
نسبت دبی سیل به دبی کم‌آبی	زیاد	متوسط	زیاد
اندازه ذرات	ریزدانه (ماسه یا کم‌تر)	شن و ماسه	قلوه‌سنگ و شن
بار رسوبی غالب	معلق	معلق	بستر
مشکلات عمده	رسوب‌گذاری	تخریب سواحل	فرسایش بستر
	لغزش سواحل	رسوب‌گذاری	فرسایش سواحل
	سیل	سیل	لغزش‌های توده‌ای دامنه
	پیچانرودی	تمایل به تعریض	آورد رسوب زیاد

شکل ۳-۳۱- خصوصیات رودخانه‌ها در ناحیه (۱) سرشاخه‌ها (فرسایشی)، ناحیه (۲) انتقالی (فرسایش/رسوبگذار) و ناحیه (۳) رسوبگذار

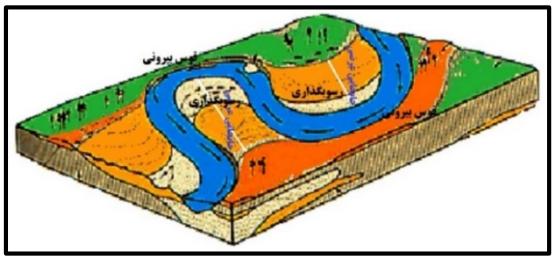
در ناحیه ۱ (کوهستان)، رودخانه‌ها به شکل V یا U هستند و رسوبات درشت‌دانه‌ای دارند که به ناحیه ۲ منتقل می‌شود. تغییرات ابعاد رودخانه در این ناحیه به‌دلیل وجود مرزهای سنگی بسیار کند است و مسیر رودخانه بیش‌تر تابع توپوگرافی منطقه است. مشکل اصلی در ناحیه ۱ جریان‌های رسوبی واریزه‌ای و انتقال رسوبات درشت مانند تنه درختان است که می‌تواند موجب انسداد و تخریب پل‌ها شود.

در ناحیه ۲، شیب رودخانه ملایم‌تر و نواحی اطراف آن تپه ماهوری و فرسایش‌پذیر هستند. رودخانه در این ناحیه عرض زیادی دارد (گاهی تا ۳ کیلومتر) و پشته‌های رسوبی تشکیل می‌شود که در هنگام سیلاب جابجا می‌شوند. در زمان سیلاب، جریان آب در کل عرض رودخانه وجود دارد ولی در زمان کم‌آبی، جریان به صورت شریانی بین پشته‌های رسوبی حرکت می‌کند (شکل ۳-۳۲). مشکلات اصلی این ناحیه، جابجایی خط‌القعر و فرسایش ساحلی است.

در ناحیه ۳، شیب رودخانه بسیار کم و رودخانه عمیق می‌شود. به‌دلیل سرعت کم جریان، رسوبات ریزدانه (کم‌تر از ۲ میلی‌متر) به این ناحیه منتقل می‌شوند و نزدیک دریا اندازه آن‌ها به کم‌تر از نیم میلی‌متر یا چسبنده می‌رسد. مسیر این رودخانه‌ها به شکل مارپیچ است و به پیچان‌رود معروف هستند (شکل ۳-۳۳). رسوب‌گذاری در پیچ داخلی و فرسایش شدید در پیچ خارجی، از مشکلات عمده این رودخانه‌هاست (شکل ۳-۳۴). این فرایندها باعث جابجایی عرضی رودخانه و ایجاد پیچ‌های طولانی می‌شود که در نهایت از مسیر اصلی جدا و به صورت نعل‌اسبی باقی می‌ماند (شکل ۳-۳۵).

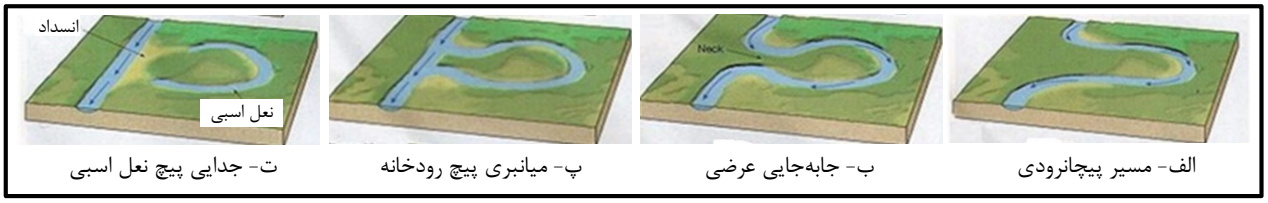


شکل ۳-۳۲- تشکیل رودخانه‌های شریانی در ناحیه ۲



شکل ۳-۳۳- تشکیل رودخانه پیچان‌رود در ناحیه ۳

شکل ۳-۳۴- شرایط الگوی جریان و رسوب در پیچ رودخانه



شکل ۳-۳۵- جانمایی عرضی رودخانه‌های پیچانرود و جدایی پیچ رودخانه به صورت حلقوی یا نعل اسبی

شکل (۳-۳۶) تغییرات عرضی یک پیچان‌رود را طی ۱۲ سال نشان می‌دهد، جایی که دو پیچ رودخانه به‌هم نزدیک شده و در آستانه جدا شدن بازه‌ی نعل اسبی قرار دارند. این جدایی، تغییرات شدیدی در شکل و ابعاد رودخانه در پایین‌دست ایجاد می‌کند. با کوتاه شدن مسیر جریان، انرژی رودخانه افزایش یافته و باعث فرسایش شدید سواحل خواهد شد. این فرسایش تا زمانی ادامه دارد که با تشکیل یک پیچ جدید در پایین‌دست، انرژی اضافی جریان مستهلک شود و شرایط رودخانه به پایداری نسبی برسد.

الف- پیچانرودی سال ۲۰۰۶ ب- پیچانرودی سال ۲۰۱۸

شکل ۳-۳۶- مهاجرت عرضی پیچ‌های یک رودخانه پیچانرودی

تقسیم‌بندی‌های جزئی‌تری هم برای تعیین فرم رودخانه پیشنهاد شده است که برای اطلاع بیش‌تر می‌توان به ضابطه شماره ۵۹۲ سازمان برنامه و بودجه کشور با عنوان «راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها» مراجعه کرد [۲۵].

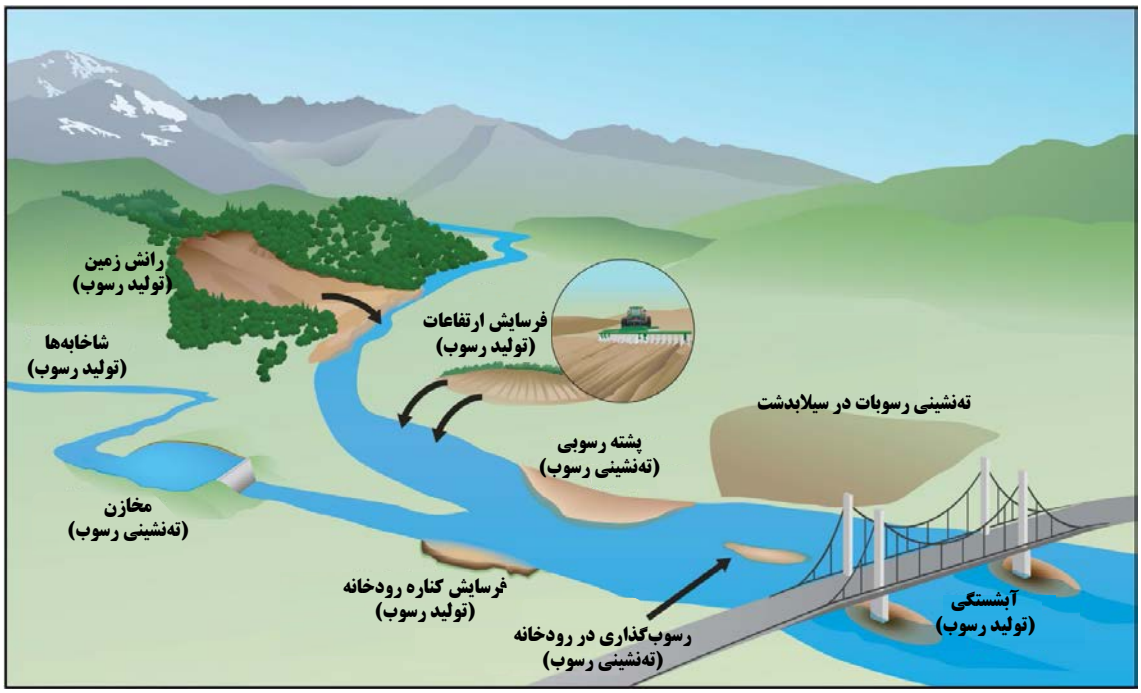
۳-۳-۲- تغییر در فرم رودخانه تحت تاثیر احداث سازه (پل) در بالادست و پایین‌دست

تغییراتی که در فرم رودخانه‌ها صورت می‌گیرد به طور معمول، تدریجی و حتی گاهی نامحسوس هستند. در این شرایط می‌توان رودخانه را پایدار[۱] (ماندگار در زمان و یکنواخت در مکان) فرض کرد. اما باید به این نکته توجه شود که حتی در رودخانه‌های پایدار هم تغییرات همچنان در حال وقوع است.

حرکت رسوب در رودخانه‌ها، یکی از عوامل تغییر در رودخانه‌ها می‌باشد. رودخانه‌ها رسوب را از فرسایش مناطق بالادست برداشت می‌کنند، سپس بخشی از آن را از مناطق میانی حوضه عبور می‌دهند و در نواحی پایین‌دست به جا می‌گذارند (شکل ۳-۳۷). تشخیص مرزهای این سه منطقه در یک حوضه‌ی آبخیز همیشه آسان نیست زیرا در اغلب رودخانه‌ها، فرایندهای مختلفی در مناطق تامین، انتقال و ته‌نشینی وجود دارد که طبقه‌بندی را مشکل می‌سازد.

در دراز مدت، رودخانه در مناطق بالادست، کاهش تراز[۲] و در مناطق پایین‌دست در اثر ته‌نشینی رسوبات، افزایش تراز[۳] می‌یابد. در عین حال ورود و خروج رسوب از ناحیه‌ی انتقالی، به طور متوسط متعادل و متوازن باقی می‌ماند. بنابراین بازه میانی رودخانه که مناطق فرسایشی و رسوبگذار را به‌یکدیگر متصل می‌کند، در طولانی مدت تغییر زیادی نمی‌کند. تحت این شرایط، بازه‌ی میانی رودخانه را می‌توان پایدار دینامیکی[۴] طبقه‌بندی کرد.

۱- Stable
۲- Degradation
۳- Aggradation
۴- Dynamically stable



شکل ۳-۳۷- مناطق فرسایشی و ته‌نشینی رسوبات در امتداد مسیر رودخانه [۱۴۲]

در سال ۱۹۵۵، لین[۱] ارتباط بین جریان آب و رسوب را به صورت یک ترازو نشان داد. در رابطه‌ی لین، ظرفیت جریان برای انتقال رسوب به صورت حاصل‌ضرب بده جریان و شیب رودخانه بیان شده است (کمیتی مشابه با قدرت جریان[۲]). این کمیت با تامین رسوب از بالادست که به صورت حاصل‌ضرب بار رسوب و اندازه‌ی رسوب بیان شده است، متعادل می‌شود. مطالعات زیست-زمین ریخت‌شناسی[۳] نشان می‌دهد که تعادل لین با در نظر گرفتن تاثیر زیست‌شناسی کامل‌تر می‌شود.

تعادل لین حتی در رودخانه‌هایی که در تعادل دینامیکی است، هیچگاه ثابت و ایستا نیست اما به طور معمول، نوسانات آن کوچک و به سرعت برگشت‌پذیر هستند. در مقابل، رخدادهای طبیعی (سیل، خشکسالی، فوران آتشفشان، رانش زمین، و سایر موارد)، پروژه‌های سد سازی، حمل و نقل و سایر فعالیت‌های انسانی موجب عدم تعادل و بی‌توازنی‌های بزرگ‌تر و طولانی‌مدت می‌شوند. شکل (۳-۳۸) نشان می‌دهد که چگونه پدیده‌ی برگشت آب[۴] موجب افزایش تراز در بالادست سازه‌های متقاطعی مانند آبگذر یا پل می‌شود. قبل از ساخت سازه، ظرفیت انتقال رسوب در تعادل با تامین رسوب است. با گذشت زمان، پس‌زدگی جریان در اثر استقرار سازه، ظرفیت انتقال رسوب را می‌کاهد. این مسئله به دلیل کاهش شیب انرژی اتفاق می‌افتد. در شکل (۳-۳۸) ترازوی لین این تغییرات را به صورت جابجا شدن سطل به طرف چپ بازوی ترازو نشان می‌دهد. در این وضعیت، بده جریان، میزان فرسایش و تولید رسوب از بالادست و اندازه‌ی رسوبات (D_{50}) تغییر نمی‌کند، در نتیجه تعادل در جهت پاد ساعتگرد به‌هم می‌خورد و عقربه افزایش تراز را نشان می‌دهد.

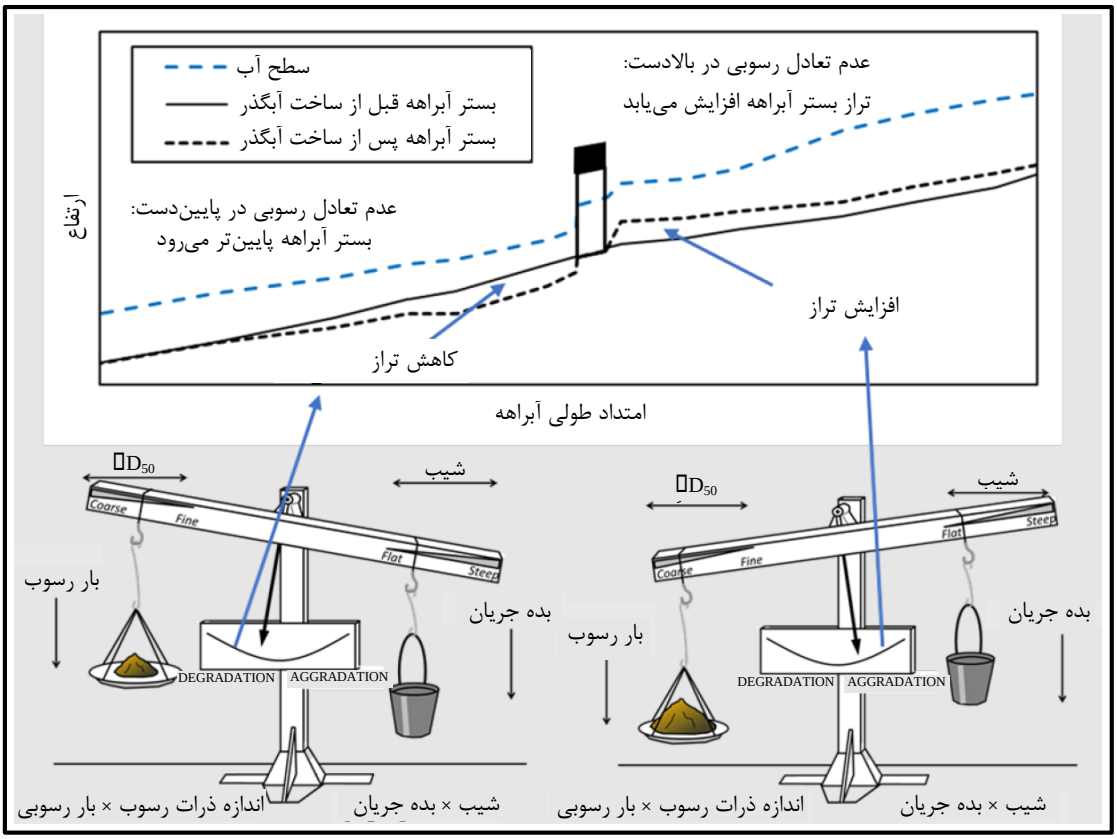
۱- Lane E.W. (1955)

۲- Stream power

۳- Biogeomorphology

۴- Backwater

در عوض در پایین‌دست سازه شرایط به این صورت است که منبع رسوب کاهش یافته است. در شکل (۳-۳۸) این اتفاق با مقدار کم‌تری رسوب روی کفه ترازو نشان داده شده است. در این حالت، شیب کف، بده جریان و اندازه‌ی رسوبات (D_{50}) بدون تغییر باقی می‌مانند پس تعادل در جهت ساعتگرد می‌چرخد و عقربه کاهش تراز را نشان می‌دهد. با ایجاد ظرفیت هیدرولیکی[۱] کافی می‌توان از این تغییرات جلوگیری کرد. در نتیجه پدیده‌ی برگشت آب فقط در صورت وقوع سیل‌های بزرگ که به ندرت اتفاق می‌افتند، رخ می‌دهد.



شکل ۳-۳۸- ترازوی لین برای پاسخ احتمالی یک رودخانه به احداث یک پل یا آبگذر با ظرفیت کم [۱۴۳]

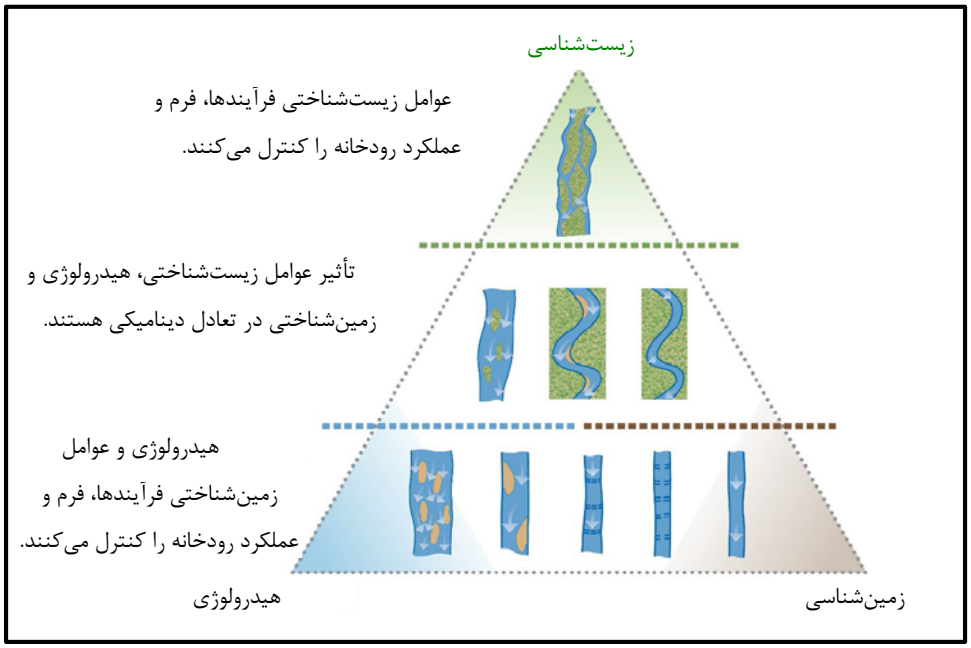
براساس روش تعادل لین، طبقه‌بندی‌های آبراهه پایدار و معادله‌های طراحی کانال‌های پایدار، برای اثرات زیست - زمین ریخت‌شناسی اصلاح شده‌اند. برای مثال Hey and Thorne (1986) نوع پوشش (درخت، بوته، علف یا بدون پوشش گیاهی) کناره‌ی رودخانه را نیز در نظرگرفتند تا قابلیت پیش‌بینی معادله‌های هندسه هیدرولیکی را برای رودخانه‌های پایدار با بستر شنی بهبود بخشند [۱۴۶].

کسترو و تورن[۲] [۱۵۲]، پلان‌فرم‌های پایدار دینامیکی را در قالب مثلث تکوین آبراهه[۳]، دوباره ترسیم کردند که بر اساس آن، فرم‌های رودخانه تحت تاثیر عوامل زیست‌شناختی، زمین‌شناختی و هیدرولوژی می‌باشد (شکل ۳-۳۹).

۱- Hydraulic capacity

۲- Castro and Thorne (2019)

۳- Stream evolution triangle



شکل ۳-۳۹- مثلث تکوین آبراهه با اثر نسبی هیدرولوژی، زمین‌شناسی و زیست‌شناسی بر فرایندها و فرم‌های رودخانه [۱۴۳]

طبقه‌بندی‌های زمین ریخت‌شناسی رودخانه‌ها و کانال‌های پایدار، پلان‌فرم‌ها را فقط بر اساس خصوصیات جریان و بار رسوبی توضیح می‌دهد ولی مثلث تکوین آبراهه (SET) با لحاظ کردن تاثیر عوامل زیست‌شناختی، نشان می‌دهد که فرم‌های پایدار صرفا بر مبنای روابط بین جریان، سنگ و رسوب مشخص نمی‌شوند، بلکه از حیات رودخانه نیز تاثیر می‌پذیرد. پلان‌فرم‌هایی که در پایین مثلث SET قرار دارند، تاثیر نسبی قدرت جریان و بار رسوبی را بدون اثرات زیست شناسی، همانند ترازوی لین، نشان می‌دهد. ولی هنگامی که تاثیر نسبی عوامل زیست شناختی افزایش می‌یابد، جریان کندتر می‌شود، قدرت جریان پخش و جابجایی و حرکت رسوبات کم‌تر می‌شود. این شرایط موجب پیچانرودی شدن یا شریانی شدن می‌گردد.

۳-۳-۳- ابعاد رودخانه (میزان مجاز تنگ‌شدگی عرض رودخانه)

براساس فرضیه رژیم، یک آبراهه در شرایطی که در یک بازه زمانی کافی بین دو متغیر مستقل (بده جریان و بار رسوبی) با متغیرهای هندسی آبراهه (عرض بالا، عمق متوسط و شیب طولی) تغییر و تنظیم ایجاد کند، به حالت رژیم یا تعادل دینامیکی می‌رسد. در این شرایط، فرسایش بستر و رسوب‌گذاری متعادل و تقریبا برابر می‌شوند. ارزیابی ابعاد هندسی رودخانه در حالت رژیم و مقایسه آن با هندسه موجود نشان می‌دهد که آیا بازه مورد نظر رودخانه در شرایط رژیم است یا خیر. همچنین در صورت نیاز به تغییر ابعاد رودخانه برای اجرای پروژه‌ای مانند احداث پل، می‌توان تخمین زد که تا چه حد می‌توان عرض رودخانه را کاهش داد که از عرض تعادلی آن کم‌تر نشود. محققان روابط متعددی برای شرایط رژیم ارائه داده‌اند که به طراحان توصیه می شود برای انتخاب مناسب‌ترین رابطه، به شرایط استخراج این روابط

(نوع رودخانه، مواد بستری، دامنه اعتبار بده جریان و رسوب) توجه نموده و به منابع معتبر هیدرولیک انتقال رسوب، مانند مرجع [۶۱] مراجعه کنند. برخی از روش‌های مهم در زیر شرح داده شده است.

علاوه بر آن، براساس مبانی ساماندهی رودخانه‌ها، عرض تنگ‌شدگی آبراهه اصلی نباید اثرات قابل توجه ریخت‌شناسی (از نظر ناپایداری بستر و دیواره‌ها) در بازه مورد نظر و در بازه‌های بالادست و پایین‌دست داشته باشد. از نظر هیدرولیکی نیز تراز برگشت آب در بالادست، خطرات حاصل از انسداد دهانه‌ها، رسوبگذاری در بستر، تخریب دیواره‌های بالادست و آبگرفتگی سیلابدشت رودخانه بایستی کاهش یابد. همچنین با انتقال بده سیل طراحی، خطرات انسداد دهانه‌ها و بیشینه مورد انتظار آبشستگی تنگ شدگی، مورد نظر قرارگیرند. با این وجود براساس نتایج تجربی، کاهش بیش از ۳۰ در صد عرض آبراهه اصلی رودخانه توصیه نمی‌شود [۱۸۶]، [۹۹] و [۲۲].

۳-۳-۳-۱- روش لیسی (Lacey)

معادله‌های اصلی در تئوری رژیم لیسی در سیستم آحاد متریک (SI) به صورت زیر بیان می‌شوند [۶۱ و ۱۱۰]:

$$P = 4.75\sqrt{Q} \qquad (۱-۳)$$

$$f = 1.76\sqrt{D_{50}} \qquad (۲-۳)$$

$$R = 0.47\left(\frac{Q}{f}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۳-۳)$$

$$S = 3\times10^{-4}\, f^{\frac{5}{3}}\, Q^{\frac{1}{6}} \qquad (۴-۳)$$

با ترکیب روابط فوق، رابطه سرعت متوسط جریان به صورت زیر خواهد بود:

$$V = 10.8\, R^{\frac{2}{3}}\, S^{\frac{1}{3}} \qquad (۵-۳)$$

در روابط بالا:

P = محیط خیس شده (m)

R = شعاع هیدرولیکی (m)

Q = بده جریان غالب (m^3/s). بده غالب[۱] در دامنه بده سیل ۱/۳ تا ۵ ساله (و عموما ۱/۵ تا ۲ ساله) قرار دارد. در رودخانه‌های پایدار سیلابدشتی، معادل بده مقطع پر[۲] است [۲۵ و ۶۱ و ۶۲].

f = پارامتر رسوب[۳] برای رسوباتی با اندازه D_{50}

D_{50} = اندازه متوسط رسوبات (mm)

S = شیب کف

۱- Dominant discharge

۲- Bankfull discharge

۳- Silt factor

V= سرعت متوسط (m/s)

در رودخانه‌های عریض، محیط خیس شـــده و عرض رودخانه تقریبا برابر هســـتند ($P \approx B$) بنابراین «عرض پایدار» رودخانه نیز با رابطه $B = 4.75\sqrt{Q}$ قابل تخمین است که در نتیجه، تنگ‌شدگی مجاز رودخانه در مقطع پل بر اساس آن مشخص می‌شود. محدوده‌ی اندازه و ضریب لای مربوط به رسوبات مختلف در جدول (۳-۱) ارائه شده است:

جدول ۳-۱- اندازه مواد رسوبی و پارامتر رسوب برای مصالح مختلف [۱۰۹]

نوع مواد رسوبی	اندازه (mm)	فاکتور سیلت
تخته‌سنگ‌های کوچک و قلوه‌سنگ	۶۴ – ۲۵۶	۶/۱۲ تا ۹/۷۵
شن درشت	۸ -۶۴	۴/۶۸
شن ریز	۴-۸	۲/۰
ماسه درشت	۰/۵ -۲/۰	۱/۴۴ – ۱/۵۶
ماسه متوسط	۰/۲۵ – ۰/۵	۱/۳۱
ماسه ریز	۰/۰۶ – ۰/۲۵	۱/۱ – ۱/۳
سیلت (کلوئیدی[۱])		۱/۰
سیلت ریز (کلوئیدی)		۰/۴ – ۰/۹

۳-۳-۳-۲- روش کوپلند (Copeland, 1994)

در روش کوپلند برای طراحی کانال‌های پایدار، از روابط بده رســـوب و عمق جریان Brownlie (1981) برای تعیین عمق و شیب پایدار، در کانالی ذوزنقه‌ای با یک عرض کف مفروض استفاده می‌شود [۱۱۰]. این روش در نرم افزار HEC-RAS استفاده شده است. در این روش فرض شده است که بار بستر از حرکت مواد کف آبراهه اتفاق می‌افتد و فرسایش کناره‌ها نقشی ندارند. همچنین زبری هیدرولیکی برای بستر و کناره‌ها جداگانه در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین سطح پایداری آبراهه، لازم است تا برآورد اولیه از بده رسوب ورودی انجام شود. این کار با استفاده از غلظت رسوبات بالادست و یا شیب و عرض کف در بازه‌ی تولید رسوب صورت می‌گیرد. غلظت رسوب و سایر معادله‌های استفاده شده در این روش به صورت زیر هستند:

$$C = 9022\left(F_g - F_{g0}\right)^{1.978}\ S^{0.6601}\left(\frac{R_b}{D_{50}}\right)^{-0.3301} \qquad (۶-۳)$$

$$F_g = \frac{V}{\sqrt{(S_s - 1) g D_{50}}} \qquad (۷-۳)$$

$$F_{g0} = \frac{4.596\ \tau_{*0}^{0.5293}}{S^{0.1405}\ \sigma^{0.1606}} \qquad (۸-۳)$$

$$\tau_{*0} = 0.22Y + 0.06\,(10)^{-7.7Y} \qquad (۹-۳)$$

$$Y = \left(\sqrt{S_s - 1}\ R_g\right)^{-0.6} \qquad (۱۰-۳)$$

۱- Colloidal

$$R_g = \sqrt{\frac{g\, D_{50}^3}{\nu}} \qquad (۱۱-۳)$$

$$\sigma = \frac{1}{2}\left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}}\right) \qquad (۱۲-۳)$$

در روابط بالا:

C = غلظت رسوب روی بستر (ppm)

F_g = عدد فرود ذره

F_{g0} = عدد فرود ذره بحرانی (KN/m^2)

S = شیب

R_b = شعاع هیدرولیکی بستر

D_{50} = اندازه متوسط ذره

V = سرعت متوسط جریان

S_s = سنگینی ویژه ذرات رسوب

τ_{*0} = تنش برشی بحرانی

R_g = عدد رینولدز ذره

ν = لزجت سینماتیک

σ = ضریب دانه‌بندی رسوبات[۱]

پس از تعیین غلظت رسوبات ورودی بستر، غلظت کل رسوب برای تمام آبراهه مورد استفاده قرار می‌گیرد تا ابعاد آبراهه پایدار برای عرض کف‌های مختلف محاسبه شود. به این منظور، معادله‌های مقاومت Brownlie به‌کار می‌رود:

$$R_b = 0.2836\, D_{50}\, q_*^{0.6248}\, S^{-0.2877}\, \sigma^{0.08013} \qquad (۱۳-۳)$$

برای رژیم جریان بالایی (فوق بحرانی)

$$R_b = 0.3724\, D_{50}\, q_*^{0.6539}\, S^{-0.2542}\, \sigma^{0.1050} \qquad (۱۴-۳)$$

برای رژیم جریان پایینی (زیربحرانی)

که در آن، q_* بده واحد جریان غالب (بی‌بعد) نامیده می‌شود و با رابطه $q_* = Vh/\sqrt{g D_{50}^3}$ تعیین می‌شود [۱۰۱].

از آنجایی‌که در این روش، زبری شیب‌های جانبی در نظر گرفته شده ا ست، باید پارامترهای هیدرولیکی آن‌ها لحاظ گردد. فرض می‌شود که سرعت متوسط روی شیب‌های جانبی با سرعت متوسط آبراهه برابر باشد، با این فرض:

$$R_s = \left(\frac{V\, n_s}{1.486\, S^{0.5}}\right) \qquad (۱۵-۳)$$

در نتیجه سطح مقطع آبراهه به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$A = R_b P_b + R_s P_s \qquad (۱۶-۳)$$

۱- Sediment gradation coefficient

در روابط بالا:

R_s = شعاع هیدرولیکی شیب‌های جانبی

P_s = محیط خیس شده شیب‌های جانبی

n_s = مقدار n مانینگ برای شیب‌های جانبی

R_b = شعاع هیدرولیکی بستر

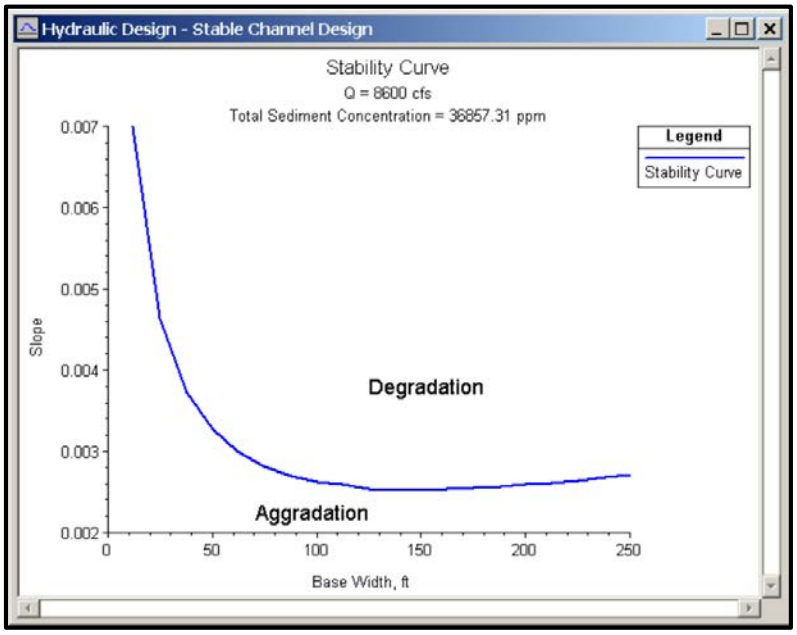
P_b = عرض بستر

عرض تعادلی رودخانه نیز با معادله رژیم زیر محاسبه می‌شود:

$$B = 2.0Q^{0.5} \qquad (۱۷-۳)$$

در رابطه بالا، Q بده غالب در دامنه بده سیل ۱/۳ تا ۵ ساله (و عموما ۱/۵ تا ۲ ساله) قرار دارد که در رودخانه‌های پایدار سیلابدشتی، معادل بده مقطع پر است [۲۵]، [۶۱] و [۶۲].

در نهایت منحنی پایداری[۱] رودخانه رسم می‌شود که نمونه‌ای از آن در شکل (۳-۴۰) نشان داده شده است:



شکل ۳-۴۰- رسم منحنی پایداری برای طراحی آبراهه پایدار با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS

۳-۳-۳-۳- روش افضلی‌مهر، عبدالحسینی و سینگ

روابط ارائه شده توسط افضلی‌مهر و همکاران [۸۸] به منظور طراحی کانال‌های پایدار با بستر شنی، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از رودخانه‌های ایران و بر مبنای روش تک ایستگاه[۲] و تحلیل همبستگی استخراج شده است:

$$h = 0.226\ Q^{0.345} \qquad (۱۸-۳)$$

۱- Stability curve

۲- At-a-station method

$$B = 5.876Q^{0.743} \quad (۱۹-۳)$$

$$S = 1.565\, D_{50}^{0.821}\, \tau_*^{0.851} \quad (۲۰-۳)$$

در این روابط، h عمق متوسط آب، B عرض بالای آب و S شیب کف است. Q بده غالب است که قبلا تعریف شده است. معادله‌های فوق در سیستم SI هستند. دیگر متغیرهای موجود در این روابط قبلا تعریف شده‌اند.

۳-۳-۴- تاثیر پل بر ریخت‌شناسی رودخانه

پل‌ها در امتداد مقاطع عرضی رودخانه‌ها برای توسعه تسهیلات حمل و نقل ساخته می‌شوند. وجود پل به عنوان یک سازه متقاطع، منجر به تغییراتی در شرایط جریان و رسوب می‌شود که باعث واکنش رودخانه می‌گردد. کاهش عرض رودخانه به منظور صرفه‌جویی در ساخت روگذر پل، وجود پایه‌های متعدد در بستر رودخانه، تورفتگی کوله یا تکیه‌گاه پل درون رودخانه، از جمله عواملی هستند که منجر به تغییر شرایط جریان و رسوب در اطراف و محدوده‌ی بالادست و پایین‌دست پل می‌شوند. انسداد مجرای رودخانه بین پایه‌ها به‌دلیل به تله افتادن تنه درختان و اجسام شناور، همچنین تجمع رسوبات به خصوص در رودخانه‌های کوهستانی و یا رودخانه‌های شریانی باعث می‌گردد تا در زمان سیلاب، ظرفیت کافی برای عبور سیل وجود نداشته باشد و سطح آب تا کیلومترها در بالادست افزایش یابد. میزان بالا آمدن سطح آب ممکن است منجر به سرریز شدن از روی عرشه پل و تخریب آن گردد. علاوه بر این با افزایش سطح آب در بالادست در زمان سیلاب، اراضی اطراف رودخانه در معرض سیل قرارگرفته و با کاهش سرعت جریان، حجم زیادی از رسوبات همراه سیل، در بالادست پل نهشته می‌شوند که به صورت پشته‌هایی ظاهر خواهند شد. جریان سیلاب با ورود به اراضی علاوه بر تخریب ابنیه و اراضی مجاور، در زمان فروکش کردن سیل رودخانه به سمت رودخانه برمی‌گردد و منجر به تخریب سواحل نیز می‌شود. هر دو پدیده رسوب‌گذاری و تخریب سواحل منجر به تغییر راستا و ابعاد رودخانه می‌شوند.

وجود پایه و تکیه‌گاه به‌عنوان مانع در مسیر جریان و نیز تنگ‌شدگی عرض رودخانه باعث تغییر الگوی جریان در محدوده پل می‌گردد و باعث تشکیل حفره‌های موضعی (آبشستگی) در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه می‌شوند. عمق حفره‌ها گاهی تا چندین متر هم می‌رسد. فرسایش بستر در محدوده‌ی پل نسبت به قبل از احداث آن، افزایش یافته و سبب می‌شود تا عمق آبشستگی افزایش یابد که در صورت عدم پیش‌بینی و انجام تمهیدات قبلی، باعث تخریب پل می‌گردد. آمار منتشر شده از کشورهای مختلف نشان می‌دهد که بیش از ۶۰٪ تخریب پل‌ها به‌دلیل فرسایش، آبشستگی و تغییر مورفولوژی رودخانه پس از احداث پل بوده است. به دلیل اهمیت موضوع آبشستگی و درک بهتر آن، مبحث آبشستگی در بند ۳-۵ ارائه شده است.

شرایط جریان در پایین‌دست نیز تحت‌تاثیر پل قرار می‌گیرد به طوری‌که پشته‌های رسوبی موضعی در پایین‌دست محل پایه‌ها تشکیل می‌شوند و بر روی شرایط جریان تاثیر می‌گذارند. فرسایش سواحل در پایین‌دست پل‌ها از جمله مواردی است که بسیار محتمل است. چنین فرسایش‌هایی در سواحل پایین‌دست پل و نیز بالا آمدن سطح آب در زمان سیلاب در بالادست پل، امکان تشکیل آبراه‌های در یکی از جناحین پل را فراهم می‌کند که به‌دلیل وجود اختلاف سطح آب دو طرف، جریان آب با شدت بیش‌تری از این آبراهه عبور خواهد کرد. علاوه بر این، وجود اختلاف سطح آب باعث

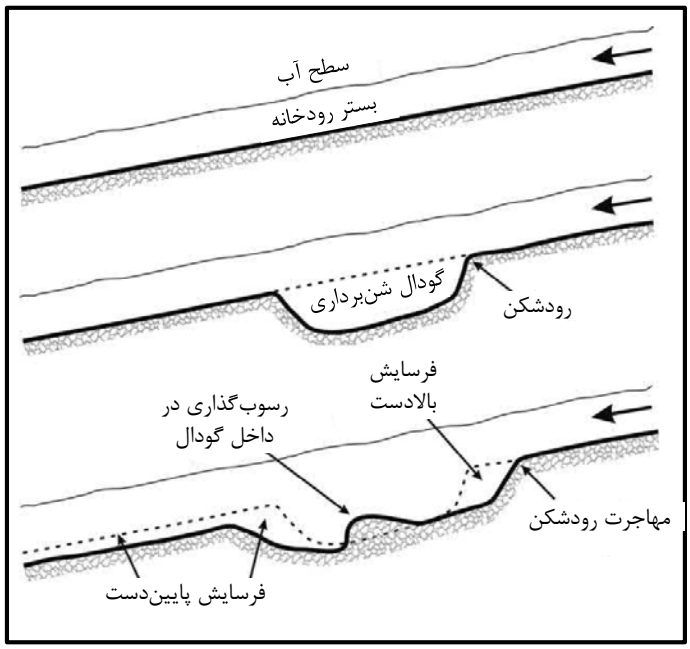
تشکیل فرسایش آبکندی می‌شود. در این شرایط به سرعت ابعاد آبراهه (عرض و عمق) افزایش یافته و عملا مسیر جدیدی برای عبور سیلاب جایگزین مسیر اصلی رودخانه (که پل بر روی آن قرار دارد) می شود. در نتیجه ارتباط جاده بین دو طرف رودخانه قطع شده و پل موجود کارائی نخواهد داشت.

براساس نتایج تجربی و مدل سازی ریاضی، طول اثرات ناشی از تغییرات بستر آبراهه و برگشت آب در بازه سازه‌های تقاطعی (و به خصوص پل‌ها) در محدوده کمینه طولی معادل ۴ برابر عرض بالای آبراهه اصلی از بالادست تا ۱۰ برابر آن در پایین‌دست سازه است.

۳-۳-۵- برداشت مصالح رودخانه در مجاورت پل‌ها

برداشت مصالح بستر رودخانه برای استفاده در راه سازی یا ساخت پل به‌خصوص در پایین‌دست پل که منجر به ایجاد گودالی شود می‌تواند باعث تغییر فرم رودخانه در بالادست و پایین‌دست آن گردد. چنین شرایطی باعث شروع فرسایش بستر به سمت بالادست خواهد شد که در نتیجه آن بستر عمیق می‌شود. عمیق شدن بستر باعث فرسایش سواحل نیز خواهد گردید که در نتیجه آن، آبراهه عمیق و عریضی به‌وجود خواهد آمد. این شرایط منجر به آسیب رساندن یا تخریب پل یا آبگذر که در بالادست محل برداشت قرار دارند، می‌گردد. شکل (۳-۴۱) نمونه‌ای از عمیق و عریض شدن آبراه‌های را که در اثر گودبرداری غیراصولی در پایین‌دست پلی به وجود آمده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تعمیق شدن رودخانه به سمت پل منتقل می‌شود و در سیلاب بعدی پل تخریب خواهد شد. شکل (۳-۴۲) نیز تغییرات بستر رودخانه در بالادست و پایین‌دست گودبرداری غیر اصولی بستر رودخانه را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۴۱- تغییر ابعاد رودخانه در اثر مهاجرت سر آبکند به طرف بالادست



شکل ۳-۴۲- فرسایش در بالادست و پایین‌دست یک گودال برداشت مصالح از بستر رودخانه [۱۷۴]

۳-۳-۵-۱- فاصله مجاز از محل‌های برداشت مصالح رودخانه‌ای

- هیچ‌گونه برداشت مصالحی در فاصله عرضی ۱۵۰ متری پل‌ها مجاز نمی‌باشد[۱۴]. این محدودیت برداشت، پتانسیل ناپایداری آبراهه (که باعث به خطر افتادن یکپارچگی سازه‌ای پل می‌شود) را محدود می‌سازد.
- براساس دستورالعمل وزارت نیرو، حریم طولی پل برای برداشت‌های مجاز مصالح رودخانه‌ای از کمینه ۵۰۰ متر بالادست تا ۱۰۰۰ متر در پایین‌دست سازه است. برای پل‌های مهم بر روی رودخانه‌های بزرگ، کمینه فاصله بالادست نیز به ۱۰۰۰ متر افزایش می‌یابد [۱۴].

رعایت فاصله مناسب از پل‌ها برای برداشت مصالح رودخانه در مواردی که مشکل کاهش ظرفیت آبگذری پل به علت تجمع آشغال‌ها و رسوبات وجود داشته باشد، عمومیت ندارد. لایروبی و پاکسازی بستر رودخانه و دهانه پل و آبگذر برای رفع عوارض مزاحم می‌تواند انجام شود و از وظایف راهداری به شمار می‌آید [۱۴].

۳-۳-۶- تحلیل پایداری رودخانه

در کل فرایند تحلیل پایداری رودخانه در سه سطح انجام می‌شود [۱۳۹]:

سطح ۱: استفاده از مفاهیم ساده زمین ریخت‌شناسی[۱] و سایر تحلیل‌های کیفی

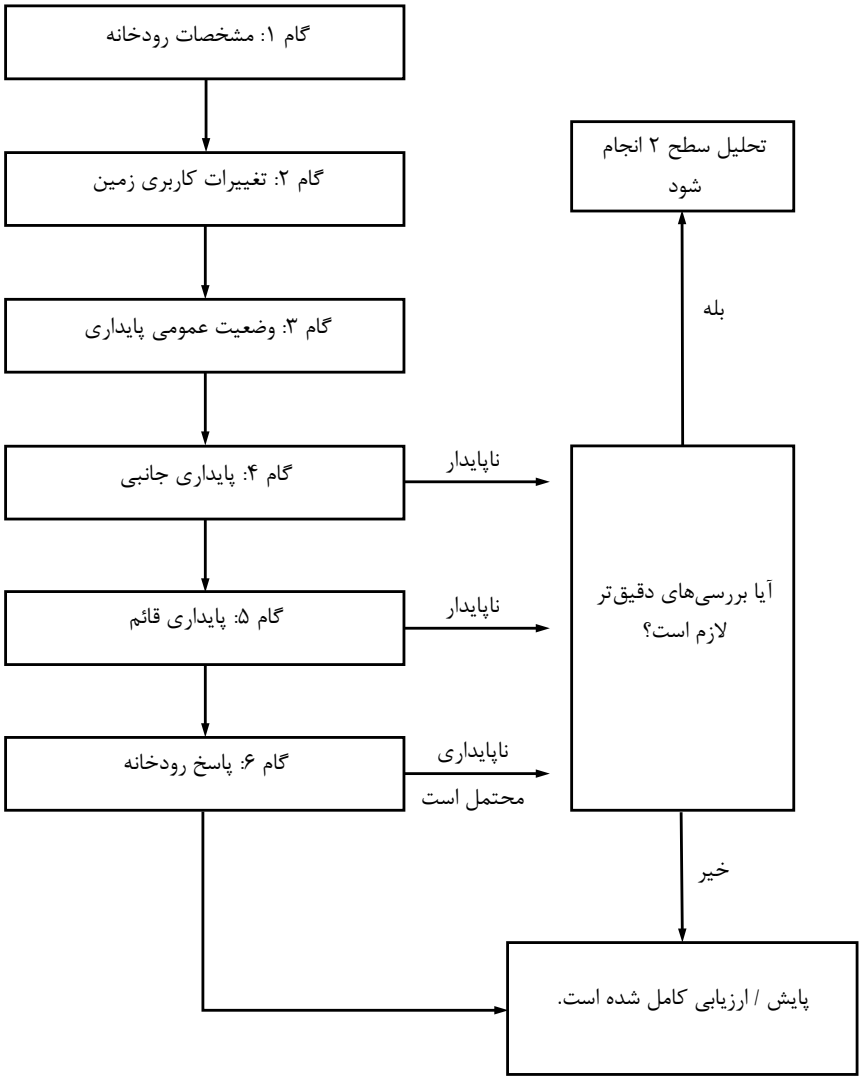
سطح ۲: استفاده از مفاهیم کلاسیک مهندسی هیدرولوژی، هیدرولیک و انتقال رسوب

سطح ۳: استفاده از مطالعات مدل‌سازی ریاضی یا فیزیکی

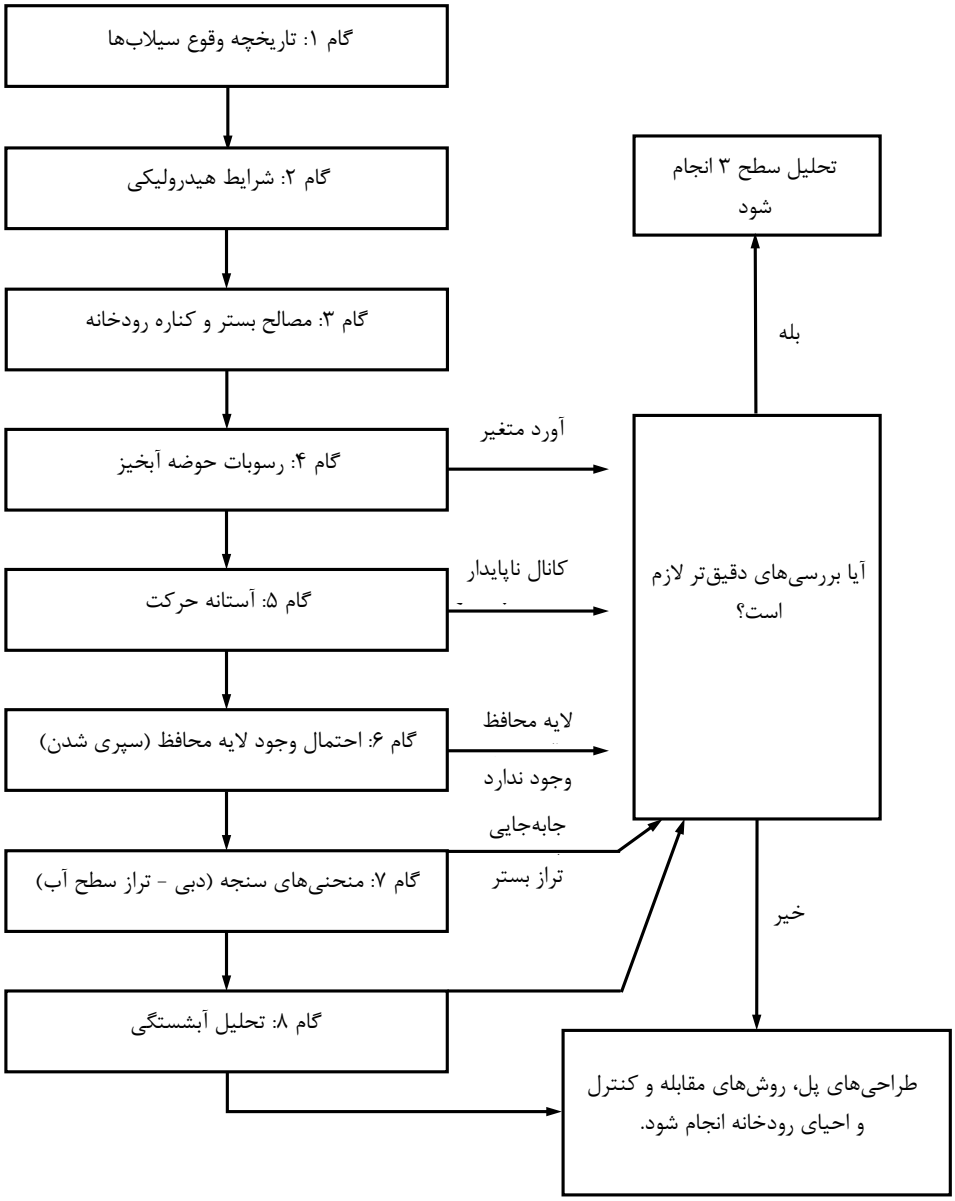
در شکل‌های (۳-۴۳) و (۳-۴۴) به‌ترتیب روندنمای مراحل مختلف تحلیل‌های سطح ۱ و ۲ نشان داده شده است.

۱- Geomorphic concepts

تحلیل سطح ۳، ارزیابی دقیق‌تر پایداری رودخانه با استفاده از مدل سازی ریاضی یا فیزیکی است. به بیان ساده یک مدل ریاضی، تو صیف کمی فرایندهای فیزیکی تاثیرگذار در پایداری رودخانه است. انواع مختلفی از مدل‌های ریاضی به منظور ارزیابی انتقال رسوب، بسته به نوع کاربرد (تحلیل حوضه آبخیز یا رودخانه) و سطح تحلیل مورد نظر موجود هستند. استفاده از این مدل‌ها، اطلاعات دقیق‌تری در خصوص فرسایش و رسوب‌گذاری در سرتاسر بازه مورد مطالعه در اختیار قرار می‌دهد و امکان انجام ارزیابی‌هایی در قالب سوال‌های «اگر-آنگاه» را فراهم می‌سازد [۱۲۷ و ۱۳۹]. در ضابطه شماره ۵۸۴ سازمان برنامه و بودجه کشور،کاربرد مدل‌های فیزیکی و نیز مجموعه‌ای از مدل‌های ریاضی به منظور تحلیل رودخانه‌های آبرفتی، ارائه شده است [۲۴].



شکل ۳-۴۳- روندنمای تحلیل سطح ۱: تحلیل کیفی عوامل زمین ریخت‌شناختی [۱۳۹]



شکل ۳-۴۴- روندنمای تحلیل سطح ۲: تحلیل مهندسی کلاسیک [۱۳۹]

۳-۴- مطالعات هیدرولیک رودخانه

۳-۴-۱- مبانی هیدرولیک جریان رودخانه

هدف از مطالعات هیدرولیک رودخانه، تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان و پارامترهایی چون بده، عمق، سرعت، تنش بر شی، سرعت بر شی و نیروهای هیدرودینامیکی وارده به پل در مقاطع عر ضی مختلف در محدوده‌ی بالاد ست و پایین‌دست پل می‌باشد. با داشتن چنین داده‌هایی می‌توان ظرفیت آبگذری پل، میزان و فاصله بالاروی آب و نواحی سیل‌خیزی بالاد ست پل، امکان عبور جریان سیلابی از روی عر شه‌ی پل، امکان فر سایش و ر سوب‌گذاری در محدوده‌ی

پل، تخمین میزان عمق آبشستگی اطراف پایه‌ها و کوله‌های پل و نیروهای وارده بر پایه‌ها و یا عرشه را برآورد کرد. علاوه براین می‌توان در خصوص تغییر مورفولوژی رودخانه در بالادست و پایین‌دست پل نیز پیش‌بینی‌های لازم را انجام داد. محدوده‌ای که لازم است تا چنین داده‌هایی استخراج گردد باید طوری باشد که کلیه عوامل تاثیرگذار در پایین‌دست (نظیر معادن شن و ماسه یا آبگیرهای نسبتا بزرگ و غیره) و بالادست (برداشت آب، معادن شن و ماسه، ورود جریان‌های سیلابی از مسیل‌ها، وجود استخرهای پرورش ماهی که در فصل برداشت حجم زیادی آب وارد رودخانه می‌کنند و هر گونه ساخت و سازهایی که ممکن است در آینده بر ورود جریان و رسوب به رودخانه تاثیر داشته باشد) را در نظر بگیرد.

معادلات حاکم بر جریان رودخانه‌ها (با مقاطع، زبری و شیب غیریکنواخت) در شرایط سیلابی (متغیر بودن شرایط هیدرولیکی نسبت به زمان) و نیز وجود انحنا یا موانع در مسیر رودخانه (که جریان به دوبعدی و سه‌بعدی تبدیل می‌شود) به صورت معادلات سه‌بعدی هستند. در حالت یک‌بعدی فرض می‌شود که سرعت انتقال جریان در عمق و عرض رودخانه برابر سرعت متوسط جریان می‌باشد که از تقسیم بده در همان مقطع بر سطح مقطع جریان محاسبه می‌شود و جهت آن در طول کانال یا رودخانه منظور می‌شود. جریان در کانال یا رودخانه‌ی نسبتا مستقیم را با دقت قابل قبولی می‌توان یک‌بعدی فرض کرد. در جریان دو بعدی، انتقال جرم در دو جهت طولی و عرضی (در محدوده‌ی دهانه آبگیر که بخشی از جریان رودخانه وارد آبگیر می‌شود) یا در جهت طولی و عمودی (حرکت جریان از روی سرریز) است. در جریان سه‌بعدی، انتقال جرم در سه بعد طولی، عرضی و عمودی اتفاق می‌افتد (برخورد جریان با مانع در بستر رودخانه نظیر اطراف پایه‌ها و یا کوله‌های پل). به‌دلیل پیچیدگی حل معادلات سه‌بعدی، دانش ریاضی و داده‌های بیش‌تر و دقیق‌تری برای حل آن‌ها مورد نیاز است.

برای حل معادلات حاکم بر جریان آب و رسوب در هندسه پیچیده رودخانه، مدل‌های عددی گوناگونی با قابلیت شبیه‌سازی یک، دو و سه بعدی در اختیار کاربران پروژه‌های رودخانه‌ای می‌باشد. شرح و قابلیت کاربرد مدل‌های عددی در بخش بعدی ارائه شده است.

۳-۴-۲- معرفی مدل‌های رایانه‌ای برای مطالعات رودخانه‌ای

به‌دلیل پیچیدگی هندسه رودخانه و نیز شرایط جریان و خصوصیات رسوب، برآورد مشخصات جریان در رودخانه‌ها توسط مدل‌های رایانه‌ای انجام می‌شود. در حال حاضر مدل‌های زیاد یک، دو و سه بعدی وجود دارند. در ضابطه شماره ۵۸۴ سازمان برنامه و بودجه کشور مجموعه‌ای از مدل‌های ریاضی با کاربرد در مقیاس رودخانه‌ها ارائه شده است [۲۰].

در جهان و ایران، به دلیل سطح مطالعات لازم در گستره شبکه رودخانه‌ها، حجم محاسبات زیاد و ظرفیت رایانه‌ها، داده‌های میدانی موجود و هزینه و زمان طرح و پروژه‌های رودخانه‌ای، عموما از مدل‌های عددی یک بعدی استفاده می‌شود. با این وجود، ملاحظات زیر در انتخاب مدل مناسب توصیه می‌گردد [۲۴ و ۴۳].

در رودخانه‌های کوهستانی و نیمه کوهستانی (که آبراهه اصلی و سیلابدشت رودخانه در یک مقطع ساده و بزرگ محدود بوده و جهت جریان با راستای رودخانه همخوانی دارد)، مدل‌سازی عددی هیدرولیک رودخانه و پهنه‌بندی سیلاب

با مدل‌های ریاضی یک بعدی (مانند HEC-RAS و MIKE11) با سرعت و دقت بالایی انجام می‌شود و به داده‌های ورودی کم‌تری نیاز دارد.

برای رودخانه‌های د شتی و پیچانرودها (که آبراهه ا صلی و سیلابد شت رودخانه از هم قابل تفکیک بوده و یک مقطع مرکب را می‌سازند) و در رودخانه‌های شریانی (که مقطع عریض و کم عمق، با تغییرات عرضی زیاد و نامنظم دارند و رشته‌های جریان در لابه لای جزایر و بارهای رسوبی پراکنده می‌شوند)، همچنین در رودخانه‌های جاری در مخروط افکنه‌ها یا دلتاها، کاربرد مدل‌های ریاضی یک - دو بعدی یا دو بعدی (مانند HEC-RAS-2D و CCHE2D و MIKE21) قابل اعتمادتر می‌با شد. در مدل ترکیبی یک و دو بعدی (مانند HEC-RAS-2D و MIKE21)، جریان در آبراهه ا صلی تا تراز مقطع پر با ا ستفاده از معادلات و روش حل یک بعدی و در ترازهای بالاتر، برای جریان در سیلابد شت از معادلات و روش حل دو بعدی استفاده می‌گردد. به هرحال مدل‌های دو بعدی نیاز به داده‌های ورودی بیش‌تر و توپوگرافی دقیق‌تری از بستر رودخانه دارند و علاوه بر پیچیدگی مراحل مدل‌سازی، با انتخاب گام‌های زمانی نامناسب و شبکه محاسباتی بزرگتر، دچار ناپایداری می‌شوند.

کاربرد مدل‌های سه بعدی (مانند FLOW-3D و SSIIM2) در بازه‌های بسیار کوتاه رودخانه از ساختگاه سازه تقاطعی امکان‌پذیر است ولی درجه اعتماد به نتایج توزیع سه بعدی سرعت، تنش برشی بستر و گردابه‌ها بستگی به شرایط و دقت مدل‌سازی و قضاوت کارشناسی دارد و با توجه به نبود داده‌های لازم، قابلیت واسنجی و تایید ندارند.

مجموعه‌ای از مدل‌های عددی رودخانه‌ای در ضابطه شماره ۵۸۴ سازمان برنامه و بودجه کشور ارائه شده است [۲۴]. تعدادی از مدل‌های معروف پرکاربرد در ایران به صورت خلاصه در زیر معرفی می‌شوند. برای اطلاعات بیش‌تر، کاربران لازم است تا به راهنماهای این مدل‌ها مراجعه نمایند. با کمک این مدل‌ها می‌توان شرایط هیدرولیکی یا پارامترهای هیدرولیکی در مقاطع مختلف رودخانه و در محدوه سازه تقاطعی را محاسبه نمود. البته برای کاربرد هر یک از این مدل‌ها، دانش هیدرولیکی جریان آب و انتقال رسوب همراه با داده‌های میدانی کافی و نسبتا دقیقی برای واسنجی و تایید مدل مورد نیاز می‌باشد.

۳-۴-۲-۱- مدل HEC-RAS

این مدل ابزار که بسیار خوبی برای شبیه‌سازی جریان و رسوب رودخانه‌ها و کانال‌ها می‌باشد، توسط بخش مهندسین ارتش ایالات متحده آمریکا ساخته شده است و به طور رایگان در اختیار استفاده‌کنندگان قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی با این مدل نسبتا ساده است و بیش‌تر کارشناسان رشته‌های مرتبط با آب با آن آشنایی دارند و یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهایی است که در ایران نیز استفاده می‌شود. مدل از زمان معرفی تاکنون پیشرفت‌های زیادی داشته است. قابلیت‌های این نرم‌افزار شامل شبیه‌سازی جریان یک و دو بعدی رودخانه تک شاخه یا چند شاخه، در شرایط ماندگار یا غیرماندگار، با و یا بدون سازه درون رودخانه (نظیر پل، آبگذر، سد انحرافی، آبشکن یا شیب شکن و نظایر آن) ا ست. این نرم‌افزار همچنین با قابلیت دریافت اطلاعات نق شه‌برداری و نق شه‌های توپوگرافی از طریق HEC-GeoRAS قادر ا ست تا

کلیه پارامترهای جریان نظیر بده، عمق آب، سرعت جریان، تنش برشی، نیروهای هیدرواستاتیک یا هیدرودینامیک وارده به سازه را در طول رودخانه و در مقاطع مورد نظر محاسبه کند.

از جمله مزایای نرم‌افزار HEC-RAS می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف- رابط کاربری که وظیفه آن ارتباط بین کاربر و نرم‌افزار می‌باشد. رابط کاربری امکاناتی نظیر مدیریت فایل‌ها، ورود و ویرایش اطلاعات و داده‌ها، تحلیل هیدرولیکی داده‌ها، نمایش جدولی و گرافیکی داده‌های ورودی و اطلاعات خروجی، نمایش پهنه‌بندی سیلاب و ساخت انیمیشن حرکت جریان آب، تهیه گزارش و راهنمای استفاده از نرم‌افزار را در اختیار کاربران قرار می‌دهد.

ب- اجزای تحلیل هیدرولیکی شامل محاسبه پروفیل سطح آب جریان ماندگار، شبیه‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی جریان غیرماندگار، محاسبه انتقال رسوب بستر متحرک و تحلیل کیفیت آب می‌باشد.

ج- ذخیره سازی و مدیریت اطلاعات. ذخیره سازی داده‌ها با استفاده از فایل‌های flat (ASCI & binary)، فایل‌های HEC-DSS (Data Storage System) و فایل‌های HDF5 (Hierarchical Data Format) Version5 انجام می‌شود. داده‌های ورودی کاربر در فایل‌های flat با دسته‌بندی‌های مجزای Project، Plan، Geometry، Steady flow، Unsteady flow، Quasi-unsteady flow، Sediment data و Water quality ذخیره می‌شوند.

اطلاعات خروجی نیز غالبا در فایل‌های binary (HEC & HDF5) ذخیره می‌شوند. با استفاده از فایل‌های HEC-DSS امکان تبادل اطلاعات بین نرم‌افزار HEC-RAS و سایر نرم‌افزارها وجود دارد. تمامی امکانات و قابلیت‌های مرتبط با ذخیره‌سازی و مدیریت اطلاعات با استفاده از رابط کاربری نرم‌افزار انجام‌پذیر است.

د- خروجی‌های گرافیکی. شامل نمایش شماتیک سیستم رودخانه در صفحه X و Y، مقاطع عرضی، پروفیل‌ها، نمودارهای بده- تراز سطح آب، هیدروگراف‌ها و پهنه‌بندی سیلاب می شود. نمایش سه‌بعدی مقاطع عرضی در مسیر رودخانه نیز امکان‌پذیر است. پهنه‌بندی سیلاب در قسمت جدید نرم‌افزار به نام HEC-RAS Mapper انجام می‌شود که قابلیت نمایش کانتورهای عمق، سرعت و غیره و همچنین نمایش انیمیشن پهنه‌بندی سیلاب را دارد. نمایش جدولی خروجی‌ها در نرم‌افزار HEC-RAS نیز امکان‌پذیر بوده و امکان انتقال این اطلاعات به سایر نرم‌افزارها مانند Word و Excel جهت ویرایش نیز به‌راحتی وجود دارد.

هـ- RAS Mapper. نرم‌افزار HEC-RAS توانایی نمایش نتایج پهنه‌بندی سیلاب را در محیط RAS Mapper دارد. با استفاده از مشخصات هندسی و پروفیل سطح جریان محاسبه شده، عمق و محدوده استغراق در محیط RAS Mapper تولید می شود. خروجی‌های گرافیکی بیش‌تری مانند کانتورهای توزیع سرعت، تنش برشی، ضخامت یخ و مسیر جریان نیز قابل تولید و بررسی هستند. برای استفاده از RAS Mapper نیاز به یک مدل رقومی با فرمت flt می‌باشد.

۳-۴-۲-۲- مدل MIKE11

یکی دیگر از نرم‌افزارهای شبیه سازی جریان و ر سوب در رودخانه‌ها و مجاری باز، نرم‌افزار MIKE11 می‌با شد که در ایران به طور گسترده تو سط کار شنا سان آب ا ستفاده می شود. این نرم‌افزار یکی از سلسله نرم‌افزارهایی ا ست که تو سط شـرکت Danish Hydraulic Institute یا (DHI) سـاخته شـده اسـت. این نرم‌افزار در مدول هیدرودینامیک آن قابلیت محاسبات هیدرودینامیکی جریان (بده، عمق، سرعت، تنش برشی و نیروهای وارده به سازه‌ها) را در هر مقطعی از رودخانه دارد. مدل ر سوب آن نیز قابلیت شبیه سازی انتقال ر سوب (فر سایش، ر سوب‌گذاری و نیز آبشستگی‌های مو ضعی اطراف سازه‌ها) در طول رودخانه یا مخازن سدها را دارد.

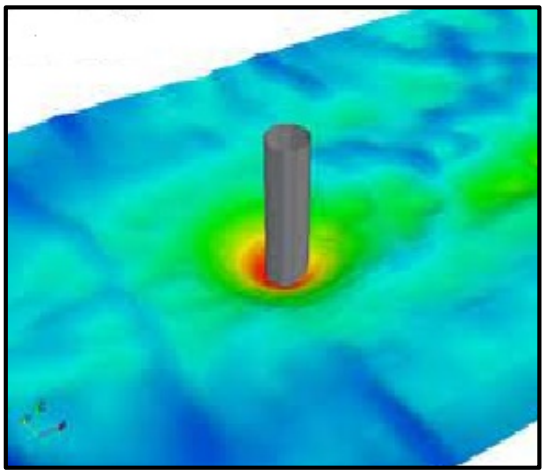
۳-۴-۲-۳- مدل دوبعدی اداره بزرگراه‌های آمریکا (SRH-2D)

این مدل دوبعدی به منظور مطالعات هیدرولیک جریان (تراز سـطح آب و سـرعت در جهت‌های طولی و عرضـی)، پیش‌بینی پهنه‌بندی سیل، روش‌های کنترل سیل و احیا و بازسازی در حال توسعه است. این مدل برای پروژه‌های بزرگ که نیازمند دقت بیش‌تری برای محاسبات هستند (نظیر ارتباط پل و جریان آب در رودخانه) در بزرگراه‌ها استفاده می‌شود.

از مزایای مدل دوبعدی SRH-2D این است که تقریبا تمام سازه‌های ممکن نظیر پل به همراه پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها، سرریزها و سازه‌های اصلاح شیب، شیب‌شکن‌ها، دیواره‌های هدایت جریان (در بالا و پایین‌دست پل‌ها)، آبگذر با همه جزئیات، آبگیرها، انشعابات از رودخانه یا به رودخانه، سدهای انحرافی و حوضچه‌های موضعی اطراف رودخانه را مدل می‌کند.

۳-۴-۲-۴- مدل سه‌بعدی FLOW3D

نرم‌افزار Flow-3D یکی از آشـناترین نرم‌افزارهای تحلیل جریان سـیال به روش دینامیک سـیالات محاسـباتی و جایگزین خوبی برای مدل‌های فیزیکی در حل م سائل مکانیک سیالات و هیدرودینامیک ا ست. این نرم‌افزار سه‌بعدی با بهره گرفتن از روش‌های عددی، شبیه سازی و تحلیل رفتار سیالات را نسبتا ساده کرده ا ست. در Flow-3D هند سه و شبکه‌بندی مسئله مستقل از هم هستند و مدل سازی‌های سه‌بعدی با هندسه‌ی پیچیده، به سهولت انجام می شوند. این نرم‌افزار ۵ مدل آشفتگی مختلف را پوشش می‌دهد و برای حل مسائل از معادلات ناویر استوکس بهره می‌برد. این نرم‌افزار تحلیل‌های سه‌بعدی جریان سیال را انجام داده و قابلیت ارائه‌ی خروجی‌های یک، دو و سه‌بعدی را دارد (شکل ۳-۴۵).



شکل ۳-۴۵- نمونه‌ای از شبیه‌سازی اطراف پایه پل با FLOW3D

۳-۴-۳- اقدامات مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی

هند سه رودخانه به همراه کلیه سازه‌های مورد نظر و همچنین شرایط جریان در مرزهای بالاد ست و پایین‌د ست از جمله الزامات برای شبیه‌سازی عددی است. چنانچه در محدوده مورد مطالعه، جریان وارد یا خارج می‌شود باید حتما اطلاعاتی از این داده‌ها نیز به مدل معرفی شود. در مرز بالاد ست معمولا بده جریان تعریف می شود که بهتر ا ست بده به صورت هیدروگراف یا بده در مقابل زمان باشد. این‌که چه بده‌ای مورد استفاده قرارگیرد بستگی به اهمیت پروژه دارد. بده با دوره بازگشت‌های مختلف نظیر ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ساله با توجه به اهمیت پروژه و بزرگی خسارت‌های احتمالی ا ستفاده می شود. برای آب ش ستگی بهتر ا ست شبیه سازی با بده‌های مختلفی انجام شود تا م شخص شود چه بده‌ای بیش‌ترین عمق آبشستگی را ایجاد می‌کند. چرا که تجربه نشان داده است که بیشینه آبشستگی ممکن است در بده‌های کم‌تر از مثلا بده ۱۰۰ ساله اتفاق افتد. این امر به‌خصوص در رودخانه‌های شریانی یا رودخانه‌هایی که م صالح در شت‌دانه حمل می‌کنند توصیه می شود. در چنین رودخانه‌هایی، ممکن ا ست برخی از دهانه‌های پل توسط ر سوب پر شده با شند (شکل ۳-۴۶) به طوری‌که جریان در بده‌های کم از این دهانه عبور نمی‌کند و جریان از سایر دهانه‌ها عبور می‌کند. در نتیجه سرعت جریان در دهانه‌هایی که جریان عبور می‌کند در بده‌های کم خیلی بیش‌تر ا ست تا بده‌های بیش‌تری که از کل دهانه‌ها عبور می‌کند.

در مرز پایین‌دست رودخانه، تعیین عمق یا تراز سطح آب در بده‌های مختلف ضروری است. این اطلاعات معمولا فقط در ای ستگاه‌های هیدرومتری موجود ا ست و به دلیل محدودیت تعداد این ای ستگاه‌ها، می‌توان برای ساده سازی، شرایط جریان را در پایین‌د ست یکنواخت فرض کرد. این فرض باید زمانی به کار گرفته شود که مرز پایین‌د ست از سازه فا صله کافی دا شته با شد و رودخانه در آن محدوده ن سبتا م ستقیم و دارای مقطع یکنواخت با شد. در پروژه‌های مهم، می‌توان همزمان تراز سطح آب را در بده‌های مختلف اندازه‌گیری کرد تا این فرض را بررسی کرد.

شکل ۳-۴۶- گرفتگی یکی از دهانه‌های پل توسط رسوب

در مدل‌های دوبعدی، مانند مدل‌های یک‌بعدی، شـــرایط اولیه نظیر بده و پارامترهایی چون تراز ســـطح آب (عمق) و سرعت در تمام نقاط گره‌ها در شروع محاسبات ضروری است. انتخاب شرایط اولیه نزدیک به واقعیت می‌تواند پایداری و عملکرد مدل عددی را بهبود بخشد. ساده‌ترین فرض برای شرایط اولیه، یکنواخت بودن جریان در طول و عرض رودخانه است که در این حالت عمق آب برابر با عمق نرمال در نظرگرفته می‌شود.

پس از ساخت مدل، واسنجی ضروری است. واسنجی به معنای مقایسه نتایج مدل با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده است. ساده‌ترین روش برای این کار مقایسه پروفیل طولی و عرضی سطح آب محاسبه شده با مدل و اندازه‌گیری شده در یک بده خاص است. میانگین خطا باید از حد تعیین‌شده توسط کاربر بیش‌تر نباشد. اگر داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت در گره‌های خاصی در دسترس باشد، می‌توان سرعت‌های محاسبه شده را نیز با آن‌ها مقایسه کرد. در صورتی که میانگین اختلاف از حد مورد نظر بیش‌تر باشد، نیاز به تغییر ابعاد شبکه محاسباتی و زبری مانینگ وجود دارد.

پس از اطمینان از صـحت نتایج شـبیه‌سـازی، بهتر اسـت مدل نسـبت به برخی پارامترها که ممکن اسـت با دقت اندازه‌گیری نشده باشد، حساسیت‌سنجی شود. به‌عنوان مثال، موقعیت مرز بالادست و پایین‌دست، تعداد و اندازه مش‌های انتخابی، یا زبری می‌توانند توسط مدل مورد ارزیابی قرار گیرند.

اجرای مدل نیز برای شرایط مختلف شرایط مرزی بالادست، تغییر در هندسه سازه (مثلا کوتاه یا بزرگ کردن عرشه پل و تغییر زاویه قرارگیری پل)، بررسی روش‌های مختلف سازه‌های کنترل جریان یا رسوب نظیر آبشکن یا شیب‌شکن‌ها و یا تاثیر گودبرداری‌های بزرگ در بالادســت و پایین‌دســت پل یا آبگذر را نیز می‌توان انجام و با مقایســه الگوی جریان (سرعت، عمق و تنش برشی یا عدد فرود) بهترین گزینه‌ای که کم‌ترین مشکل را ایجاد خواهد کرد، انتخاب نمود.

۳-۴-۴- نسبت بازشدگی پل[۱]، M

از آنجا که به منظور کاهش هزینه‌های ســـاخت پل، معمولا عرض رودخانه کاهش می‌یابد. در بند ۳-۳ در رابطه با میزان کاهش عرض آبراهه از نظر ریخت‌شناسی (به طوری‌که رودخانه در شرایط رژیم یا تعادل باشد) روابطی ارائه شد. در

۱- Bridge opening ratio

این قسمت تاثیر میزان کاهش عرض و یا تنگ شدگی و اثر آن بر شرایط جریان بالادست و یا پایین‌دست پل بررسی خواهد شد. تنگ شدگی جریان موجب اتلاف انرژی می شود که بخش بیش‌تر آن در انبساط مجدد در پایین‌دست اتفاق می‌افتد. این افت انرژی به صورت مقداری افزایش تراز در سطح آب و خط انرژی در بالادست رودخانه خود را نشان می‌دهد. این اتفاق را می‌توان با یک پروفیل طولی در امتداد مرکزی رودخانه نشان داد (شکل ۳-۴۷- الف). در این شکل، تراز نرمال برای یک بده مفروض، پیش از ایجاد تنگ‌شدگی، نیز با خطی به موازات بستر نشان داده شده است. توجه شود که سطح آب از بالای تراز نرمال در مقطع ۱ شروع می‌شود.

برای بررسی شرایط هیدرولیکی معمولا از نسبت بازشدگی پل (M) که اساسا معیاری برای بیان شدت تنگ شدگی است استفاده می شود. تعاریف مختلفی برای M ارائه شده است از جمله مطابق رابطه زیر، نسبت بده عبوری q از بخش تنگ‌شدگی با عرض b به بده کل (Q) عبوری از تمام عرض رودخانه (B).

$$M = \frac{q}{Q} \qquad (۲۶-۳)$$

بدین ترتیب مقدار M=1 به این معنی است که پل هیچ تنگ‌شدگی را ایجاد نمی‌کند و تمام جریان می‌تواند از بازشدگی پل، بدون مانع و فشردگی عبور کند.

برای شرایطی که جریان یکنواخت فرض شود مقدار M برابر است با نسبت a (مقدار سطح در محل تنگ‌شدگی) به A (سطح مقطع کل رودخانه) و چنانچه مقطع مستطیل باشد در آن صورت M برابر است با نسبت عرض تنگ شدگی به عرض کل.

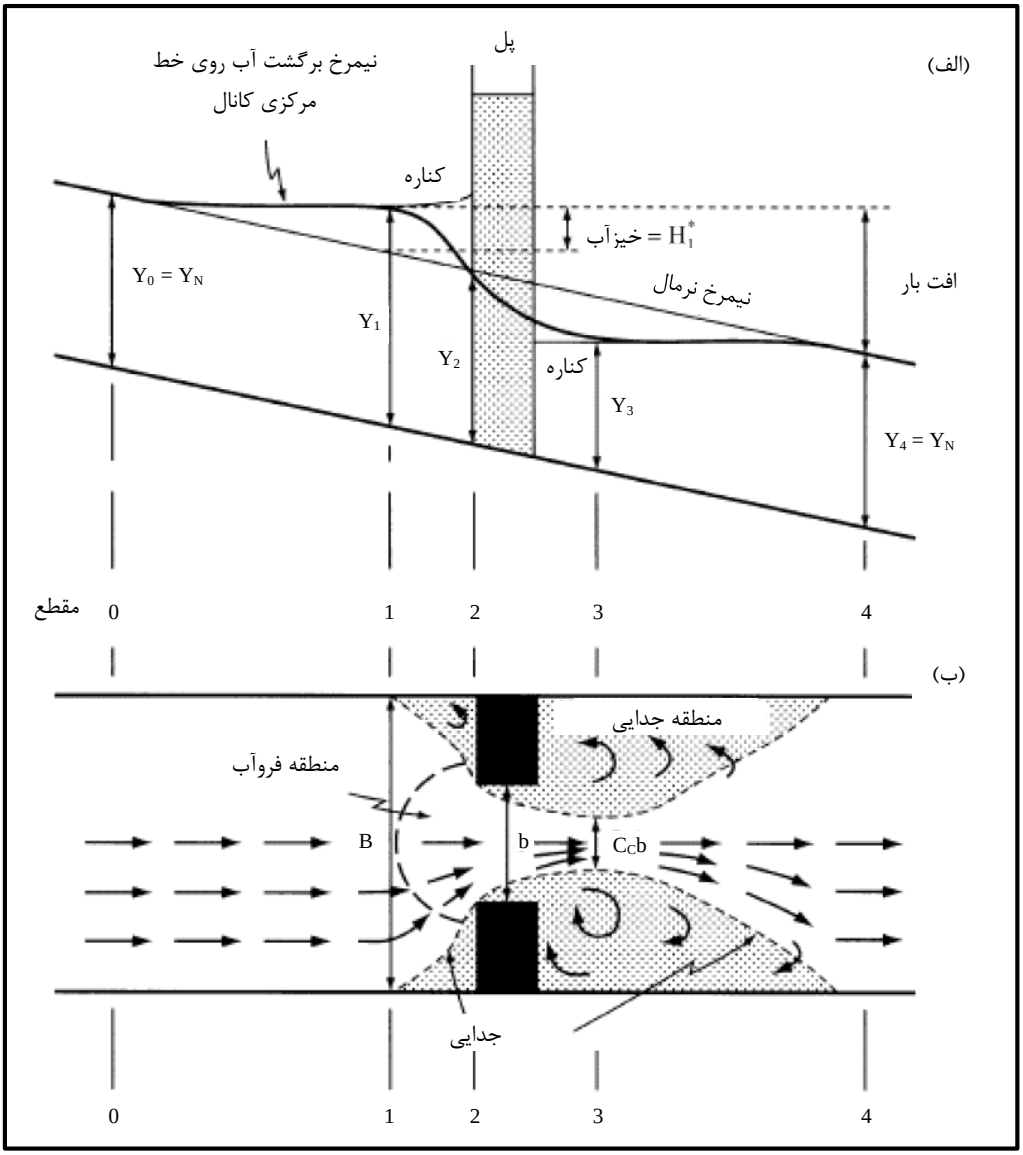
در شرایط واقعی در ترازهای سیل بالا، کانال‌های رودخانه‌های مرکب، عمق و سرعت جریان در امتداد عرض رودخانه تغییرات زیادی دارند. در نتیجه هیچ‌یک از روابط فوق به اندازه‌ی کافی M را توصیف نمی‌کنند. تحت این شرایط، روش معمول برای محاسبه M، به این ترتیب است که رودخانه در جاهایی که تغییرات زیادی در شعاع هیدرولیکی وجود دارد، به زیربخش‌هایی تقسیم می شود (تغییرات زبری اهمیت ندارد مگر این‌که جریان سطحی باشد) و سپس مقادیر انتقال هیدرولیکی محاسبه می شوند. تمام بخش‌های رودخانه (یعنی، آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها) گرادیان انرژی (اصطکاک) طولی S_F یکسانی دارند، بنابراین نسبت بازشدگی به شکل معادله زیرخواهد شد:

$$M = \frac{K_b}{K} \qquad (۲۷-۳)$$

که در آن، K_b مقدار انتقال متناظر با بازشدگی به عرض (b) است که به طرف بالادست در مقطع ۱ تصویر شده است و K نیز مقدار انتقال در آبراهه از تمام مقطع ۱ است. انتقال بر مبنای معادله مانینگ تعریف می‌شود. بنابراین در سیستم متریک، مقدار انتقال برای هر آبراهه یا زیربخشی از آن (که با اندیس i نشان داده شده است) برابر است با:

$$K_i = \frac{Q_i}{(S_{Fi})^{\frac{1}{2}}} = \frac{A_i R_i^{\frac{2}{3}}}{n_i} \qquad (۲۸-۳)$$

انتقال معمولا با استفاده از عبارت سمت راست رابطه بالا محاسبه می‌شود، که در آن A_i (m^2) و R_i (m) به‌ترتیب مساحت سطح مقطع و شعاع هیدرولیکی هستند. n_i نیز ضریب زبری مانینگ است.

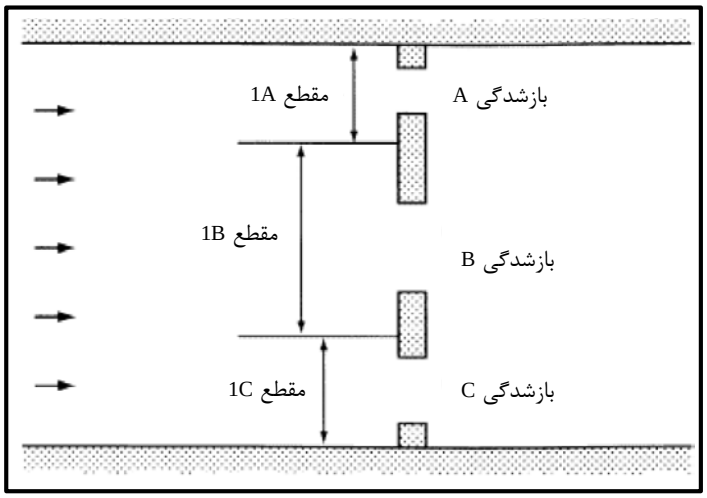


شکل ۳-۴۷- (الف) نیمرخ طولی جریان یکنواخت در عمق نرمال (Y_N) در آبراهه اصلی رودخانه که افزایش تراز سطح آب از محل پل را نشان می‌دهد (ب) نمای پلان که جدایی جریان و شکل‌گیری مقطع منقبض با عرض $C_C b$ را نشان می‌دهد.

برای پل‌های چند دهانه با پایه‌ها (مگر این‌که آن‌ها به طور غیرعادی عریض باشـــند) در بیش‌تر روش‌های تحلیل، هنگام محاسبه q (یا K_b) و در نتیجه M، از مساحت بازشدگی ناخالص[۱]، که مساحت اشغال شده توسط پایه‌ها را نیز شامل می شود، ا ستفاده می‌کنند. البته در ادامه، تاثیر پایه‌ها با در نظر گرفتن ضرایبی لحاظ می شود. این روش ب سیار عملی‌تر از این است که سعی شود تا در خصوص این‌که کدام بخش جریان می‌تواند از بین آبگذرهای متعدد بدون ممانعت

۱- Gross opening area

عبور کند و کدام بخش به‌واسطه وجود پایه‌های باریک منقبض می شود، تصمیم‌گیری شود. حالت استثناء برای شرایط مذکور، تنگ شدگی با چند بازشدگی است که خاکریزهای داخلی[۱] در آبراهه اصلی رودخانه دارد (شکل ۳-۴۸). بنابراین هر بازشدگی، با تقسیم آبراهه اصلی رودخانه به زیرآبراهه‌هایی[۲] (یکی برای هر بازشدگی)، به طور مجزا در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۴۸- شماتیک تنگ‌شدگی با چند دهانه. رابطه طول خاکریزهای داخلی در زیر آبراهه‌ها با مساحت ناخالص بازشدگی‌ها [۱۶۶]

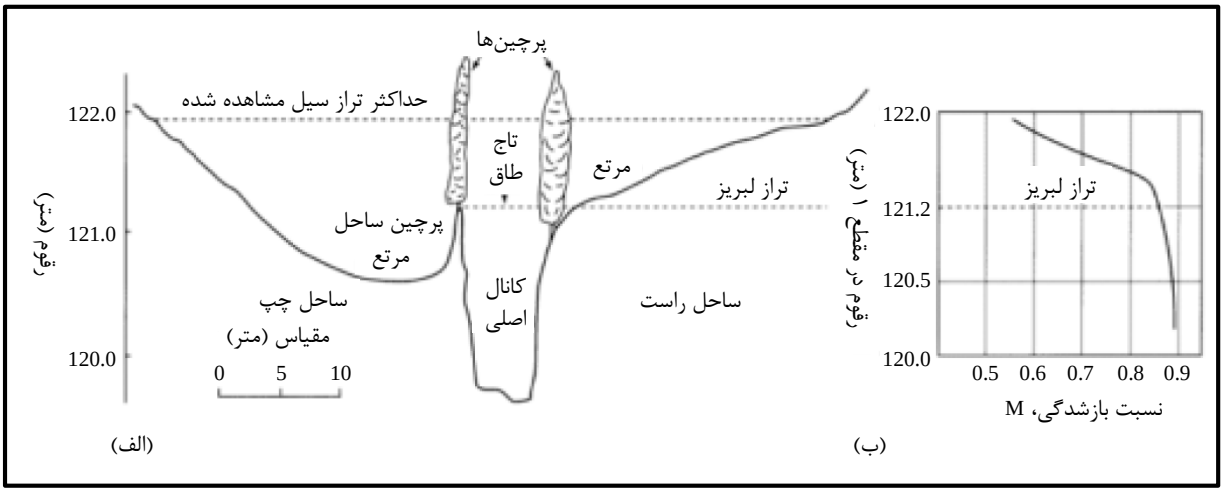
در رودخانه‌های طبیعی، مقدار M ثابت نیست و بر اساس تراز تغییر می‌کند (شکل ۳-۴۹). با افزایش تراز، ظرفیت آبراهه اصلی پر می شود و جریان وارد سیلابدشت‌ها می شود. با این اتفاق، در حالی که Q ، K و A به طور پیوسته به افزایش ادامه می‌دهند، مقادیر q، K_b و a ممکن است نسبتا ثابت بمانند که این مسئله تغییر در گرادیان منحنی «تراز M» را نتیجه می‌دهد. در مورد پل‌های طاقی شکل، شرایط پیچیده‌تر است زیرا عرض بازشدگی نیز با تراز تغییر می‌کند در نتیجه b ثابت نیست.

در جریان رودخانه، نسبت بازشدگی بسیار مهم است. با یک بازشدگی عریض (M بزرگ) جریان در رودخانه خیلی کم تاثیر می‌گیرد. اگر بازشدگی در مقایسه با رودخانه باریک (M کوچک) است، جریانی که وارد آبگذر می‌شود سرعت‌های عرضی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند که موجب شکل‌گیری یک آبگذر باریک و یک ضریب انقباض Cc کوچک (و در نتیجه، یک ضریب بده C کوچک) می‌شود (شکل ۳-۴۷). بنابراین در جریان رودخانه، یک رابطه اساسی بین M و Cc یا C وجود دارد.

در طراحی پل ضروری است تا با تغییر نسبت M در محدوده مقادیر عرض که از روابط رژیم حاصل شده است، شرایط جریان توسط مدل‌های عددی شبیه‌سازی و تغییرات تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست و سرعت جریان در بده سیل طرح محاسبه و مقدار M مناسب انتخاب گردد.

۱- Interior embankments

۲- Subchannels



شکل ۳-۴۹- پل Canns Mills، Devon: (الف) مقطع ۱، (ب) تغییرات نسبت بازشدگی M با تراز [۱۶۶]

۳-۴-۵- محاسبه ارتفاع و مسافت برگشت آب

۳-۴-۵-۱- استفاده از مدل‌های عددی

با استفاده از مدل‌های عددی (در بند ۳-۴-۲)، می‌توان ارتفاع و طول مسافتی که جریان آب در بالادست تحت تاثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد را محاسبه کرد. به طور مثال، شبیه‌سازی تراز و طول اثر برگشت آب در مدل دو بعدی HEC-RAS-2D دیده شده که شرح روش آن توسط هادیان و زراتی (۲۰۰۷) ارائه گردیده است [۱۴۱]. محاسبات تراز و طول برگشت آب به طراح کمک می‌کند تا عرشه پل را به گونه‌ای طراحی کند که از وقوع جریان روگذری جلوگیری شود یا در صورت لزوم، تمهیدات لازم برای پایداری عرشه در شرایط غرقابی اتخاذ گردد. همچنین مسافتی که سطح آب در بالادست پل تحت تاثیر قرار می‌گیرد، به طراح این اطمینان را می‌دهد که جریان آب از لبه ساحل وارد اراضی نشود. در غیر این صورت این امر می‌تواند به ابنیه مجاور و جاده‌های دو طرف پل خسارت وارد کند. برای اثر برگشت آب، روش‌های کنترل سیلاب مانند احداث خاکریز در دو طرف رودخانه تا مسافت به‌دست آمده، باید در نظر گرفته شوند.

۳-۴-۵-۲- روش HDS 1[1] برای محاسبه برگشت آب

استاندارد HDS1 روشی محاسباتی برای تعیین برگشت آب ناشی از تقاطع پل در رودخانه‌ها ارائه کرده است. معادله‌ی اساسی این روش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h_1^* = K^* \alpha_2 \frac{V_{n2}^2}{2g} + \alpha_1 \left[\left(\frac{A_{n2}}{A_4} \right) - \left(\frac{A_{n2}}{A_1} \right) \right] \frac{V_{n2}^2}{2g} \qquad (۲۹-۳)$$

که در آن:

h_1^* = برگشت آب کل، (m)

۱- Hydraulic Design Series (HDS)

K^* = ضریب برگشت آب کل

α_1 و α_2 = ضرایب توزیع انرژی جنبشی در مقاطع ۱ و ۲

A_{n2} = مساحت ناخالص آب در آبگذر تنگ شده پل که در زیر تراز نرمال در مقطع ۲ اندازه‌گیری می‌شود (m^2)

V_{n2} = سرعت متوسط در تنگ‌شدگی (بده کل تقسیم بر A_{n2}) (m/s)

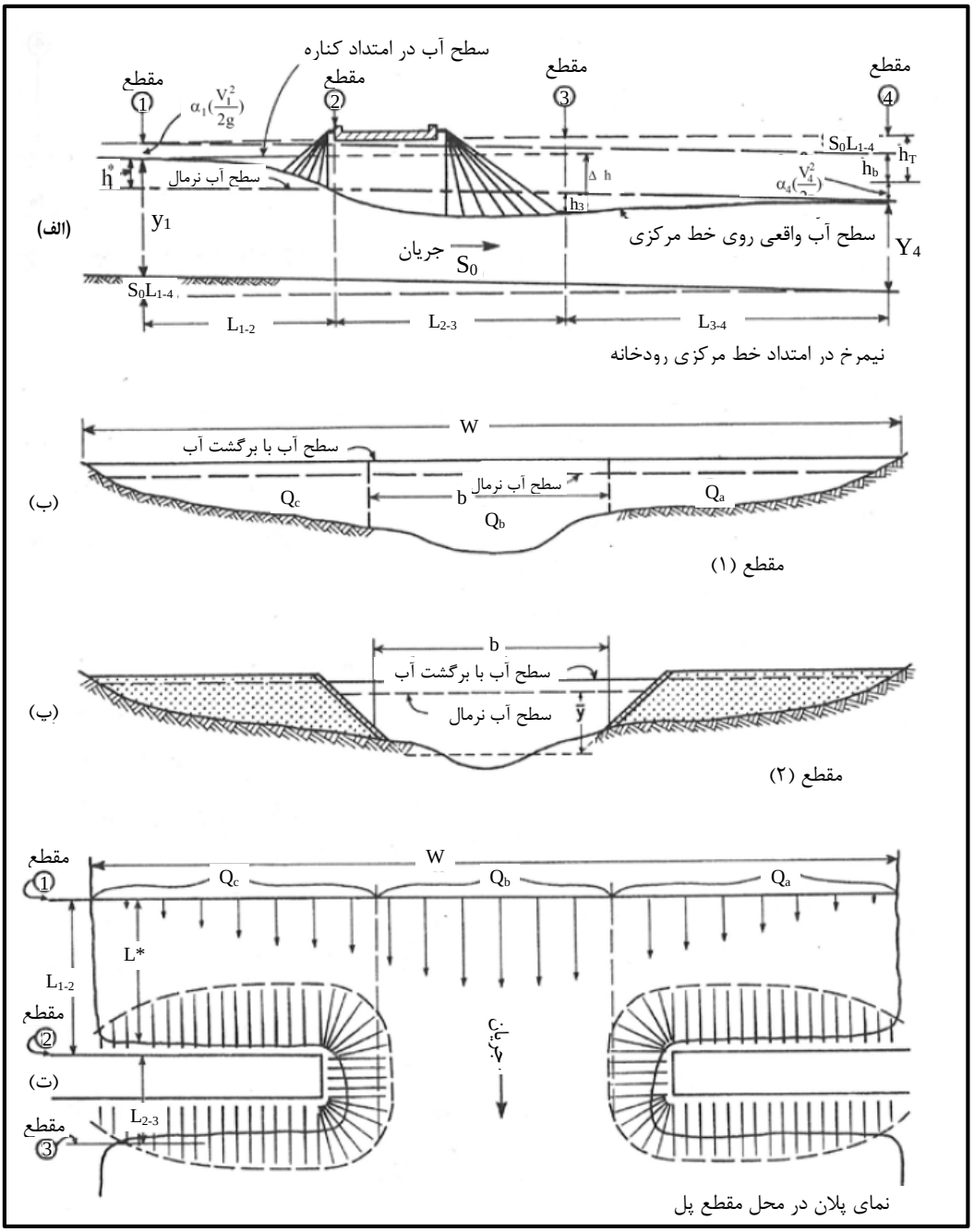
A_1 = مساحت کل جریان در مقطع ۱ شامل مقدار اضافه شده در اثر برگشت آب (m^2)

A_4 = مساحت کل جریان در مقطع ۴ در پایین‌دست محدوده تحت‌تاثیر پل (m^2)

g= شتاب گرانش (m^2/s)

معادله روش HDS1 (معادله ۳-۲۹) معادله‌ی انرژی را بین محل بی شینه تراز برگ شت آب در بالاد ست پل و نقطه‌ای در پایین‌دست پل، جایی که جریان کاملا باز می‌شود، به‌کار می‌برد. همچنین این معادله یک ضریب تجربی افت بار پل را نیز شامل می شود. در این معادله فرض شده ا ست که جریان در بازه‌ی تحت‌تاثیر، ماندگار و زیربحرانی ا ست (در روش HDS 1 با عنوان جریان نوع I طبقه‌بندی می‌شود). فرض مهم دیگر در این روش، این است که جریان تقریبا یکنواخت است (شیب سطح آب یکنواخت و موازی با شیب بستر رودخانه) به جز برای برگشت آب که توسط پل ایجاد شده است. در چارچوب روش HDS1، سطح مقطع ۱ بالادست پل در نقطه فرضی مربوط به بیشینه برگشت آب، سطح مقطع ۲ در وجه بالادست پل و سطح مقطع ۴ در پایین‌دست پل در نقطه‌ای که جریان به شرایط نرمال اولیه برمی‌گردد، تعریف می‌شوند (شکل ۳-۵۰). سطح مقطع ۳ در پنجه شیب جانبی پایین‌دست خاکریز جاده واقع می‌شود اما از آن در محاسبات برگشت آب استفاده نمی‌شود.

هنگام استفاده از این روش، ابتدا باید عمق جریان برای بده طرح مفروض، در یک سطح مقطع معرف در شرایط جریان یکنواخت و بدون هیچ تنگ‌شدگی محاسبه شود. قبل از اعمال تنگ‌شدگی ناشی از پل، به دلیل فرض جریان یکنواخت، ویژگی‌های سطح مقطع معرف برای تمام مقاطع (۱ تا ۴) نیز در نظر گرفته می‌شود. پس از مشخص شدن عمق جریان منقبض نشده، A_4 و α_1 محاسبه می‌شوند. سپس مقادیر A_{n2}، V_{n2} و α_2 با اعمال تنگ‌شدگی ناشی از خاکریزهای جاده و تکیه‌گاه‌ها بر مساحت سطح مقطع و در نظر گرفتن مساحت در تنگ شدگی و تحت سطح آب نرمال حساب می‌شوند (۳-۵۰-پ).



شکل ۳-۵۰- شماتیک مقاطع ۱ تا ۴ در روش HDS 1 برای محاسبه برگشت آب [۱۴۰]

۳-۵- مطالعات آبشستگی در محدوده‌ی پل‌ها

آبشستگی به معنای فرسایش و انتقال رسوبات بستر رودخانه از یک محدوده خاص است که می‌تواند منجر به ایجاد حفره‌های عمیق و آسیب به سازه‌های اطراف مانند پل‌ها و تکیه‌گاه‌ها شود. این پدیده بر خلاف فرسایش عمومی، آنی و به‌ویژه در جریان‌های سه‌بعدی ناشی از موانع در مسیر آب رخ می‌دهد و در شرایط سیلاب می‌تواند عمق حفره‌ها را به چندین متر برساند. تعیین عمق آبشستگی برای طراحان بسیار مهم است چرا که به آن‌ها کمک می‌کند تا تمهیدات لازم

برای پایداری سازه‌ها را در نظر بگیرند. به همین دلیل محققان از گذشته روابط تجربی مختلفی برای برآورد عمق آبشستگی ارائه داده‌اند.

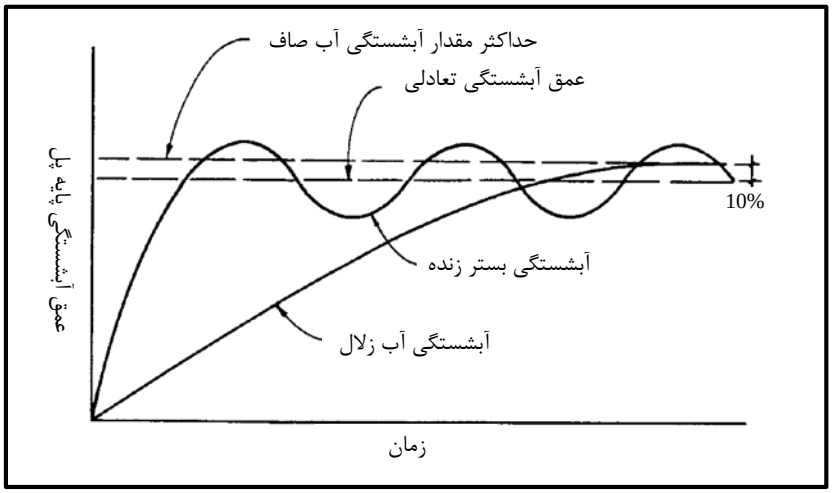
تقریبا تمام معادلات مربوط به تخمین آبشستگی بر مبنای تحقیقات آزمایشگاهی هستند و صحت‌سنجی‌های میدانی محدودی در خصوص آن‌ها انجام شده است. البته در برخی موارد، عمق آبشستگی‌های تنگ شدگی و موضعی اطراف پایه‌های پل که در شرایط واقعی مشاهده و اندازه‌گیری شده‌اند با مقادیر محاسبه شده از این معادله‌ها مطابقت داشته‌اند [۱۱۷]. روش‌ها و معادلاتی که کاربرد بیش‌تری برای برآورد عمق آبشستگی دارند در پیوست شماره ۳ معرفی شده‌اند.

یک عامل در ارزیابی آبشستگی در تقاطع پل‌ها (پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها) این است که آیا آبشستگی به صورت آب صاف[۱] است یا بستر متحرک[۲]. آبشستگی آب صاف در شرایطی رخ می‌دهد که مواد بستری بالادست تقاطع حرکت نمی‌کنند و منتقل نمی‌شوند و یا این‌که مواد بستری انتقال یافته از بازه بالادست به صورت معلق و در مقادیر کم‌تر از ظرفیت جریان از حفره آبشستگی اطراف پایه و تکیه‌گاه پل عبور می‌کنند. آبشستگی بستر متحرک هم مربوط به شرایطی است که انتقال مواد بستری از بالادست تقاطع صورت می‌گیرد. آبشستگی موضعی بستر متحرک، ماهیتی چرخه‌ای و تناوبی دارد، به این معنی که حفره آبشستگی که در مرحله افزایش سیل توسعه پیدا کرده در هنگام فروکش کردن سیل، دوباره با رسوبات پر می‌شود [۱۲۸].

شرایط معمول وقوع آبشستگی آب صاف شامل چندین عامل کلیدی می‌باشد: ۱- وجود مواد بستر در شت‌دانه در رودخانه‌ها ۲- شیب مسطح در رودخانه‌های با جریان‌های کم‌آبی ۳- نهشته‌های موضعی از مواد بستر در شت‌دانه که بزرگ‌تر از مصالح منتقل‌شده توسط جریان هستند (مانند سنگریزه‌ها) ۴- بستر رودخانه‌هایی که دارای لایه‌های محافظ (سپری) بوده به طوری‌که تنها مکان‌هایی که نیروهای برشی کافی برای نفوذ به لایه محافظ دارند، پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها باشند و ۵- وجود پوشش گیاهی یا مناطق روکرانه در سیلابدشت‌ها. در زمان وقوع سیل، پل‌هایی که بر روی رودخانه‌های دارای مواد بستر درشت‌دانه قرار دارند، معمولا در بده‌های کم، تحت تاثیر آبشستگی آب صاف قرار می‌گیرند. اما در بده‌های بزرگ‌تر، آبشستگی بستر متحرک رخ می‌دهد و پس از فروکش کردن سیل، در بده‌های کوچک‌تر، آبشستگی آب صاف دوباره اتفاق می‌افتد. آبشستگی آب صاف به طور کلی در مقایسه با آبشستگی بستر متحرک به مدت زمان طولانی‌تری برای رسیدن به حداکثر مقدار خود نیاز دارد (شکل ۳-۵۱). زیرا آبشستگی آب صاف بیش‌تر در رودخانه‌های دارای مواد درشت‌دانه دیده می‌شود. در حقیقت حتی ممکن است آبشستگی موضعی آب صاف پس از چندین سیلاب به حداکثر مقدار خود نرسد و معمولا بیشینه آبشستگی موضعی آب صاف پایه پل حدود ۱۰ درصد بیش‌تر از آبشستگی موضعی تعادلی بستر متحرک پایه پل است.

۱- Clear-water scour

۲- Live bed scour



شکل ۳-۵۱- عمق آبشستگی پایه پل در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای به صورت تابعی از زمان [۱۲۸]

۳-۵-۱- محاسبات آبشستگی کل[۱]

آبشستگی کل در تقاطع جاده‌ها با رودخانه، سه جزء اصلی دارد که عبارتند از:

۱- ترازکاهی بلندمدت[۲] در بستر رودخانه

۲- آبشستگی تنگ‌شدگی[۳] در پل

۳- آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها

این سه مولفه با یکدیگر جمع می شوند تا آبشستگی کل در محل یک پایه یا تکیه‌گاه به‌دست آید. برای این منظور فرض می‌شود که هر جزء به صورت مستقل از بقیه رخ می‌دهد. در نظرگرفتن مجموع آبشستگی‌ها، برای طراحی محافظه‌کارانه و در جهت اطمینان خواهد بود. علاوه بر این، انواع دیگری از آبشستگی نیز وجود دارند که در شرایط به‌خصوصی رخ می‌دهند. همچنین مهاجرت جانبی رودخانه را نیز هنگام ارزیابی آبشستگی کل در پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل باید در نظر گرفت.

ترازکاهی بستر رودخانه، یک فرآیند ریخت‌شناسی پیوسته است که در مقیاس زمانی بلندمدت و در بازه طولانی رودخانه صورت می‌گیرد. این پدیده سبب عمیق‌تر شدن آبراهه اصلی و در نتیجه تخریب دیواره‌ها و سپس افزایش عرض آبراهه اصلی می‌گردد. ارزیابی روند کاهشی یا افزایشی تراز بستر در مجموعه مطالعات ریخت شناسی انجام می‌یابد. این روند به طور تجربی با داده‌برداری میدانی از مقاطع عرضی آبراهه در یک بازه زمانی طولانی (بیش از ۱۰ ساله) قابل ارزیابی است. شبیه سازی روند تغییرات بلندمدت بستر با کاربرد مدل‌های عددی جریان آب با انتقال رسوب برای شرایط جریان پیوسته و ناپایدار (و با استفاده از سری زمانی بلندمدت داده‌های جریان روزانه) امکان‌پذیر می‌باشد. در این راهنما،

۱- Total scour

۲- Long-term degradation

۳- Contraction scour

برآورد آبشستگی عمومی (در اثر تنگ‌شدگی) و آبشستگی موضعی (مربوط به تکیه‌گاه‌ها و پایه های پل و در پایین‌دست آبگذرها) به شرح زیر می‌باشد:

۱- آبشستگی تنگ‌شدگی

آبشستگی تنگ‌شدگی، عبارت است از پایین افتادن بستر رودخانه در امتداد عرض و طول بستر رودخانه در بازه ساخت پل و آبگذر. این پایین‌افتادگی ممکن است در تمام عرض بستر، یکنواخت یا غیریکنواخت بوده و عمق آبشستگی در بعضی از قسمت‌های مقطع عمیق‌تر باشد. آبشستگی تنگ شدگی، از تنگ شدگی (یا انقباض) جریان ناشی می شود و موجب کنده شدن و حذف مواد بستری در تمام یا بخش عمده عرض رودخانه می‌شود. از آنجایی‌که آبشستگی تنگ‌شدگی در نزدیکی انقباض ناشی از پل رخ می‌دهد، آبشستگی تنگ‌شدگی با ترازکاهی بلند مدت فرق می‌کند. آبشستگی تنگ‌شدگی می‌تواند چرخه‌ای و تناوبی باشد و یا به عبور سیلاب وابسته باشد.

فرآیند آبشستگی بستر با فرض طولانی بودن بازه تنگ شدگی و فرصت زمانی زیاد و کافی برای دستیابی به شرایط تعادل تراز بستر را آبشستگی نهایی یا تعادلی می‌نامند. برای برآورد آبشستگی نهایی ناشی از تنگ‌شدگی بستر روش‌های مختلفی ارائه شده است. به طور مثال، برای شرایط جریان آب صاف از معادله زیر (که براساس فرضیه تنش برشی بحرانی برای آستانه حرکت مواد بستری و بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده) می‌توان استفاده نمود [۱۰۱ و ۱۰۲].

$$y_{s-ult} = 0.94\, y_1 \left(\frac{1.83\, V_2}{\sqrt{g\, y_1}} - \frac{K_u \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_c}}}{g\, n\, y_1^{\frac{1}{3}}} \right) \qquad (۳۰-۳)$$

که در آن: y_1 = عمق متوسط جریان در بالادست (m)، V_2 = سرعت متوسط جریان در مقطع تنگ‌شده (m/s)، τ_c = تنش برشی بحرانی (N/m^2)، n= ضریب زبری مانینگ و K_u برابر ۱/۴۹ برای سیستم آحاد انگلیسی و ۱ برای سیستم آحاد SI است.

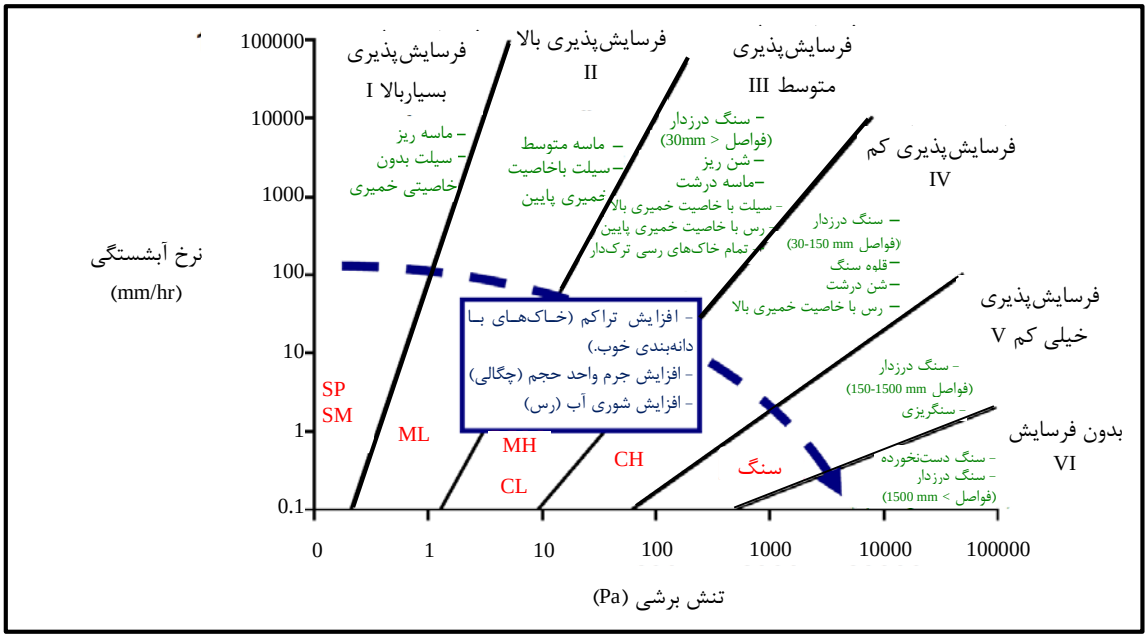
باید به این نکته توجه شود که هرچند در فرمول بالا از عمق جریان در بالادست استفاده شده است، ولی در استخراج این رابطه فرض بر این بوده است که عمق جریان در بالادست با عمق جریان در تنگ‌شدگی برابر است. Briaud و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که این معادله آبشستگی روی خط مرکزی آبراهه در پایین‌دست ورودی را محاسبه می‌کند و آبشستگی روی خط مرکزی در نزدیکی ورودی، ۳۵ درصد بیش‌تر است [۱۰۱].

وجود چسبندگی، معمولا عمق آبشستگی برآورد شده را در مقایسه با ماسه ریزدانه، در معادله آبشستگی تنگ‌شدگی آب صاف کاهش می‌دهد. در بعضی موارد اگر سیلاب‌ها تداوم کافی نداشته باشند، در طول عمر پل شاید هیچگاه آبشستگی به مقدار نهایی نرسد. برای تخمین آبشستگی در طول عمر یک پل، اطلاعات بیش‌تر و انجام محاسبات اضافی نیاز است. اطلاعات اضافی شامل منحنی نرخ فرسایش در مقابل تنش برشی مازاد و مقدار و تداوم جریان‌ها در طول عمر پروژه می‌باشند. محاسبات از طریق هیدروگراف جریان در عمر پل و با افزودن آبشستگی ناشی از یک سیل به‌خصوص به

آبشستگی ناشی از جریان‌های قبلی پیش برده می‌شود. Briaud (۲۰۱۱) روابطی کلی بر مبنای نوع مواد برای تنش برشی بحرانی و نرخ‌های فرسایش ارائه کرده است (شکل ۳-۵۳) [۱۰۱]. برای یک جریان به‌خصوص، تنش برشی اولیه از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$\tau = \gamma \left(\frac{V_2 \, n}{K_u} \right)^2 y_o^{-\frac{1}{3}} \qquad (۳۱-۳)$$

متغیرهای موجود در رابطه بالا قبلا معرفی شده‌اند. چنانچه برای مصالح مورد نظر، تنش برشی از تنش برشی بحرانی (براساس داده‌های آزمایش یا نمودارهایی مانند شکل ۳-۵۲) تجاوز نکند، آنگاه آبشستگی تنگ‌شدگی اتفاق نمی‌افتد ولی اگر تنش برشی بیش‌تر از مقدار بحرانی گردد، آبشستگی نهایی با استفاده از معادله (۳-۳۰) محاسبه می‌شود.



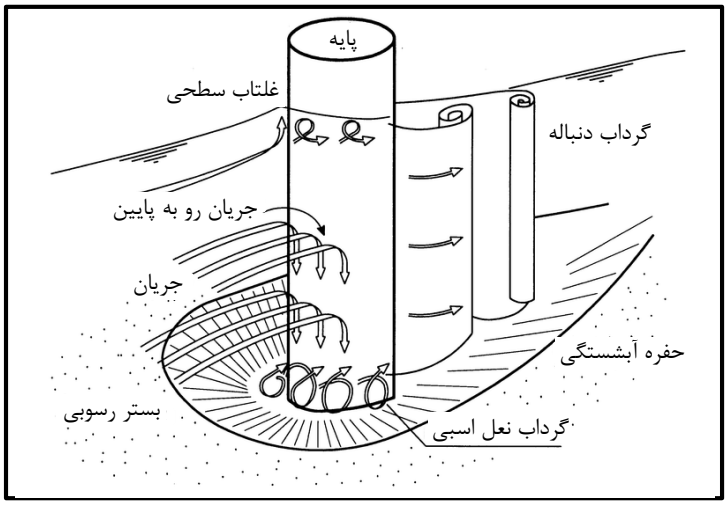
شکل ۳-۵۲- روابط کلی برای تنش برشی و نرخ آبشستگی در مواد چسبنده [۱۰۱ و ۱۰۲]

روش‌ها و معادلات کاربردی برای برآورد عمق آبشستگی تنگ‌شدگی، همراه با مثال در پیوست شماره ۳ معرفی شده‌اند. در بیش‌تر موارد، آبشستگی در اثر تنگ شدگی پل برابر آبشستگی در یک بازه یک تنگ شده طولانی نیست. روش‌ها و معادلات برآورد آبشستگی با فرض طولانی بودن بازه تنگ شدگی (برای دستیابی به شرایط تعادل بستر) به دست آمده‌اند. برای این منظور ضریب افزایشی تا ۱/۳ نیز برای آبشستگی تنگ‌شدگی واقعی پل‌ها توسط اداره راه کالیفرنیا توصیه شده است.

۲- آبشستگی موضعی

آبشستگی موضعی شامل فرسایش مواد بستری از اطراف پایه‌ها، تکیه‌گاه‌ها، آبشکن‌ها و خاکریزها و همچنین پایین‌دست آبگذرها است. این نوع آبشستگی به دلیل شتاب گرفتن جریان و شکل‌گیری گردابه‌های ناشی از آن به دلیل وجود مانع در مقابل جریان است. در شکل (۵-۵۳)، الگوی جریان در پیرامون یک پایه استوانه‌ای نشان داده شده است

[۶۱]. اطلاعات لازم برای برآورد عمق آبشستگی موضعی در بخش‌های زیر آمده است. روش‌ها و معادلات کاربردی برای برآورد عمق آبشستگی موضعی، به تفکیک برای پایه‌های پل، تکیه‌گاه‌ها و آبگذرها، همراه با مثال‌های کاربردی در پیوست شماره ۳ معرفی شده‌اند.



شکل ۳-۵۳- الگوی جریان و آبشستگی پیرامون یک پایه قائم [۶۱]

۳-۵-۲- نرخ زمانی آبشستگی

برای نخستین رخداد سیل که آبشستگی تنگ شدگی را در طول عمر پل ایجاد می‌کند، آبشستگی واقعی که اتفاق خواهد افتاد به نرخ اولیه آبشستگی ($\dot{z}_i$)، آبشستگی نهایی برای جریان مورد نظر و طول مدت جریان (t) بستگی دارد. معادله آبشستگی در حین رخداد سیل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$y_s(t) = \frac{t}{\frac{1}{\dot{z}_i} + \frac{t}{y_{s_ult}}} \qquad (۳۲-۳)$$

که در آن: $\dot{z}_i$ = نرخ اولیه آبشستگی (m/hr) و t= مدت زمان جریان (hr) است.

شایان ذکر است که مقیاس طولی نرخ آبشستگی با همان واحدهای آبشستگی نهایی بیان شده است. برای رخدادهای آبشستگی متوالی، آبشستگی هنگامی رخ می‌دهد که آبشستگی نهایی برای آن رخداد از آبشستگی که قبلا اتفاق افتاده است، تجاوز کند. این شرایط همواره هنگامی که تنش برشی از هر تنشی که قبلا رخ داده بیش‌تر شود، اتفاق می‌افتد اما ممکن است برای تنشی هم که کم‌تر از تنش‌های قبلی باشد، رخ دهد. آبشستگی اضافی برای شرایط جریان هنگامی که آبشستگی نهایی برای آن شرایط جریان بیش‌تر از آبشستگی تجمعی قبلی باشد، اتفاق می‌افتد. بنابراین در طول عمر یک پل، آبشستگی در مواد چسبنده تجمعی است و مقدار تجمعی آبشستگی حتی می‌تواند به ازای رخدادهای کوچکی که پس از رخدادهای بزرگ اتفاق می‌افتند، افزایش بیابد.

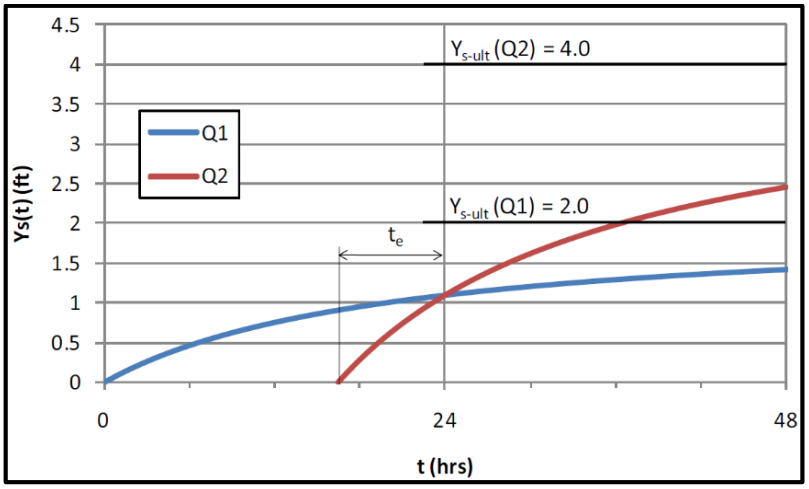
معادله (۳-۳۳) برای محاسبه آبشستگی در رخدادهای با آبشستگی‌های متوالی استفاده می‌شود اما زمان (t) در این معادله باید تعدیل شود تا آبشستگی قبلی را نیز شامل شود ($t = t_{event} + t_e$). t_e زمان معادل است برای رسیدن به

مقدار آبشستگی قبلی نیاز دارد. زمان معادل (t_e) در شکل (۳-۵۴) نشان داده شده است و با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$t_e = \frac{\left(y_{s_ult}\right)\left(y_{s_prior}\right)}{\dot{z}_i\left(y_{s_ult} - y_{s_prior}\right)} \qquad (۳۳-۳)$$

که در آن: y_{s_prior} = آبشستگی تجمعی که در رخدادهای قبلی ایجاد شده است. (m)

مراحلی که در بالا مشخص شده‌اند باید برای تمام رخدادهای آبشستگی در طول عمر پل کامل شوند زیرا آبشستگی که یک پل در طول یک سیل تجربه خواهد کرد به مقدار و تداوم آن سیل و نیز مقدار آبشستگی ناشی از سیل‌های پیشین بستگی دارد. توالی سیل‌ها نیز بر مقدار آبشستگی کل در طول عمر پل تاثیر خواهد داشت. بزرگ‌ترین آبشستگی تجمعی زمانی رخ می‌دهد که مقدار سیلاب‌ها در طول عمر پل افزایش داشته باشند و کوچک‌ترین آبشستگی تجمعی نیز هنگامی اتفاق می‌افتد که مقدار سیلاب‌ها در طول عمر پل کاهش داشته باشند. اگر چه اطلاعات مورد نیاز برای انجام این سطح از محاسبات قابل توجه است، ولی باید برای عمر آینده پل درنظر گرفته شود. همچنین توجه به این نکته برای مواد چسبنده با مقاومت بسیار زیاد در مقابل فرسایش، ضروری است. حتی اگر آبشستگی تجمعی برآورد نشده است، میزان آبشستگی برای دو مقادیر «سیل طراحی آبشستگی» و «سیل کنترل آبشستگی» (براساس توصیه جدول ۳-۲) برآورد شود و یا با استفاده از معادله (۳-۳۰) باید آبشستگی نهایی محاسبه شود.



شکل ۳-۵۴- محاسبات آبشستگی وابسته به زمان [۱۲۸ و ۱۲۹]

جدول ۳-۲- کمینه مقادیر توصیه شده برای دوره بازگشت‌های سیل طراحی آبشستگی و سیل کنترل طراحی آبشستگی بر مبنای دوره بازگشت سیل طراحی هیدرولیکی [۱۲۸ و ۱۲۹]

دوره بازگشت سیل طراحی هیدرولیکی، Q_D	دوره بازگشت سیل طراحی آبشستگی، Q_s	دوره بازگشت سیل کنترل طراحی آبشستگی، Q_c
Q_{10}	Q_{25}	Q_{50}
Q_{25}	Q_{50}	Q_{100}
Q_{50}	Q_{100}	Q_{200}
Q_{100}	Q_{200}	Q_{500}

۳-۵-۳- آبشستگی جریان تحت‌فشار[۱] (آبشستگی تنگ‌شدگی قائم[۲])

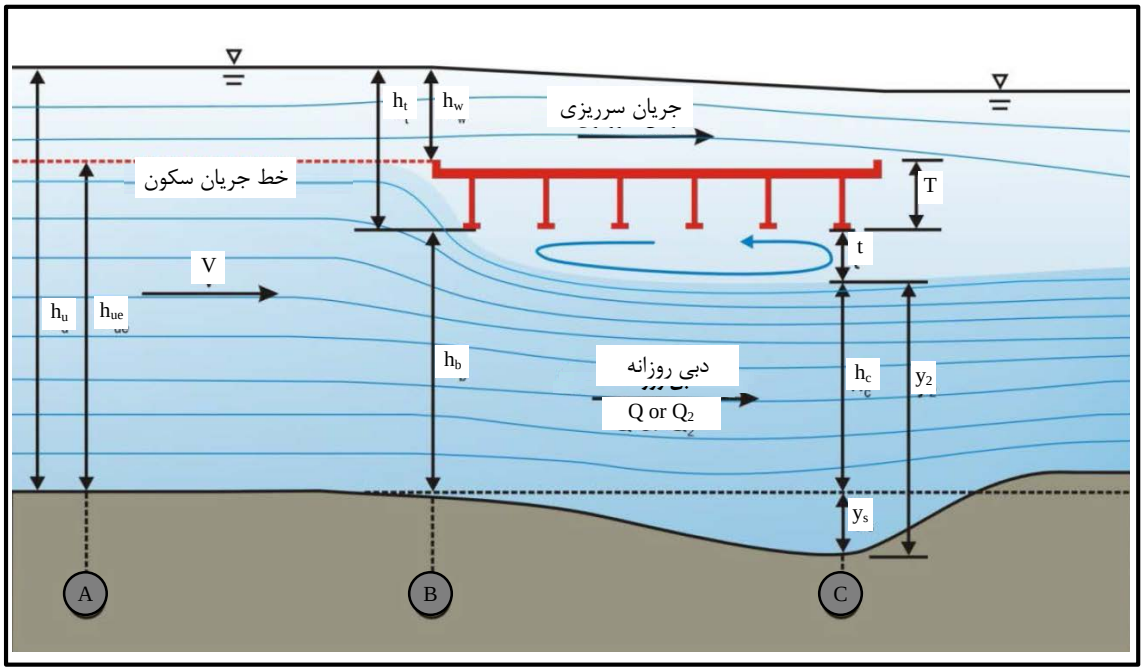
- تخمین آبشستگی جریان تحت فشار

پیش‌بینی آبشستگی جریان تحت فشار در زیر یک عرشه پل سیل‌گرفته در یک رخداد سیل شدید برای طراحی پل ایمن و برای ارزیابی آبشستگی در محل پل‌های موجود اهمیت دارد. یک فرمول پس از کالیبراسیون و واسنجی با داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) توسط FHWA (2012a) [۱۲۷] برای محاسبه عمق آبشستگی جریان تحت فشار در شرایط مختلف سیل‌گرفتگی پل‌ها ارائه شده است. بیشینه عمق آبشستگی با استفاده از معادله‌های آبشستگی تنگ شدگی که با رابطه ضخامت ناحیه جدایی جریان در زیر پل سیل‌گرفته ترکیب شده‌اند، محاسبه می شود [۱۲۸]. روش‌ها و معادلات کاربردی برای برآورد عمق آبشستگی جریان تحت فشار همراه با مثال در پیوست شماره ۳ معرفی شده‌اند.

شکل (۳-۵۵) مشخصه‌های جریان را برای روسازه پل کاملا مستغرق نشان می‌دهد. واژه «روسازه» که در این بخش از آن استفاده شده است به یک سطح مقطع پیوسته از اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای گفته می شود که روی آبگذر قرار می‌گیرند و در شرایط سیل‌گرفتگی جزئی یا کامل، انسداد قابل‌توجهی را ایجاد می‌کنند. بده در زیر روسازه پل را می‌توان فرض کرد که تمام جریان نزدیک شونده از زیر وجه فوقانی روسازه با ارتفاع $h_b + T$ است، که h_b اندازه قائم باز شدگی پل قبل از آبشستگی و T ارتفاع موانع شامل تیرهای اصلی، عرشه و دیواره جان‌پناه پل است. در سیلاب‌هایی که موجب روگذر شدن جریان نمی‌شوند، تمام بده بالادست از بازشدگی پل عبور می‌کند. عمق بیشینه آبشستگی از سه جزء تشکیل می‌شود: h_c: ارتفاع جریان منقبض شده در امتداد قائم از خط جریانی که ناحیه جدایی را در زیر روسازه پل در هنگام وقوع بیشینه عمق آبشستگی محدود می‌کند، y_s: عمق آبشستگی و t: بیشینه ضخامت ناحیه جدایی جریان می‌باشد. ناحیه جدایی جریان هیچ جرم خالصی را از بازشدگی بالادست پل به خروجی پایین‌دست منتقل نمی‌کند.

۱- Pressure flow scour

۲- Vertical contraction scour



شکل ۳-۵۵- پارامترهای هندسی مربوط به تنگ‌شدگی قائم [۱۲۷]

برای تعیین عمق آبشستگی جریان تحت‌فشار y_s با به‌کار بردن معادله‌های آبشستگی تنگ‌شدگی افقی ارتفاع $y_s + h_c$ که برای انتقال جریان از بازشدگی پل با سرعت بحرانی مورد نیاز است، محاسبه می‌شود. در پیوست شماره ۳، ارتفاع y_2 (عمق متوسط در مقطع تنگ‌شده) برای آبشستگی در شرایط آب صاف، یا برای آبشستگی تنگ‌شدگی بستر فرسایشی معادل است. با ترکیب این رابطه و تعاریف t و h_b:

$$y_s = y_2 + t - h_b \qquad (۳۴-۳)$$

توجه شود که h_b در آبشستگی جریان تحت‌فشار معادل با y_0 (عمق موجود در مقطع تنگ‌شده قبل از آبشستگی) در آبشستگی تنگ‌شدگی است. با مقایسه معادله‌های آبشستگی تنگ‌شدگی (در پیوست ۳)، عمق آبشستگی در جریان تحت‌فشار به طور قابل‌ملاحظه‌ای می‌تواند بزرگ‌تر از جریان آزاد باشد زیرا از عمق موجود برای انتقال جریان از بازشدگی زیر پل به‌اندازه‌ی ضخامت جدایی جریان، t کاسته شده است.

هنگامی که جریان سرریزی از روی پل یا جاده‌های دستر سی عبور می‌کند، مقدار Q_2 (جریان در آبراهه تنگ شده) در معادله بستر فرسایشی یا Q (بده عبوری از آبگذر پل) در معادله آب صاف فقط باید جریان عبوری از باز شدگی پل باشد (پیوست ۳). این بده با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی نظیر HEC-RAS یا FST2DH قابل محاسبه است.

در شرایط بستر فرسایشی، بده آبراهه بالادست Q_1 و عمق جریان باید اصلاح شوند. برای شرایطی که جریان روگذر نشده، نیازی به اصلاح Q_1 نیست و $y_1 = h_{ue} = h_u$. برای جریان روگذر که در شکل (۳-۵۵) نشان داده شده است، Q_1 اصلاح می‌شود و $y_1 = h_{ue} = h_b + T$، که T ارتفاع موانع شامل تیرهای اصلی، عرشه و دیواره جان‌پناه پل است. اگر پل دارای نرده‌کشی با بازشدگی‌هایی باشد، ارتفاع انسداد T تا لبه زیرین بازشدگی در زیر نرده‌ها امتداد می‌یابد. احتمال گرفتگی چشمه‌های نرده‌کشی توسط واریزه‌های شناور، هنگام تعیین T باید در نظر گرفته شود. برای جریان‌های روگذر

در شرایط بستر فرسایشی، Q_{ue} به جای Q_1 در معادلات پیوست ۳ استفاده می‌شود که بر مبنای بده کل رودخانه در مقطع نزدیک‌شونده Q_1، با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{ue} = Q_1 \left(\frac{h_{ue}}{h_u} \right)^{\frac{8}{7}} \qquad (۳۵-۳)$$

که در آن:

Q_{ue} = بده موثر رودخانه برای شرایط بستر فرسایشی و جریان روگذر از پل، m^3/s

Q_1 = بده آبراهه بالادست که در پیوست ۳ تعریف شده است، m^3/s

h_u = عمق جریان آبراهه بالادست که در پیوست ۳ تعریف شده است، m

h_{ue} = عمق موثر جریان در آبراهه بالادست برای شرایط بستر فرسایشی و روگذری جریان از پل، m

ضخامت ناحیه جدایی، t (بر حسب متر) با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{t}{h_b} = 0.5 \left(\frac{h_b \Delta h_t}{h_u^2} \right)^{0.2} \left(1 - \frac{h_w}{h_t} \right)^{-0.1} \qquad (۳۶-۳)$$

که در آن:

h_b = اندازه قائم بازشدگی پل قبل از آبشستگی، m

h_t = فاصله سطح آب تا وجه زیرین تیرهای اصلی پل، مساوی با $h_u - h_b$، m

h_w = ارتفاع جریان سرریزی = $h_t - T$ برای $h_t > T$ و $h_w = 0$ برای $h_t \le T$

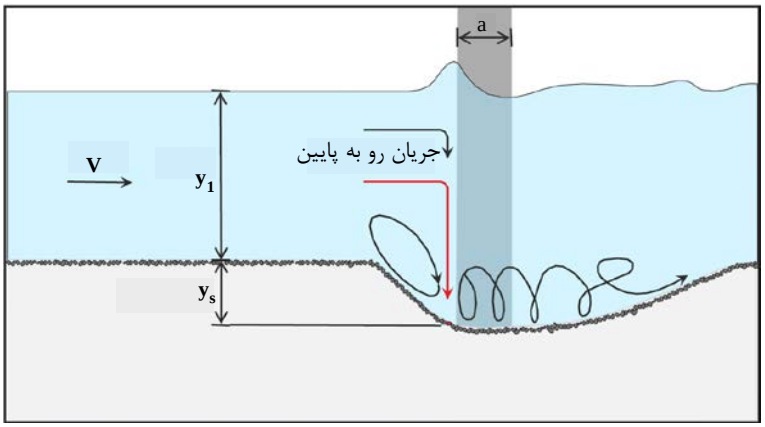
در پیوست ۳، آبشستگی تنگ شدگی جریان در آبراهه اصلی و سیلابدشت‌های آن (تنگ شدگی جانبی[۱]) و جریان تحت‌فشار (تنگ‌شدگی قائم[۲]) شرح داده شده است.

۳-۵-۴- آبشستگی موضعی پایه پل‌ها

متغیرهای موثر در آبشستگی موضعی پایه پل در شکل (۳-۵۶) نشان داده شده است.

۱- Lateral contraction

۲- Vertical contraction



شکل ۳-۵۶- نمایش توصیفی آبشستگی پایه پل [۱۲۷]

طبق شکل (۳-۵۶)، متغیرهای مربوط به آبشستگی پایه پل عبارتند از:

a= قطر پایه یا عرض آن در جهت جریان

V= سرعت نزدیک‌شونده

y_1 = عمق جریان

y_s = عمق آبشستگی موضعی

علاوه بر متغیرهای فوق، مشخصه‌های دیگر پایه‌ها نظیر نوع و شکل پایه نیز در آبشستگی تاثیر دارند. نوع پایه‌ها شامل ستون منفرد، ستون‌های چندگانه یا مستطیلی است. شکل شامل دماغه گرد، مربعی، گوشه‌دار یا استوانه‌ای است. همچنین پایه‌ها ممکن است ساده یا پیچیده باشند. پایه‌های ساده از یک یا چندین ستون که در مقابل جریان قرار می‌گیرند، تشکیل می‌شود درحالی‌که پایه پیچیده از خود پایه، شالوده یا کلاهک شمع و شمع‌هایی که در معرض جریان قرار دارند، تشکیل می‌شود.

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، Melville and Sutherland (1988) مقدار ۲/۴ را به عنوان حد بالای نسبت عمق آبشستگی به عرض پایه (y_s / a) برای پایه‌های استوانه‌ای گزارش کرده‌اند [۱۶۹]. در تحقیقات مذکور، عدد فرود کم‌تر از یک بوده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که نسبت عمق آبشستگی (y_s / a) به عرض پایه به‌ندرت از ۲/۳ فراتر می‌رود. هر چند مقادیر y_s / a در حدود ۳ توسط Jain and Fischer [۱۸۰]، برای جریان‌های تنداب و گودآب[۱] با عدد فرود حدود ۱/۵ به دست آمده است. بزرگ‌ترین مقدار y_s / a برای جریان با پادتلماسه برابر با ۲/۵ با عدد فرود ۱/۲ به‌دست آمده است. توجه شود که این حدود بالا برای پایه‌های دایره‌ای تعیین شده است و اصلاحات مربوط به شکل پایه یا انحراف آن انجام نشده است. همچنین جریان تحت‌فشار، یخ یا واریزه‌ها می‌تواند این نسبت را افزایش دهد.

با توجه به توضیحات فوق، نسبت y_s / a برای عددهای فرود بزرگ می‌تواند ۳ باشد. بنابراین توصیه می‌شود که بیشینه مقدار نسبت مذکور برابر با ۲/۴ برای اعداد فرود کم‌تر یا مساوی با ۰/۸ و برابر با ۳ برای اعداد فرود بزرگ‌تر در

۱- Chute and pool

نظر گرفته شـود. این مقادیر توصـیه شـده فقط به منظور اسـتفاده در پایه‌هایی با دماغه گرد که به موازات جریان قرار گرفته‌اند، می‌باشد.

روش‌ها و معادلات کاربردی برای برآورد عمق آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل، همراه با مثال‌های کاربردی در پیوست شماره ۳ معرفی شده‌اند.

۳-۵-۴-۱- آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های عریض

مطالعات آزمایشگاهی بر روی عمق آبشستگی پایه‌های عریض در جریان‌های کم‌عمق و مشاهدات میدانی عمق‌های آبشستگی پایه پل‌های اهرمی[۱] (متحرک) در جریان‌های کم‌عمق نشان می‌دهد که معادله‌های موجود، از جمله معادله CSU، عمق آبشستگی را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. Johnson and Torrico [۱۵۱]، معادله‌های زیر را برای محاسبه فاکتور K_w به منظور اصلاح معادله‌های پیشین (در پیوست ۳) برای پایه‌های عریض در جریان‌های کم‌عمق ارائه کرده‌اند [۱۰۷]. ضریب اصلاحی باید هنگامی که نسبت عمق جریان (y) به عرض پایه (a) کمتر از ۰/۸ ($y/a<0.8$)، نسبت عرض پایه (a) به قطر میانه مواد بستر (D_{50}) بزرگ‌تر از ۵۰ ($a/D_{50}>50$) و جریان زیربحرانی ($Fr<1$) است، اعمال شود.

$$K_w = 2.58\left(\frac{y}{a}\right)^{0.34} Fr_1^{0.65} \qquad \text{برای } \frac{V}{V_c}<1 \qquad (۳۷-۳)$$

$$K_w = 1.0\left(\frac{y}{a}\right)^{0.13} Fr_1^{0.25} \qquad \text{برای } \frac{V}{V_c}\geq 1 \qquad (۳۸-۳)$$

متغیرها قبلا تعریف شده‌اند.

استفاده از ضریب K_w باید با قضاوت مهندسی صورت گیرد زیرا بر پایه داده‌های محدود آزمایشگاهی به‌دست آمده است. در قضاوت مهندسی، حجم ترافیک، میزان اهمیت جاده، هزینه‌های تخریب احتمالی پل (خسارت‌های جانی و مالی) و نیز تغییر (افزایش) در هزینه‌ها، در صورت اعمال ضریب K_w باید در نظر گرفته شود.

۳-۵-۴-۲- عرض فوقانی حفره آبشستگی

عرض فوقانی حفره آبشستگی در مواد بستر غیرچسبنده در یک سمت پایه یا شالوده را می‌توان با استفاده از معادله (Richardson and Abed, 1993) در زیر تخمین زد [۱۵۱]:

$$W = y_s\left(K + \cot\theta\right) \qquad (۳۹-۳)$$

که در آن:

W= عرض فوقانی حفره آبشستگی در یک سمت پایه یا شالوده، m

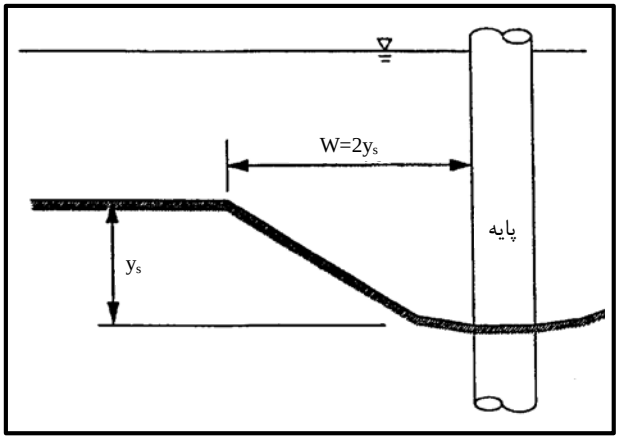
y_s = عمق آبشستگی، m

۱- Bascule piers

K = عرض کف حفره آبشستگی که تابعی از عمق آبشستگی است، m

θ = زاویه ایستایی مواد بستر که عمدتا بین ۳۰ تا ۴۴ درجه است.

زاویه ایستایی مصالح غیرچسبنده در هوا در دامنه ۳۰ تا ۴۴ درجه قرار دارد. بنابراین اگر عرض کف حفره آبشستگی مساوی با عمق آبشستگی y_s $(K=1)$ باشد، عرض فوقانی در ماسه غیرچسبنده بین $2.07\ y_s$ تا $2.8\ y_s$ تغییر می‌کند. در حد انتهایی دیگر، اگر $K=0$، عرض فوقانی بین $1.07\ y_s$ تا $1.8\ y_s$ تغییر می‌کند. بنابراین عرض فوقانی می‌تواند در دامنه $1.0\ y_s$ تا $2.8\ y_s$ تغییر کند و به عرض کف حفره آبشستگی و ترکیب مواد بستر بستگی دارد. در کل هر چقدر حفره آبشستگی عمیق‌تر باشد، عرض کف آن کوچک‌تر خواهد بود. در آب، زاویه ایستایی مصالح غیرچسبنده کم‌تر از مقادیر داده شده برای هوا است در نتیجه عرض فوقانی برابر با $2.0\ y_s$ برای شرایط عملی و کاربردی پیشنهاد می‌شود (شکل ۳-۵۷).



شکل ۳-۵۷- نمای جانبی با نمایش عرض فوقانی حفره آبشستگی در بالادست پایه پل تراز بستر کانال بالادست با شیب حدود ۲ به ۱ به کف حفره آبشستگی می‌رسد [۱۲۷]

۳-۵-۵- آبشستگی موضعی در تکیه‌گاه پل‌ها

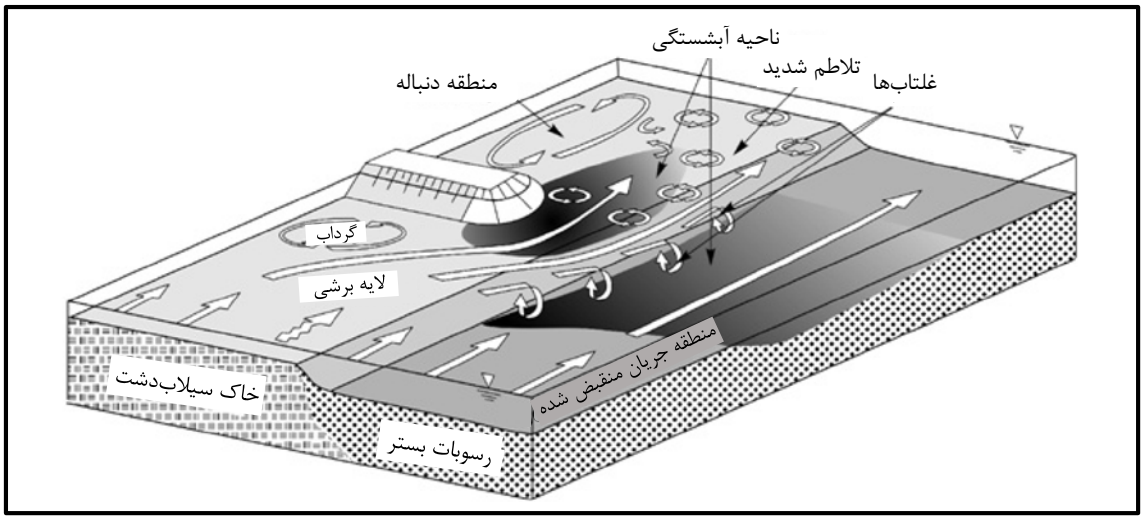
آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه‌ها هنگامی رخ می‌دهد که تکیه‌گاه و خاکریز جاده مانع و محدودیتی برای جریان ایجاد می‌کند. دلایل عمده تخریب تکیه‌گاه‌ها (بر اساس مشاهدات میدانی پس از وقوع سیلاب‌ها) عبارتند از [۱۵۸]:

- جریان سرریزی و عبور جریان از روی تکیه‌گاه‌ها و خاکریزهای دسترسی
- مهاجرت جانبی رودخانه یا فرایندهایی که موجب عریض شدن رودخانه می‌شوند.
- آبشستگی تنگ‌شدگی
- آبشستگی موضعی در اطراف یک یا هر دو تکیه‌گاه

آسیب و خسارت به تکیه‌گاه‌ها معمولا به واسطه ترکیبی از عوامل فوق صورت می‌گیرد. به‌عنوان یک قانون کلی، تکیه‌گاه‌هایی که در نزدیکی کناره‌های رودخانه واقع می‌شوند، بیش‌تر در معرض خسارت هستند. در تکیه‌گاه‌هایی که دور

از کناره‌های رودخانه هستند، به‌ویژه در سیلابدشت‌های عریض، حفره‌های آبشستگی موضعی بزرگی مشاهده شده است که عمق آبشستگی در برخی از آن‌ها به چهار برابر عمق جریان نزدیک‌شونده در روی سیلابدشت هم می‌رسد.

سد شدن جریان توسط تکیه‌گاه و خاکریز دسترسی جاده، موجب شتاب گرفتن جریان و شکل‌گیری گردابی می‌شود که از انتهای بالادست تکیه‌گاه شروع شده و در امتداد پنجه تکیه‌گاه پیشروی می‌کند. معمولا یک گرداب دنباله[1] هم در پایین‌دست خاکریز تشکیل می‌شود (شکل ۳-۵۸).



شکل ۳-۵۸- آبشستگی تکیه‌گاه در یک آبراهه مرکب [۱۲۷]

گردابی که در پایین‌دست تکیه‌گاه تشکیل می‌شود شبیه گرداب دنباله است که در پایین‌دست پایه پل تشکیل می‌شود. تحقیقات زیادی به منظور تعیین عمق و محل حفره آبشستگی که به دلیل گرداب ناشی از وجود تکیه‌گاه تشکیل می‌شود، انجام شده است و معادله‌های متعددی هم برای تعیین این عمق آبشستگی ارائه شده است. تخریب تکیه‌گاه و فرسایش خاکریز جاده ممکن است به‌واسطه گرداب دنباله در پایین‌دست نیز رخ دهد. نمونه‌ای از فرسایش تکیه‌گاه و خاکریز دسترسی پل در نتیجه فعالیت جریان‌های گردابی مختلف در شکل (۳-۵۹) نشان داده شده است.

شکل ۳-۵۹- آبشستگی تکیه‌گاه پل و خاکریز دسترسی [۱۲۷]

۱- Wake vortex

انواع مختلف تخریب که در بالا به آن‌ها اشاره شده است، نتیجه انسداد جریان به دلیل وجود تکیه‌گاه و خاکریزهای جاده و در ادامه تنگ‌شدگی و تلاطم جریان در اطراف تکیه‌گاه‌ها است. شرایط دیگری نیز وجود دارد که در حین سیلاب‌های بزرگ به‌ویژه در سیلابدشت‌های عریض رخ می‌دهند ولی پیش‌بینی آن‌ها مشکل‌تر می‌باشد ولی با این حال لازم است تا در تحلیل هیدرولیکی و طراحی زیرسازه پل به آن‌ها توجه شود [۱۵۸]:

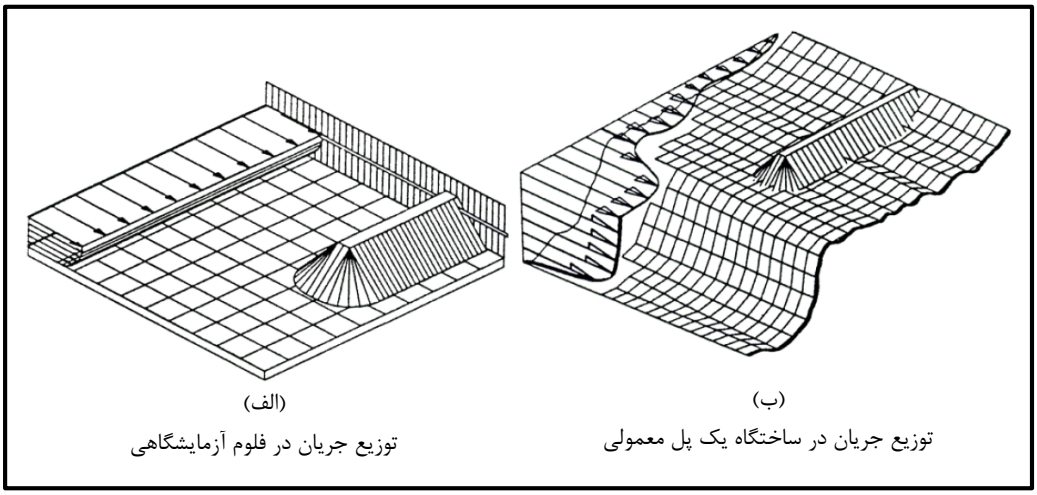
- گودال‌های شنی در سیلابدشت بالادست یک سازه می‌توانند جریان را به دام انداخته و جریان آبراهه اصلی را به بیرون از کناره‌های طبیعی آن و به طرف گودال‌ها منحرف کنند. این مسئله موجب جریان‌هایی با زاویه حمله معکوس روی جاده پایین‌دست شده که نتیجه آن تضعیف و شکست خاکریز و تکیه‌گاه می‌باشد.
- خاکریزهای ساحلی (گوره‌ها) نیز می‌توانند تضعیف و تخریب شوند که نتیجه آن جریان‌های معکوس در اطراف تکیه‌گاه پل می‌باشد.
- واریزه‌ها ممکن است در تکیه‌گاه و پایه‌ها و نیز روسازه پل گیرکنند و با تغییر شرایط، جریان‌هایی با زوایه حمله معکوس به سمت تکیه‌گاه و پایه‌های پل ایجاد کنند.

۳-۵-۵-۱- محاسبه آبشستگی تکیه‌گاه‌ها

روش‌ها و معادلات کاربردی برای برآورد عمق آبشستگی موضعی در دماغه و اطراف تکیه‌گاه‌های پل، همراه با مثال‌های کاربردی در پیوست شماره ۳ معرفی شده‌اند.

معادله‌های پیش‌بینی عمق آبشستگی تکیه‌گاه پل از جمله لیو و همکاران [۱۶۶]، لارسن [۱۶۲ و ۱۶۳]، فروهلیچ [۱۳۱] و ملویل [۱۶۸ و ۱۶۹] همگی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی هستند. داده‌های میدانی کم، مشکلی است که در زمینه آبشستگی تکیه‌گاه پل وجود داد.

تا این اواخر در بیش‌تر معادله‌های ارائه شده در منابع، طول تکیه‌گاه و خاکریز دسترسی یکی از متغیرهای موجود در معادله‌ها بوده است. این رویکرد منجر به محاسبه عمق‌های آبشستگی اضافی و محافظه‌کارانه می‌شود، چون بده جریانی که در فلوم‌های آزمایشگاهی توسط تکیه‌گاه سد می شود رابطه مستقیمی با طول تکیه‌گاه دارد درحالی‌که در شرایط میدانی این وضعیت چندان مصداق ندارد. شکل (۳-۶۰) این نکته را نشان می‌دهد. بنابراین اگر بده جریانی که تکیه‌گاه و خاکریز در مقابل آن حائل می‌شوند به‌جای طول آن‌ها استفاده شود، معادله‌های پیش‌بینی آبشستگی تکیه‌گاه برای شرایط میدانی و واقعی کاربردی‌تر خواهند شد. استورم [۱۹۷ و ۱۹۸] نتیجه‌گیری کرد که استفاده از یک ضریب توزیع بده جریان در معادله‌های برآورد عمق آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل به‌جای طول تکیه‌گاه، متغیر مناسب‌تری است.



شکل ۳-۶۰- مشخصه‌های توزیع جریان: (الف) در فلوم آزمایشگاهی با کف تخت، (ب) تکیه‌گاه یک پل معمولی در شرایط واقعی

در تحقیقی که توسط موسسه تحقیقات ملی بزرگراه‌های امریکا NCHRP (2011) در زمینه فرایندهای آبشستگی تکیه‌گاه و روش‌های پیش‌بینی عمق آبشستگی انجام شده است، نتایج و توصیه‌های پیشنهادی به منظور ارزیابی آبشستگی تکیه‌گاه و طراحی تکیه‌گاه به شرح زیر عنوان شده است [۱۹۸]:

- آبشستگی تنگ‌شدگی باید به‌عنوان عمق آبشستگی مرجع در محاسبه آبشستگی تکیه‌گاه در نظر گرفته شود. آبشستگی تکیه‌گاه باید به صورت حاصل‌ضرب آبشستگی تنگ‌شدگی (که به‌وسیله جریان شتاب‌دار در مقطع تنگ‌شده رخ می‌دهد) در ضریبی که اثرات تلاطمی گردابه‌های بزرگ مقیاس جریان را در بر دارد، تعیین شود. این رویکرد جایگزین روش فعلی برای اضافه کردن آبشستگی تنگ‌شدگی به آبشستگی تکیه‌گاه که به صورت جداگانه محاسبه می‌شود است.
- تکیه‌گاه‌ها باید طوری طراحی شوند که کم‌ترین فاصله عقب‌نشینی از کناره آبراهه اصلی را داشته و همراه با حفاظت روکش سنگریزه‌ای خاکریز و کف‌بند سنگریزه‌ای برای حفاظت در مقابل آبشستگی باشد. فاصله عقب‌نشینی باید با عرض کف‌بند (بر مبنای توصیه‌های FHWA, 2009) سازگار باشد [۱۲۴].
- به طور معمول باید از مدل‌های دو بعدی برای تمام تقاطع‌های پل‌ها به‌جز موارد ساده، استفاده شود.

شالوده تکیه‌گاه نیز باید به‌گونه‌ای طراحی شود که در مقابل ترازکاهی بلند مدت، مهاجرت جانبی و آبشستگی تنگ‌شدگی محفوظ بماند و با استفاده از روش‌هایی نظیر سنگریزه، دیواره‌های هادی[۱] و دیواره‌های ساحلی[۲] در مقابل آبشستگی موضعی حفاظت شود.

۱- Guide bank
۲- Dike (= dyke)

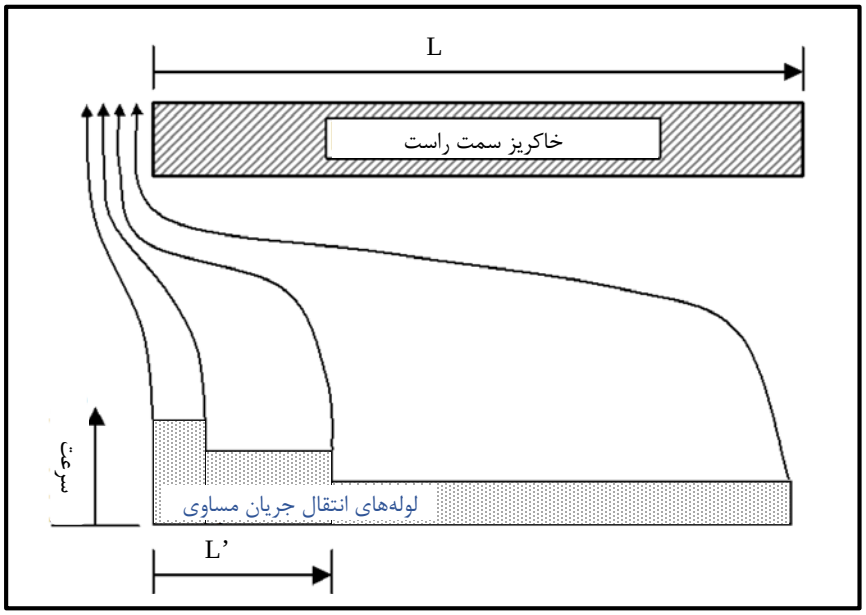
۳-۵-۵-۲- تعیین پارامترهای آبشستگی تکیه‌گاه

طول خاکریز در امتداد عمود بر جریان که در بیش‌تر معادله‌های برآورد آبشستگی تکیه‌گاه پل به چشم می‌خورد، بر اساس نتایج به‌دست آمده از مدل‌های هیدرولیکی یک‌بعدی نظیر HEC-RAS بوده است که یک سرعت متوسط را برای کل سطح مقطع در نظر می‌گیرند. در شرایط واقعی، یعنی در سیلابدشت‌های عریض و با عمق کم جریان و نیز پوشش گیاهی سنگین، ظرفیت انتقال و سرعت و عمق جریان مربوط به آن در قسمت‌های کناری سیلابدشت بسیار کم‌تر است. این بخش از جریان، به طور معمول «جریان غیرموثر» نامیده می شود. بنابراین هنگام استفاده از معادله‌های آبشستگی تکیه‌گاه پل که از طول خاکریز در امتداد عمود بر جریان استفاده می‌کنند، لازم است تا طولی از خاکریز که در اصطلاح «جریان زنده[۱]» را سد می‌کند، به‌کار برده شود.

طولی از خاکریز که جریان زنده را سد می‌کند را می‌توان از نمودار انتقال در مقابل فاصله در امتداد عرضی یک سطح مقطع معرف در بالادست یک پل تعیین کرد (شکل ۳-۶۱). اگر بخش بزرگی از یک سطح مقطع برای انتقال مقدار مشخصی از بده در یک سیلابدشت مورد نیاز باشد، آنگاه طولی از خاکریز که این جریان را سد می‌کند نباید در تعیین طول خاکریز که در معادله پیش‌بینی آبشستگی تکیه‌گاه استفاده خواهد شد، لحاظ گردد. همچنین اگر جریان در بخش قابل‌ملاحظه‌ای از مقطع که سرعت پایین و یا عمق کمی دارد نیز طولی از خاکریز که در مقابل آن حائل می‌شود نباید در معادله‌های آبشستگی استفاده شود. HEC-RAS به آسانی مقدار انتقال در مقابل فاصله را در یک مقطع محاسبه می‌کند.

برای مثال شکل (۳-۶۱) نمای پلان از خاکریزی که سه لوله انتقال مساوی در سیلابدشت سمت راست پل را مسدود کرده است را نشان می‌دهد. بنابراین چون لوله انتقال سمت راست که بخش عمده سیلابدشت را نیز اشغال کرده فقط یک‌سوم جریان سیلابدشت را انتقال می‌دهد، نباید جزو مساحت جریان زنده، به منظور محاسبه L'، لحاظ شود. در این مورد، طول L' خاکریز که جریان زنده را سد می‌کند تقریبا برابر است با طول دو لوله انتقال داخلی‌تر. در حالتی که نمودار انتقال در مقابل فاصله، نقطه تفکیک مشخصی را بین جریان زنده و جریان غیرموثر نشان نمی‌دهد، روش جایگزین برای تعیین L' به این ترتیب است که عرض لوله انتقال بلافاصله در بالادست خاکریز در تعداد کل لوله‌های انتقال (شامل بخش‌های جزئی) که توسط خاکریز سد شده است ضرب شود. این طول بیش‌تر معرف جریان یکنواخت در شرایط آزمایشگاهی است که در توسعه و استخراج معادله‌های آبشستگی تکیه‌گاه استفاده می‌شود.

۱- Live flow



شکل ۳-۶۱- طولی از خاکریز که جریان زنده را سد می‌کند [۱۲۶]

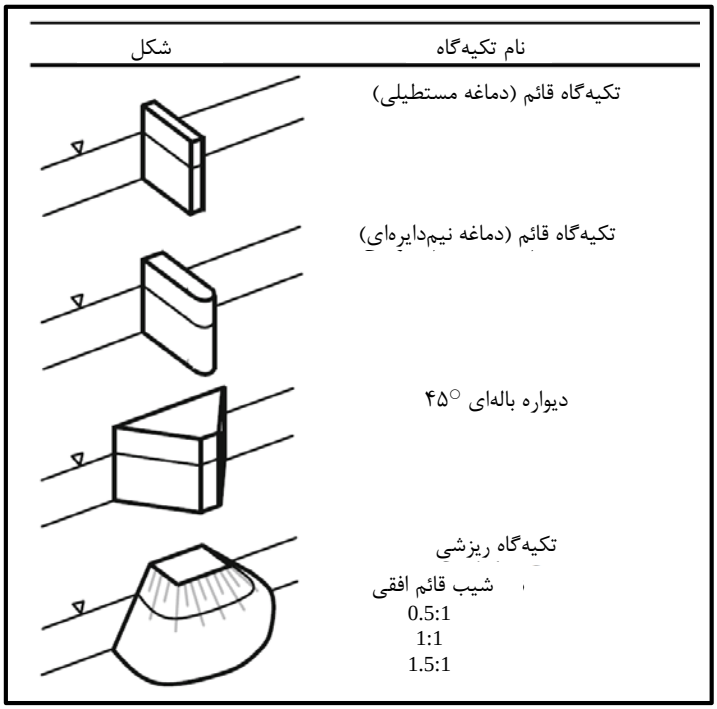
- شرایط محل تکیه‌گاه

تکیه‌گاه‌ها ممکن است یا از کناره طبیعی رودخانه فاصله داشته باشند، یا روی خط کناره باشند و یا در برخی موارد در داخل آبراهه اصلی رودخانه واقع شده باشند. طراحی‌های متداول شامل تکیه‌گاه‌های متصل به ساحل و در سه نوع اصلی شیب‌دار ریزشی[۱]، تکیه‌گاه قائم[۲] ساده (با دماغه مستطیلی یا نیم‌دایره‌ای) و تکیه‌گاه قائم با دیواره‌های باله‌ای[۳] می‌باشند (شکل ۳-۶۲). آبشستگی موضعی تکیه‌گاه می‌تواند به صورت آب صاف یا بستر متحرک باشد. پل و جاده دسترسی ممکن است آبراهه اصلی رودخانه و سیلابدشت آن را به طور مورب قطع کرده باشند که این مسئله بر شرایط جریان در اطراف تکیه‌گاه تاثیر خواهد گذاشت. همچنین مقدار متغیری از جریان روکرانه توسط خاکریزهای دسترسی به پل، سد شده و به‌طرف تکیه‌گاه و آبراهه اصلی رودخانه برگردانده می‌شود. آبشستگی شدید تکیه‌گاه زمانی رخ می‌دهد که بخش عمده جریان روکرانه در بالادست مقطع پل، مستقیما به طرف پل برمی‌گردد. آبشستگی با شدت کم‌تر هم زمانی اتفاق می‌افتد که جریان روکرانه در بالادست تقاطع پل به‌تدریج به سمت آبراهه اصلی رودخانه برمی‌گردد.

۱- Spill-through abutment

۲- Vertical wall abutment

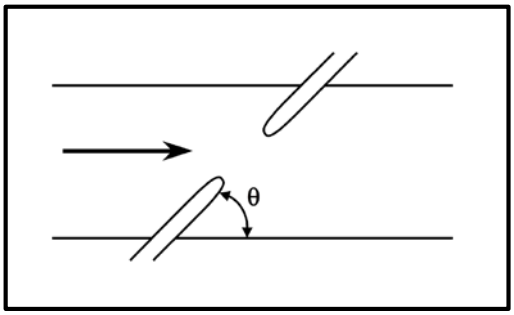
۳- Vertical wall with wingwall abutment



شکل ۳-۶۲- انواع متداول تکیه‌گاه پل‌ها [۱۴۴]

- جانمایی مورب تکیه‌گاه

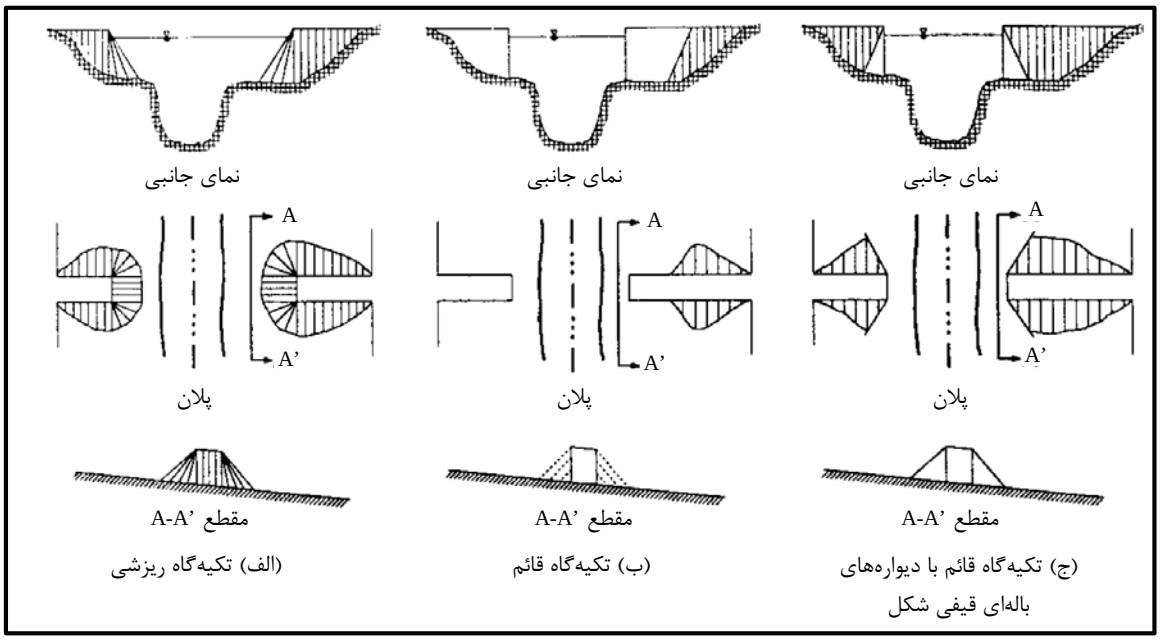
زاویه انحراف یک تکیه‌گاه (خاکریز) در شکل (۳-۶۳) نشان داده شده است. برای تکیه‌گاهی که به سمت پایین‌دست متمایل شده، عمق آبشستگی کاهش و برای تکیه‌گاهی که رو به بالادست منحرف شده، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. معادله و دستورالعمل مورد نیاز برای محاسبه عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌های مورب در بخش‌های بعدی ارائه شده است.



شکل ۳-۶۳- زاویه جهت‌گیری تکیه‌گاه نسبت به جریان [۱۲۶]

- شکل تکیه‌گاه

در شکل (۳-۶۴) پلان و مقطع سه نوع تکیه‌گاه (۱- تکیه‌گاه ریزشی، ۲- تکیه‌گاه قائم بدون دیواره باله‌ای و ۳- تکیه‌گاه قائم با دیواره باله‌ای) هنگام قرارگیری روی رودخانه نشان داده شده است. این شکل‌ها زاویه متفاوتی نسبت به جریان دارند. مطابق جدول (۳-۳)، عمق آبشستگی مربوط به تکیه‌گاه قائم تقریبا دو برابر تکیه‌گاه ریزشی است. از طرفی آبشستگی در تکیه‌گاه قائم با دیواره باله‌ای (در مقایسه با تکیه‌گاه قائم بدون دیواره باله‌ای) ۸۲ درصد کاهش یافته است.



شکل ۳-۶۴- انواع تکیه‌گاه پل‌ها (الف) خاکریز ریزشی، (ب) تکیه‌گاه قائم، (ج) تکیه‌گاه قائم با دیواره‌های بالهای [۱۲۷]

جدول ۳-۳- ضریب شکل انواع مختلف تکیه‌گاه‌ها

نوع تکیه‌گاه	K_1
تکیه‌گاه قائم	1.00
تکیه‌گاه قائم با دیواره بالهای	0.82
تکیه‌گاه ریزشی	0.55

- دیواره هادی

دیواره هادی، سازه‌ای (خاکریز یا بتنی یا غیره) برای هدایت جریان رودخانه به سمت پل و آبگذر است که علاوه بر کمک به تثبیت محل پل، در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های پل نیز موثر است. ضوابط و ملاحظات طراحی دیواره‌های هادی برای پل‌ها در گزارش تحقیقاتی شماره (گ-۷۳۶) مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۹۵) ارائه شده است [۲۰]. روابط مشخص و قطعی برای برآورد میزان اثر دیواره هادی گزارش نشده است ولی برای نمایش شدت اثربخشی انواع دیواره هادی و مقایسه آن‌ها می‌توان به نتایج مطالعات مدل فیزیکی فتحی و زراتی و سلامتیان (۲۰۱۱) مراجعه نمود [۱۲۱].

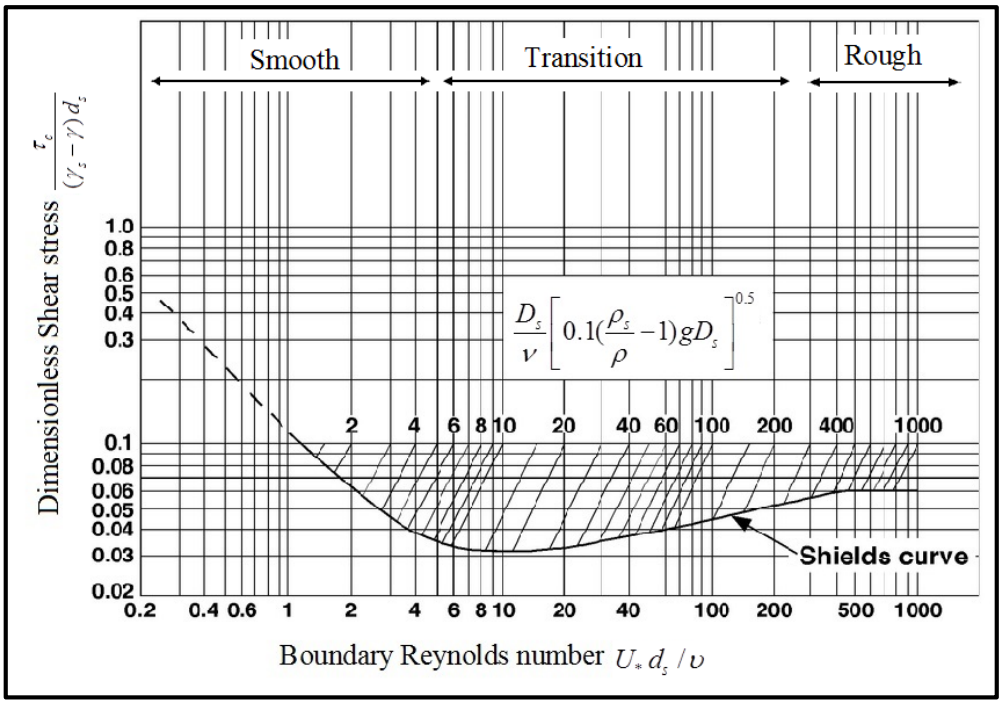
۳-۶- مطالعات انتقال مواد جامد و شناور

انتقال مواد جامد در جریان سیلابی در دو حالت به صورت موارد رسوبی (معلق و کف) و مواد شناور می‌باشد.

۳-۶-۱- انتقال مواد رسوبی

رودخانه‌های آبرفتی به طور عمده تحت تاثیر دو پدیده مهم ناپایداری یعنی تغییر در میزان فرسایش و رسوب‌گذاری قرار می‌گیرند. فرسایش به معنای جدا شدن و حرکت مصالح رسوبی موجود در بستر رودخانه توسط جریان آب است که

این مصالح به بازه‌های پایین‌دست منتقل می شوند. این فرایند می‌تواند به صورت تدریجی یا آنی صورت گیرد. در حالت تدریجی، شرایط متوسط جریان در بازه‌ای از رودخانه باید بیش‌تر از حد آستانه حرکت ذرات رسوبی باشد. حد آستانه حرکت ذرات رسوبی در رودخانه‌های طبیعی با شیب ملایم به مشخصات رسوبی (مانند اندازه و چگالی) بستگی دارد. برای تعیین این حد آستانه، روابط تجربی متعددی وجود دارد که می‌توان به آن‌ها استناد کرد (شکل ۳-۶۵).

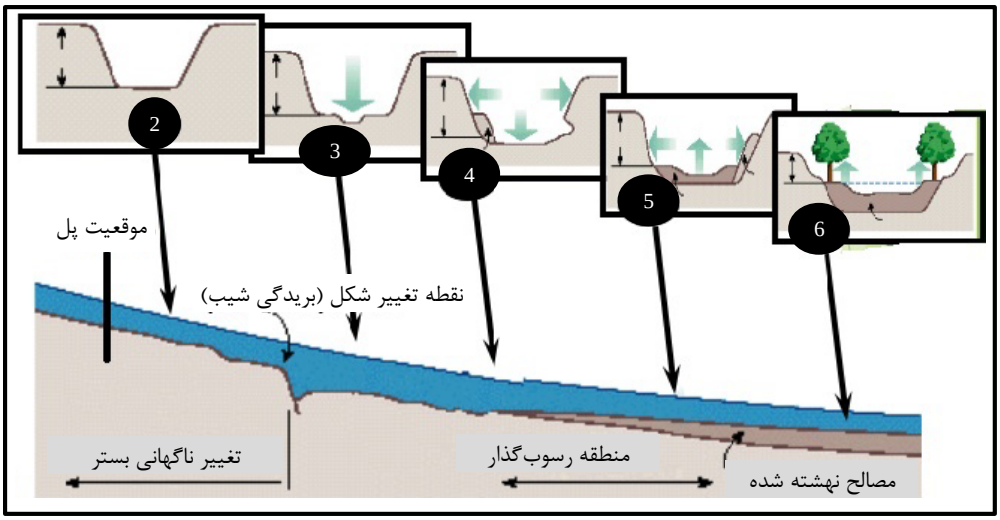


شکل ۳-۶۵- دیاگرام شیلدز برای تعیین آستانه حرکت مصالح بستر رودخانه

در صورتی که تنش برشی یا سرعت جریان از حد آستانه حرکت ذرات بیش‌تر باشد، فرسایش بستر رخ می‌دهد و بستر به تدریج گود می شود. نرخ فرسایش به تفاوت شرایط جریان و حد آستانه بستگی دارد، هر چه این تفاوت بیش‌تر باشد، نرخ انتقال رسوب نیز افزایش می‌یابد. رودخانه‌های کوهستانی به دلیل شیب زیاد، پتانسیل بالایی برای انتقال رسوب دارند در حالی که رودخانه‌های جلگه‌ای فرسایش کم‌تری را تجربه می‌کنند.

رسوباتی که منتقل می‌شوند به دو دسته بار بستر و بار معلق تقسیم می‌شوند. بار رسوب معمولا بر حسب کیلوگرم بر ثانیه یا تن در روز اندازه‌گیری می‌شود و درصد بار بستر معمولا کم‌تر از ۵۰٪ کل رسوبات در حال حرکت است. در رودخانه‌های کوهستانی ممکن است این در صد به حدود ۵۰٪ بر سد در حالی که در رودخانه‌های جلگه‌ای کم‌تر از ۱۰٪ است. غلظت رسوب معلق در عمق آب در نزدیکی بستر بیش‌تر و در سطح آب کم‌تر است. داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط ایستگاه‌های هیدرومتری به تحلیل شرایط نرخ انتقال رسوب کمک می‌کند و برای ارزیابی عمر سازه‌هایی نظیر سدها و پل‌ها کاربرد دارد. در مناطق کوهستانی، احتمال انتقال سنگ‌های بزرگ (تا قطر یک متر) وجود دارد که پیش‌بینی نیروهای مومنتم ناشی از برخورد این سنگ‌ها به سازه‌ها را تسهیل می‌کند.

علاوه بر فرسایش عمومی، نوع دیگری از فرسایش‌ها وجود دارد که انتقال مواد رسوبی بستر را با نرخ بسیار بالاتری در مدت کوتاهی انجام می‌دهد. در این فرسایش‌ها، بستر رودخانه ممکن است به طور آنی و در یک سیل چندین متر گود شود. یکی از این فرسایش‌ها فرسایش آبکندی است که در نتیجه وجود پله یا اختلاف ناگهانی سطح بستر یا سطح آب آغاز می‌شود (شکل ۳-۶۶). در این شرایط تنش برشی بستر به صورت موضعی تحت‌تاثیر الگوی سه‌بعدی جریان به شدت افزایش می‌یابد و مواد بستر با شدت به پایین‌دست منتقل می شوند. این مهاجرت پله موجب تعمیق بستر رودخانه در بالادست تا کیلومترها و افزایش عرض آبراهه می شود و در نتیجه حجم زیادی از رسوب به جریان رودخانه وارد می شود. رسوبات در بازه‌های پایین‌دست نهشته می شوند. لذا اگر سازه پل در موقعیت بالادست پله (شکل ۳-۶۶) اجرا شود، با رسیدن فرسایش آبکندی به محل پل، سازه در معرض تخریب قرار خواهد گرفت.



شکل ۳-۶۶- تغییرات ابعاد رودخانه در اثر مهاجرت فرسایش آبکندی به طرف بالادست رودخانه

پدیده دیگری مرتبط با انتقال رسوب در رودخانه‌ها، نهشته شدن رسوب است که تحت دو مکانیزم متفاوت رخ می‌دهد. اولین مکانیزم در شرایط جریان یک بعدی با کاهش سرعت جریان، مانند نهشته شدن رسوب در مخازن سدها و حوضچه‌های ته‌نشینی، اتفاق می‌افتد. نهشته شدن رسوبات در سیلابدشت‌های رودخانه در زمان فروکش سیلاب نیز به همین دلیل است. از سوی دیگر رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها غالبا به شکل پشته‌های رسوبی[1] دیده می شود که ناشی از الگوهای خاص جریان است. این پشته‌ها ممکن است در پیچ‌های داخلی به دلیل جریان ثانویه (شکل ۳-۶۷) یا در اثر ایجاد جریان گردابه افقی آزاد در منطقه جداشدگی جریان (شکل ۳-۶۸) شکل بگیرند. پشته‌های آزاد معمولا دارای ابعاد بزرگ‌تری هستند و در جهت جریان کشیده می شوند. نرخ نهشته شدن رسوب به وجود رسوب همراه جریان و قدرت گردابه‌ها بستگی دارد که این شرایط در زمان سیلاب امکان‌پذیر است. بنابراین پشته‌های رسوبی عمدتا در زمان سیلاب ایجاد و یا گسترش می‌یابند و با فروکش کردن سیلاب نمایان می‌شوند. شکل (۳-۶۹) نمونه‌ای از پشته‌های رسوبی

۱- River bars

پایین‌دست یک پل در کشور ایتالیا را نشان می‌دهد. مدیریت این پشته‌ها به دلیل وسعت و گرایش آن‌ها به جابجایی (طولی و عرضی) و تغییر ابعاد و فرم چالش‌برانگیز است و نه تنها می‌توانند مسیر جریان رودخانه را جابجا کنند، بلکه ممکن است دهانه‌های آبگیرها و پل‌ها را مسدود نمایند.

شکل ۳-۶۷- تشکیل پشته رسوبی در پیچ داخلی رودخانه

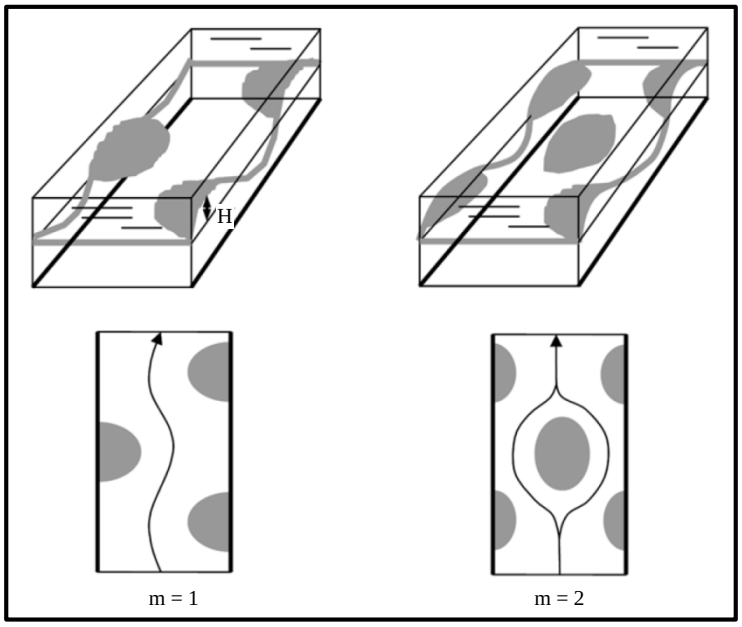
شکل ۳-۶۸- جداشدگی جریان در اثر خاکریزی در رودخانه

شکل ۳-۶۹- نمونه‌ای از پشته‌های رسوبی عرضی تشکیل شده در پایین‌دست پل در کشور ایتالیا [۱۱۱]

هر دو عامل گفته شده (شرایط پیچ داخلی و یا الگوی جریان افقی) و نیز تامین رسوب بیش از ظرفیت در اثر آبشستگی اطراف پایه می‌توانند در تشکیل پشته‌های رسوبی در پایین‌دست پایه پل‌ها موثر باشند و ابعاد این پشته‌ها بستگی به ابعاد پایه پل دارد. البته پشته‌های ایجاد شده بالادست و پایین‌دست تکیه‌گاه عمدتا از نوع آزاد می‌باشند زیرا علت اصلی تشکیل آن‌ها جداشدگی جریان می‌باشد که به‌دلیل پیشروی تکیه‌گاه درون رودخانه به‌وجود آمده است. ابعاد این پشته‌ها هم به میزان پیشروی تکیه‌گاه درون رودخانه دارد.

طول‌موج پشته‌های عرضی تعیین می‌کند که چند پشته در یک مقطع آبراهه وجود دارد که «رژیم پشته‌ها» را تعریف می‌کند. شاخص پشته‌ها که با حرف m نشان داده می شود عبارت است از تعداد نصف طول‌موج‌های عرضی در مقطع آبراهه. به عبارت دیگر این شاخص، تعداد ردیف‌های پشته‌های متناوب موجود در یک مقطع آبراهه اصلی رودخانه را بیان

می‌کند (شکل ۳-۷۰). این پارامتر بیش‌ترین ا ستفاده را برای تعریف رژیم پشته‌ها در یک آبراهه ا صلی رودخانه‌ها ا ست. مقدار m به نسبت عرض به عمق یک مقطع بستگی دارد. یک آبراهه کم عمق عریض در مقایسه با آبراهه باریک عمیق تعداد پشته‌های بیش‌تری دارد.



شکل ۳-۷۰- نمونه‌ای از تعیین مقدار m

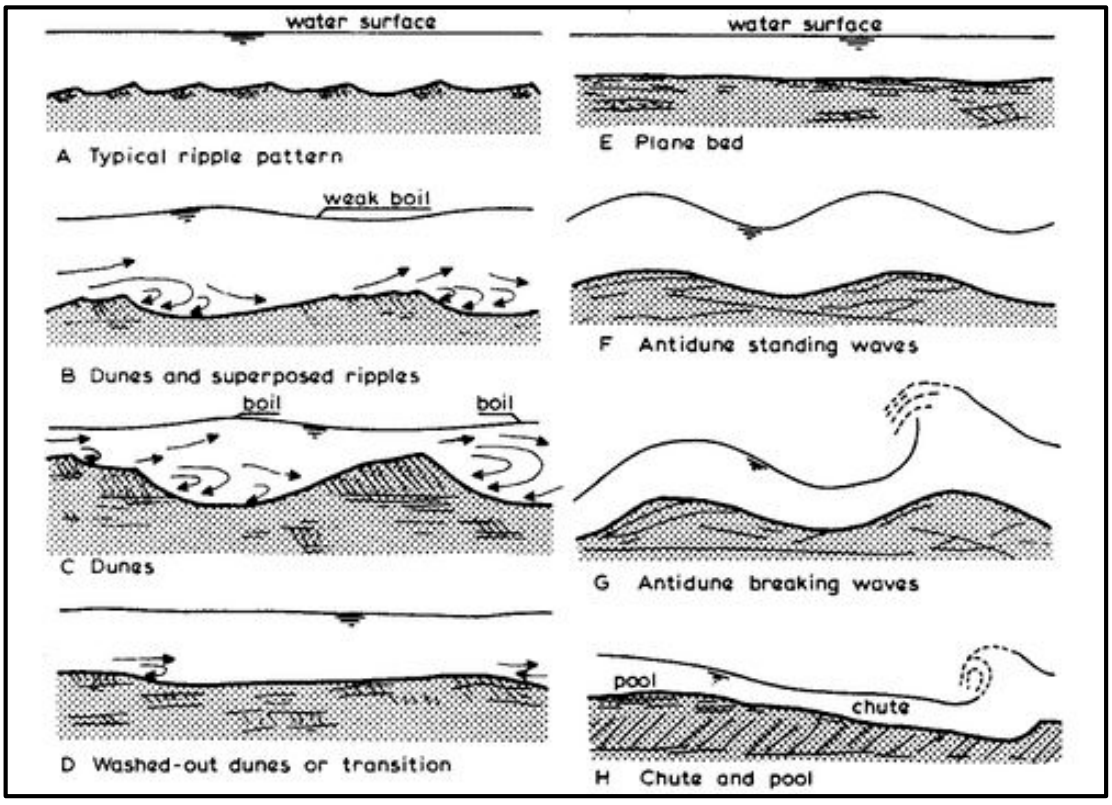
مقدار m همچنین می‌تواند برای پیش‌بینی شکل پلان رودخانه (پیچانرودی یا شریانی) استفاده شود. بیش‌ترین حالت احتمالی m، را می‌توان از رابطه کرو ساتو و مو سلمن (۲۰۰۹) برای رودخانه‌های با ن سبت عرض به عمق زیر ۱۰۰ تعیین کرد [۱۱۱]:

$$m^2 = 0.17g\frac{(b-3)}{\sqrt{\Delta D_{50}}}\frac{B^3 S}{C Q_{wbf}} \qquad (۴۰-۳)$$

در این رابطه: Q_{wbf} برابر بده لبریز (m^3/s)، B عرض رودخانه (m)، S شیب طولی رودخانه، Δ چگالی اشباع ر سوبات، D_{50} اندازه متو سط ر سوبات (m)، C ضریب شزی و b نیز توان سرعت در رابطه انتقال ر سوب می‌با شد که مقدار آن برای رودخانه‌های شنی برابر ۱۰ و برای رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای نیز برابر ۴ است [۱۱۱].

۳-۶-۱-۱- فرم‌های بستر

بستر رودخانه‌های طبیعی همیشه مسطح نبوده بلکه با شروع حرکت ر سوب، پستی و بلندی‌هایی ظاهر می‌شوند که به آن‌ها فرم بستر می‌گویند. ابعاد این پستی و بلندی‌ها به خصوصیات رسوب بستر و شرایط هیدرولیکی رودخانه بستگی دارد به طوری‌که با افزایش شرایط جریان، ابعاد این فرم‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳-۷۱).

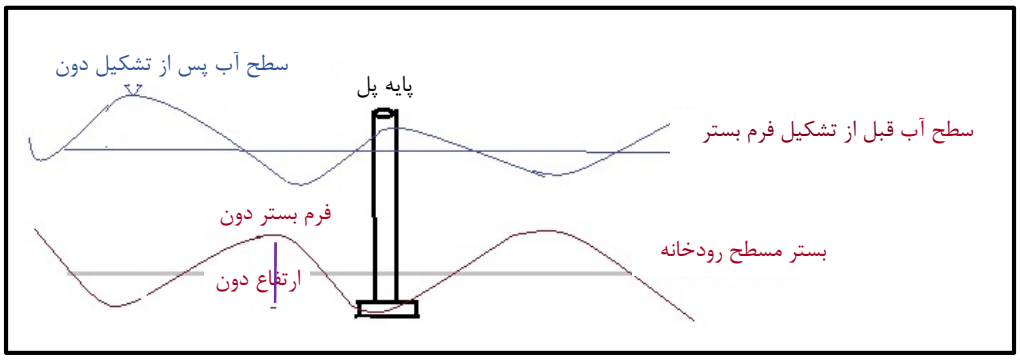


شکل ۳-۷۱- انواع فرم‌های بستر در آبراهه های بستر ماسه‌ای

در شرایط جریان زیر بحرانی، فرم‌های سمت راست شکل (۳-۷۱) تشکیل می‌شوند. در ابتدا فرم ریپل با ارتفاع امواج در حد سانتی‌متر ایجاد می‌شود اما با افزایش شدت جریان، این موج‌ها بزرگ‌تر شده و به دون (تلماسه‌ای) تبدیل می‌شوند که ارتفاع آن‌ها ممکن است به چندین متر برسد. در نهایت با ادامه افزایش جریان، دون‌ها شسته شده و بستر مسطح و صافی تشکیل می‌شود.

در شرایط جریان فوق بحرانی، موج‌ها بزرگ‌تر شده و به صورت الگوهای سمت چپ شکل (۳-۷۱) ظاهر می شوند. تشکیل فرم بستر باعث افزایش مقاومت در مقابل جریان و افزایش زبری بستر می‌شود که در نتیجه عمق آب نیز افزایش می‌یابد. این فرم‌های بستر ساکن نیستند و در حال حرکت‌اند به طوری‌که با عبور آن‌ها، تراز بستر رودخانه به طور متناوب گود و مرتفع می‌شود و سطح آب نیز تحت تاثیر تغییرات بستر به طور مرتب بالا و پایین می‌رود.

خطرناک‌ترین فرم بستر که در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای و در زمان سیلاب به‌وجود می‌آید، فرم دون (تلماسه‌ای) است. این فرم با عبور از محل پل، بستر رودخانه را گود کرده و سپس دوباره پر می‌شود. به دلیل ابعاد بزرگ این فرم، میزان گودی ممکن است به چند متر برسد و در همین لحظه می‌تواند باعث تخریب پایه یا کوله پل گردد (شکل ۳-۷۲).



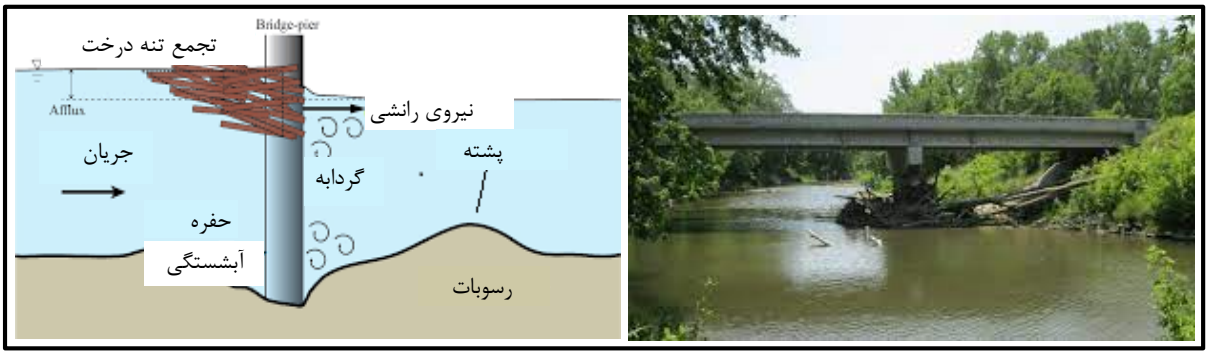
شکل ۳-۷۲- فرم بستر دون (تلماسه‌ای) در حین عبور از محل پل، در آبراهه‌های بستر ماسه‌ای

۳-۶-۲- انتقال اجسام شناور و انسداد

علاوه بر رسوب که توسط رودخانه‌ها منتقل می‌شود، اجسام زیادی از قبیل بوته، خار و خاشاک، اجسام پلاستیکی، لاشه حیوانات، تنه درختان، نخاله‌های ساختمانی سبک نظیر یونولیت، قطعات بتنی و لاشه خودروهای سقوط کرده در دره‌های کوهستانی به همراه جریان آب رودخانه در زمان سیلاب به پایین‌دست منتقل می‌شوند. انباشته شدن این مواد در بالادست یا درطول سازه‌های پل و آبگذر باعث تغییر شرایط انتقال رسوب و آبشستگی اطراف سازه‌های پل و آبگذر می‌شود.

۳-۶-۲-۱- بررسی وضعیت انسداد در پل‌ها

گیرکردن اجسام شناور و مستغرق به‌خصوص تنه درختان، شاخ و برگ گیاهان و نظایر آن در بالادست پل باعث می‌شود که بخشی از فضای دهانه‌های پل مسدود و ظرفیت انتقال جریان سیلابی کاهش یابد. در نتیجه سطح آب بالادست بیش از حد طراحی بالا آمده و احتمال این‌که از روی عرشه پل عبور کند، افزایش خواهد یافت. در این شرایط، عرشه مستغرق شده و تحت‌تاثیر نیروی شناوری، امکان بالاروی عرشه و تخریب آن افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سطح آب در بالادست باعث می شود تا اراضی و ابنیه حاشیه رودخانه سیلابی شده و خسارت‌هایی را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، بوته و تنه درختان در جلوی پایه منجر به جداشدگی بیش‌تر جریان و تقویت الگوهای جریان عامل آبشستگی شده که منجر به افزایش عمق آبشستگی اطراف پایه‌ها و کوله‌ها می‌گردد (شکل ۳-۷۳). مطالعات تجربی و میدانی زیادی در این خصوص انجام شده است که مبین صحت مطالب فوق می‌باشد. مطالعات انجام شده در آمریکا نشان می‌دهد که تقریبا یک سوم پل‌هایی که تخریب شده‌اند به دلیل آبشستگی بیش از حد در اثر تجمع مواد شناور اطراف پایه و تکیه‌گاه‌ها بوده است. در انگلستان تجمع مواد شناور به‌عنوان عامل مهم یا دومین علت تخریب پل‌ها گزارش شده است به طوری‌که از ۶۹ پل راه‌آهن تخریب شده، ۲۰ پل به دلیل تجمع موارد شناور بوده است [۹۶].



شکل ۳-۷۳- تجمع اجسام شناور در اطراف پایه پل

البته اجسام شناوری که بتوانند مشکل‌آفرین باشند در همه رودخانه‌ها حضور ندارند و از این رو ضروری است تا ابتدا بررسی دقیق و جامعی نسبت به احتمال انتقال اجسام شناور در رودخانه مورد نظر انجام شود. از جمله روش‌هایی که می‌تواند به مطالعات انتقال اجسام شناور کمک کند عباتند از:

- بررسی شود که آیا شرایط هیدرولیکی رودخانه امکان و توان حمل تنه درختان و سایر اجسام شناور را دارد.
- آیا رودخانه در پایین‌دست مناطق جنگلی و یا بیشه‌زارهای پوشیده از درختان و بوته‌زار قرار دارد.
- پرس و جو از افراد محلی یا گزارش‌های مطالعات قبلی می‌توانند وجود اجسام شناور در رودخانه را تایید کند.
- بررسی عکس‌های هوایی و تصاویر Google earth از پل‌های موجود می‌توانند تجمع اجسام شناور را نشان دهند.
- در بازرسی از پل، آثاری از تجمع مواد شناور در بالادست پل، اطراف پایه یا تکیه‌گاه پل را نشان می‌دهد.

درصورتی‌که موارد فوق تایید شد، لازم است تا برای احداث پل‌های جدید، طراحی با در نظر گرفتن تجمع مواد شناور باشد. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در خصوص تاثیر تجمع مواد شناور بر افزایش تراز سطح آب بالادست (Schalko et al. 2018)، افزایش نیروی هیدرودینامیک وارده به پایه‌ها (Panici and de Almeida, 2018) و افزایش عمق آبشستگی اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها (Laggasse et al. 2020 و Ebrahimi et al. 2018) انجام شده است که می‌توان به این منابع مراجعه کرد.

۳-۶-۲-۲- بررسی وضعیت انسداد در آبگذرها

انسداد یا گرفتگی آبگذر هنگامی رخ می‌دهد که خار و خاشاک و مواد سطح حوضه در طول سیلاب، در ورودی آبگذر تجمع یابند. انسداد ورودی آبگذر، ساختار جریان در داخل مجرا و خروجی آبگذر را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد و ممکن است سبب خرابی آبگذر شود. ویکس[۱] و همکاران در سال ۲۰۰۹ گزارشی در مورد انسداد و نتایج مخرب آن در آبگذرها ارائه کردند. از لحاظ جنبه‌های کاربردی، انسداد آبگذرها و پل‌ها حین سیلاب موضوع مهمی برای راهداری و سازمان‌های مربوطه است. علاوه بر این انسداد در آبگذرها خطر احتمال خرابی در سازه‌های اطراف را نیز افزایش می‌دهد [۲۰۸]. استرالیا در سال ۲۰۰۹ گزارشی در مورد خرابی آبگذرها در اثر انسداد آبراهه‌ها ارائه کرد. بر اساس گزارشی که وزارت حمل و نقل بزرگراه‌های آمریکا

۱- Weeks

در سال ۲۰۰۵ منتشر کرد، تجمع مواد زائد در ورودی آبگذر، احتمال آبشستگی در خروجی آبگذر، جریان روگذری، ناپایداری و افزایش آبشستگی موضعی در پایه‌ها و شکل‌گیری آبشستگی جریان تحت فشار را به دنبال دارد [۱۰۰]. ریگبی و همکاران در سال ۲۰۰۲ موضوع انسداد در پل‌ها و آبگذرها را در سیلاب وولنگانگ[۱] سال ۱۹۹۸ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که برای آبگذرهایی با عرض دهانه کم‌تر از ۶ متر خطر انسداد بسیار بالا است. آن‌ها انسداد را مستقل از فاکتورهایی چون جنس مواد، کاربری اراضی، شیب آبراهه، حوضه آبریز، تعداد آبگذرهای بالادست و شرایط انسدادی آن‌ها عنوان کردند. در مورد تاثیر انسداد بر جریان روگذری و ایجاد آبشستگی در پایه‌ها و احتمال ناپایداری آبگذر هشدار دادند و پیشنهاد کردند مطالعه انسداد به عنوان بخشی از مطالعات سیلاب در نظر گرفته شود. ریگبی و همکاران چند نوع انسداد را معرفی کردند:

- انسداد تدریجی با رسوبات ریز یا درشت دانه و حتی تخته سنگ (در ورودی و خروجی آبگذر)
- انسداد اولیه با قطعات بزرگ گیاهی نظیر تنه درخت و یا بوته‌های بزرگ (در ورودی صورت می‌گیرد)
- انسداد با مواد زاید شهری (نخاله ساختمانی) که ممکن است در ورودی یا خروجی آبگذر اتفاق افتد.
- انسداد توسط اشیای بزرگ همچون وسایل نقلیه
- انسداد توسط اجسام مستغرق نظیر بطری‌های پلاستیک و غیره
- انسداد توسط ترکیبی از موارد فوق

تاثیر انسداد ورودی آبگذر بر شرایط جریان بالادست و آبشستگی پایین‌دست به صورت آزمایشگاهی و عددی در چهار مدل مختلف آبگذر توسط کریم‌پور در سال ۱۳۹۹ بررسی شد. با وجود انسداد شرایط آبگذری تغییر چشمگیری نشان داد و به ازای کاهش ۴۳درصد سطح ورودی آبگذر سطح آب بالادست به میزان ۷۵درصد افزایش یافت. آبشستگی پایین‌دست نیز تحت تاثیر انسداد ورودی قرارگرفته و روابط محاسبه عمق و طول گودال آبشستگی در مقادیر مختلف انسداد ورودی به صورت تابعی از میزان انسداد، شرایط جریان و شکل مجرای آبگذر ارائه شد (کریم‌پور، ۱۳۹۹).

۳-۶-۲-۳- مکانیسم انسداد و مشکلات احتمالی

انسداد ممکن است به صورت ناگهانی و با قرارگیری مانعی همچون اتومبیل یا مواد زاید شهری و تخته‌سنگ‌های بزرگ به صورت انسداد صلب ناگهانی شکل بگیرد و یا با انباشت شدن تدریجی الوار و شاخ و برگ درختان ابتدا به صورت انسداد متخلخل عبور جریان را مختل کند و با گذشت زمان به‌تدریج با افزایش رسوبات به صورت انسداد صلب درآید (کریم‌پور، ۱۳۹۹). شکل (۳-۷۴) نمونه‌هایی از انسداد در دهانه آبگذر را نشان می‌دهد. به طور کلی وقوع انسداد در آبگذر مسائل و مشکلات بسیاری به همراه خواهد داشت که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است [۲۰۸]:

- بالا رفتن تراز سطح آب بالادست و افزایش مناطق سیل‌گرفتگی
- انحراف جریان سیلابی به سمت راه‌های ارتباطی
- تخریب سازه و قطع شدن مسیر حمل و نقل

۱- Wollongong

- افزایش هزینه‌های نگهداری

شکل ۳-۷۴- نمونه‌هایی از انواع انسداد در ورودی آبگذر

نشریه شماره ۳۲۱ سازمان برنامه و بودجه کشور با عنوان «ضوابط طراحی هیدرولیکی سیفون و آبگذر زیرجاده» که ضوابط طراحی هیدرولیکی آبگذر را در کشور ارائه کرده است در مقادیر بده‌های کم‌تر از ۳ مترمکعب در ثانیه، آبگذر را برای عبور رواناب سطحی پیشنهاد می‌دهد و برای بده‌های بیش‌تر، ملاحظات اقتصادی و برخی محدودیت‌های اجرایی را برای انتخاب بین پل و آبگذر پیشنهاد می‌کند [۳۱]. این در حالیست که در اکثر ضوابط طراحی‌های ارائه شده برای این سازه، بر ملاحظات مربوط به احتمال انسداد تاکید شده است.

۳-۶-۲-۴- تخمین مقادیر مواد مسدود کننده

ارزیابی انباشت مواد مسدودکننده بر روی پل‌ها توسط دیهل به سه مرحله اصلی تفکیک شده است:

۱- تخمین پتانسیل ورودی مواد مسدود کننده در محل

۲- تخمین پتانسیل انباشت زباله بر روی هر یک از اجزای پل مجزا

۳- محاسبه تجمعات فرضی برای کل سازه

مراحل تخمین مقادیر مواد مسدود کننده را می‌توان به هشت گام مطابق جدول (۳-۴) تقسیم کرد:

جدول ۳-۴- مراحل تخمین مقادیر مواد مسدود کننده

فاز اصلی	گام‌ها

تخمین پتانسیل میزان مواد مسدود کننده ورودی در محل	تخمین پتانسیل انتقال زباله به محل تخمین اندازه بزرگ‌ترین زباله انتقال داده شده دسته‌بندی مکان‌ها با تمرکز بر قسمت‌های تقاطع بزرگراه انجام شود
تخمین پتانسیل انباشت زباله بر روی هر یک از اجزای پل مجزا	تمام قسمت‌های غوطه‌ور پل مد نظر قرارگیرد تعیین پتانسیل تجمع برای هر قسمت از پل
محاسبه تجمعات فرضی برای کل پل	انباشت فرضی با پتانسیل انسداد متوسط محاسبه شود انباشت فرضی با پتانسیل انسداد زیاد محاسبه شود انباشت بحرانی فرضی محاسبه شود

۳-۶-۲-۵- حجم مواد مسدود کننده

حجم مواد مسدودکننده بزرگ در یک حوضه آبخیز را با استفاده از روشی که توسط دیهل و برایان[۱] برای حوضه‌ای از رودخانه هارپت غربی در تنسی اعمال شد، می‌توان تعیین کرد. رویه کلی شامل انتخاب چندین مسیر مختلف از رودخانه است که معرف شرایط بالادست و پایین‌دست باشد. بازه‌های انتخابی را می‌توان با استفاده از عکس‌های هوایی و یا تحقیقات میدانی شنا سایی و انتخاب کرد. مواد م سدودکننده بزرگ‌تر از طول معین در هر یک از محدوده‌ها شمارش و اندازه‌گیری می‌شوند. سپس غلظت مواد مسدودکننده برای هر یک از مسیرها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

مترمکعب زباله در هر کیلومتر آبراهه (مثلا ۲۷ مترمکعب در کیلومتر برای د ستر سی به طول ۳ کیلومتر و حاوی ۸۱ مترمکعب زباله)، یا تعداد قطعات در محدوده ارتفاع به ازای هر کیلومتر آبراهه (مثلا ۲۵ متر مکعب درکیلومتر برای دسترسی به طول ۳ کیلومتر و حاوی ۷۵ متر مکعب زباله به طول ۱۰ متر).

سپس حجم کل زباله‌ها برای هر یک از بازه‌ها با ضرب غلظت زباله در طول کل که محدوده انتخاب شده نشان‌دهنده آن است، تخمین زده می‌شود. به عنوان مثال محدوده‌ای که غلظت زباله ۲۷ مترمکعب در کیلومتر (یعنی ۳ کیلومتر طول حاوی ۸۱ مترمکعب زباله) و کل طول نماینده ۱۲ کیلومتر داشته باشد، حجم کل زباله ۳۲۴ مترمکعب (۲۷مترمکعب در کیلومتر ضربدر ۱۲ کیلومتر برابر با ۳۲۴ مترمکعب). در نهایت حجم هر یک از بازه‌ها برای تعیین حجم کل زباله جمع می‌شود. به عنوان مثال حوضه‌ای که دارای سه حوضه با حجم‌های ۳۲۴ مترمکعب، ۵۰۰ مترمکعب و ۲۱۰ مترمکعب است، حجم کل مواد مسدود کننده برابر ۱۰۳۴ مترمکعب را تولید می‌کند (یعنی ۳۲۴ مترمکعب به اضافه ۵۰۰ مترمکعب به اضافه ۲۱۰ مترمکعب معادل ۱۰۳۴ مترمکعب است). در حین شمارش و اندازه‌گیری مواد مسدود کننده، اطلاعات تکمیلی در مورد مواد مسدودکننده باید یادداشت و مستند شود. اطلاعات باید شامل موارد زیر باشد:

- طول قطعه که از توده ریشه یا قسمت تحتانی الوار تا بالای آن اندازه‌گیری می‌شود.
- قطر لب به لب و در بالای قطعه
- اگر دارای ساقه راست یا خمیده باشد
- فراوانی شاخه‌ها مانند هیچ، کم یا زیاد
- پوست دارد یا نه

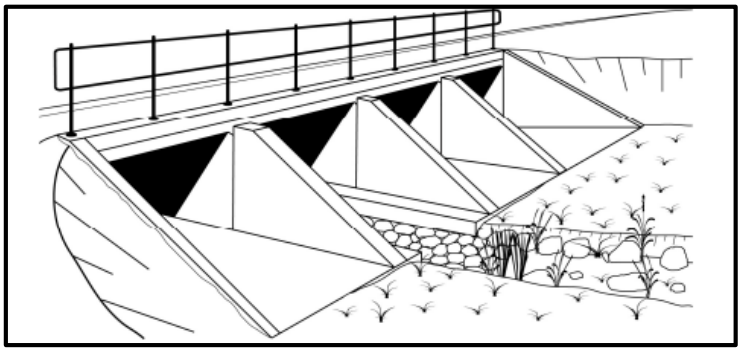
۱- Diehl and Bryan

- وضعیت توده ریشه، مانند کثیف، یک طرفه، متقارن، فرسوده و یا از بین رفته
- جهت‌گیری در داخل آبراهه، مانند موازی، عمود یا مورب نسبت به تراز آبراهه
- موقعیت در آبراهه، مانند روی بستر، روی کناره‌ها یا روی بستر و کناره
- نوع و وسعت محل قرارگیری، مانند بالای بستر، فرورفته در بستر، در هم پیچیده در پوشش گیاهی یا بخشی از توده مواد مسدودکننده

۳-۶-۲-۶- مدیریت انسداد در آبگذرها

- در تمام سازه‌ها توجه به روش‌های نگهداری و تعمیرات بسیار مهم است، حتی اگر امکان انسداد بسیار پایین باشد. با این حال احتمال انسداد، نیاز به نگهداری را افزایش می‌دهد. بنابراین باید توجه زیادی به نحوه دسترسی ایمن پرسنل تعمیر و نگهداری برای اهداف بازرسی و تعمیر و نگهداری از جمله دسترسی ایمن به ماشین‌آلات برای رفع انسداد زباله‌ها شود.
- به عنوان یک دستورالعمل کلی، بسیاری از مراجع نشان می‌دهند که کمینه اندازه همه آبگذرهای زهکشی متقاطع باید ۳۷۵ میلی‌متر قطر برای لوله‌ها و ارتفاع ۳۷۵ میلی‌متر برای آبگذرهای جعبه‌ای باشد. برای آبگذرهایی که به شدت مستعد رسوب هستند، به طور کلی توصیه می‌شود از ابعاد مجرای ۶۰۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر اجتناب شود و این استاندارد معمولا در بسیاری از مناطق روستایی اعمال می‌شود.
- لوله‌های کم‌تر از ۶۰۰ میلی‌متر به صورت مکانیکی با جت آب تمیز می‌شوند. لوله‌های بزرگ‌تر از ۹۰۰ میلی‌متر نیز به صورت دستی تمیز می‌شود. برای به کمینه رساندن پتانسیل ۱۰۰٪ انسداد آشغال در یک آبراهه، کمینه ارتفاع مجرای مطلوب ۳ متر و کمینه عرض مجرای مناسب ۵ متر است.
- توصیه‌های متناقض، عدم‌قطعیت در ارزیابی خطر انسداد را نشان می‌دهد. در برخی از سیستم‌های زهکشی و سازه‌های زهکشی متقاطع، کمینه ابعاد کوچک‌تر به طور گسترده ممکن است کاملا قابل قبول باشند. در مکان‌های دیگری با خصوصیات حوضه‌ای مستعد انسداد، این اندازه‌ها ممکن است به طور قابل توجهی کوچک‌تر از اندازه لازم باشد. به‌خصوص در سیستم‌های زهکشی که در مناطقی با شیب زیاد قرار دارند و سرعت زیاد جریان رسوبات و پوشش گیاهی و همچنین هر ماده سست دیگری را جمع‌آوری می‌کند. سازه‌های اصلی زهکشی متقاطع بر روی بخش‌های مسطح کانال‌هایی قرار می‌گیرند که به طور طبیعی احتمالا زباله‌ها در آن‌جا رسوب می‌کنند.
- بنابراین توصیه‌ها، کمینه اندازه‌ها برای سازه‌های زهکشی متقاطع باید برای عوامل خطر موضعی خاص و با در نظر گرفتن عدم قطعیت، در نظرگرفته شود. تعیین یک روش مناسب برای محاسبه ابعاد کمینه برای سازه‌های زهکشی متقاطع مشکل است.

- اندازه‌های کوچک‌تر عموما برای مناطقی منا سب ه ستند که خطر ن سبتا کم ا ست اما برای مناطقی که خطر بیش‌تر ارزیابی شود، تعیین یک دستورالعمل مناسب مسئله دشواری خواهد بود.
- برای به کمینه رساندن اثرات انسداد آشغال و به کمینه رساندن خطر غرق شدن فردی در صورت جاروب شدن از طریق آبراهه، تمام اقدامات منطقی و عملی باید برای به بی شینه ر ساندن ارتفاع آبراهه انجام شود حتی اگر این امر منجر به افزایش ظرفیت هیدرولیکی آبراهه شـود. خطر انسـداد زباله نیز با اسـتفاده از کانال‌های تک مجرایی کاهش می‌یابد یا در مورد آبگذرهای دشت سیلابی، فاصله بین مجراهای مجزا را طوری کاهش داد که به طور موثر به عنوان کانال‌های تک مجرا بدون دیواره (پای) مشترک عمل کنند.
- اثرات انسـداد زباله بر روی گذر ماهی باید در زیسـتگاه‌های حیاتی ماهی در نظر گرفته شـود. یکی از ابزارهای حفظ ظرفیت هیدرولیکی آبگذرها در جریان‌های پر از مواد جامد شـناور، سـاختن دیوارهای تخلیه‌کننده مواد جامد با شیب (V:H ۲:۱) است که در شکل (۳-۷۵) نشان داده شده است. هدف از ساخت این دیوارها، فراهم کردن امکان تخلیه توده زباله به هنگام بالا آمدن سیل است.

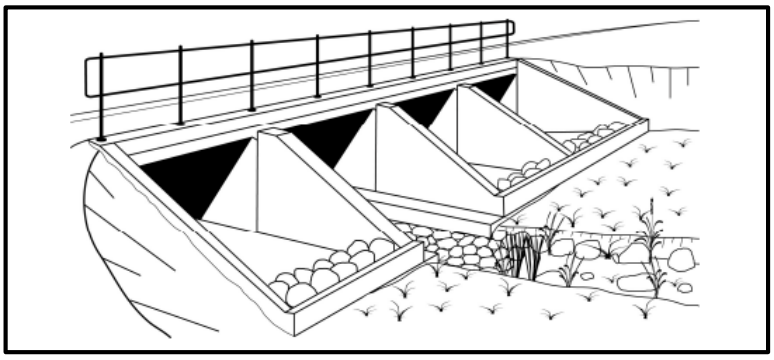


شکل ۳-۷۵- ورودی آبگذر با دیواره‌های تخلیه مواد شناور در طرفین

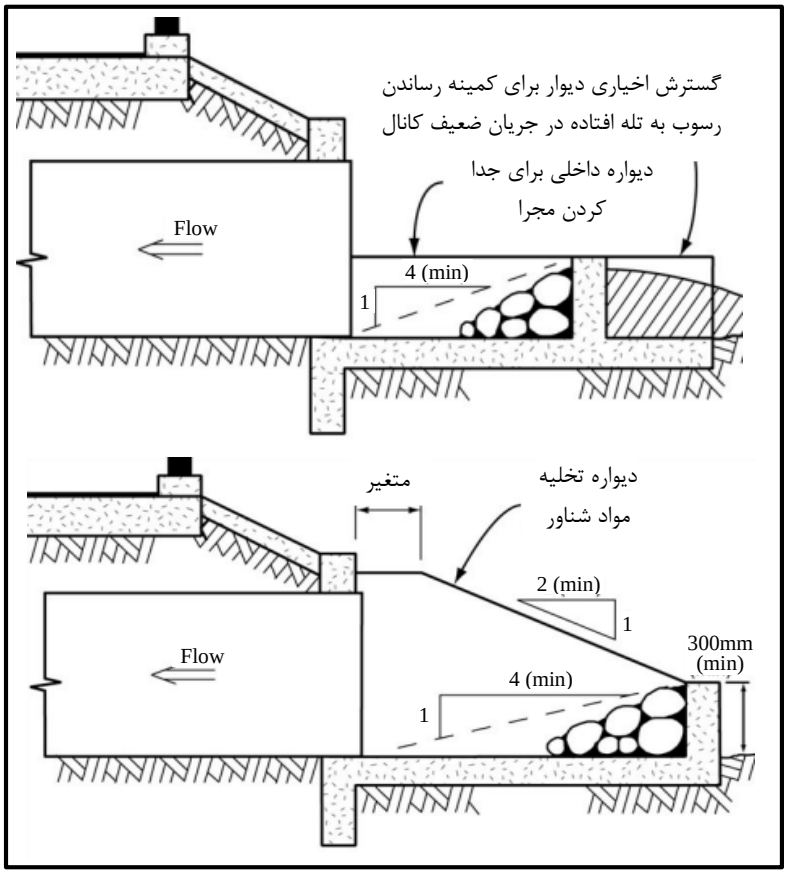
ته‌نشین‌شدن رسوب در داخل آبگذرها با استفاده از یک یا چند مورد از فعالیت‌های زیر قابل مدیریت است:

- ایجاد یک حوضچه ته‌نشینی داخل رودخانه در بالادست آبگذر
- ایجاد یک آبگذر چند مجرایی با سطوح ورودی متغیر به طوری که مقطع طبیعی آبراهه را شبیه‌سازی کند.
- نصب دیوارهای تله رسوبگیر بر روی ورودی آبگذر (شکل ۳-۷۶ و شکل ۳-۷۷)

دیوارهای تله ر سوبگیر، خطر ر سوب‌گذاری کل مجرای بیرونی را با محدود کردن جریان‌های جزئی به یک یا دو مجرا کاهش می‌دهد.



شکل ۳-۷۶- ورودی آبگذر با تله‌های رسوبگیر و دیواره‌های تخلیه مواد شناور در طرفین



شکل ۳-۷۷- چیدمان‌های مختلف دیوارهای تله رسوبگیر با (چپ) و بدون (راست) دیواره تخلیه مواد شناور

۳-۷- معیارهای مناسب حفاظت و تثبیت بازه‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه

۳-۷-۱- مقدمه

تخریب سازه‌های پل یا آبگذر بیش‌تر تحت تاثیر عوامل هیدرولیکی بوده تا عوامل سازه‌ای. شرایط هیدرولیکی می‌توانند موجب ناپایداری رودخانه در بازه‌های بالادست یا پایین‌دست سازه شوند و بر پایداری سازه تاثیر مستقیم بگذارند. از این‌رو شناخت عوامل ناپایداری و چگونگی مقابله با آن‌ها برای مهندسان طراح پل و آبگذر بسیار ضروری است.

ناپایداری رودخانه‌ها با فرسایش و یا رسوب‌گذاری همراه است. فرسایش می‌تواند بخشی از ساحل رودخانه را تخریب یا بستر رودخانه را تعمیق کند که اگر این اتفاق در نزدیکی سازه رخ دهد، ممکن است در کوتاه‌مدت به آن خسارت وارد کند. همچنین اگر فرسایش در فاصله دورتری از پل باشد، ممکن است منجر به تغییر مورفولوژی رودخانه در محل سازه شده و در نهایت باز هم باعث آسیب به سازه شود. علاوه بر این، پدیده‌های مرتبط با خصوصیات مکانیکی خاک نیز می‌توانند باعث تخریب سواحل و ناپایداری شوند. این مسئله به‌ویژه در رودخانه‌های عمیق و پیچانرود و در فصولی که عمق آب رودخانه کاهش می‌یابد، به‌دلیل اشباع خاک سواحل و کاهش مقاومت برشی آن‌ها (که معمولا به‌دلیل کشت محصولاتی مانند برنج یا نیشکر در نزدیکی سواحل یا وجود استخرهای پرورش ماهی رخ می‌دهد) اتفاق می‌افتد. همچنین در این رودخانه‌ها پدیده تخریب سواحل به‌دلیل فروکش سریع سیلاب (معمولا به‌دلیل بسته شدن ناگهانی دریچه‌های سد بالادست) و اشباع ماندن خاک ساحلی مشاهده می‌شود.

به طور کلی، تخریب سواحل رودخانه‌ها پدیده‌ای طبیعی یا انسان‌ساخت است که می‌تواند به‌دلیل شرایط هیدرولیکی رودخانه یا عوامل مکانیکی خاک باشد. فرسایش بستر و تخریب دیواره‌های رودخانه به سازه‌های تقاطعی مانند پل‌ها و آبگذرها، اراضی ساحلی و ساخت‌وسازهای اطراف آسیب می‌رساند و برای مقابله با این عوامل تخریب، باید تدابیر حفاظتی و مقاوم‌سازی به کارگرفته شود. برای این منظور روش‌های مختلفی بسته به نوع عوامل تخریب وجود دارد. این راهنما به روش‌هایی که عامل اصلی فرسایش و تخریب، مشخصات مورفولوژیکی رودخانه و شرایط هیدرولیکی جریان است، می‌پردازد. برای شرایطی که عوامل مکانیکی خاک عامل اصلی تخریب هستند، باید از روش‌ها و اقدامات خاصی مانند دور کردن عوامل اشباع خاک ساحلی، احداث زهکشی زیرسطحی طولی به موازات ساحل، احداث چاهک در نزدیکی ساحل و پمپاژ آب چاهک استفاده کرد.

روش‌های حفاظت یا کنترل و تثبیت بستر یا سواحل رودخانه بر حسب نوع مصالح، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها، مکانیزم عملکرد حفاظتی، دوام کارکرد و موضع کاربرد، به‌ترتیب به شناسه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- انعطاف‌پذیری: «صلب» یا «انعطاف‌پذیر»
- آبگذری: «نفوذپذیر» یا «نفوذناپذیر»
- ساز و کار حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه: روش «مستقیم» (مانند روکش‌ها و دیواره حائل) و روش «غیرمستقیم» (مانند آرام‌کننده‌ها و انحراف دهنده‌ها)
- ساز و کار حفاظت و تثبیت بستر رودخانه: «کف بند» و «آبشارک»
- نوع مصالح و ساختار حفاظتی: «طبیعی»، «سازه‌ای» و «طبیعی- سازه‌ای»
- موضع کاربرد: حفاظت بستر رودخانه (کنترل شیب)، حفاظت آبراهه اصلی، حفاظت ساحل بالا و سیلابدشت رودخانه
- دوام: «موقتی یا اضطراری»، «کوتاه مدت» یا «دائمی» برای حفاظت درازمدت

برخی مشخصات فوق و کارکرد آن‌ها به شرح زیر است:

انعطاف‌پذیری: روش‌ها و سازه‌های انعطاف‌پذیر بهتر از سازه‌های صلب هستند. سازه‌های انعطاف‌پذیر نسبت به تغییرات، قابلیت تنظیم و جابجایی و تحکیم داشته و امکان مرمت و بازسازی مجدد را دارند. در شرایط خاص (مانند رودخانه‌های کم عرض، حفاظت تاسیسات مهم ساحلی، در رودخانه‌های شهری، در محل پل‌ها یا سازه‌های آبی)، سازه‌های صلب به صورت دیواره حائل یا روکش به‌کار می‌روند. پو شش گیاهی و یا روکش سنگریزه‌ای از مثال‌های بارز روش‌های انعطاف‌پذیر به‌شمار می‌آیند.

آبگذری: روش‌ها و سازه‌های آبگذر از نظر هیدرولیکی، برتر از سازه‌های نفوذناپذیر می‌باشند زیرا قابلیت عبور آب و جذب رسوبات و مواد شناور و معلق را دارند. حفاظت مستقیم دیواره‌های رودخانه با پوشش گیاهی و یا روکش سنگریزه‌ای و حفاظت غیرمستقیم با سازه‌های آرام‌کننده، از مثال‌های بارز روش‌های حفاظتی نفوذپذیر به‌شمار می‌آیند.

روش‌های مستقیم حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه: راهکار عمومی در حفاظت رودخانه، مقاوم سازی دیواره در برابر عوامل فیزیکی (فرسایش سطحی، ذوب و انجماد و غیره) و عوامل هیدرولیکی (سرعت، تنش و تلاطم جریان، اثر موج، آبشستگی پنجه دیواره و غیره) است. دیواره‌های نگهدارنده (وزنی یا غیر وزنی) و روکش‌های حفاظتی (سازه‌ای و یا طبیعی) از روش‌های حفاظت مستقیم برای سواحل به‌شمار می‌آیند. روکش‌ها عمومی‌ترین سامانه حفاظتی پیوسته برای جلوگیری از فرسایش بستر یا ساحل می‌باشند. کارآیی روکش‌ها در حفاظت سواحل بستگی به اصلاح فیزیکی و پایداری شیب دیواره و مقاومت مصالح روکش بر روی شیب دارد. در شرایطی که شیب ساحل خیلی زیاد است می‌توان یک دیواره حائل کوتاه در پای ساحل احداث کرد. برای سواحل عمیق نیز ضروری است تا ساحل به دو بخش تقسیم شود و بِرمی با عرض مناسب برای تردد ماشین در ارتفاع خاصی منظور گردد. در موارد خاص (به‌خصوص مناطق شهری که امکان اصلاح شیب رودخانه به شیب پایدار، پر هزینه و یا غیرممکن است) می‌توان از دیواره‌های نگهدارنده یا حائل برای حفاظت عمودی و یا با شیب زیاد (به صورت تخت یا پلکانی) استفاده نمود. شرح بیش‌تر در پیوست شماره ۴ آمده است.

روش‌های غیرمستقیم حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه: آرام‌کننده‌ها از سازه‌های حفاظتی غیرمستقیم دیواره‌ها در طرح اصلاح مسیر رودخانه به‌شمار می‌آیند. در این روش، سازه‌های آبگذر (نفوذ پذیر) به صورت 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، ته‌نشست مواد رسوبی معلق و جذب مواد جامد شناور می‌شود. میدان رسوب‌گذاری در کناره رودخانه به تدریج توسعه یافته و قابلیت تثبیت بیولوژیکی می‌یابد. شمع‌کوبی با فواصل مناسب، شبکه‌های نرده‌ای یا سیم خاردار و جک‌های فلزی از انواع «آرام کننده‌ها» هستند. شرح بیش‌تر در پیوست شماره ۴ آمده است.

روش‌های غیرمستقیم- انحراف‌دهنده‌ها: انحراف دهنده‌ها از سازه‌های حفاظتی غیرمستقیم رودخانه‌های با هدف دورسازی جریان تخریبی از موقعیت دیواره‌های موجود به‌شمار می‌آیند. آبشکن‌های رودخانه‌ای از این نوع بوده که به صورت 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 نظر سازه‌ای، 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 ته‌نشست رسوبات می‌گردند. کناره رودخانه در حد فاصل دیواره‌های طبیعی موجود با مرز راستای اصلاح شده به تدریج توسعه یافته و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در دراز مدت تثبیت می‌شود. در روش‌های غیرمستقیم، صفحات مستغرق و آبشکن‌های کوتاه و مستغرق در پیچ[1] از دیگر انواع سازه‌های اصلاح الگوی جریان هستند. شرح بیش‌تر در پیوست شماره ۴ آمده است.

- روش‌های حفاظت از نظر نوع مصالح و ساختار حفاظتی

روش‌های طبیعی: در روش طبیعی (بیولوژیک)، 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 بهم بافته (به صورت پوشش سطحی یا تسلیح خاک)، صورت می‌پذیرد. مکانیزم حفاظت از طریق تقویت پایداری ساختمان دیواره و سواحل بالای رودخانه (در برابر فرسایش 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. این روش گرچه از نظر بیولوژیکی و زراعی و نیز از جنبه مدیریت نگهداری، مسائل و مشکلات پیچیده‌ای دارد ولی از جنبه‌های اقتصادی، اکولوژیکی و محیط‌زیستی همواره گزینه برتری محسوب می‌شود.

روش‌های سازه‌ای: در روش سازه‌ای با استفاده از مصالح فنی و ساختمانی (بتن، سنگ، سیمان) انواع سازه‌های مقاوم از نوع دیواره‌های «نگهدارنده» و یا «روکش» (برای حفاظت مستقیم سطح دیواره)، سازه‌های آرام‌کننده و یا هدایتی (برای اصلاح مسیر جریان) و سازه‌های تثبیت بستر رودخانه (برای کنترل شیب) طرح و انتخاب می‌گردند. 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 باشند. به‌هر حال سازه‌های انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر (نظیر روکش سنگریزه‌ای، تورسنگی) همواره باید در اولویت انتخاب قرارگیرند.

روش‌های طبیعی- سازه‌ای (بیومکانیک یا بیومهندسی): در این روش مجموعه شرایط حفاظت سازه‌ای و بیولوژیکی به منظور گزینش برتر اقتصادی، فنی و محیط‌زیستی مورد نظر قرار می‌گیرند.

۳-۷-۲- روش‌های حفاظت و تثبیت بستر رودخانه

روش‌های تثبیت بستر، مجموعه عملیاتی است که سطح بستر توسط مصالح مقاوم نسبت به فرسایش پوشانده می‌شود تا از تماس مستقیم جریان آب با رسوبات طبیعی بستر جلوگیری شود. بدیهی است مهم‌ترین معیار طراحی، عدم انتقال

۱- Bendway Weirs

این مصالح توسط جریان آب در بده سیل طرح می‌باشد. مصالح پوششی برای تثبیت بستر، تا حد امکان باید نفوذپذیر و انعطاف‌پذیر بوده و دوستدار محیط زیست باشند تا فضای مناسبی برای گیاهان و آبزیان نیز فراهم کنند. مصالح طبیعی از جمله پرکاربردترین می‌با شند. در صورت نبود یا پر هزینه بودن م صالح طبیعی، از م صالحی باید ا ستفاده شود تا اهداف محیط‌زیست را نیز تامین کنند.

۳-۷-۳- روش‌های کنترل فرسایش بستر

در آبراهه‌های کوه ستانی یا نیمه‌کوه ستانی که شیب تندی دارند، فر سایش ب ستر منجر به عمیق شدن کف ب ستر و تعریض رودخانه و در نتیجه انتقال حجم زیادی رسوب به پایین‌دست می‌شود. برای پل‌ها و آبگذرهای واقع در این رودخانه‌ها، با کاهش شیب آبراهه می‌توان نرخ فرسایش بستر و همچنین آبشستگی اطراف پایه و کوله‌های پل یا آسیب‌پذیری آبگذرها را کاهش داد. اجرای روش‌های پوشش بستر برای این رودخانه‌ها، به‌خصوص اگر بازه‌ای طولانی باید تثبیت شود، بسیار پرهزینه و زمان‌بر ا ست. از این رو از روش کنترل با کاهش شیب بستر ا ستفاده می‌شود. برای کاهش شیب بستر آبراهه، از سازه‌های مختلف اصلاح شیب (مانند کف‌بند، سرریز کوتاه و آبشارک‌ها) استفاده می‌شود، که برخی از آن‌ها در پیوست شماره ۴ ارائه شده است. ضوابط طراحی تثبیت‌کننده‌های بستر برای کف‌بندها در نشریه شماره ۷۰۱ و برای شیب‌شکن‌ها در نشریه شماره ۴۸۲ سازمان برنامه و بودجه کشور [۳۰ و ۳۲] ارائه شده است.

۳-۷-۴- روش‌های کنترل آبشستگی بستر رودخانه در ساختگاه سازه تقاطعی

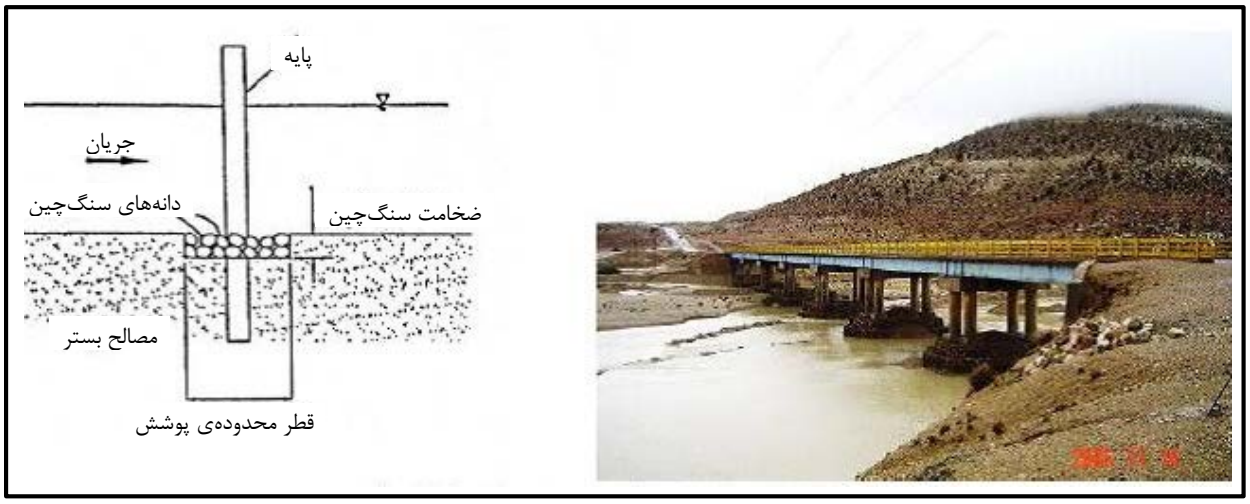
براساس راهنماها و استانداردهای طراحی و ساخت سازه‌های تقاطعی، بهترین شرایط برای پایداری و نگهداری سازه در برابر پدیده آبشستگی عمومی (تنگ‌شدگی) و آبشستگی موضعی، حفظ و حفاظت از بستر طبیعی ساختگاه پل و آبگذرهای نوع باز و اجتناب از احداث کف‌بند صلب و سخت است. روش‌های مختلف حفاظت بستر و پیرامون موانع (تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های پل) با استفاده از مصالح انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر (مانند سنگریزی، تورسنگ، بلوک‌های بتنی و غیره) می‌باشد (شکل ۳-۷۸). گاهی برای کاهش عمق و شدت آبشستگی پایه‌های پل از ترکیب حفاظت بستر پیرامونی پایه با طوق در پیرامون پایه (در کف پایه ویا در ترازهای بالاتر) استفاده می‌شود (شکل ۷۹). در برخی شرایط از ریزشمع‌ها در بالادست پایه‌های پل برای شکست گردابه‌های پیرامون پایه‌ها و کاهش آبشستگی و به عنوان پیشمرگ در برابر اجسام غوطه‌ور و شناور استفاده می‌شود (شکل ۳-۸۰).

برای آشنایی با روش‌های مختلف کنترل آبشستگی در ساختگاه پل‌ها و آبگذرها به راهنماها و استانداردهای ایران [۷ و ۱۶ و ۱۹ و ۲۰ و ۳۰ و ۳۲ و ۵۸ و ۶۰] و در جهان [۱۱۳ و ۱۲۲ و ۱۲۴ و ۱۶۰ و ۱۶۱ و ۱۶۴ و ۱۷۷ و ۱۸۱ و ۱۸۶ و ۲۰۶]، همچنین به مقالات پژوهش‌های کاربردی جدید [۱۲۱ و ۱۶۷] مراجعه شود.

در صنعت راه و راه‌آهن کشور، استفاده از رادیه[۱] و برید[۲] بسیار متداول است (شکل ۳-۸۱). رادیه یک کف بند صلب (بتنی یا سنگ و سیمان) است، که برای جلوگیری از آبشستگی طولی بستر از ابتدای ورودی تا انتهای خروجی ساختگاه پل‌ها و آبگذرها احداث می‌شود. برید یک دیواره سپری صلب در عرض و در ورودی و خروجی ساختگاه پل‌ها و آبگذرها می‌باشد که برای کنترل زیرشویی از بالادست و حفاظت بستر یا رادیه در پایین‌دست سازه تقاطعی ساخته می‌شود.

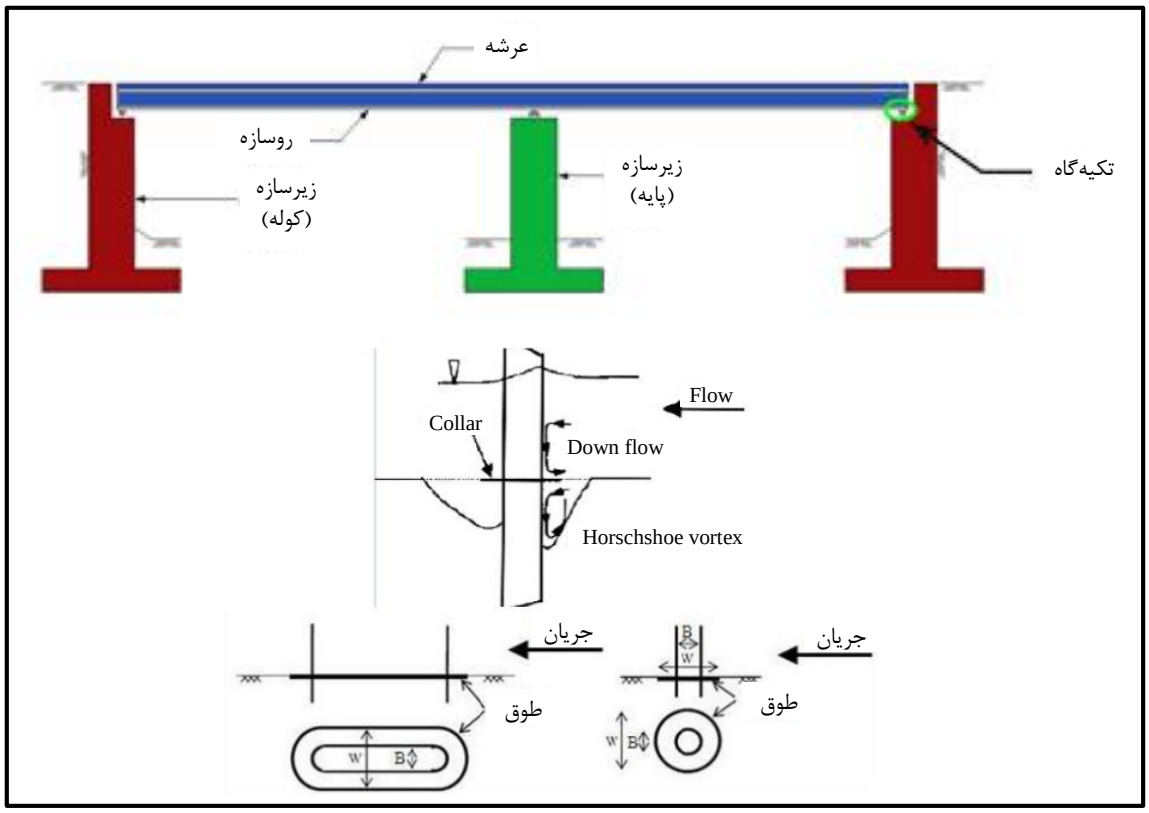
در راهنماها و استانداردهای پل‌ها، استفاده از رادیه در طراحی و ساخت به عنوان یک راهکار برای کنترل آبشستگی ارائه نشده است. در ایران، رادیه‌بندی پل‌ها و آبگذرها به صورت گسترده و به دلیل سادگی اجرا و هزینه کم‌تر برای کنترل و یا مقابله با آبشستگی تنگ‌شدگی و آبشستگی موضعی تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های پل اجرا می‌گردد. شواهد موجود از آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران در جدول (۱-۲)، همراه با شواهد تصویری و مستند در جدول (پ.۲-۵) از پیوست شماره ۲، نشان می‌دهد که رادیه‌بندی در مراحل طراحی و ساخت اولیه پل‌ها قابل قبول نبوده و توصیه نمی‌شود. رادیه‌بندی در آبگذرهای باز و طبیعی‌ساز نادرست بوده و تنها در نوع آبگذرهای بسته به عنوان ساختار اصلی سازه دیده شده که با اقدامات حفاظت بستر پایین‌دست باید همراه باشد.

رادیه و برید ممکن است در بخش راهداری برای مرمت و نگهداری پل‌ها و آبگذرهای آسیب‌دیده از آبشستگی و برای جلوگیری از روند تخریبی سازه استفاده گردد. برای جلوگیری از توسعه آبشستگی موضعی در پایین‌دست رادیه و برید، حفاظت بستر با استفاده از مصالح انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر (مانند سنگریزی یا تورسنگ) باید انجام یابد.

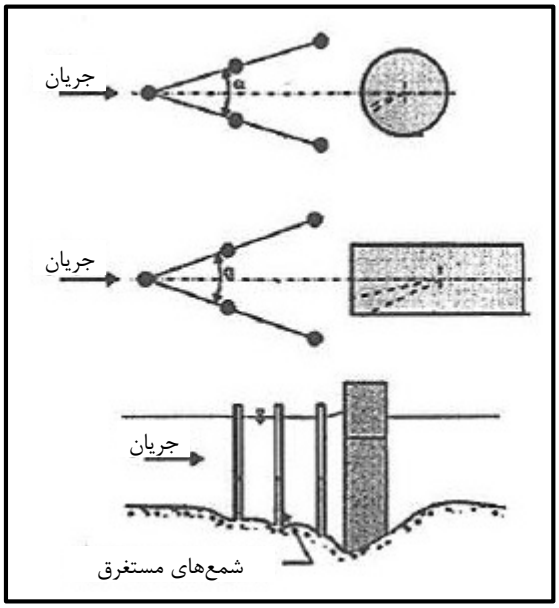


شکل ۳-۷۸- حفاظت بستر پیرامونی پایه و تکیه‌گاه پل در برابر آبشستگی به روش سنگریزی

۱- Apron
۲- Cut-off wall



شکل ۳-۷۹- کاربرد طوق در پیرامون پایه پل برای کاهش شدت آبشستگی



شکل ۳-۸۰- کاربرد ریزشمع‌ها در بالادست پایه‌های پل به عنوان پیشمرگ در برابر اجسام شناور و برای کاهش شدت آبشستگی

شکل ۳-۸۱- کاربرد رادیه و برید در پل‌ها و آبگذرهای راه و راه‌آهن ایران

۳-۷-۵- روش‌های تثبیت دیواره رودخانه در نزدیکی سازه تقاطعی

فرسایش سواحل رودخانه در بالادست یا پایین‌دست پل‌ها می‌تواند موجب خسارت‌هایی به سازه پل گردد. در رودخانه‌های پیچانرود واقع در مناطق دشت، که شیب بستر رودخانه بسیار ملایم است و تخریب پل به‌دلیل آبشستگی پایه و تکیه‌گاه بسیار نادر می‌باشد، تخریب ساحل رودخانه می‌تواند منجر به پیچش آبراهه شود که با گسترش آن، خسارت‌های زیادی به پل وارد شود. ضمن این‌که در این نواحی به‌دلایل مختلف ممکن است پل در محل پیچ رودخانه احداث شود. در این شرایط فرسایش ساحل در پیچ خارجی می‌تواند موجب تخریب پل گردد. همان‌گونه که در بند ۳-۷-۱ اشاره شد، اگر عوامل مکانیک خاکی نیز اثربخش باشند، از روش‌های افزایش مقاومت برشی خاک (مانند احداث زهکش زیرزمینی و غیره) نیز برای تثبیت ساحل استفاده می‌گردد. از این‌رو ضروری است تا درصورتی‌که احتمال تخریب سواحل بالادست و پایین‌دست پل وجود دارد، اقدامات لازم به منظور حفاظت و تثبیت کناره رودخانه صورت گیرد که برخی از آن‌ها در پیوست شماره ۴ ارائه شده است.

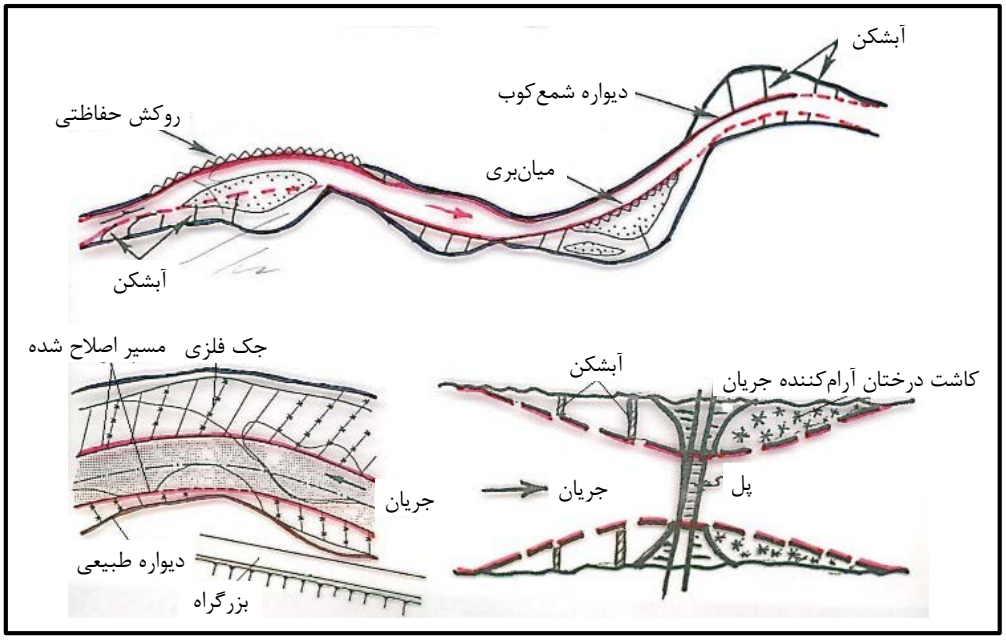
دیواره هادی، سازه‌ای (خاکریز، سنگریز، بتنی و غیره) است که در تثبیت سازه پل و آبگذر در دیواره‌های رودخانه بالادست و پایین‌دست، هدایت جریان رودخانه به سمت دهانه‌ها و کاهش آبشستگی موثر است [۲۰]. اثربخشی تعدادی از طرح‌های مختلف دیواره هادی در مطالعات مدل فیزیکی فتحی و زراتی و سلامتیان (۲۰۱۱) مقایسه شده، که مراجعه به آن توصیه می‌شود [۱۲۱].

۳-۷-۶- روش‌های اصلاح الگوی جریان

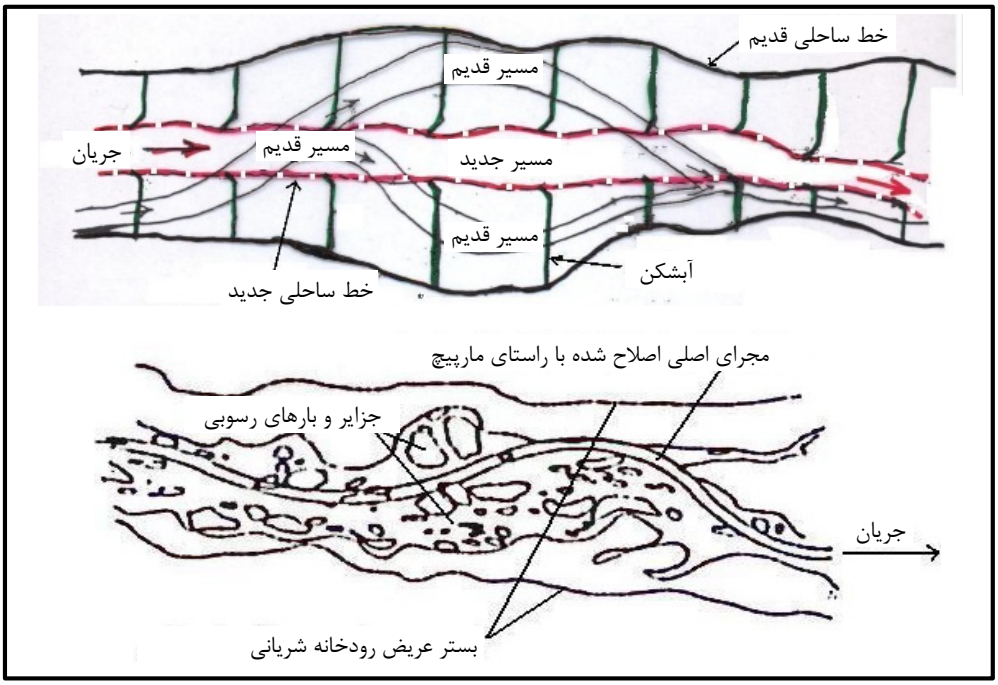
در این روش‌ها، شرایط جریان به‌گونه‌ای ا صلاح می شود تا فر سایش ساحل به کمینه بر سد و علاوه بر این، موجب رسوب‌گذاری و ترمیم ساحل فرسایش یافته هم بشود. از جمله آن‌ها شامل آبشکن، صفحات مستغرق و آبشکن‌های کوتاه و مستغرق در پیچ می‌باشند که در پیوست شماره ۴ شرح داده شده است.

۳-۷-۷- انتخاب روش‌های حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه

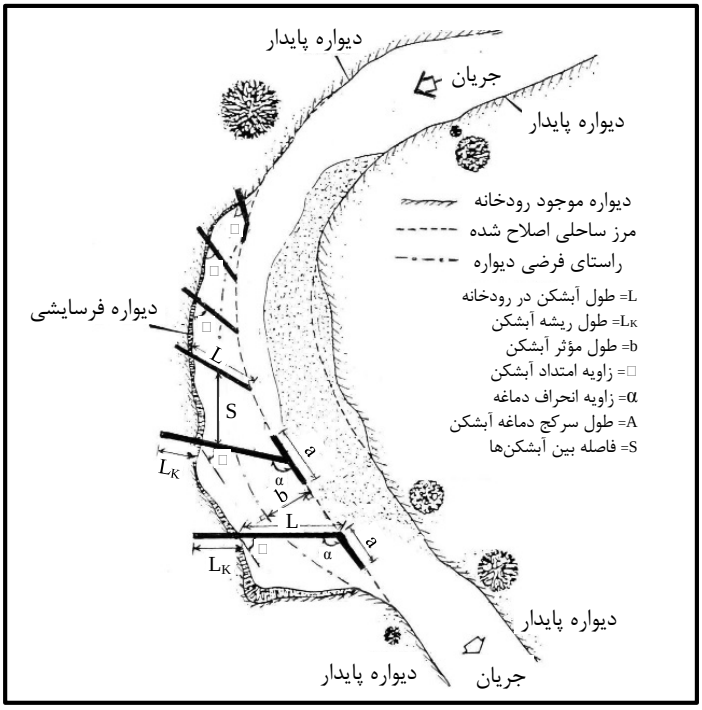
براساس تجارب مهندسی رودخانه، از پایداری رودخانه در بازه ساخت سازه تقاطعی باید اطمینان کافی حاصل گردد. برای این منظور، کمینه طولی معادل ۱۰ برابر عرض بالای آبراهه اصلی از بالادست سازه تا ۱۰ برابر عرض در پایین‌دست محل ســازه، باید برای ارزیابی پایداری و حفاظت و تثبیت دیواره‌ها و بســتر رودخانه مورد نظر قرارگیرد. در شــرایطی که سازه تقاطعی در پیچ و یا نزدیک به پیچ آبراهه باشد، کمینه حفاظتی رودخانه از فاصله طولی یک برابر عرض بالای آبراهه اصلی از بالادست پیچ تا ۲ برابر عرض در پایین‌دست پیچ، باید فراهم گردد [۲۱۰]. در رودخانه‌های شریانی و ناپایدار، این طول بیش‌تر بوده و با اصـــلاح مســـیر آبراهه و حفاظت و تثبیت دیواره جدید رودخانه، باید از عدم امکان انحراف آب از بالادست به خارج از دهانه سازه پل و آبگذر اطمینان یافت. شکل (۳-۸۲) نمونه‌هایی از طرح ا صلاح م سیر رودخانه‌های پیچانرودی و شریانی را در بازه ساخت سازه‌های تقاطعی نشان می‌دهد.



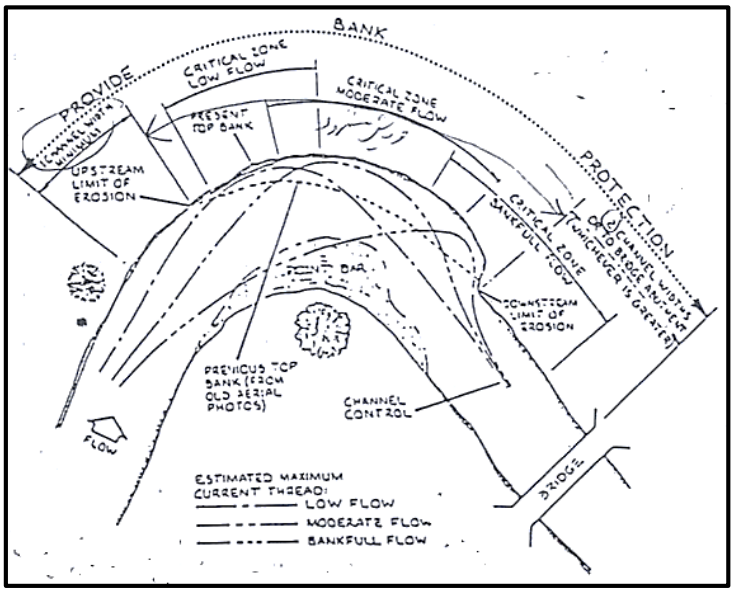
الف- اصلاح مسیر یک بازه پیچانرودی



ب- اصلاح مسیر یک بازه مستقیم، عریض و شریانی



ج- اصلاح و حفاظت و تثبیت پیچ رودخانه

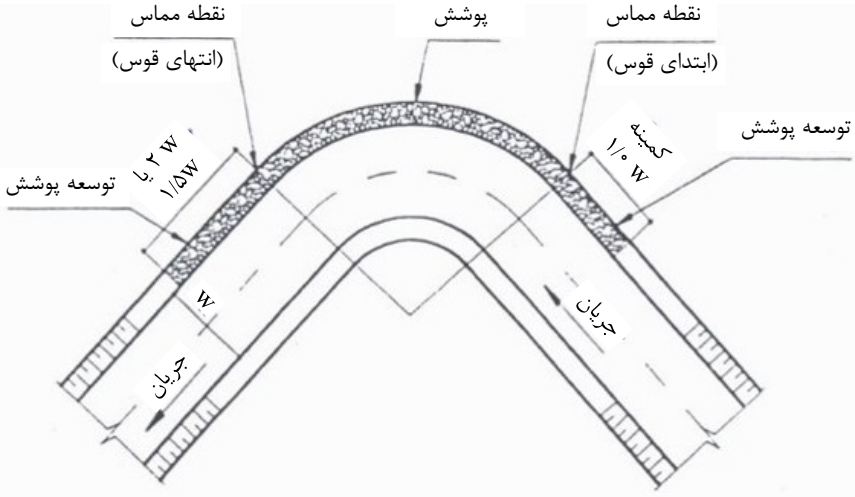


د- طول بازه حفاظتی در پیچ رودخانه و نزدیک به پل

شکل ۳-۸۲- نمونه‌هایی از طرح اصلاح مسیر رودخانه‌ها در بازه ساخت سازه‌های تقاطعی (پل و آبگذر) [۲۲ و ۲۱۰]

روش‌های حفاظت یا تثبیت دیواره و بستر رودخانه‌ها متنوع بوده و متناسب با اهداف، مسائل و شرایط حاکم بر پروژه می‌توان از یک روش و یا ترکیبی از روش‌های موجود استفاده کرد. به طور نمونه، شکل‌های (۳-۸۳) تا (۳-۸۵) برخی روش‌های موجود و کاربرد هر یک را نمایش می‌دهد. انواع روش‌ها، جزئیات و طراحی هر یک از این روش‌ها در راهنماها و ضوابط استاندارد ارائه شده و در حال به‌روز رسانی نیز می‌باشند. برخی از این روش‌ها در پیوست شماره ۴ معرفی شده است.

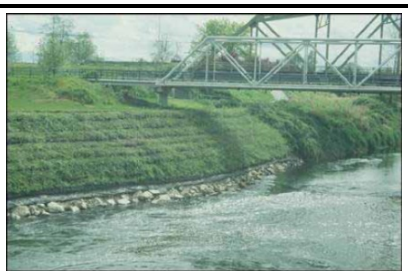
دیواره تورسنگ در حفاظت دیواره پایین پیچ و اصلاح شیب و پوشش گیاهی در دیواره بالای پیچ رودخانه



طول بازه حفاظتی در پیچ رودخانه و نزدیک به پل

حفاظت طبیعی- سازه‌ای دیواره رودخانه در بالادست پل

صفحات مستغرق بتنی در حفاظت پیچ رودخانه در بازه پل

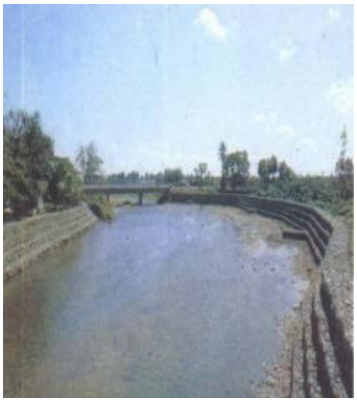


حفاظت طبیعی دیواره رودخانه در محل پل

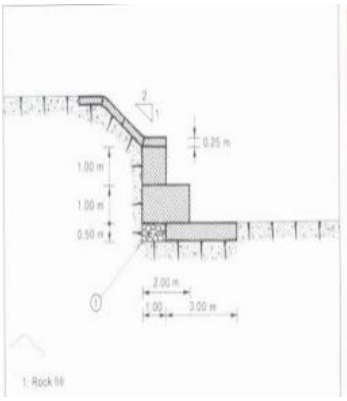
آبشکن‌های کوتاه در حفاظت دیواره رودخانه در بالادست پل

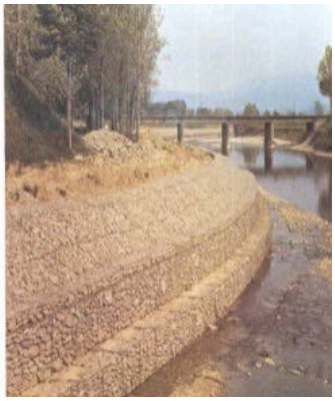
آبشکن‌ها در تثبیت راه ساحلی رودخانه تنگی، کانادا

آبشکن‌های در تثبیت راه ساحلی رودخانه قزل‌اوزن، ایران



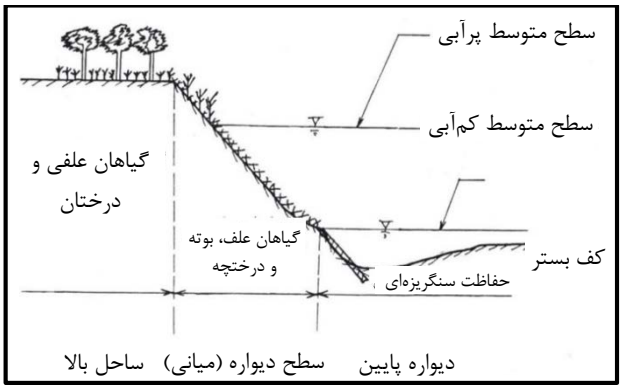
دیواره تورسنگ در حفاظت پیچ رودخانه در بالادست پل





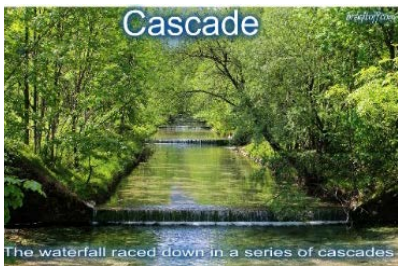
دیواره تورسنگ در حفاظت پیچ رودخانه در بالادست پل

شکل ۳-۸۳- نمونه‌هایی از طرح حفاظت و تثبیت دیواره رودخانه در محدوده ساخت پل‌ها [۲۲ و ۷۹]

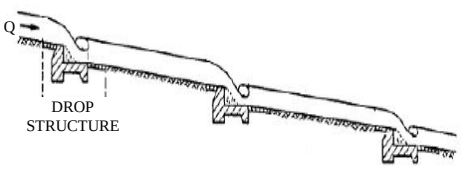


شکل ۳-۸۴- نمایش سطوح مختلف دیواره رودخانه و ترکیب کاربرد روش‌های طبیعی و سازه‌ای [۷۸]

ج- بندهای کوتاه- با راه ماهی



ب- آبشارک



الف- کف‌بندها

شکل ۳-۸۵- نمونه روش‌های کنترل و تثبیت شیب بستر رودخانه [۷۹]

در منابع موجود، توصیه‌های کاربرد برخی از انواع روش‌های تثبیت و حفاظت رودخانه‌ها به صورت جدول‌های (۳-۵) و (۳-۶) و (۳-۷) ارائه شده است.

جدول ۳-۵- روش‌های حفاظت دیواره‌های رودخانه - بر اساس عملکرد سازه حفاظتی [۲۲ و ۲۰۴]

حفاظت مستقیم دیواره‌ها			حفاظت غیرمستقیم دیواره‌ها و اصلاح مسیر رودخانه		
صلب و نفوذناپذیر	انعطاف‌پذیر و نفوذناپذیر	انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر	آرام‌کننده‌ها (نفوذپذیر)	انحراف دهنده‌ها (صلب و نفوذناپذیر)	انحراف دهنده‌ها (انعطاف‌پذیر و نفوذناپذیر)	انحراف دهنده‌ها (انعطاف‌پذیر و نفوذپذیر)
۱- دیواره حائل بتنی یا سنگ و سیمانی ۲- روکش بتنی ۳- روکش سنگ و سیمان ۴- روکش آجری ۵- روکش خاک و سیمان ۶- سپر فلزی ۷- سپر آزبست سیمانی	۱- روکش پلاستیکی ۲- روکش لاستیکی ۳- روکش قیری و آسفالت	۱- روکش سنگریزه‌ای ۲- روکش سنگ فرش ۳- روکش تورسنگ ۴- دیواره حائل تورسنگ ۵- روکش بتنی مفصل‌دار ۶- روکش کیسه‌ای ماسه- سیمان (چیدمان کیسه‌ای منفرد بر روی یکدیگر) ۷- مصالح طبیعی و گیاهی ۸- پوشش گیاهی ۹- تایر فرسوده ماشین ۱۰- ماشین‌های اسقاطی ۱۱- بلوک‌های‌سیمانی توخالی	۱- جک فلزی Kellner ۲- جک فلزی چهار وجهی ۳- شبکه نرده کشی ۴- تورهای سیمی	۱- آبشکن- سپر فلزی ۲- آبشکن- سپر بتنی ۳- آبشکن- سنگ و سیمان ۴- صفحات مستغرق: بتنی، سنگ وسیمان یا سپر فلزی	۱- آبشکن با هسته رسی و روکش سنگریزه‌ای ۲- آبشکن با هسته رسی و روکش تورسنگ ۳- آبشکن با هسته رسی و روکش کیسه‌ای	۱- آبشکن- سنگریزه‌ای ۲- آبشکن- تورسنگی ۳- آبشکن- بلوک بتنی ۴- صفحات مستغرق: تورسنگی یا سنگریزه‌ای

جدول ۳-۶- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه - بر اساس نوع و اندازه رودخانه [۲۲ و ۱۸۶]

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

× مناسب + درصورت فقدان سنگ‌های بزرگ ❋ برای رودخانه‌های سیلابدشتی

جدول ۳-۷- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه بر اساس اندازه رودخانه و عوامل تخریب رودخانه [۲۲ و ۲۰۴]

شرایط رودخانه	سیلاب حداکثر (m^3/s)	عوامل تخریب دیواره*	روش‌های حفاظت دیواره
رودخانه اصلی	>۲۸۰۰۰	۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۱	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 حائل کوتاه (سطح بالای دیواره) ۸- موانع سخت

ادامه جدول ۳-۷- راهنمای روش‌های حفاظت رودخانه بر اساس اندازه رودخانه و عوامل تخریب رودخانه [۲۲ و ۲۰۴]

شرایط رودخانه	سیلاب حداکثر (m^3/s)	عوامل تخریب دیواره*	روش‌های حفاظت دیواره
رودخانه بزرگ	۱۴۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰	۶ و ۵ و ۳ و ۱	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 حائل کوتاه (سطح پایین دیواره) ۱۰- موانع سخت
رودخانه متوسط با شیب زیاد	۲۸۰۰ تا ۱۴۰۰۰	۷ و ۵ و ۳ و ۲	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 تا۱۴۰۰۰	۷ و ۵ و ۳ و ۲	۱- روکش سنگریزه‌ای ۲- تورسنگ ۳- آبشکن‌ها ۴- جک فلزی ۵- دیواره شمع‌کوب چوبی ۶- دیواره شمع کوب با تورسیمی ۷- روکش طبیعی ترکه‌ای ۸- پوشش گیاهی ۹- موانع سخت
رودخانه کوچک با شیب زیاد	<۲۸۰۰	۷ و ۵ و ۳ و ۲	۱- روکش سنگریزه‌ای ۲- تورسنگ ۳- آبشکن‌ها ۴- دیواره شمع‌کوب چوبی ۵- شبکه‌بندی۶- روکش طبیعی ترکه‌ای (سطح بالای دیواره) ۷- پوشش گیاهی (سطح بالای دیواره) ۸- موانع سخت
رودخانه کوچک با شیب کم	<۲۸۰۰	۷ و ۵ و ۳ و ۲	۱- روکش سنگریزه‌ای ۲- تورسنگ ۳- آبشکن ۴- جک فلزی ۵- دیواره شمع‌کوب چوبی ۶- دیواره شمع کوب 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 و قایق) ۷- فرسایش دیواره در اثر نیروی تراوش

به طور کلی انتخاب روش یا روش‌های مناسب در حفاظت و تثبیت دیواره‌های رودخانه علاوه بر تجربه کافی و داشتن دانش مهندسی رودخانه، تابع مطالعات و بررسی‌های زیر نیز می‌باشد:

- **مورفولوژی (نوع و مشخصات) رودخانه:** مستقیم، پیچانرودی، یا شریانی، بستر ریزدانه (ماسه‌ای)، یا درشت‌دانه (شنی و درشت‌تر)، بزرگ، متوسط یا کوچک، عمیق یا کم‌عمق، عریض یا کم‌عرض، مقطع ساده یا مقطع مرکب و رودخانه دائمی یا فصلی یا خشک‌رود
- **مشخصات دیواره‌ها:** عوامل فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی فرسایش و تخریب (در سطوح سه گانه: دیواره پایین، سطح دیواره و ساحل بالا)، لایه‌بندی مواد دیواره و بستر، خصوصیات مکانیکی مواد دیواره و مکانیزم تخریب و گسیختگی دیواره‌ها (فرسایش سطحی، لغزش، ریزش توده‌ای- وزنی)
- **مشخصات جریان:** جریان دائمی 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 (کم یا زیاد و مواد درشت‌دانه یا ریزدانه)، بار رسوبی معلق (قابلیت ته‌نشینی زیاد یا کم)، کیفیت شیمیایی آب (درجه قلیایی و خورندگی) و محاسبات پروفیل 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)
- **موا ضع 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 محیط زیستی:** حفظ و ضع حیاتی موجود، احیای سامانه حیاتی و زیستابی رودخانه، حفظ زیبایی طبیعت رودخانه، تاثیرات زیستی و حیاتی اجرای طرح پیشنهادی در آینده‌ی رودخانه و قابل قبول یا غیر قابل قبول بودن ارزش محیط‌زیستی کارهای رودخانه‌های 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 رودخانه‌های)، محل تامین مصالح (فاصله از منطقه طرح) و پتانسیل استقرار پوشش گیاهی (گونه‌های بومی و گونه‌های مناسب رودخانه‌های)
- **فاصله حمل مصالح:** فاصله حمل یکی از عوامل مهم هزینه پروژه است که می‌تواند بر تعیین نوع روش حفاضتی تاثیر داشته باشد. مثلا در نواحی که فاصله از معادن سنگ طولانی است، به جای استفاده از سنگ ممکن است روش‌های نظیر کیسه‌های حاوی مصالح رسوبی رودخانه یا المان‌های بتنی برای پوشش استفاده شود.
- **ارزیابی تناسب کاربرد:** تناسب کاربرد گزینه‌های مختلف طبیعی و یا سازه‌ای متناسب با مطالعات فوق (تلفیق روش‌های حفاظتی «مستقیم» و «غیر مستقیم»، با مصالح «طبیعی و یا سازه‌ای»، 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 باشند)
- **امکانات فنی و اجرایی:** 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 خسارت‌های احتمالی و مقایسه و ارزیابی گزینه‌های برتر
- **ارزیابی ارزش‌های دیگر:** ارزش‌های اجتماعی، محیط‌زیستی، منطقه‌ای و ملی طرح. ارزیابی ارزش‌های سیاسی-دفاعی، ملی و بین‌المللی طرح (در خصوص رودخانه‌های مشترک و مرزی)
- **هزینه و زمان:** برآورد واقعی از هزینه و زمان‌بندی اجرای طرح در مراحل مختلف (با توجه به محیط طبیعی، ریسک‌پذیری و سلامت رودخانه در صورت توقف احتمالی اجرای طرح به دلایل طبیعی یا عدم تامین اعتبار لازم)

۳-۸- معیارهای انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی و ظرفیت آبگذری پل‌ها و آبگذرها

دوره بازگشت سیلاب رودخانه (T) در واقع معرف سطح احتمال (P) وقوع آن سیلاب در رودخانه می‌باشد (P=1/T) و دوره بازگشت سیلاب طراحی یک سازه طولی یا تقاطعی مستقر در رودخانه، بیان‌کننده احتمال وقوع سیلابی است که در صورت وقوع، آن سازه با بیشینه ظرفیت آبگذری خود عمل می‌کند و در صورت وقوع سیلابی بزرگ‌تر، احتمالا تخریب خواهد شد.

برای مصون ماندن سازه پل و آبگذر از تهدید سیلاب رودخانه نیز از همین مفهوم استفاده شده و بسته به اهمیت آن سازه سطح احتمال وقوع سیلاب طراحی و یا به عبارتی دوره بازگشت سیلاب طراحی تعریف می‌شود. روش متداول برای انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی و ظرفیت آبگذری، استفاده از جداول (۳-۸) و (۳-۹) ارائه شده در آیین‌نامه ۴۱۵ با عنوان «آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران» است [۵].

جدول ۳-۸- دوره بازگشت سیلاب طراحی پل [۵]

نوع راه	دوره بازگشت سیلاب طرح (سال)		
راه شریانی (آزادراه و بزرگراه)	مسیر اصلی	راه جانبی	رابط‌ها
	۵۰ تا ۱۰۰	۵۰	۵۰
راه اصلی	۵۰		
راه فرعی	۲۵		

جدول ۳-۹- دوره بازگشت سیلاب طراحی آبگذر [۵]

نوع راه	دوره بازگشت سیلاب طرح (سال)		
راه شریانی (آزادراه و بزرگراه)	مسیر اصلی	راه جانبی	رابط‌ها
	۲۵	۲۵	۲۵
راه اصلی	۲۵		
راه فرعی	۱۵		

در آیین‌نامه ۴۱۵ [۵] تنها تهدید برای تخریب پل، پدیده سیلاب شناخته شده و لذا احتمال وقوع تخریب متناظر با دوره بازگشت سیلاب تشخیص داده شده است. در حالی که سوابق پل‌ها و آبگذرهای تخریب شده طی وقوع سیلاب‌های گذشته در کشور نشان داده‌اند که بسیاری از تخریب‌ها به دلیل وقوع سیلاب‌هایی بیش‌تر از سیلاب طراحی نبوده و علت اصلی تخریب، تغییرات مورفولوژیکی رودخانه گزارش شده است. چه بسا سازه پل یا آبگذر که برای سیلاب طراحی ۱۰۰ ساله طراحی و ساخته شده است با وقوع یک سیلاب ۱۰ ساله به دلیل ایجاد تغییرات مورفولوژیکی رودخانه در بالادست تخریب شده باشد.

معیارهای انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی سازه پل و آبگذر، بسیار گسترده بوده و بسته به روش برخورد اعم از تحلیل اقتصادی، تحلیل خطرپذیری، تجربی، ملاحظات اجتماعی و محیطزیستی، از تنوع بالایی برخوردار هستند و در نشریه شماره ۳۱۶ سازمان برنامه و بودجه کشور با عنوان «راهنمای تعیین دوره بازگشت سیلاب طراحی برای کارهای

مهندسی رودخانه» به تفصیل بیان شده‌اند [۱۵]. مطابق راهنمای این نشریه، انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی سازه‌های آبی از جمله پل و آبگذر نیازمند داشتن حجم قابل ملاحظه‌ای از شواهد، قرائن و داده‌های اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی و خطرپذیری می‌باشد و مطالعات گسترده‌ای را طلب می‌نماید. در صورت اهمیت راهبردی سازه پل و آبگذر، از این روش‌ها می‌توان استفاده نمود و دوره بازگشت سیلاب طراحی را انتخاب نمود.

در آیین‌نامه ۴۱۵ [۵] با عنوان «آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران» معیار انتخاب سطح ریسک تخریب سازه پل و آبگذر، نوع راه و مولفه‌های آن می‌باشد. همچنین در این آیین‌نامه فرض شده که سیلاب تنها تهدیدی است که پل را در معرض تخریب قرار می‌دهد. لذا سطح ریسک معادل دوره بازگشت سیلاب طراحی منظور شده است. در این آیین‌نامه، تهدید مورفوهیدرولیکی رودخانه بر ریسک تخریب سازه پل یا آبگذر مورد توجه قرار نگرفته است.

سطح ریسک تخریب سازه تابعی از احتمال تهدید سیلاب و تهدید مورفوهیدرولیکی رودخانه و شدت آسیب‌پذیری سازه پل و آبگذر است. هر چه دامنه و شدت تهدیدات دوگانه فوق و پیامدهای آن‌ها گسترده‌تر و بیش‌تر باشد، سطح ریسک تخریب پل و آبگذر بالاتر خواهد بود. کاهش سطح ریسک سازه و انتخاب یک سطح مناسب برای ریسک تابعی از اهمیت پایداری سازه در شرایط رخداد سیلاب‌های بزرگ خواهد بود.

تهدید مورفوهیدرولیکی تابعی از کیفیت موروفولوژیکی بازه‌ای از رودخانه که پل یا آبگذر روی آن واقع شده است، می‌باشد. در یک بیان کیفی، هر چه بازه رودخانه از نظر مورفوهیدرولیکی ضعیف‌تر باشد، تهدید مورفوهیدرولیکی و ریسک تخریب سازه پل یا آبگذر بیش‌تر خواهد شد.

تهدیدات مورفوهیدرولیکی که از طرف رودخانه متوجه سازه پل و آبگذر می‌باشند، در قالب گروه‌های مخاطراتی زیر قابل توصیف است:

- **گروه ۱- مخاطرات فرسایشی:** کف‌کنی و آبشستگی، مهاجرت آبشاری و فرسایش دیواره
- **گروه ۲- مخاطرات ناشی از ناپیوستگی انتقال رسوب:** رسوب‌گذاری، حرکت غیرطبیعی بارهای رسوبی بالادست و پایین‌دست، تشکیل تراس‌ها و پادگانه‌های آبرفتی
- **گروه ۳- مخاطرات ناشی از تغییر شکل:** توسعه و جابجایی پیچانرود، جزایر مستغرق و غیرمستغرق، میان‌بری پیچ‌ها و میان‌بری یا انحراف موضعی بخشی از رودخانه
- **گروه ۴- مخاطرات ناشی از تغییر الگوی پلان:** مستقیم به پیچانرودی، مستقیم به شریانی، شریانی به پیچانرودی، شریانی به مستقیم، پیچانرودی به مستقیم و پیچانرودی به شریانی
- **گروه ۵- سایر مخاطرات:** اشیای شناور و امواج

همان‌گونه که بیان شده، در مطالعات یک سازه پل یا آبگذر، علاوه بر سیلاب بایستی مورفوهیدرولیک رودخانه را نیز تهدیدی جدی برای پایداری سازه دانست ولی ارتباط دادن احتمال مجاز تخریب سازه پل یا آبگذر با تغییرات مورفوهیدرولیکی رودخانه کاری دشوار بوده و استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی آن‌گونه که برای سیلاب میسر است، امکان‌پذیر نیست. همچنین قاعده کلی این است که برای انتخاب سطح ریسک تخریب سازه پل و آبگذر در یک

پروژه خاص، پیامدهای انسانی، اقتصادی، محیط‌زیستی مربوطه با کمک معیارهای کمی و کیفی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. انتخاب سطح ریسک تخریب سازه پل و آبگذر و معیارهای مربوطه در قالب مطالعاتی گسترده در مورد پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی ناشی از تخریب سازه قابل انجام است و در چارچوب خدمات این راهنما قرار ندارد.

در این راهنما یک رویه واحد و کاربردی و آسان برای انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی و ظرفیت آبگذری از طریق اصلاح و تعدیل جداول (۳-۸) و (۳-۹) با در نظر گرفتن اثرات مورفوهیدرولیک رودخانه ارائه شده است. برای حل این مشکل دو راه حل (الف و ب) به شرح زیر وجود دارد.

۳-۸-۱- راه‌حل الف- تعیین دوره بازگشت سیلاب طراحی

در این رویکرد کاهش اثرات تهدید مورفوهیدرولیکی رودخانه روی سازه پل یا آبگذر (در راستای مدیریت جامع رودخانه) مورد نظر است و سعی می‌شود که در یک فضای کاری دو مرحله‌ای اقداماتی صورت گیرد:

مرحله اول مدیریت رودخانه، انتخاب یک دوره بازگشت سیلاب طراحی برای مدیریت سازه‌ای رودخانه می‌باشد. در این مرحله، آثار مخرب مورفوهیدرولیکی رودخانه روی سازه پل یا آبگذر تا حد احتمال مجاز تخریب در مقابل سیلاب طراحی سازه پل یا آبگذر (آیین‌نامه ۴۱۵) [۵] همسان‌سازی می‌شود. به عبارت دیگر چنانچه برای سازه پل یا آبگذر طبق آیین‌نامه و با توجه به اهمیت آن دوره بازگشتی از سیلاب تعریف شده است، رودخانه نیز باید در مقابل این سیلاب مدیریت و برنامه‌ریزی شده و از اثرات تخریبی آن کاسته شود.

مرحله دوم مدیریت رودخانه، اعمال روش‌های غیر سازه‌ای در بازه‌های مورد مطالعه برای کاهش آثار تخریبی آن روی سازه پل یا آبگذر است که بخشی جدانشدنی از مرحله اول می‌باشد. مدیریت بر اقدامات مصنوعی و انسان ساخت در رودخانه و مدیریت سیلابدشت و تعیین بستر و حریم و کاربری‌های مجاز از جمله اقداماتی هستند که بایستی در کنار اقدامات سازه‌ای مورد نظر باشند.

مراحل دوگانه بالا که در واقع مولفه‌های مدیریت رودخانه به منظور کاهش آثار تهدیدات روی سازه می‌باشند بسته به کیفیت مورفولوژیکی رودخانه می‌توانند با هم و یا به تفکیک مورد بررسی قرارگیرد.

برای مدیریت رودخانه لازم است گام‌های ذیل برداشته شوند:

- شناخت ابعاد مسئله و آسیب‌شناسی مورفوهیدرولیکی رودخانه
- اقدامات مدیریتی (غیرسازه‌ای) در رودخانه به منظور کاهش اثرات تخریبی تهدیدات مورفوهیدرولیکی
- انتخاب دوره بازگشتی کمینه از سیلاب برای انجام اقدامات سازه‌ای در رودخانه، به‌گونه‌ای که تهدیدی متوجه سازه با دوره بازگشت سیلاب آیین‌نامه‌ای نباشد.

آسیب‌شناسی مورفوهیدرولیکی رودخانه از طریق طبقه‌بندی رودخانه میسر است. در این راهنما از جدیدترین طبقه‌بندی مورفوهیدرولیکی رودخانه استفاده می شود که در بند بعد این مبحث به ذکر جزئیات آن پرداخته می شود. بر

اساس این طبقه‌بندی، شاخص‌های مورفوهیدرولیکی رودخانه را از سه جنبه پیوستگی جریان آب و رسوب در طول رودخانه، مورفولوژی و پوشش گیاهی می‌توان به شاخص‌های مختلفی تقسیم نمود. تعریف این شاخص‌ها در جداول مربوط به روش طبقه‌بندی موسوم به «شاخص کیفیت مورفولوژیکی MQI» که از این به بعد MQI ارائه شده است. روش تعیین شاخص MQI از بخش‌های مهم مطالعات مورفولوژیکی است که در منابع معتبر ریخت شناسی شرح داده شده است. نمونه این مطالعات به طور خلاصه برای رودخانه تالار توسط طالبی و همکاران [۶۵] گزارش شده است.

تعیین طبقه رودخانه نیازمند انجام مطالعات مهندسی و مدل سازی رودخانه در گستره‌ای وسیع‌تر از بازه اولیه برای احداث پل یا آبگذر می‌باشد. به منظور بررسی میزان امکان‌پذیری کاهش اثرات تخریبی مورفوهیدرولیکی بازه روی سازه پل یا آبگذر لازم است که مرز امکان‌ناپذیری کاهش احتمال تخریب مورفوهیدرولیکی تعیین شود و چنانچه ساخت سازه پل یا آبگذر روی رودخانه به لحاظ مورفوهیدرولیکی امکان‌پذیر باشد، برای کاهش اثر تخریبی مورفوهیدرولیکی رودخانه، اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای (مدیریتی) روی رودخانه انجام گیرد.

انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی برای اقدامات سازه‌ای روی رودخانه و به منظور کاهش اثرات مورفوهیدرولیکی تخریب رودخانه موضوعی بسیار مهم بوده و نیاز به بهینه‌سازی دارد. چرا که تاثیر زیادی روی هزینه‌های تمام شده پروژه خواهد گذاشت. این دوره بازگشت الزاما با دوره بازگشت سیلاب طراحی سازه پل و آبگذر (آیین‌نامه ۴۱۵) [۵] برابر نیست. عوامل مختلفی در آثار مورفوهیدرولیکی رودخانه تاثیر گذارند. عوامل عملکردی، عوامل مصنوعی و انسان‌ساخت و تغییر الگو و جابجایی رودخانه از عوامل مهم در مورفوهیدرولیک و آثار تخریبی آن روی سازه پل و آبگذر هستند که درجه اهمیت و شدت تاثیرگذاری هر یک روی انتخاب دوره بازگشت سیلاب برای رودخانه موثر خواهد بود. برای مثال چنانچه کیفیت مورفولوژیکی رودخانه عمدتا تحت تاثیر اقدامات انسانی و مصنوعی نظیر ایجاد سازه‌های عرضی و طولی متعدد (بندها و استخر ذخیره، خاکریزها، نیمرخ پله‌بندی شده و غیره)، بهره‌برداری از شن و ماسه بستر و حواشی آن، قطع ارتباط آب‌های زیرزمینی با آب‌های سطحی، کاهش بده رودخانه و شار رسوب و جریان، اعمال محدودیت جانبی رودخانه، حذف رفتارهای طبیعی و دشت‌سیلابی و دست اندازی وسیع به حریم رودخانه با احداث پل‌های متعدد و کانال سازی و بتنی کردن آن باشد، می‌توان با مدیریت و برنامه‌ریزی منسجم اثرات تخریبی مورفوهیدرولیکی رودخانه را تا حد زیادی کاهش داد و نیازی به انتخاب سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا برای روش‌های سازه‌ای در رودخانه نیست.

سطح مدیریت رودخانه و انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی بستگی به سطح بندی اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای رودخانه و اهمیت سازه تقاطعی دارد که در این راهنما به پنج سطح به صورت زیر تقسیم می‌شوند:

- **سطح ۱:** اقدامات کامل سازه‌ای با دوره بازگشت سیلاب طراحی رودخانه معادل سیلاب طراحی سازه پل یا آبگذر همراه با اقدامات کامل غیرسازه‌ای
- **سطح ۲:** اقدامات کامل سازه‌ای در رودخانه با دوره بازگشتی کم‌تر از سیلاب طراحی سازه همراه با اقدامات کامل غیرسازه‌ای
- **سطح ۳:** اقدامات کامل غیرسازه‌ای

- **سطح ۴:** اقدامات نسبی غیرسازه‌ای
- **سطح ۵:** بدون اقدام

در راه‌حل (الف)، ابتدا سطح اقدامات مدیریتی در رودخانه مورد نظر شناسایی می‌شود. سپس دوره بازگشت سیلاب طراحی برای دو سازه پل و آبگذر، به ترتیب از جدول‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) تعیین می‌گردد.

۳-۸-۲- راه‌حل ب- تغییر معیار سیلاب طراحی آیین‌نامه ۴۱۵ در طرح سازه پل و آبگذر

در این رویکرد و در راستای اصلاح مورفوهیدرولیکی طرح سازه پل و آبگذر، دو مرحله اقدامات در نظر گرفته می‌شود:

- **مرحله اول اقدامات،** افزایش نسبی سیلاب طراحی نسبت به مقادیر جدول‌های (۳-۸) و (۳-۹) در آیین‌نامه ۴۱۵ [۵] از طریق اعمال یک ضریب اصلاحی است. این ضریب توسط کارشناس مورفولوژی رودخانه در بازه پیشنهادی جدول (۱/۲ تا ۲/۰) تعیین خواهد شد. توضیح آن‌که در آیین‌نامه هیدرولوژی راه‌های برون شهری و خطوط ریلی (ضابطه شماره ۸۰۰-۱، سال ۱۴۰۳) نیز مشابه دامنه ضرایب پیشنهادی ارائه شده است. هرچند که در این ضابطه برای پیشنهاد دوره بازگشت سیل برای درجات مختلف پل و آبگذر به مورفوهیدرولیک رودخانه توجه نشده است [۶]. با افزایش میزان سیلاب طراحی، ارتفاع و طول سازه بیش‌تر خواهد شد و مصونیت سازه در مقابل تهدیدات و تغییرات مورفوهیدرولیکی بیش‌تر خواهد شد.
- **مرحله دوم اقدامات،** سازگار نمودن معماری و جانمایی سازه با شرایط مورفوهیدرولیکی رودخانه می‌باشد. شرح بیش‌تر در بخش‌های زیر ارائه خواهد شد.

دو مرحله بالا عموما مکمل هم هستند و انجام بخشی از اقدامات اصلاحی گاهی منجر به نتیجه مطلوب نخواهد شد لذا باید احتیاط‌های لازم در خصوص اقدامات مکمل را نیز مورد توجه قرار داد.

ارتباط دادن احتمال مجاز تخریب سازه پل یا آبگذر با تغییرات مورفوهیدرولیکی رودخانه کاری دشوار بوده و استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی آن‌گونه که برای سیلاب میسر است، در حوزه تغییرات مورفوهیدرولیکی امکان‌پذیر نیست.

تهدیدهای مورفوهیدرولیکی رودخانه منجر به کاهش ظرفیت آبگذری سازه پل یا آبگذر از طریق رسوب‌گذاری در دهانه پل و یا تغییر عرض و جابجایی مسیر رودخانه خواهند گردید. ازاین‌رو با افزایش تراز سطح روگذر سازه، هم ظرفیت آبگذری جبران خواهد شد و هم طول سازه برای تاب‌آوری در مقابل تغییر عرض و جابجایی بیش‌تر خواهد شد. بنابراین با اصلاح میزان سیلاب طراحی، سازه پل یا آبگذر در مقابل تهدیدهای مورفوهیدرولیکی تا حدودی مقاوم‌سازی خواهد شد. اصلاح مورفولوژیکی طرح سازه نباید محدود به افزایش سیلاب طراحی شود بلکه تمهیدات گسترده در حوزه جانمایی و معماری و سایر اقدامات به عنوان مکمل تغییر سیلاب طراحی منظور شوند. جانمایی مناسب سازه، کمینه سازی تعداد دهانه‌ها، عدم ایجاد فشردگی در رودخانه، در نظرگرفتن دامنه جابجایی عرضی رودخانه در تعیین طول پل و آبگذر، در نظرگرفتن کریدور فرسایشی رودخانه، ضرورت احداث سد رسوبگیر در بالادست از جمله راه‌حل‌های مورفوهیدرولیکی هستند که ابعاد و گستردگی و میزان تاثیر آن‌ها در اصلاح طرح بستگی به سطح کیفیت مورفولوژیکی رودخانه دارد.

با کمک طبقه‌بندی کیفی MQI، ابتدا طبقه رودخانه مورد نظر استخراج می شود و سپس با اعمال ضرایبی افزایشی متناسب با طبقه رودخانه به میزان سیلاب طراحی آیین‌نامه ۴۱۵ [۵]، سیلاب طراحی اصلاح خواهد شد. هر چقدر رودخانه از کیفیت مورفولوژیکی بهتری برخوردار باشد، ضریب افزایش کوچک‌تری اعمال خواهد شد. به طور مثال در رودخانه تالار، مقدار شاخص MQI یک بازه مورفولوژیکی برابر با ۰/۶۳ تعیین شده است [۶۵]. با فرض طراحی پل برای یک راه شریانی (آزاد راه و بزرگراه) در مسیر اصلی، براساس جدول (۳-۱۱)، رودخانه در شرایط کیفی متوسط قرار داشته و دوره بازگشت سیل طراحی مطابق با آیین‌نامه ۴۱۵ (۵۰ تا ۱۰۰ ساله) کفایت می‌کند (ضریب اصلاحی برابر ۱/۰ است).

سطح اقدامات به منظور اصلاح مورفولوژیکی سازه پل یا آبگذر بستگی به طبقه رودخانه و اهمیت سازه دارد که در این راهنما به پنج سطح به صورت زیر تقسیم می‌شوند:

- **سطح ۱:** اعمال ضریب اصلاحی به سیلاب طراحی سازه همراه با اقدامات و تمهیدات کامل اصلاحی مورفوهیدرولیکی
- **سطح ۲:** اعمال ضریب اصلاحی به سیلاب طراحی سازه همراه با اقدامات و تمهیدات نسبی اصلاحی مورفوهیدرولیکی
- **سطح ۳:** اقدامات و تمهیدات کامل اصلاحی مورفوهیدرولیکی
- **سطح ۴:** اقدامات و تمهیدات نسبی مورفوهیدرولیکی
- **سطح ۵:** عدم اقدام

در راه‌حل (ب)، ابتدا با کمک روش طبقه بندی MQI طبقه رودخانه مورد نظر شناسایی می‌شود سپس متناسب با هر یک از پنج طبقه مورفوهیدرولیکی، دوره بازگشت سیلاب طراحی و ضرایب اصلاحی آن، برای دو سازه پل و آبگذر به ترتیب از جدول‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) تعیین می‌گردد. گاهی نیز ممکن است از ترکیب نتایج دو راه‌حل (الف) و (ب) و با قضاوت کارشناسی، دوره بازگشت سیلاب طراحی انتخاب گردد.

جدول ۳-۱۰- اصلاح مورفوهیدرولیکی سیلاب طراحی سازه پل

نوع راه	مولفه‌های راه	دوره بازگشت سیلاب طراحی (سال) [۵]	طبقه مورفوهیدرولیکی بازه رودخانه				
			بد 0≤MQI<0.3	ضعیف 0.3≤MQI<0.5	متوسط 0.5≤MQI<0.7	خوب 0.7≤MQI<0.85	خیلی خوب 0.85≤MQI≤1.0
شریانی (آزادراه و بزرگراه)	مسیر اصلی	۵۰ تا ۱۰۰	راه‌حل (الف)، سطح ۱، سیلاب طراحی رودخانه ۵۰ تا ۱۰۰ سال راه‌حل (ب)، سطح ۱، ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۲ تا ۲/۰	راه‌حل (الف)، سطح ۲ سیلاب طراحی رودخانه ۲۵ تا ۵۰ سال راه‌حل (ب)، سطح ۲ ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۰ تا ۱/۲	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴

ادامه جدول ۳-۱۰- اصلاح مورفوهیدرولیکی سیلاب طراحی سازه پل

نوع راه	مولفه‌های راه	دوره بازگشت سیلاب طراحی (سال) [۵]	طبقه مورفوهیدرولیکی بازه رودخانه				
			بد 0≤MQI<0.3	ضعیف 0.3≤MQI<0.5	متوسط 0.5≤MQI<0.7	خوب 0.7≤MQI<0.85	خیلی خوب 0.85≤MQI≤1.0
	راه جانبی	۵۰	راه‌حل (الف)، سطح ۲ – سیلاب طراحی رودخانه ۲۵ تا ۵۰ سال راه‌حل (ب)، سطح ۲- ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۰ تا ۱/۲	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵
	رابط‌ها	۵۰	راه‌حل (الف)، سطح ۲ – سیلاب طراحی رودخانه ۲۵ تا ۵۰ سال راه‌حل (ب)، سطح ۲- ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۰ تا ۱/۲	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵
راه اصلی	-	۲۵	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵
راه فرعی	-	۱۵	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵

جدول ۳-۱۱- اصلاح مورفوهیدرولیکی سیلاب طراحی سازه آبگذر

نوع راه	مولفه‌های راه	دوره بازگشت سیلاب طراحی (سال) [۵]	طبقه مورفوهیدرولیکی بازه رودخانه				
			بد 0≤MQI<0.3	ضعیف 0.3≤MQI<0.5	متوسط 0.5≤MQI<0.7	خوب 0.7≤MQI<0.85	خیلی خوب 0.85≤MQI≤1.0
شریانی (آزاد راه و بزرگراه)	مسیر اصلی	۲۵	راه‌حل (الف)، سطح ۱، سیلاب طراحی رودخانه ۲۵ سال راه‌حل (ب)، سطح ۱، ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۲ تا ۲/۰	راه‌حل (الف)، سطح ۲ – سیلاب طراحی رودخانه ۱۰ تا ۱۵ سال راه‌حل (ب)، سطح ۲- ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۰ تا ۱/۲	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴
	راه جانبی	۲۵	راه‌حل (الف)، سطح ۲ – سیلاب طراحی رودخانه ۱۰ تا ۱۵ سال راه‌حل (ب)، سطح ۲-	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵

		ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۰ تا ۱/۲					

ادامه جدول ۳-۱۱- اصلاح مورفوهیدرولیکی سیلاب طراحی سازه آبگذر

نوع راه	مولفه‌های راه	دوره بازگشت سیلاب طراحی (سال) [۵]	طبقه مورفوهیدرولیکی بازه رودخانه				
			بد 0≤MQI<0.3	ضعیف 0.3≤MQI<0.5	متوسط 0.5≤MQI<0.7	خوب 0.7≤MQI<0.85	خیلی خوب 0.85≤MQI≤1.0
	رابط‌ها	۲۵	راه‌حل (الف)، سطح ۲ - سیلاب طراحی رودخانه ۲۵ تا ۵۰ سال راه‌حل (ب)، سطح ۲- ضریب سیلاب طراحی پل ۱/۰ تا ۱/۲	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵
راه اصلی	-	۲۵	راه‌حل (الف)، سطح ۳ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵
راه فرعی	-	۱۵	راه‌حل (الف)، سطح ۴ راه‌حل (ب)، سطح ۳	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۴	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵	راه‌حل (الف)، سطح ۵ راه‌حل (ب)، سطح ۵

۳-۸-۳- توصیه‌های ریسک مبنای مورفوهیدرولیکی برای طراحی و ساخت سازه پل و آبگذر

بر اساس آیین‌نامه ۴۱۵ [۵] و مطابق جداول (۳-۸) و (۳-۹) درخصوص راهنمای انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی، سطح ریسک برای پل‌ها و آبگذرها بر مبنای ارزیابی احتمالاتی تهدید سیلاب بوده است و تهدیدهای مورفوهیدرولیکی رودخانه نادیده گرفته شده است.

سطح ریسک برای سازه‌ها اگر تنها براساس دوره بازگشت تعیین شود با این فرض همراه است که با بالابردن عرشه پل تا حد عمق متناظر با سیلاب طراحی، آ سیب‌پذیری پل به صفر می‌ر سد در صورتی‌که برای تهدید مورفوهیدرولیکی به دلیل عدم امکان پیش‌بینی پیامدهای مورفولوژیکی با یک احتمال خاص نمی‌توان روی آسیب‌پذیری سازه پل و آبگذر و راهکارهای به صفر رساندن آسیب‌پذیری سازه نسخه‌ای ارائه نمود. لذا سطح ریسک ناشی از تهدید مورفولوژیکی مطابق با سطح ریسک دوره بازگشت سیلاب نمی‌باشد و قاعدتا بیش‌تر خواهد بود. ازاین‌رو، در برخورد با ریسک مورفولوژیکی چاره‌ای جز برخورد کیفی نمی‌توان داشت. در این راهنما، برای سادگی، با قبول دوره بازگشت سیلاب طراحی، توصیه‌های ریسک مورفوهیدرولیکی برای دو سازه پل و آبگذر به ترتیب در جداول (۳-۱۲) و (۳-۱۳) ارائه شده است.

جدول ۳-۱۲- توصیه‌های ریسک مبنای مورفوهیدرولیکی طراحی و ساخت سازه پل

نوع راه	مولفه‌های راه	دوره بازگشت سیلاب طراحی (سال) [۵]	طبقه مورفوهیدرولیکی بازه رودخانه				
			بد 0≤MQI<0.3	ضعیف 0.3≤MQI<0.5	متوسط 0.5≤MQI<0.7	خوب 0.7≤MQI<0.85	خیلی خوب 0.85≤MQI≤1.0
شریانی (آزاد راه و بزرگراه)	مسیر اصلی	۵۰ تا ۱۰۰	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه فوق العاده بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه خیلی بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط وجود دارد	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط محدود وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.
	راه جانبی	۵۰	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه خیلی بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط محدود وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.
	رابط‌ها	۵۰	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط محدود وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.
راه اصلی	-	۲۵	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط محدود وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.
راه فرعی	-	۱۵	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است.	بدون پیش شرط امکان ساخت وجود دارد.

			امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	

جدول ۳-۱۳- توصیه‌های ریسک مبنای مورفوهیدرولیکی طراحی و ساخت سازه آبگذر

نوع راه	مولفه‌های راه	دوره بازگشت سیلاب طراحی (سال) [۵]	طبقه مورفوهیدرولیکی بازه رودخانه				
			بد 0≤MQI<0.3	ضعیف 0.3≤MQI<0.5	متوسط 0.5≤MQI<0.7	خوب 0.7≤MQI<0.85	خیلی خوب 0.85≤MQI≤1.0
شریانی (آزاد راه و بزرگراه)	مسیر اصلی	۲۵	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه فوق العاده بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. در صورت تصمیم به ساخت به شرایط مندرج در جدول ۳-۸ گزارش توجه شود	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه خیلی بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. در صورت تصمیم به ساخت به شرایط مندرج در جدول ۳-۸ گزارش توجه شود	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط مندرج در جدول ۳-۸ وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط مندرج در جدول ۳-۸ وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.
	راه جانبی	۲۵	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه خیلی بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. در صورت تصمیم به ساخت به شرایط مندرج در جدول ۳-۸ گزارش توجه شود.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط مندرج در جدول ۳-۸ وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط مندرج در جدول ۳-۸ وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.
	رابط‌ها	۲۵	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه بیش‌تر از حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط مندرج در جدول ۳-۸ وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط مندرج در جدول ۳-۸ وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.
راه اصلی	-	۲۵	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی سازه تقریبا معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت با شرایط مندرج در جدول۳-۸ وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.

ادامه جدول ۳-۱۳- توصیه‌های ریسک مبنای مورفوهیدرولیکی طراحی و ساخت سازه آبگذر

نوع راه	مولفه‌های راه	دوره بازگشت سیلاب طراحی (سال)	طبقه مورفوهیدرولیکی بازه رودخانه				
			بد 0≤MQI<0.3	ضعیف 0.3≤MQI<0.5	متوسط 0.5≤MQI<0.7	خوب 0.7≤MQI<0.85	خیلی خوب 0.85≤MQI≤1.0
راه فرعی	-	۱۵	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	ریسک تخریب مورفوهیدرولیکی معادل حد پیش‌بینی آیین‌نامه ۴۱۵ است. امکان ساخت بدون پیش شرط وجود دارد.	بدون پیش شرط امکان ساخت وجود دارد.

۳-۹- مطالعات محیط‌زیستی از نظر پیوستگی رودخانه

۳-۹-۱- تاثیر آبگذرها و پل‌ها بر پیوستگی محیط زیستی رودخانه

آبگذرها به منظور انتقال آب رودخانه از زیرجاده‌ها استفاده می شوند، آبگذرها می‌توانند به عنوان مانع مهاجرت مطرح شوند و مهاجرت ماهیان را با تاخیر یا توقف مواجه سازند. سرعت زیاد جریان در آبگذرها ممکن است با توانایی شنای ماهیان سازگار نبوده، بنابراین از عبور ماهیان به بالادست جلوگیری کند. لذا ماهیان مهاجر در پایین‌دست گیر افتاده و نمی‌توانند به محل‌های تخم‌ریزی مهاجرت کنند. پس بایستی برای عبور ماهیان از این سازه‌ها تدبیری اندیشیده شود.

۳-۹-۱-۱- مهاجرت ماهی

ماهیان به دلایل مختلفی محیط‌زیست خود را ترک کرده به محل‌های جدیدی مهاجرت می‌کنند که از جمله آن‌ها می‌توان به مهاجرت‌های تغذیه‌ای، مهاجرت برای دفع انگل‌ها و از همه مهم‌تر مهاجرت برای تولیدمثل اشاره کرد. طبقه‌بندی ماهی‌ها براساس تحمل آب با شوری‌های متفاوت در مراحل اصلی سیکل زندگیشان معمول شده است. بر این اساس ماهیان به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۷۵].

گونه‌های پوتادروم: تمام سیکل زندگی گونه‌های پوتادروم (مثلا قصافای رنگین‌کمان) در آب‌های شیرین یک سیستم رودخانه می‌باشد. مناطق تولیدمثل و تغذیه ممکن است با فواصل از چند متر تا چند صدکیلومتر از هم جدا شود.

گونه‌های دیادروم: چرخه زندگی گونه‌های دیادروم بخشی در آب شیرین و بخشی درآب‌های دریا، با فواصل بیش از چندین کیلومتر بین مناطق تولیدمثل و تغذیه جابجا می‌شود. دوگروه متفاوت در گونه‌های دیادروم وجود دارد:

گونه‌های آنادروم (مثلا ماهی آزاد و ماهی سفید دریاچه خزر)، که تولید مثل آن‌ها در آب شیرین و مرحله رشد شان در دریاست و در مرحله بعد برای تخم‌ریزی به آب شیرین برمی‌گردند. گونه‌های کاتادروم (مثلا مارماهی) چرخه زندگی معکوسی دارند. برای تولید مثل به دریا مهاجرت کرده و برای سکونت به آب‌های شیرین برمی‌گردند.

گونه‌های آمفی‌دروم: گونه‌های آمفی‌دروم (مثلا برخی از کفزی ماهیان) بخشی ازچرخه زندگی خود را هم در آب‌های شیرین و هم آب‌های دریا می‌گذراند. مهاجرت آن‌ها برای تولیدمثل نیست بلکه نوعا برای جستجوی غذا یا پناهگاه می‌باشد.

- تاثیر موانع رودخانه‌ای بر ماهیان مهاجر

ساخت موانع مانند آبگذرها عموما ضربه عمده‌ای روی جمعیت ماهیان دارد. مهاجرت و دیگر جابجایی ماهیان ممکن است متوقف شود و یا به تاخیر بیوفتد. کیفیت، کمیت و دسترسی زیستگاه‌شان که نقش مهمی در تحمل‌پذیری جمعیت ماهیان دارد می‌تواند تحت تاثیر قرار بگیرد. تغییر در رژیم بده یا کمیت آب همچنین ممکن است تاثیر غیرمستقیمی روی گونه‌های ماهی داشته باشد همچنین باعث قرارگیری بیش‌تر در معرض شکار ماهی مهاجر در بالادست و پایین‌دست موانع شود. ماهی‌ها در مقابل موانع متوقف شده و متمرکز می‌شوند و محل تجمع آن‌ها برای گونه‌های شکاری معین مناسب می‌شود.

- تاثیر موانع بر مهاجرین بالادست

یکی از تاثیرهای عمده احداث موانع رودخانه‌ای روی جمعیت ماهیان، کاهش گونه‌های آنادروم می‌باشد. این‌گونه موانع، مسیر مهاجرت بین مناطق تغذیه و تخم‌ریزی ماهیان را قطع می‌کند. تاثیر آن‌ها زمانی حاد می‌شود که باعث انقراض گونه‌ها شود به خصوص در مواقعی که هیچ جایی برای تخم‌گذاری در رودخانه یا شاخه فرعی آن در پایین‌دست سد یا مانع وجود نداشته باشد.

از قرن نوزده یک کاهش مداوم و فزاینده‌ای در موجودی گونه‌های دیادروم در فرانسه صورت گرفته است. در بسیاری از حالات، علل اصلی کاهش ساخت سدهایی است که از مهاجرت بالادست آزاد ماهیان جلوگیری می‌کنند. تاثیر منفی این موانع روی گونه‌های آنادروم (مخصوصا آزادماهی و شاه‌ماهی) بسیار مهم‌تر از آلودگی آب، ماهیگیری بیش از حد و تخریب زیستگاه در رودخانه‌های اصلی است. موانع، علت انقراض کل گونه‌ها (آزادماهیان در رودخانه‌های راین، سین و گارون) یا محبوس شدن گونه‌های معینی در بسیاری از بخش‌های محدود حوضه رودخانه (ماهی آزاد در لویر، شاه‌ماهی در گارون یا رون و غیره) بوده است [۱۷۹].

تحول تنوع زیستی هم در مقطع سیلابی و هم در رودخانه زیر موانع رخ می‌دهد. در استرالیا، مسدودشدن معبر ماهی شواهد زیادی از کاهش یا انقراض گونه‌های ماهی در حوضه تحت‌تاثیر نشان می‌دهد [۹۵].

این‌که یک ماهی می‌تواند از مانع عبور کند. قابلیت شنا و پرش بستگی به گونه ماهی، اندازه خاص آن‌ها، شرایط فیزیولوژیکی‌شان و فاکتورهای کیفیت آب مانند دما و اکسیژن محلول دارد. گونه‌های معین کاتادروم توانایی ویژه‌ای برای برداشتن موانع درطول مهاجرت‌شان به بالادست دارند. مارماهی‌های جوان علاوه بر سرعت زیاد، قادر به صعود از میان بوته‌ها یا روی شیب‌های علفی به شرطی که کاملا مرطوب باشند هستند. بعضی گونه‌ها (مثلا ماهی کفزی) دارای مکنده و بال‌های بزرگ شده هستند که می‌توانند با آن به لایه زیرین چسبیده و از اطراف لبه آبشار و راپیدها صعود کنند [۱۷۰].

- تاثیر موانع بر مهاجرین پایین‌دست

در مراحل اولیه ایجاد موانع مانند آبگذر و غیره، مهندسان و بیولوژیست‌های شیلات، تهیه تسهیلات عبور ماهی به بالادست را در نظر می‌گیرند. عبور از موانع علت مهم صدمات مخصوصا برای مهاجرت ماهی به پایین‌دست نمی‌باشد. آزمایش‌ها نشان داده است که مشکلات در رابطه با مهاجرت پایین‌دست می‌تواند عامل موثر عمده‌ای روی موجودی ماهی‌های دیادروم باشد.

مهاجرت پایین‌دست شامل گونه‌های دیادروم گونه‌های آنادروم جوان، گونه‌های کاتادروم بالغ وگونه‌های آنادروم معین (تجدید تخم‌گذاری) می‌باشد.

۳-۹-۱-۲- افزایش خطر شکار شدن

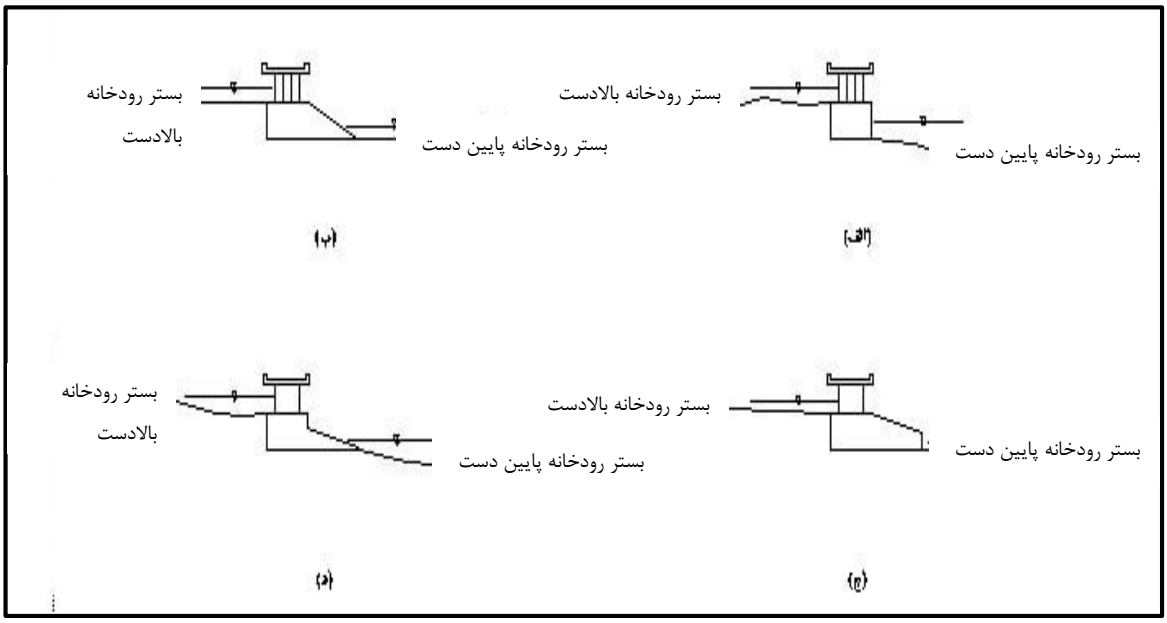
رفتار شکار طبیعی ممکن است با ایجاد موانع در رودخانه تغییرکند. گرچه اطلاعات کمی در این مورد وجود دارد ولی به نظر می‌رسد که برای گونه‌های مهاجر، افزایش شکار در نزدیکی موانع توسط دیگر ماهیان یا پرندگان به علت تمرکز غیرعادی ماهی‌های بالادست موانع یا افتادن در آشفتگی یا چرخش گردابه‌های پایین‌دست، بیشتر می‌باشد. در بعضی رودخانه‌ها شکار ممکن است بخش مهمی از جمعیت ماهیان را تحت تاثیر قرار دهد.

۳-۹-۱-۳- بررسی موانع مهاجرت آبزیان در پل‌ها

متاسفانه بعضی پل‌ها به دلیل سهل انگاری و عدم توجه به مسائل محیط‌زیستی، مشکلاتی را برای عبور ماهیان ایجاد نموده است. در این پل‌ها، پایه‌ها بر روی سکوی یکپارچه واقع شده و این سکو بلندتر از بستر رودخانه می‌باشد. احتمالا هدف طراح از این کار، جلوگیری از فرسایش و آبشستگی پایه پل‌ها می‌باشد. در رودخانه‌هایی که دارای شیب تندی بوده و فرسایش بستر آن رخ می‌دهد، محدوده‌ای را در فاصله دو طرف پل در جهت طولی رودخانه و برای کل عرض رودخانه، مقطعی بتنی با شیب تقریبا صفر در نظر می‌گیرند تا سرعت در این ناحیه کم شده و فرسایش و آبشستگی در این مقطع و در اطراف پایه‌ها حذف شود.

همچنین به سبب پایین رفتن سطح دریا، بستر رودخانه نیز به تبع آن به مرور زمان فرسایش یافته تا سطح خود را با تراز سطح دریا هماهنگ کند و این فرسایش به بالادست حرکت می‌کند که در رسیدن به پل‌ها باعث فرسایش زیر پایه پل‌ها و سست نمودن فونداسیون و تخریب پل‌ها خواهد شد.

با توجه به دلایل بالا و احتمالا دیگر علت‌ها، فونداسیون پل‌ها را به صورت پی گسترده و مرتفع‌تر از بستر رودخانه احداث می‌نمایند و پایین‌دست آن را پله‌ای و یا به صورت شیب‌دار و گاهی ترکیبی از این دو ایجاد می‌کنند. بدین وسیله یک اختلاف ارتفاع قابل توجهی در محل پل‌ها بین بالادست و پایین‌دست پل ایجاد می‌شود که برای ماهیان مهاجر غیرقابل گذر می‌شود (شکل ۳-۸۶).



شکل ۳-۸۶- بعضی از انواع موانعی که در محل احداث پل‌ها ایجاد می‌شود

به عنوان نمونه در پل تجن در نزدیکی ساری در جاده ساری- نکا بر روی رودخانه تجن و بالادست سد انحرافی تجن این مورد به وضوح دیده می‌شود. پایین‌دست سکوی پایه‌ها به صورت آب شیب و دراپ ایجاد شده و ارتفاعی حدود ۳ متر دارا می‌باشد (شکل ۳-۸۷). این رودخانه یکی از رودخانه‌های پر آب بوده و محل مهاجرت گونه‌های مختلف ماهیان خاویاری می‌باشد ولی به دلیل وجود این مانع، سال‌هاست که مهاجرت ماهیان به قسمت‌های بالادست رودخانه قطع شده است و در صورت اصلاح آن، مسیر مهاجرت ماهیان مجددا بازیابی خواهد شد.

پل تجن در جاده ساری - نکا، نزدیک شهر ساری و بر روی رودخانه تجن احداث شده است. پایه‌های این پل بر روی سکویی واقع شده که پایین‌دست آن یک آب شیب (سطح شیب‌دار) و بعد از آن دراپ می‌باشد که اختلاف ارتفاعی حدود ۳ متر بین سطح آب بالادست و پایین‌دست ایجاد می‌کند مانند شکل (۳-۸۶-ج) که به صورت یک مانع جدی برای مهاجرت بوده و از زمان احداث آن، ماهیان دیگر قادر به مهاجرت به بالاتر نمی‌باشند. شکل‌های (۳-۸۷) و (۳-۸۸) نمایی از این موانع را نشان می‌دهند. این پل حدود ۱/۵ کیلومتر بالاتر از سد انحرافی تجن واقع شده و سد مزبور دارای راه‌ماهی است و در صورت عبور موفق ماهیان از این راه‌ماهی، ماهیان در این مانع به طور کامل متوقف خواهند شد و در واقع وجود این پل، راه‌ماهی سد انحرافی تجن را بی‌اثر نموده و وجود آن را چیز زایدی وانمود می‌کند. ولی در صورت ا صلاح و بازیابی مسیر مهاجرت در این مانع، تا مسافت قابل توجهی از رودخانه بازگشایی شده و محل تخم‌ریزی قبلی ماهیان مجددا احیا خواهد شد.

شکل ۳-۸۷- مانع پل تجن

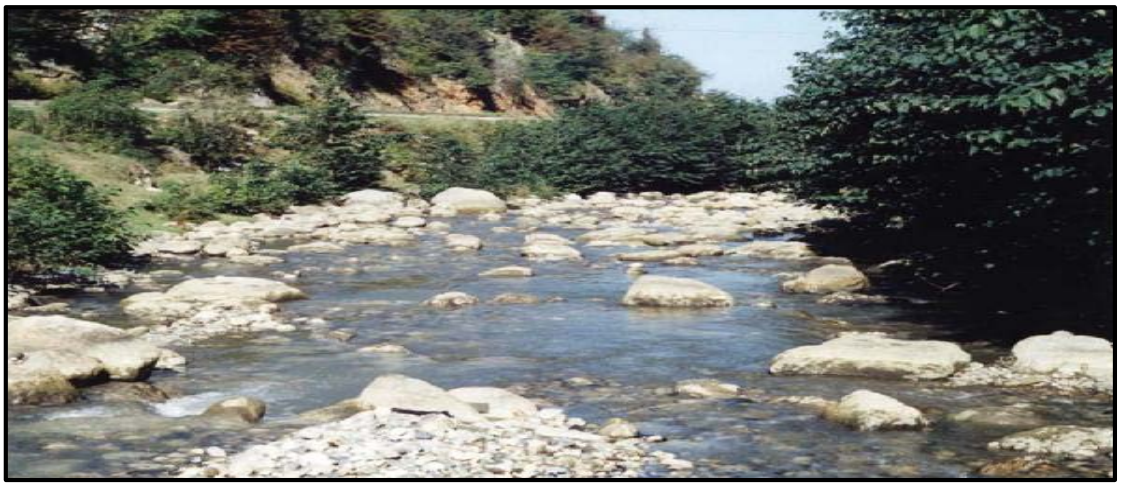
شکل (۳-۸۸) مجموعه‌ای از آبگذرهایی که بر روی رودخانه جهت عبور و مرور احداث شده است را نشان می‌دهد. به آبشار پایین‌دست آن توجه شود. چنین سازه‌هایی مانع جدی مهاجرت ماهی بوده بنابراین توصیه می‌شود حتی‌المقدور از ساخت چنین سازه‌هایی در رودخانه‌های دارای ماهیان مهاجر به بالادست استفاده نشود.

شکل ۳-۸۸- مجموعه آبگذرها و آبشار موجود در پایین‌دست، مانع گذر ماهی مهاجر به بالادست

۳-۹-۲- حفظ پیوستگی بیولوژیکی رودخانه پس از احداث پل‌ها و آبگذرها

لازم است که در طول رودخانه‌ها شرایط و موقعیت‌هایی موجود باشد که هر یک از گونه‌های مهاجر و ساکن بسته به نیاز خود به تخم‌ریزی، تغذیه، استراحت، پناه گرفتن، زمستان گذرانی و غیره بپردازند. در بعضی موارد مسیر رودخانه‌ها به طور طبیعی دارای چنین شرایطی بوده و محل‌های مورد نیاز ماهیان تامین می‌باشد و ماهی می‌تواند بدون هیچ مشکلی نیاز خود را برآورده سازد. ولی در بعضی رودخانه‌های دیگر به دلیل شرایط خاصی مورفولوژیکی طبیعی رودخانه یا شرایط ناشی از عوامل طبیعی یا مصنوعی متفاوت، وضعیت به‌گونه‌ای می‌شود که شرایط را دشوار نموده یا به کلی از بین می‌برد. در مسیر رودخانه‌ها ممکن است شیب زیاد یا سرعت جریان بالا بوده که برای گونه‌های با توانایی شنای محدود به صورت مانعی مطرح شود. شیب زیاد رودخانه و سرعت جریان بالا احتمال دارد طبیعت خود رودخانه بوده یا بعدا در اثر عوامل طبیعی یا عوامل مصنوعی ناشی از دخالت انسان حادث شود. عوامل طبیعی می‌تواند شامل پایین رفتن سطح دریا، تغییر

طبیعی بستر رودخانه به مرور زمان و یا موارد دیگری باشد. عوامل مصنوعی می‌تواند شامل تغییر مسیر رودخانه‌ها مانند کوتاه کردن مسیر، میان‌برها، احداث بستر مصنوعی، تغییر خصوصیات هیدرولیکی مسیر رودخانه مانند کاهش زبری بستر، بهینه نمودن هیدرولیکی مقطع رودخانه و موارد مشابهی بوده که موجب افزایش سرعت در مسیر رودخانه شده و برای ماهیان ساکن و مهاجر رودخانه‌ها مشکلاتی را ایجاد نماید (شکل ۳-۸۹).

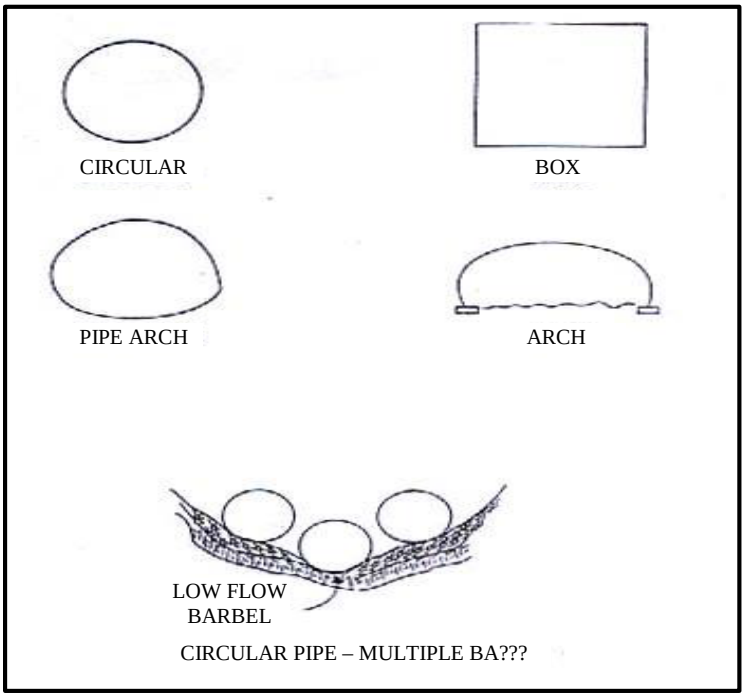


شکل ۳-۸۹- توزیع طبیعی سنگ‌های بستر رودخانه برای کمک به مهاجرت ماهی به بالادست (رودخانه سردآبرود، پایین‌دست سد انحرافی)

۳-۹-۲-۱- راه‌حل برای آبگذرهای جدید

یک راه‌حل ساده برای مواقعی که سرعت عبور ماهی کم می‌باشد به این صورت است که شیب آبگذر برابر شیب بستر رودخانه در بالا و پایین آبگذر باشد و مواد قرار داده شده در کف آبگذر شبیه بستر رودخانه باشد. بنابراین ضریب زبری و شعاع هیدرولیکی مشابه بستر رودخانه باقی مانده و سرعت برابر همان خواهد بود که در رودخانه است و ماهی قادر خواهد بود به آسانی از میان آبگذر عبور کند.

اولین قانون در طراحی آبگذرهای جدید این است که بستر رودخانه در میان آبگذر بایستی تا حد امکان از نظر شیب بستر، مصالح بستر و محیط تر شده نزدیک (مشابه) بستر رودخانه اصلی باشد. همیشه رسیدن به این شرایط ایده‌آل ممکن نخواهد بود زیرا با ثابت نگه داشتن ضریب زبری و شعاع هیدرولیکی، سرعت جریان بیش‌تر از سرعت ماهی شده و برای ماهی قابل گذر نخواهد بود. بنابراین برای این منظور بهتر است زبری را با موجدار کردن لوله افزایش داد و هر چه این موج‌ها عمیق‌تر باشد نیز نتیجه بهتر بوده ولی این کار از نظر مهندس طراح ممکن است به‌دلیل نیاز به لوله‌های قطورتر و در نتیجه هزینه بیش‌تر، مناسب نباشد (شکل ۳-۹۰).

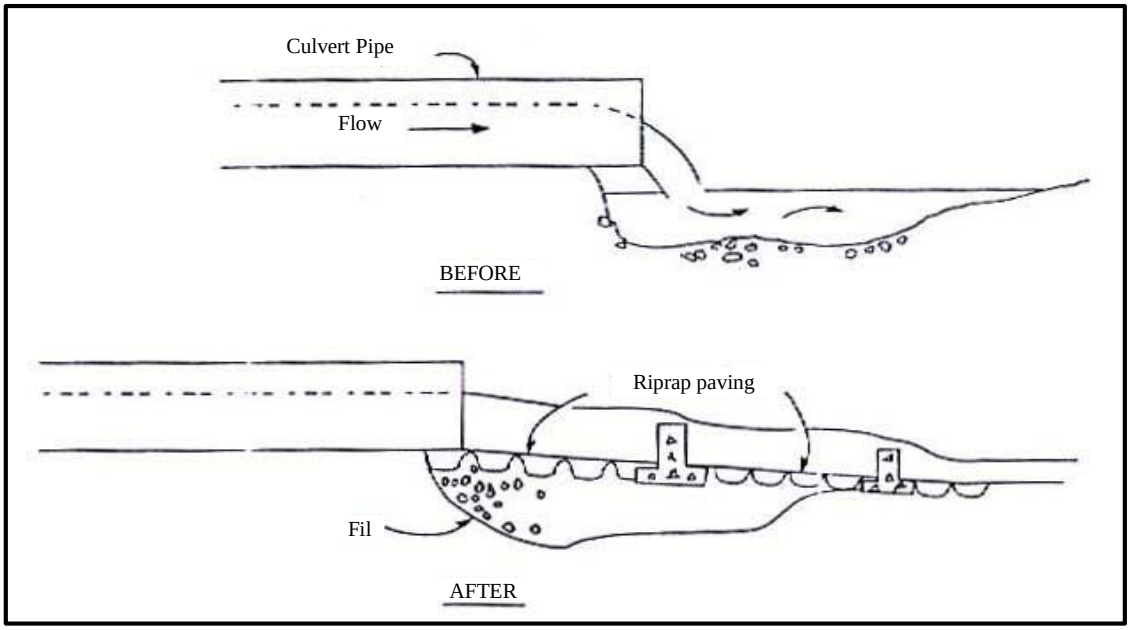


شکل ۳-۹۰- چند نوع از آبگذرهای فولادی و بتنی [۱۰۹]

روش دیگر برای قابل گذر نمودن آبگذر برای ماهیان در جریان‌های بالاتر، الحاق یک سری مانع داخل لوله می‌با شد که اثری شـــبیه لوله‌های موجدار، ولی بیش‌تر از آن دارد ولی این روش نیز ظرفیت عبور ســـیل را کاهش می‌دهد و چنانچه راه‌حل‌های دیگر پیدا شـود، موانع در طراحی آبگذرهای جدید توصـیه نمی‌شـود. این روش می‌تواند برای آبگذرهای موجود مفید باشد. ضعف دیگر در طراحی آبگذرها برای عبور ماهی آن است که یک لوله بزرگ منفرد اغلب در جریان‌های کم آب را به نقطه‌ای پخش می‌کند که عمق کافی برای شـنای ماهی وجود ندارد. این تا اندازه‌ای می‌تواند جبران شـود مخصـوصـا در حالاتی که محل اجازه نصـب چندین آبگذر لوله‌ای را می‌دهد در این حالت یک لوله آبگذر بایسـتی پایین‌تر از دیگر آبگذرها قرار داده شـود. بنابراین جریان در یک لوله متمرکز می‌شـود و عمق کافی برای ماهی جهت شـنا در جریان‌های بالا وجود خواهد داشـت. این مشـکل برای آبگذرها قوطی شـکل که دارای کف صـاف و تخت بوده و اغلب برای ماهی غیرقابل عبور می‌باشد، نیز وجود خواهد داشت. در این حالت نیز آبگذرهای مختلف می‌تواند استفاده شود یا یک مقطعی از کف یک آبگذر تنها می‌تواند پایین آورده شود و آب را در جریان‌های کم در آن قسمت متمرکز کند.

م.شکل سوم می‌تواند بعد از ساخت آبگذر پیش آید مگر این‌که ضریب اطمینان بزرگی در طراحی گرفته شود. از آن جایی که آبگذر برای حداکثر جریان در رودخانه طراحی شده است، فرسایش در خروجی آبگذر یا پایین آن می‌تواند ایجاد شـــود بنابراین لوله جریان پری را عبور داده و در نتیجه در انتهای آن هد قابل توجهی وجود خواهد داشـــت. در نتیجه سرعت‌های زیاد در لوله، آبشستگی قابل‌توجهی در پایین خروجی ایجاد خواهد شد که بایستی در طراحی پیش‌بینی شود و سنگریزه کافی در پایین خروجی یا حوضچه‌های آرامش بتنی جهت جلوگیری از آبشستگی و قابل گذر نمودن خروجی

برای ماهی در نظرگرفته شـود. بسـیاری از گونه‌های موجود در محل آبگذرها جهنده نبوده و نمی‌توانند از دراپ‌های بیش از چند اینچ صعودکنند. شکل (۳-۹۱) راه‌حل این مساله را نشان می‌دهد.



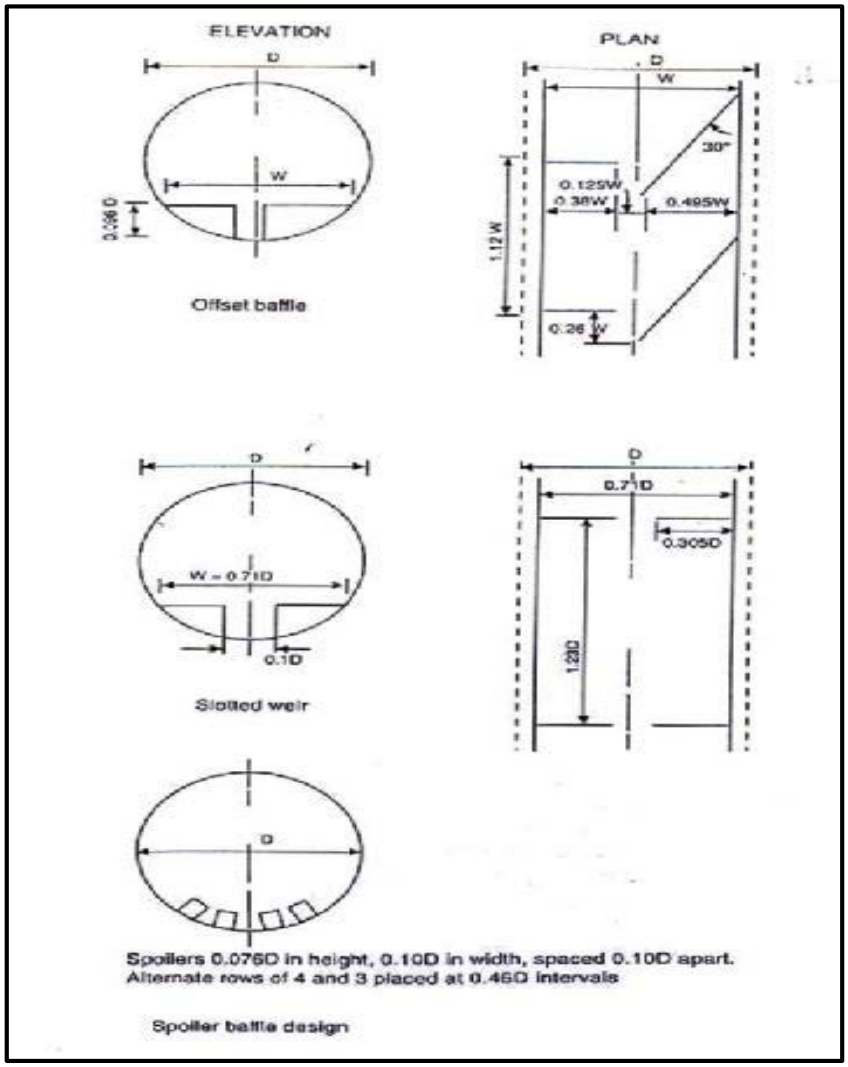
شکل ۳-۹۱- آبشستگی در پایاب آبگذر و روش اصلاح آن با استفاده از سنگریزی و قرار دادن موانع بتنی [۱۰۹]

۳-۹-۲-۲- قابل گذر نمودن آبگذرهای موجود

این مساله یک مشکل مجزایی است زیرا بسیاری از آبگذرها بدون توجه به مشکلات بالقوه عبور ماهی ساخته شده‌اند. بنابراین روش‌های متفاوتی برای آن‌ها لازم است. در بسیاری از آبگذرها آبشستگی پایین‌دست لوله‌ها گودالی ایجاد می‌کند که دراپ آن‌ها قابل گذر برای ماهی نیست و یکی از مشکلات اصلی در آبگذرهای موجود می‌باشد. راه‌حل‌های مختلفی برای این آبگذرها وجود دارد که همه آن‌ها از یک اصل پیروی می‌کنند.

ضروری است که پایاب به ترازی که صعود ماهی را ممکن سازد رسانده شود که می‌تواند با نصب دیوارها یا موانع پایدار در عرض حوضچه آبشستگی با ترکیب سنگریزه با بتن چنانچه که قبلا توضیح داده شد، یک سری از پله‌ها را ایجاد نمود که ماهی بتواند صعود کند. این دیوارها یا موانع می‌تواند بسته به نیاز ماهی یا سازه، به منظور اطمینان از پایداری آن شکاف‌دار شوند. مشکل دیگر وجود سرعت بالا داخل آبگذر است. روش‌های زیادی برای کاهش سرعت در جریان مهاجرت ماهی وجود دارد که همه آن‌ها شـامل قراردادن مانع داخل آبگذرها می‌باشـد. این موانع می‌تواند بتنی، فولادی، چوبی یا از دیگر مواد باشد و یا ممکن است سنگ‌های بزرگی بوده که در کف مهار شده‌اند. هر یک از آبگذرها خصوصیات خاصی دارند که ممکن است یکی از این سیستم‌ها برای آن مناسب‌تر از دیگر سیستم‌ها باشد. چند نمونه در شکل‌های (۳-۹۲) و (۳-۹۳) نشان داده شده‌اند. سیستم موانع نشان داده شده در شکل (۳-۹۲) می‌تواند از بتن فولاد یا چوب ساخته شده و توسط بولت‌ها به دیواره آبگذر بسته شود. این نوع موانع متاسفانه در معرض رسوب قرارگرفته بنابراین نیاز به نگهداری دارند. سیستم موانع سرریز شکاف‌دار نشان داده است که برای عبور ماهی مانند سیستم قبلی موثر است و

دارای پیچیدگی کمی در طراحی و اجرا می‌باشد. لیکن سرریزهای بدون شکاف برای ماهی‌های غیرجهنده، مخصوصا در جریان‌های کم، قابل گذر نیست. این سیستم منجر به نگهداری بار بستر شده ولی کم‌تر در معرض جمع شدن آشغال و مواد شناور قرار می‌گیرد و به نگهداری زیاد نیاز دارد.

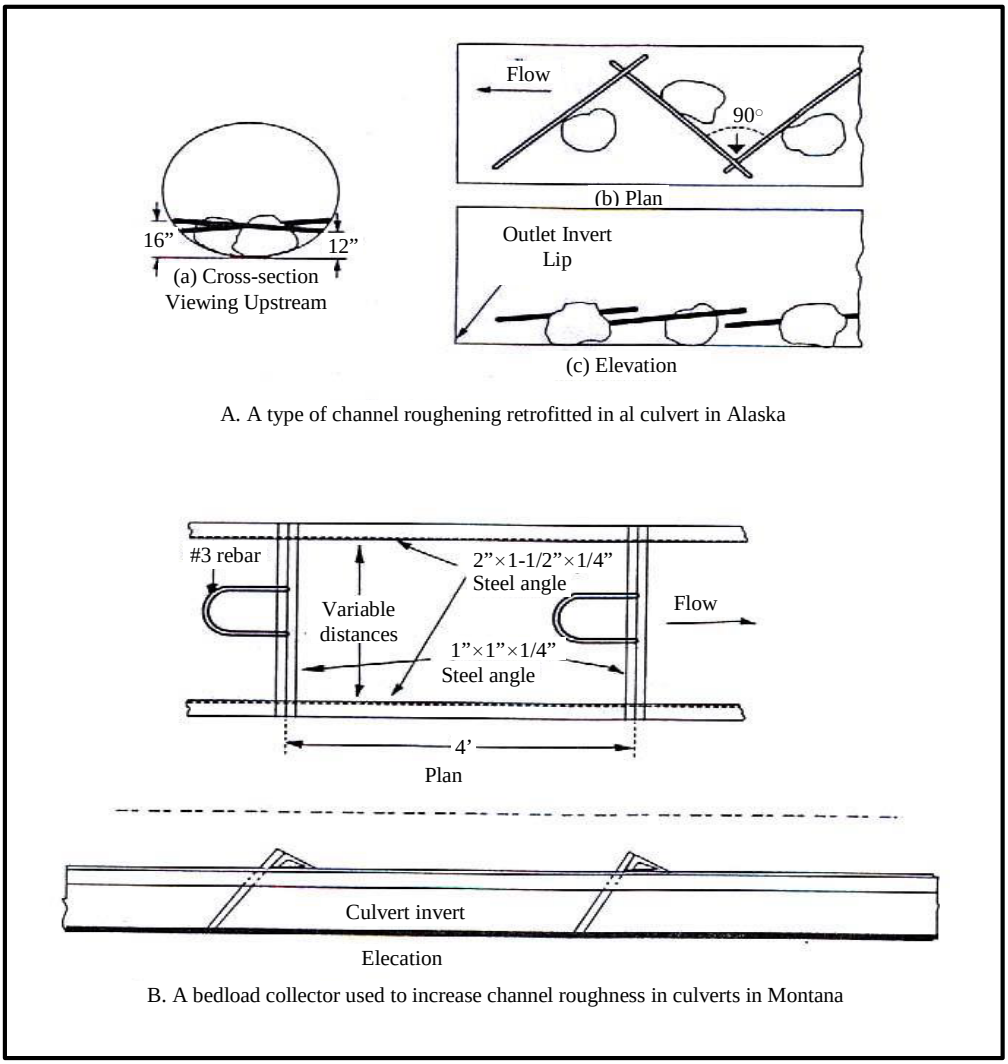


شکل ۳-۹۲- سه نوع از موانع قرار داده شده در آبگذرها [۱۰۹]

سیستم موانع[۱] جهت طراحی و ساخت بسیار هزینه‌بر بوده ولی در کاهش سرعت موثر هستند و احتمالا تمایل کم‌تری برای جمع شدن بار بستر و آشغال‌های شناور دارند. موانع با صفحات فلزی، دارای اثر بیش‌تر در کاهش سرعت و ساخت ساده می‌باشند.

میله‌های مسلح و سازه‌های سنگی نشان داده شده در شکل (۳-۹۳)- (A-4) نصب شده در آلاسکا برای عبور ماهی مخصوصا در جریان‌های کم موثر است به شرطی که با آشغال مسدود نشود، به این دلیل نگهداری زیادی لازم است.

۱-Spoiler baffles



شکل ۳-۹۳- روش‌های دیگر قابل گذر نمودن آبگذرها [۱۰۹]

نهایتا موانع نوع نبشی و میلگرد نشان داده شده در شکل (۳-۹۳) - (B-4) در مونتانا برای عبور قزل آلا استفاده می‌شود و برای شیب‌های تند کاملا موفقیت آمیز بوده است و با جابجایی کل قاب از داخل آبگذر به آسانی نگهداری (تمیز نمودن) می‌شود.

توصیه‌های عمومی زیر برای قابل گذر نمودن آبگذرهای جدید و آبگذرهای ساخته شده داده شده است.

الف- آبگذرهای جدید

- **شیب آبگذر:** عموما توافق بر این است که این شیب بیش از شیب بستر رودخانه در بالا و پایین آبگذر نباشد. بعضی گزارش‌ها کم‌تر از این، حتی یک شیب صفر را ذکر می‌کنند. ولی انحراف از شیب بستر اصلی رودخانه، رژیم طبیعی رودخانه را بر هم می‌زند و بایستی پرهیز شود.

- **ارتفاع آبگذر:** توافق عمومی بر قراردادن کف آبگذر مقداری پایین‌تر از بستر طبیعی رودخانه می‌باشد. برای لوله‌های کم‌تر از قطر ۳ متر، ۰/۳ تا ۰/۶ متر زیر بستر و برای لوله‌های با قطر بیش‌تر از ۳ متر، یک پنجم قطر در زیر بستر توصیه می‌شود.
- **مواد بستر:** ته آبگذر بایستی با مصالح طبیعی بستر رودخانه یا معادل آن تا رسیدن کف آن به تراز بستر رودخانه و شیبی که در بالا ذکر شده پر شود. شکل بستر رودخانه در مقطع عرضی بایستی تا حد ممکن جهت تهیه عمق کافی برای شنای ماهی و نگه داشتن محیط تر شده اصلی، دو قسمتی شود.
- **مصالح آبگذر:** درحالی‌که آبگذرهای بدون کف ترجیح داده می‌شود مانند آبگذر قوسی، گزینه بعدی لوله فلزی موجدار می‌باشد. موج‌ها بایستی بیشینه ضریب زبری را در فرمول مانینگ ایجاد کنند. بدترین گزینه یک آبگذر بتنی باکس است که در جریان‌های کم، یک آبراهه عریض صاف ایجاد می‌کند و صعود از آن برای ماهی بسیار مشکل است.
- **امتداد آبگذر و طول آن:** ترجیح داده می شودکه امتداد آبگذر همان امتداد رودخانه با شد ولی بایستی در نظر دا شت که طول بایستی در حد امکان کوتاه با شد. در حالت‌هایی که زاویه بین رودخانه و جاده بسیار کوچک ا ست ممکن ا ست لازم با شد که امتداد جاده را تغییر داد. چنین اقداماتی بستگی به مقدار ماهی و نیاز آن‌ها برای بالا رفتن در رودخانه دارد.
- **فرسایش آبگذر:** فرسایش بالقوه در ورودی و خروجی آبگذر بایستی پرهیز شود که می‌تواند با مسلح نمودن بستر رودخانه در ورودی و خروجی با سنگریزه، بتن یا مصالح دیگر عملی شود.
- **نگهداری آبگذر:** بازرسی و نگهداری منظم آبگذرها ضروری می‌باشد.

ب- آبگذرهای ساخته شده (موجود)

روش قابل گذر نمودن آبگذرهای موجود، به شرایطی که آبگذر را غیر قابل گذر کند، بستگی دارد. دو دلیل بسیار عمومی گود شدگی پایین‌د ست آبگذر و سرعت بالا داخل آبگذر برای جلوگیری از عبور ماهی وجود دارد. در گود شدگی پایاب آبگذر، چنانچه قبلا ذکر شد سنگریزه نمودن و ایجاد حوضچه آرامش معمولا به کار می‌رود. در حالتی هم که سرعت بالا از صعود ماهی جلوگیری می‌کند اگر با پر کردن کف آبگذر با مصالح بستر مساله حل شود، قرار دادن موانعی داخل آبگذر ممکن است ضروری باشد که این موانع بایستی با سیمان کاری یا با آرماتور به داخل آبگذر بسته شود.

۳-۹-۲-۳- راه‌ماهی‌ها (Fishways)

راه‌ماهی‌ها سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی هستند که به منظور مهاجرت ماهی‌ها از پایین‌دست به بالادست در سازه‌های تقاطعی طراحی و اجرا می‌شوند. انواع راه‌ماهی‌های متداول در ۶۰ سال اخیر شامل موارد ذیل می‌باشند:

الف- حوضچه و سرریز[۱]

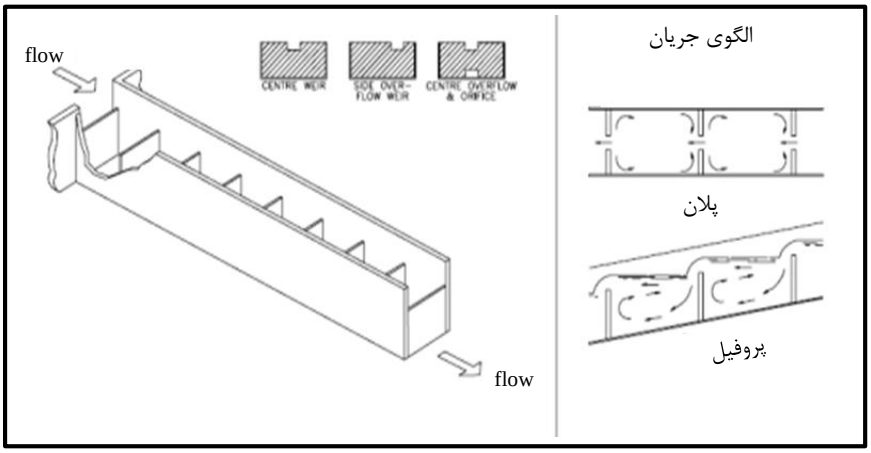
ب- بازشدگی قائم[۲]

ج- دنیل[۳]

د- کانال ماهی- قایق‌رو[۴]

الف- راه‌ماهی حوضچه و سرریز

قدیمی‌ترین نوع راه‌ماهی مورد ا ستفاده، راه‌ماهی حو ضچه و سرریز ا ست که در سرتا سر دنیا نمونه‌هایی از آن دیده می‌شود. این نوع راه‌ماهی‌ها، ترکیبی از یک سری حوضچه‌های متناوب هستند که با سرریزهای لبه‌تیز از هم جداشده‌اند. هر کدام از این سرریزها دارای یک شکاف در قسمت بالایی می‌باشند که برای عبور جریان در نظرگرفته شده است. همچنین در قسمت تحتانی سرریزها، یک روزنه با ابعاد مناسب برای عبور ماهی در نظر گرفته شده است. نمای شماتیک راه‌ماهی از نوع حوضچه و سرریز در شکل (۳-۹۴) و (۳-۹۵) نشان ارائه شده است.



شکل ۳-۹۴- نمای شماتیک راه‌ماهی حوضچه و سرریز [۱۵۲]

۱. Weir fishway

۲. Vertical Slot Fishways

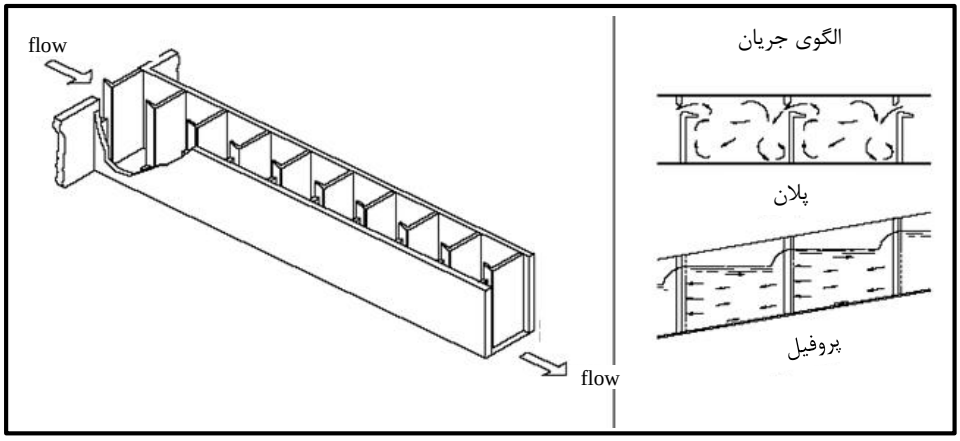
۳. Denil Fishways

۴. Canoe-Fishway

شکل ۳-۹۵- نمونه‌ای از راه‌ماهی حوضچه و سرریز [۱۵۲]

ب- راه‌ماهی بازشدگی قائم

راه‌ماهی متداول دیگر، راه‌ماهی از نوع باز شدگی قائم یا راه‌ماهی شیار قائم ا ست (شکل‌های ۳-۹۶ و ۳-۹۷). این نوع راه‌ماهی در ا صل، یک راه‌ماهی از نوع حو ضچه و سرریز می‌با شد که با یک باز شدگی در یک طرف، به صورت عمودی تا کل ارتفاع سرریز ادامه یافته است [۱۵۲].

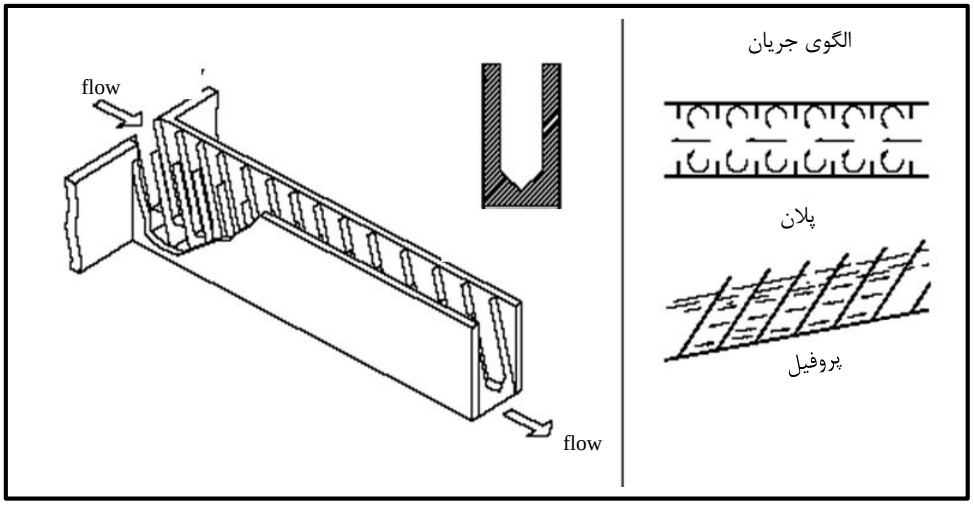


شکل ۳-۹۶- نمای شماتیک راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم [۱۵۲]

شکل ۳-۹۷- نمایی از راه‌ماهی نوع بازشدگی قائم و زاویه بازشدگی ۴۵ درجه نسبت به جهت جریان

ج- راه‌ماهی دنیل

راه‌ماهی دنیل یکی از انواع راه‌ماهی های کلا سیک ا ست که اولین بار تو سط ا ست جی دنیل (۱۹۰۸) معرفی گردید [۱۵۱]. راه‌ماهی دنیل تشکیل شده از یک کانال مستقیم مستطیلی شیب‌دار که قاب‌هایی در داخل آن قرار گرفته‌اند که نحوه قرارگیری قاب‌ها باعث اســتهلاک انرژی جریان گردیده و جریان نســبتا مناســبی را برای عبور ماهی در یک مســیر مستقیم و پیو سته فراهم می‌کند. کاتوپودیس (۱۹۸۱) [۱۵۲] نیز این راه‌ماهی‌ها را مورد مطالعه قرار داد. نمای شماتیک راه‌ماهی دنیل در شکل (۳-۹۸) و (۳-۹۹) نشان داده شده است.



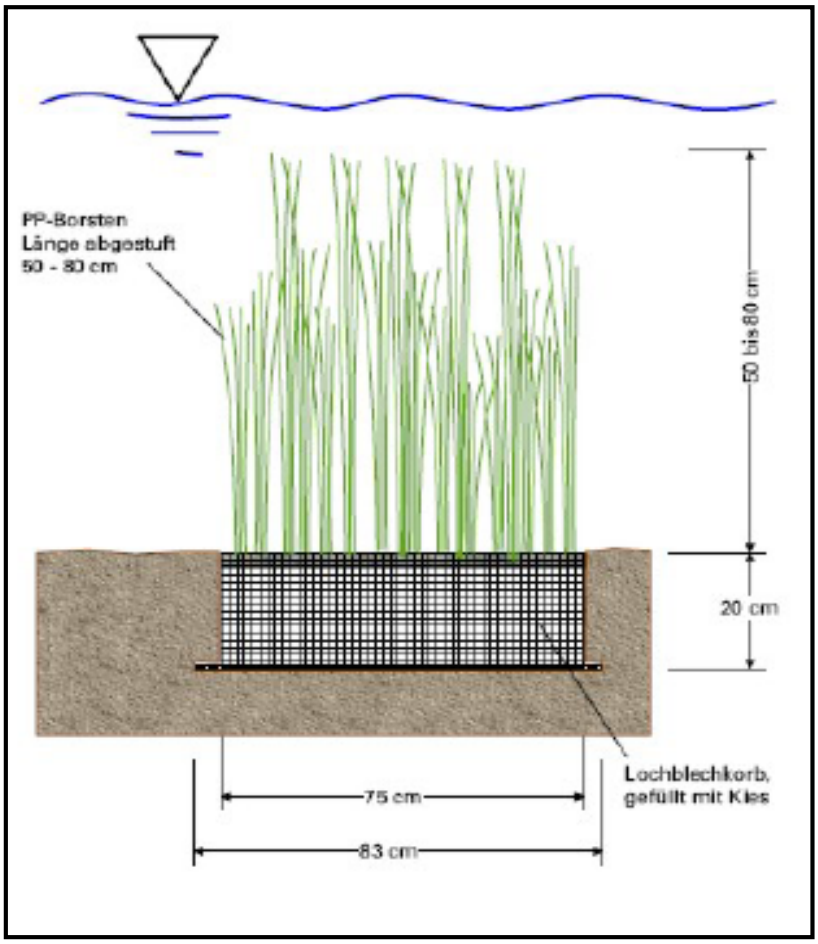
شکل ۳-۹۸- نمای راه‌ماهی دنیل [۱۵۲]

شکل ۳-۹۹- نمایی از راه‌ماهی دنیل

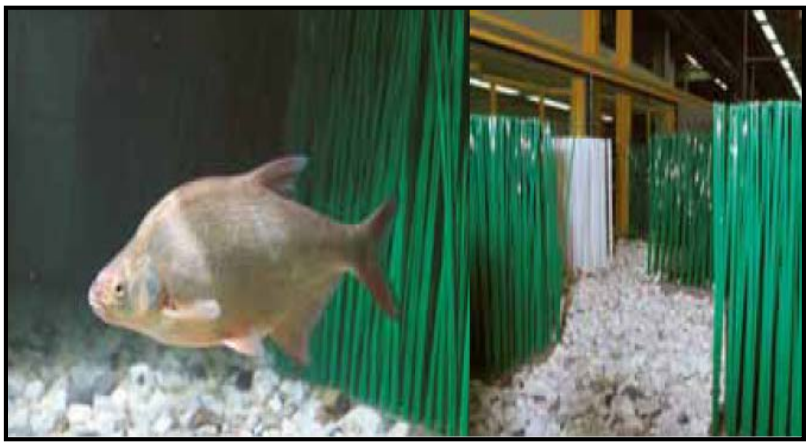
د- کانال ماهی- قایق‌رو

راه‌ماهی جدیدی که در سال‌های اخیر مورد استفاده واقع شده است راه‌ماهی از نوع ماهی- قایق‌رو می‌باشد. در طراحی و اجرای این راه‌ماهی، سعی شده است که بیشینه انطباق را با محیط‌زیست رودخانه داشته باشد. در سالیان اخیر، این فناوری جدید برای عبور ماهی در کشورهایی نظیر آلمان، سوئیس و اتریش مورد استفاده قرارگرفته است و در حال حاضر حدود ۳۵ نمونه از این نوع راه‌ماهی ساخته شده ا ست. این راه‌ماهی یک کانال م ستطیلی ا ست که در کف آن، برس‌هایی مت شکل از

تعداد زیادی از میله‌های نازک زبر انعطاف پذیر اســـت. این برس‌ها انرژی را به خوبی مســـتهلک می‌کنند و به دلیل شـــعاع خمش مناســـب برس‌ها، قایق‌ران بدون هیچ‌گونه مشـــکلی از روی آن‌ها عبور می‌کند (شـــکل‌های۳-۱۰۰ تا ۳-۱۰۶). از مهم‌ترین مزایای این نوع راه‌ماهی ایجاد شرایط هیدرولیکی سازگار با شرایط محیط‌زیستی، پایین بودن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، عدم رسوب‌گذاری و ایجاد معبری برای تردد قایق‌ها می‌باشد.



شکل ۳-۱۰۰- نمای شماتیک برس



شکل ۳-۱۰۱- عبور ماهی از نوع سیم در کانال ماهی- قایق‌رو [۱۴۴]

شکل ۳-۱۰۲- عبور قایق از کانال ماهی- قایق‌رو در رودخانه مدوای (دانشگاه کاسل المان، ۲۰۰۷)

شکل ۳-۱۰۳- استقرار برس‌های علفی در بستر رودخانه برای حفاظت از صدف‌های رودخانه‌ای (دانشگاه کاسل المان، ۲۰۰۷)

شکل ۳-۱۰۴- نمایی از کانال ماهی- قایق‌رو [۱۴۳]

شکل ۳-۱۰۵- کانال ماهی‌رو اجرا شده در سد آیو در سوئیس [۱۴۳]

شکل ۳-۱۰۶- کانال ماهی- قایق رو در آلمان [۱۴۳]

فصل ۴

راهنمای ساخت و اجرای پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه

۴-۱- ملاحظات مورفوهیدرولیکی رودخانه در زمان اجرای پل و آبگذر

۴-۱-۱- مقدمه

همان‌گونه که در فصل سوم در خصوص مورفولوژی رودخانه‌ها اشاره شده است، مشخصات هندسی رودخانه‌ها (فرم، عرض، عمق، شیب و درجه پیچانرودی) به طور پیوسته و علی‌رغم این‌که در هر دو بعد زمانی و مکانی درحال تغییر هستند، به طور دینامیکی در تعادل می‌باشند. این تغییرات می‌تواند به‌دلیل تغییر در شرایط جریان (بده و شیب خط انرژی)، رسوب (میزان آورد و اندازه رسوب) و مواد گیاهی (که شاخ و برگ گیاهان، توده‌های ریشه درختان و بوته‌ها و هر نوع پوشش گیاهی دیگر در نوار ساحلی را شامل می‌شود) که در قسمت‌های بالادست و یا پایین‌دست اتفاق می‌افتد، باشد. چنانچه تغییرات این پارامترها بیش از حد با شد، پاسخ رودخانه نیز متناسب با آن زیاد و سریع خواهد بود. چنین تغییراتی منجر به این خواهد شد که رودخانه از تعادل دینامیکی خارج و پدیده‌هایی چون فرسایش و رسوب‌گذاری تشدید و باعث تغییر در هندسه رودخانه می‌شود و تا زمانی‌که به تعادل دینامیکی جدیدی نرسد، ناپایداری رودخانه ادامه خواهد داشت. این ناپایداری‌ها باعث وارد آوردن خسارات هنگفتی می شود. از این‌رو هر نوع ساخت و ساز در رودخانه که منجر به تغییر در شرایط جریان، رسوب و پوشش گیاهی اطراف آن شود، باید مبتنی بر مطالعات دقیق مورفولوژی رودخانه بوده که شامل مراحل اجرایی ساخت سازه‌های پل و آبگذر نیز می‌باشد که در این فصل تاثیر متقابل اجرای سازه و پاسخ رودخانه به این تغییرات و یا به طور کلی اندرکنش مورفولوژی رودخانه و اجرای سازه پل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

متخصصان پروژه‌های حمل و نقل، به طور روزافزون به اهمیت این موضوع پی برده‌اند که تا جای ممکن باید درتمام فازهای پروژه‌هایی که در محیط رودخانه انجام می‌شوند، عملکردها و فرایندهای رودخانه مدنظر قرارگیرد تا دوام سازه افزایش یابد. این آگاهی لزوم دست‌یابی به روش‌هایی برای شناسایی شبکه‌ی پیچیده‌ی وابستگی‌های متقابل بین عوامل فیزیکی و زیست‌شناختی که در فرایندهای طبیعی محیط رودخانه یک‌جا جمع هستند را آشکار می‌سازد [۱۲۹]. بر خلاف روش‌های منحصرا سازه‌ای (یا به اصطلاح روش‌های سخت یا خاکستری[۱]) روش‌های ذکر شده در بالا، رویکرد جامعی را در پیش می‌گیرند تا ضمن برآورده شدن نیازهای انسان، عملکرد طبیعی رودخانه نیز حفظ شود. این روش‌ها نام‌گذاری های متعددی دارند: مهندسی با طبیعت[۲] (EWN)، عوارض طبیعی و مبتنی بر طبیعت[۳] (NNBF)، زیرساخت‌های نرم یا سبز[۴] (GI)، مدیریت طبیعی سیل، روش‌های حساس به محیط‌زیست برای حفاظت رودخانه و ساحل[۵] و غیره [۱۲۹].

۱- Hard or gray approaches

۲- Engineering with nature (EWN)

۳- Natural and nature-based features (NNBF)

۴- Soft or green infrastructures (GI)

۵- Environmentally-sensitive channel- and bank-protection measures

در کل راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت[۱] (NBS) به منظور بهبود یا ترمیم و احیای کارکردهای طبیعی رودخانه، قابلیت ذاتی برای توسعه و نگهداری زیرساخت‌های حمل و نقل پایدار در محیط رودخانه را دارند. روش NBS را می‌توان در سه بخش خلاصه کرد: ۱- استفاده از مصالح طبیعی، ۲- استفاده از شرایط طبیعی مانند منطقه نوار ساحلی، سیلابدشت‌ها و تالاب‌ها و ۳- سازه‌های مهندسی شده‌ای که فرایندهای طبیعی و مصالح طبیعی را ترکیب کرده و به‌کار می‌گیرند. روش NBS با بهره‌گیری از شرایط طبیعی یا اقدامات مهندسی شده که ریسک سازه را کاهش می‌دهند، فرایندهای رودخانه را ارتقا داده یا احیا می‌نماید. مصالح طبیعی پوشش گیاهی بومی و مواد ارگانیک مانند چوب و سنگ را شامل می‌شود. به‌کارگیری شرایط طبیعی نیز شامل برقراری اتصال مجدد یا ترمیم بخش‌های مهم به منظور عملکرد رودخانه مانند سیلابدشت‌ها و قابلیت ذخیره‌سازی سیل آن‌ها، مناطق ساحلی و تالاب‌ها است. روش NBS در تمام فازهای پروژه‌های حمل و نقل (طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری) و در تمام طول عمر آن‌ها قابل استفاده است. البته باید به این نکته توجه شود که علی‌رغم مزایا و کاربردهای گسترده‌ی روش NBS، لازم است تا محدودیت‌های بالقوه و ریسک‌های ذاتی ناشی از اتکای زیاد این روش به پوشش گیاهی بومی ارزیابی و مدیریت شود. هنگامی که مسائل پایداری رودخانه ریسک غیرقابل قبولی را برای پایداری سازه‌ی حمل و نقل ایجاد می‌کند، راه‌حل‌های طبیعی و بیوتکنیک[۲] برای حفاظت در مقابل فرسایش و آبشستگی کافی نخواهند بود.

۴-۱-۲- بررسی‌های اجمالی برای اجرا

به منظور توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل و ساخت سازه‌های متقاطع با رودخانه (نظیر پل و آبگذر) ضروری است متخصصانی از رشته‌های گوناگون با یکدیگر همکاری نمایند و درک کامل و جامعی از فرایندهای مرتبط با رودخانه و سیلابدشت آن حاصل شود تا ایمنی و قابلیت اطمینان[۳] پروژه افزایش یابد و از اثرات محیط‌زیستی معکوس جلوگیری شود و همچنین هزینه‌های اجرا و نگهداری کمینه گردد. تیم متشکل از رشته‌های مختلف می‌تواند ریسک کلی پروژه را کاهش دهد و تاب‌آوری[۴] پروژه را به‌واسطه‌ی در نظرگرفتن ویژگی‌ها و فرایندهای رودخانه و سیلابدشت آن در هر مرحله از اجرای پروژه، بهبود بخشد. ثبت مستندات مربوط به پیشرفت کار در هر فاز پروژه و پایش و جمع‌آوری متمرکز داده‌ها و اطلاعات، موجب سهولت کارها و در نهایت موفقیت پروژه می‌شود.

در پروژه‌های حمل و نقل، صرف نظر از ابعاد، مقیاس و جزئیات آن‌ها، کار معمولا در چهار مرحله انجام می‌شود: (الف) برنامه‌ریزی، (ب) طراحی، (ج) ساخت و (د) بهره‌برداری – نگهداری. این چهار مرحله به طور شماتیک در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. در برخی موارد (مانند پروژه‌های پل و آبگذر) پایش و ارزیابی رعایت تعهدات محیط‌زیستی پس از

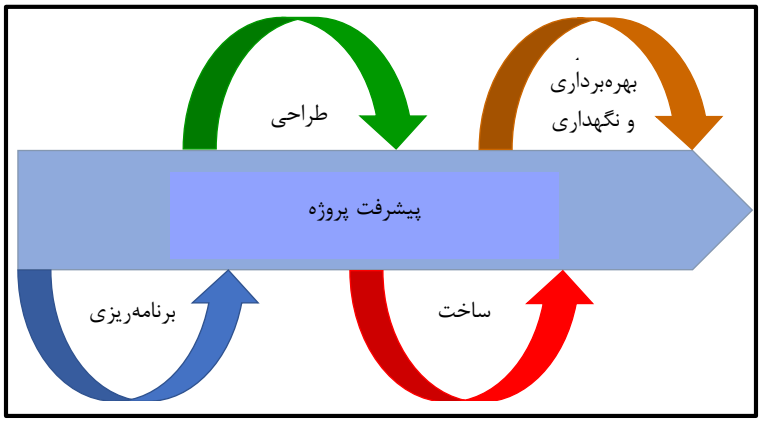
۱- Nature-based solutions (NBS)

۲- Biotechnical solutions

۳- Reliability

۴- Resilience

اتمام ساخت پروژه نیز ادامه می‌یابد. پایش و بازرسی به طور معمول در حین بهره‌برداری و همراه با فعالیت‌های نگهداری انجام می‌شود ولی می‌تواند به‌گونه‌ای توسعه یابد که موجب مزایای افزوده در راستای بهبود مرحله‌ی طراحی، جلوگیری از پیامدهای محیط‌زیستی، مدیریت تطبیقی[۱] و افزایش دوام پروژه گردد.



شکل ۴-۱- الگوی شماتیک مراحل پیشرفت یک پروژه‌ی حمل و نقل [۱۲۹]

همان‌گونه که شکل (۴-۱) نشان می‌دهد، فازهای پیشرفت پروژه کاملا جدا از هم و خطی نیستند. هر فاز چرخه‌ی تصمیم‌گیری مختص به خود را دارد و این چرخه‌های وابسته به‌هم، فعالیت‌ها و تصمیم‌های مراحل بعدی پروژه را ترسیم می‌کند و نشان می‌دهد.

به‌دلیل بزرگ بودن پروژه‌های حمل و نقل هم از نظر ابعاد هم اعتبارات، اجرای این پروژه‌ها بسیار زمان‌بر می‌باشد. در نتیجه ممکن است فاصله بین طراحی و زمان اجرا طولانی باشد. حتی زمان اجرا نیز طولانی خواهد بود. در این فاصله آنچه که اهمیت دارد تغییرات محسوسی است که در رودخانه‌ها اتفاق افتاده است و نباید از این تغییرات غافل شد چرا که ممکن است اصولا محل سازه‌های متقاطع و یا ابعاد آن‌ها تغییر زیادی داشته باشد. در نتیجه همیشه در هر مرحله‌ای باید تیم طراح آمادگی داشته باشد تا با توجه به تغییرات احتمالی رودخانه، طراحی خود را به‌روزرسانی نماید. بودن متخصصین هیدرولیک با دانش مهندسی رودخانه در تیم طراحی و حتی تیم پیمانکاران به کاهش خسارات احتمالی آتی کمک شایانی خواهد بود.

به طور کلی در مرحله اجرای پل یا آبگذر، تیم طراحی و ساخت سازه باید موارد زیر را رعایت کنند:

الف- هم‌زمان با آماده‌سازی کارگاه، لازم است تا مورفولوژی رودخانه (فرم رودخانه، ابعاد و شیب رودخانه، راستای رودخانه و میزان فرسایش و رسوب‌گذاری) در محدوده پل بررسی شود و میزان انطباق آن با شرایط زمان طراحی مشخص گردد زیرا این احتمال دارد که ساخت و سازهایی که در بالادست یا پایین‌دست موقعیت پل در سال‌های پس از طراحی انجام شده است موجب تغییر مورفولوژی و ابعاد رودخانه شده باشد. تغییر اقلیم نیز از عواملی است که در برآورد جریان و رسوب رودخانه تاثیر دارد و موجب تغییر مورفولوژی رودخانه می‌شود.

۱- Adaptive management

تغییرات ناگهانی تراز سطح آب در مخازن یا دریاچه‌های پایین‌دست رودخانه نیز می‌تواند بر مورفولوژی رودخانه در بازه‌های بالادست تاثیر داشته باشد. به طور مثال کاهش تراز سطح آب دریاچه منجر به افزایش شیب انرژی و تشدید فرسایش (عمومی و آبکندی) می‌گردد که در کوتاه‌مدت باعث تعمیق و تعریض رودخانه خواهد شد. از این رو ضرورت دارد تا تاثیر پروژه‌های بزرگی که در فاصله بین طراحی و زمان اجرا که در بالادست (نظیر احداث سد یا آبگیر بزرگ) و یا در پایین‌دست (نظیر برداشت از معادن شن و ماسه) اجرا شده‌اند یا در دست اجرا می‌باشند، بر مورفولوژی رودخانه بررسی شود. در صورت وجود پارامترهای تاثیرگذار بر مورفولوژی، ضروری است تا بررسی شود آیا رودخانه به تعادل دینامیکی جدیدی رسیده است، در غیر این صورت باید به‌کمک مدل‌های ریاضی و استفاده از روابط تجربی میزان تغییرات ابعاد رودخانه در سال‌های آتی برآورد و منطبق با آن در ابعاد سازه پل اصلاحاتی انجام شود یا از روش‌های تثبیتی استفاده شود.

ب- بررسی شود که آیا جاده‌های احداث شده قبلی در بالادست سازه پل باعث تغییر بده جریان سیلابی رودخانه می‌گردد یا خیر. این مساله به‌خصوص زمانی اتفاق می‌افتد که در احداث جاده‌های بالادستی، به منظور صرفه‌جویی در هزینه و زمان اجرا، آبراهه‌های کوچک تجمیع شده و به رودخانه متقاطع با جاده هدایت می‌شود در نتیجه بده سیلابی رودخانه نسبت به زمان طراحی بسیار بزرگ‌تر خواهد بود. عدم در نظرگرفتن ابعاد مناسب زیرگذرها منطبق بر بیشینه محتمل رواناب سطحی در جاده‌های بالادستی به‌خصوص در نواحی جلگه‌ای یا دشت نیز باعث خواهد شد تا سطح آب در یک سمت جاده افزایش یابد و جریان رودخانه‌ای به‌موازات جاده اتفاق افتد تا در یک نقطه‌ای به رودخانه متقاطع با جاده برسد که منجر به افزایش بده رودخانه در محل پل می‌گردد. در این رابطه بررسی پهنه‌بندی سیل به‌کمک مدل‌های دو بعدی می‌تواند در پیش‌بینی وقوع چنین رخدادی موثر باشد.

ج- به کمینه رساندن تغییرات در شرایط و وضعیت نوار ساحلی و بستر رودخانه در بازه مناسبی در بالادست و پایین‌دست سازه توصیه می شود تا چنانچه تغییراتی در هندسه رودخانه (نظیر مستقیم کردن مسیر، کاهش عرض رودخانه، انحراف جریان، خاکبرداری و خاک‌ریزی در بستر یا سواحل رودخانه و دپوی مصالح) اتفاق افتد، چگونگی پاسخ آن از طرف رودخانه توسط مدل‌های هیدرولیکی ریاضی مطالعه شود.

د- به کمینه رساندن آلودگی‌های ناشی از تولید رواناب و رسوب در محل ساخت و مدیریت آن‌ها

هـ- بازسازی پوشش گیاهی (گونه‌های گیاهی بومی مناسب) در بخش‌هایی که در اثر عملیات ساخت و ساز از بین رفته است.

و- مقابله با رشد و تثبیت گونه‌های مهاجم و غیربومی

اقدامات قبل از اجرا شامل:

الف- ارزیابی‌های اولیه[۱]

ارزیابی‌های اولیه‌ی مشکلات احتمالی بین پروژه برنامه‌ریزی شده و شرایط رودخانه و سیلابدشت آن، موجب اتخاذ تصمیمات و انجام اقداماتی در فازهای طراحی، ساخت و بهره‌برداری و نگهداری می‌شود. آگاهی زودهنگام از مشکلات احتمالی در مسیر انجام پروژه، در موفقیت نهایی پروژه تاثیر زیادی خواهد داشت. توجه به الزامات مجوز زمین یا حق عبور پروژه[۲] نیز از موارد مهم بررسی‌های اولیه محسوب می‌شود. اطلاعات حق عبور را می‌توان با عکس‌های هوایی تطبیق داد تا مشخص شود که آیا پروژه مورد نظر در محدوده‌ی مناسب و مجاز قرار می‌گیرد یا خیر. با توجه به اهمیت این مساله، رعایت مفاد ماده ۱۳ آیین‌نامه مربوط به بستر و حریم رودخانه‌ها، انهار، مسیل‌ها، ... (۱۳۷۹) تاکید می‌شود [۱].

ملاحظات ژئوتکنیکی نیز می‌تواند عامل مهمی در برنامه‌ریزی و هزینه‌های ساخت باشد، به‌ویژه تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به شالوده پل و همچنین وجود و تراز سنگ بستر که در طراحی شالوده، تخمین آبشستگی و نیز در طراحی راهکارهای مقابله با آن تاثیرگذار است. مطالعات منطقه‌ای و استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی از جمله‌ی روش‌هایی هستند که در تشخیص سریع سنگ بستر موثر هستند. بازدیدهای میدانی هم ممکن است بیرون‌زدگی سنگ بستر در کف رودخانه یا کناره‌های آن را نشان دهد.

ب- پایداری آبراهه[۳]

دستورالعمل HEC-20 [۱۲۷] توضیح می‌دهد که طراحان پروژه باید پایداری آبراهه اصلی رودخانه را قبل از پرداختن به مطالعات جامع‌تر هیدرولوژی و هیدرولیک انجام دهند. مزیت این اقدام این است که نه تنها از مشکلات سازه‌ای ناشی از تغییرات آبراهه پیشگیری می‌شود، بلکه از پیامدهای احتمالی که عملکرد رودخانه را مختل می‌کند نیز جلوگیری می‌شود. درصورتی‌که بروز برخی مشکلات اجتناب‌ناپذیر باشد، می‌توان تمهیداتی را به منظور مقابله و به کمینه رساندن آن‌ها در نظر گرفت. در اولین قدم، با بازبینی و مقایسه عکس‌های جدید و سال‌های گذشته، شرایط رودخانه و سیلابدشت‌های آن مشخص می شود و بر اساس آن می‌توان تعیین کرد که آیا شرایط موجود به نفع پروژه است و یا محدودیت‌هایی را برای پروژه مورد نظر ایجاد می‌کند. بند ۵-۴ از دستورالعمل HEC-20 (FHWA 2012a) جزئیات روش‌های ارزیابی سریع پایداری آبراهه را ارائه می‌دهد [۱۲۷].

۱- Early assessment

۲- Project right-of-way

۳- Channel stability

ج- هیدرولوژی و هیدرولیک

قوانین و مجوزهای پروژه و نیز معیارها و استانداردهای طراحی، الزامات هیدرولوژیکی یک پروژه را مشخص می‌سازند. یکی از شاخص‌های هیدرولوژیکی مهم، بده طرح است. یک روش سریع به منظور برآورد مقدار بده طرح، بررسی گزارش‌ها و مطالعات هیدرولوژیکی موجود است، به‌ویژه چنانچه پروژه فعلی جایگزین سازه‌ی قبلی خواهد شد. در صورتی‌که چنین مطالعاتی موجود نباشد، معادله‌های رگرسیونی محلی که خصوصیات حوضه‌ی آبخیز را به بده اوج (جریان بیشینه) ربط می‌دهند، روش سریع و مفیدی برای تخمین بده طرح در اختیار قرار می‌دهند. اطلاعات هیدرولیکی، به‌ویژه عمق‌ها و سرعت‌های مربوط به بده طرح برای محاسبه‌ی ابعاد سازه و رقوم سطح آب استفاده می شوند تا باز شدگی هیدرولیکی[۱] (فاصله سطح آب تا وجه زیرین عرشه پل) کافی برای سازه در نظرگرفته شود و براساس آن ریسک آب‌گرفتگی سازه‌ی پل و جاده‌های دسترسی مرتبط با آن در هنگام وقوع سیل تعیین گردد. از مدل‌های عددی هیدرولیکی نیز می‌توان برای انجام این ارزیابی استفاده کرد [۱۳۰]. در این خصوص توضیحات بیش‌تری در فصل سوم این راهنما ارائه شده است.

د- تجاوز به حریم رودخانه و پیامدهای محیط‌زیستی آن

هر چند زمان ساخت پروژه‌های پل یا آبگذر در مقایسه با طول عمر پل کوتاه می‌باشد ولی هر نوع اثرگذاری بر محیط رودخانه و تجاوز به بخش‌هایی از آبراهه اصلی رودخانه، نوار ساحلی آن، منطقه‌ی مهاجرت رودخانه و یا سیلابدشت آن می‌تواند در کوتاه‌مدت هم منجر به پاسخ رودخانه گردد که موجب شروع تغییر مورفولوژی رودخانه در دراز مدت گردد. از این رو اجرای عملیاتی که باعث تنگ کردن عرض رودخانه می‌گردد باید با مطالعه تاثیر آن بر پاسخ رودخانه باشد. چرا که هر نوع تنگ‌شدگی ناشی از احداث سازه‌ی متقاطع همچنین موجب برگشت آب یا پس‌زدگی آب (افزایش تراز سطح آب در بالادست مقطع تنگ شده) می شود که ریسک سیل در اراضی اطراف رودخانه را نیز افزایش می‌دهد و کاربری اراضی و کشاورزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، تجاوز به حریم رودخانه الگوی رسوب‌گذاری و مدت زمان غرقاب[۲] شدن را نیز تغییر می‌دهد که این مساله، پوشش گیاهی در سیلابدشت را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

همان‌گونه که احداث پروژه‌های حمل و نقل بر روی رودخانه‌ها، اثرات و تغییراتی را در محیط رودخانه موجب می‌شود، این تغییرات صورت گرفته در محیط رودخانه نیز به نوبه‌ی خود، بر روی سازه‌ی احداث شده اثرات متقابلی خواهد داشت. برای اطلاع از طبقه‌بندی رودخانه و اثرات متقابل می‌توان به فصل ۳ این راهنما مراجعه کرد.

هـ- رسوب، سنگ، چوب و واریزه در آب

۱- Hydraulic opening

۲- Inundation

در زمان ساخت پروژه‌های رودخانه یا آبگذر و به‌خصوص در مناطقی که مستعد جریان‌های واریزه‌ای هستند ضرورت دارد تا پیش‌بینی حرکت این نوع جریان‌ها که می‌تواند موجب آسیب رساندن به سازه‌ی در دست احداث یا جاده و کارگاه شود، صورت گیرد. از آنجا که این جریان‌ها می‌توانند به سازه پل احداث شده نیز آسیب برسانند و یا در صورت ساخت پل و گیرکردن اجسام شناور موجب روگذری جریان شوند و بالا آمدن سطح آب بالادست نیز موجب پخش سیلاب در اراضی بالادست و کنارگذری گردد، احداث سازه‌های مقابله با جریان‌های واریزه‌ای در بالادست پل و آبگذر بسیار موثر است. ولی برای جلوگیری از انسداد پل و آبگذرها در آبراهه‌های کوهستانی و با حوضه جنگلی، سازه تقاطعی هم‌عرض با آبراهه اصلی، بدون پایه برای پل‌ها (و یک دهانه برای آبگذرها) و با افزایش حداقل ۲۰ درصد در ارتفاع طراحی معمول عرشه (همانند پل‌های قوسی تاریخی) توصیه می‌شود.

ح- آبشستگی رودخانه

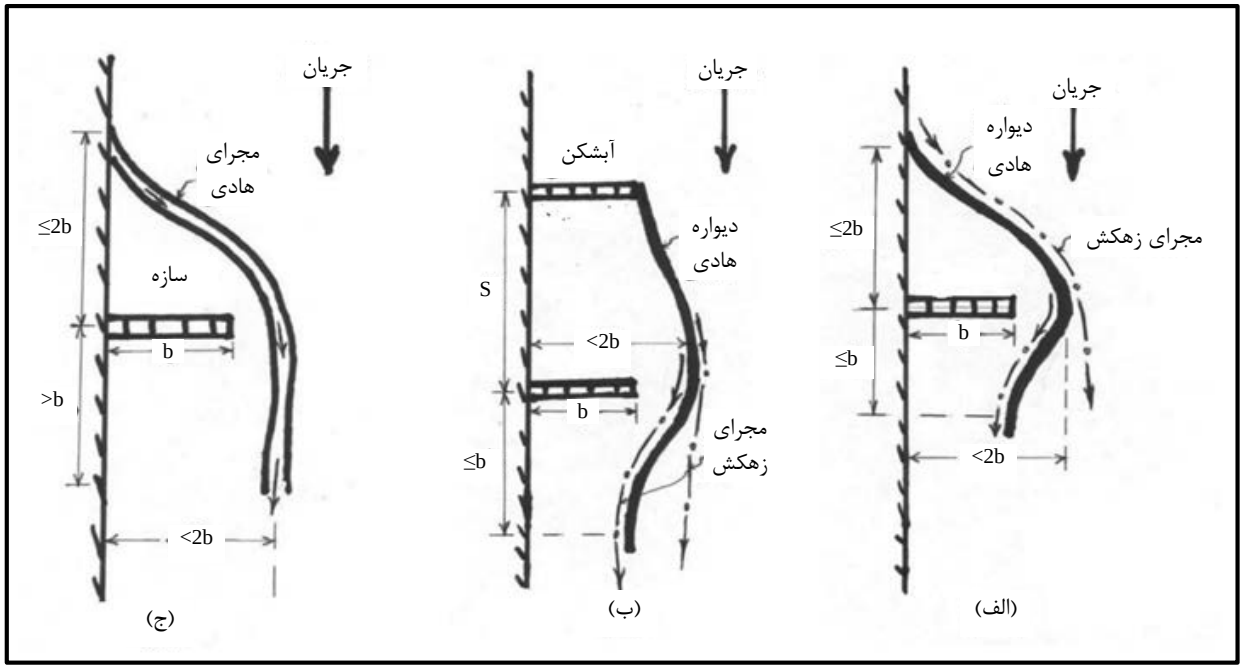
۱- در نظر گرفتن طول کافی برای پل تا از آبشستگی تنگ‌شدگی اضافی در محل تقاطع جلوگیری شود.
۲- تطبیق بده که در آن حرکت بار بستر در زیر آبگذر پل شروع می‌شود با بده که حرکت بار بستر در آبراهه بالادست پل شروع می‌شود.
۳- پایه‌ها/ تکیه‌گاه‌های پل
۴- در نظرگرفتن تمهیدات برای بیشینه مقدار آبشستگی موضعی و آبشستگی تنگ‌شدگی
۵- جلوگیری از شرایطی که در آن آبشستگی موضعی در پایه‌ها/ تکیه‌گاه‌ها به طور معکوس بر پایداری کناره‌های رودخانه، زیستگاه‌های داخل جریان و پیوستگی در طول جریان تاثیر می‌گذارد.
۶- فاصله‌گذاری مناسب شالوده‌ی پل از طریق کارگذاری پایه‌ها/ تکیه‌گاه‌ها در بیرون از بخش فعال رودخانه تا امکان عبور واریزه‌ها و قطعات چوبی بزرگ از سازه‌ی متقاطع فراهم شود.

۴-۱-۳- روش‌های ساخت با انحراف آب در بستر اصلی رودخانه

الف-احداث دیواره هادی: در این روش یک دیواره هادی برای انحراف جریان در بستر رودخانه از بالادست سازه و به صورت عصایی مطابق شکل (۴-۲ الف و ب) ساخته می شود. برای هدایت جریان کم‌آبی رودخانه و نیز انتقال تراوشات آب از محیط کار، احداث مجرای زهکشی مطابق شکل‌های فوق لازم است. گستره‌ی عرضی دیواره باید در حدی باشد که فضای کار در محل بستر سازه 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 کم‌آبی 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 کم‌آبی استفاده می‌گردد. برای ساخت دیواره هادی، از مصالح خاکی یا رودخانه‌ای می‌توان استفاده کرد. در رودخانه‌های بزرگ و دائمی (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 دراگ‌لاین انجام می‌یابد.

با احداث یک باله از سازه (در سمت چپ یا راست رودخانه)، بخش اول به‌عنوان سازه انحراف جریان آب مورد استفاده قرارگرفته و باله دوم سازه اجرا خواهد شد. در این‌صورت دیواره هادی اولیه برداشته شده و از مصالح آن برای اجرای دیواره حفاظتی و خشکیدگی بستر کار در سمت دیگر استفاده می‌گردد [۲۲].



شکل ۴-۲- روش‌های انحراف آب در بستر رودخانه برای ساخت سازه‌های تقاطعی [۲۲]

ب- **احداث مجرای هادی جریان کم‌آبی:** در این روش، یک مجرای هادی مطابق شکل (۴-۲- ج) از بالادست سازه برای انحراف و هدایت جریان کم‌آبی در بستر رودخانه و با فاصله کافی از سازه (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 سازه 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 کم‌آبی استفاده می‌گردد [۲۲].

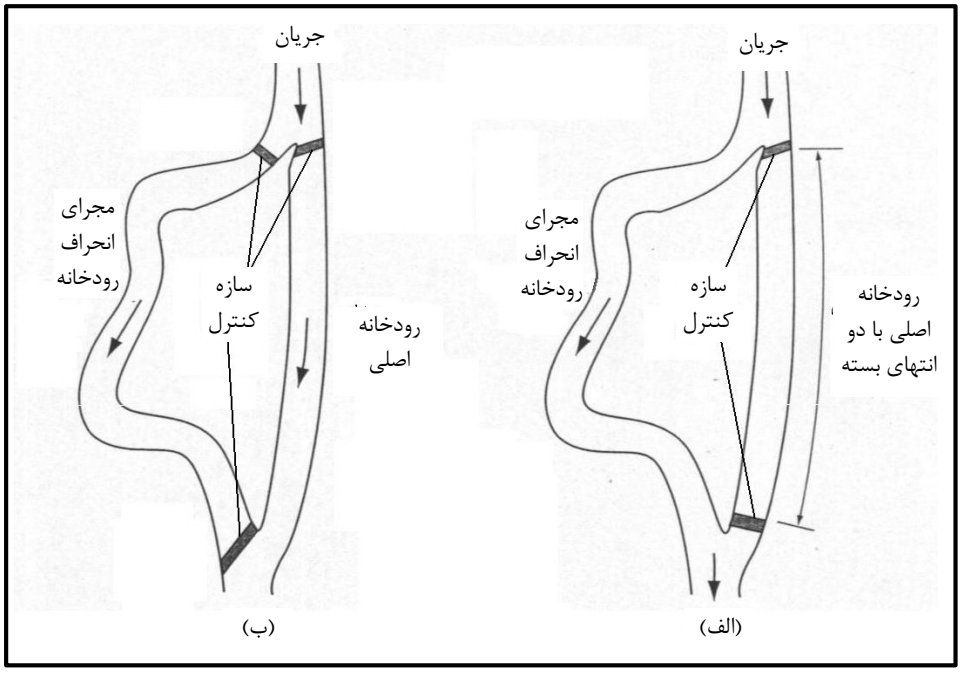
پ- **انحراف موقتی و موضعی رودخانه:** در این روش، رودخانه به طور موضعی و به صورت حلقوی مطابق شکل (۴-۳) از بالادست بازه مورد نظر منحرف شده و در فاصله‌ای در پایین‌دست مجددا به مجرای طبیعی و اصلی خویش باز می‌گردد. انحراف جریان ممکن است مطابق شکل (۴-۳- الف) به طور کامل صورت یافته و بازه اجرای کار خشک گردد. این روش بیش‌تر برای رودخانه‌های با بده پایه کم نسبت به سیل متوسط سالانه مناسب است. ساخت سراسری و یکپارچه سازه تقاطعی در بستر رودخانه ساده‌تر بوده و نیاز به پمپاژ آب از محل ترانشه پنجه سازه‌ها نیز کم‌تر خواهد بود.

گاهی نیز ممکن است مطابق شکل (۴-۳- ب) مجرای انحرافی تنها برای عبور جریان‌های پرآبی تا سیلابی در نظر گرفته شده و جریان‌های کم‌آبی و حیاتی همچنان در رودخانه اصلی و در بازه کاری برقرار باشد. در این حالت، احداث یک مجرای هادی نظیر شکل (۴-۲- ج) برای هدایت جریان کم‌آبی در بستر رودخانه ضروری خواهد بود. این روش بیش‌تر برای رودخانه‌های با بده پایه بالا نسبت به سیل متوسط سالانه (تغییر پذیری کم‌تر رژیم جریان در طول سال) مناسب است.

در هر دو صورت فوق، ظرفیت مجرای انحرافی رودخانه معادل حداکثر سیل محتمل در دوره زمانی ساخت سازه تقاطعی باید باشد. البته از آنجا که زمان ساخت باید کوتاه بوده و ترجیحا می‌بایست در طول یک فصل کم‌آبی رودخانه اجرا گردد، دوره بازگشت سیل طرح انحراف نیز کوتاه خواهد بود. به‌هرحال 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.

در طرح مجرای انحرافی، خصوصیات جریان و توان رودخانه نباید تفاوت قابل ملاحظه‌ای با شرایط نظیر در رودخانه اصلی داشته باشد. در غیر این صورت، ناپایداری بازه جدید سبب افزایش فرسایش بستر و رسوب‌گذاری در پایین‌دست شده، به ماهی‌ها و گیاهان و به ساختار محیط‌زیستی منطقه صدمات زیادی رسیده و کدورت آب نیز باعث کاهش کیفیت آب و غیر قابل استفاده شدن آن توسط بسیاری از جانوران می‌گردد.

به طور کلی گرچه انحراف رودخانه عملیات ساخت سازه تقاطعی را (به‌خصوص 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 باید اجتناب نمود [۲۲].



شکل ۴-۳- روش‌های انحراف موضعی رودخانه برای ساخت سازه‌های تقاطعی [۲۲]

۴-۱-۴- روش‌های ساخت بدون انحراف آب رودخانه

در رودخانه‌های بزرگ و دائمی (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 ساخت سازه تقاطعی در شرایط جریان طبیعی رودخانه در فصل کم‌آبی و در طول یک سال باید انجام گیرد.

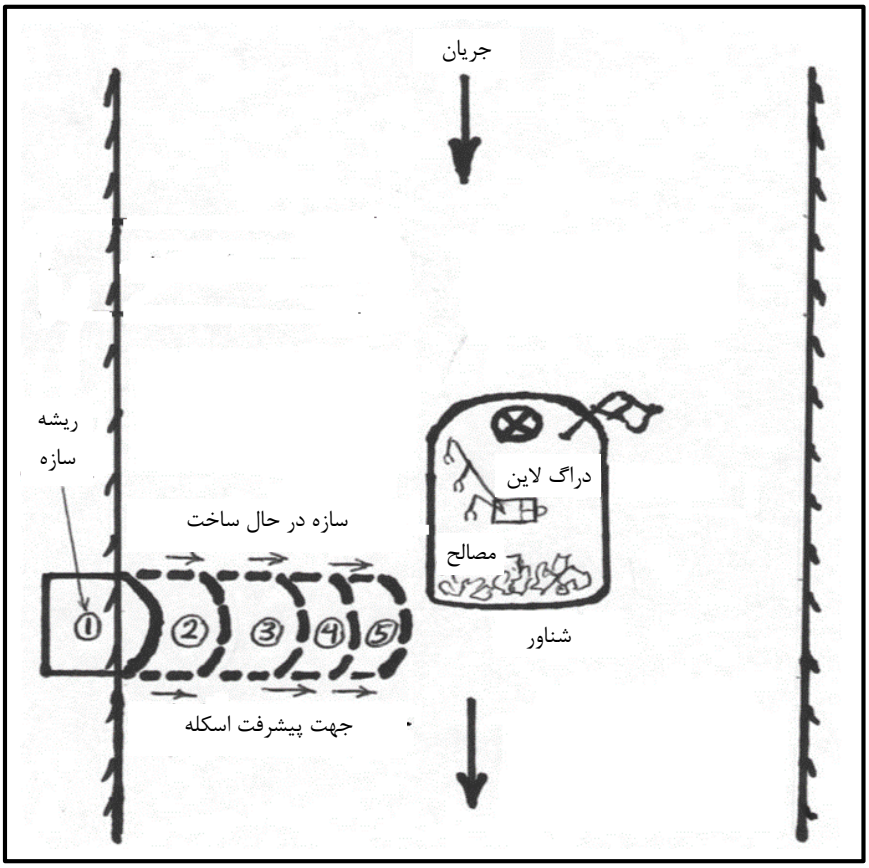
برای ساخت سازه تقاطعی بدون انحراف آب در رودخانه‌های بزرگ، یکی از سه روش اسکله‌ریزی، استفاده از شناور و روش ترکیبی، به شرح زیر انتخاب می‌گردد. انتخاب هر یک از این سه روش به شرایط خاص رودخانه و طرح بستگی داشته و ماشین‌آلات، تجهیزات و مهارت‌های خاص خود را می‌طلبد.

الف- روش اسکله‌ریزی: در این روش مطابق شکل (۴-۴)، مراحل ساخت به صورت گام به گام از ساحل بالای رودخانه به سمت میانه رودخانه انجام می‌گیرد. شیوه اجرای کار مشابه ساخت اسکله‌ها و موج‌شکن‌های دریایی است. با توجه به سابقه کارهای ساحلی و 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 دراگ‌لاین برای کنترل بهتر مصالح ریزشی در زیر آب مناسب‌تر است.

ب- روش استفاده از شناور: در این روش، از شناور یا بارج به‌عنوان سکوی متحرک برای استقرار ماشین‌آلات و مصالح ساخت استفاده می شود. از شناورهای موجود، با اصلاحاتی می‌توان برای کارهای رودخانه‌ای استفاده نمود. در کاربرد شناورها جهت اجرای سازه در میانه رودخانه و از سطح آب، موارد زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

- عمق آب و فضای حرکت کافی برای شناور در حین عملیات اجرا فراهم باشد.
- دید کافی برای ایمنی کار در حین 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 سازه نشود.
- عملیات اجرا در زیر آب با دیده‌بانی غواصان کنترل گردد.
- شرایط آب و هوایی در حوضه بالادست رودخانه (احتمال طوفان و سیلاب) تحت کنترل دائمی باشد.

پ- روش ساخت ترکیبی: در این روش مطابق شکل (۴-۴)، 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 سازه تقاطعی دارد [۲۲].



شکل ۴-۴- روش ساخت سازه تقاطعی بدون انحراف آب رودخانه [۲۲]

۴-۱-۵- مراحل ساخت سازه تقاطعی

۱- بستر ساخت سازه تقاطعی

عملیات آماده سازی بستر ساخت سازه تقاطعی باید با کمینه به هم‌خوردگی بستر و آن هم تنها در محدوده احداث سازه صورت گیرد. برای این منظور باید از ماشین‌آلات مناسب و از مدیریت بهینه جهت انتخاب بهترین راه دستر سی به‌داخل رودخانه و بستر کار استفاده نمود. برای یک حفاری مناسب در بستر رودخانه جهت ساخت سازه تقاطعی باید مراحل زیر را به‌ترتیب اجرا نمود:

الف- پاک‌سازی بستر و دیواره رودخانه: باید محدوده ساخت را از گیاهان و آشغال و نخاله‌ها پاکسازی نمود. زیرا این مواد که بیش‌تر منشای آلی دارند باعث نشست پی و ایجاد شکاف در بدنه سازه بعد از ساخت خواهند شد.

ب- 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، زیر شویی و ناپایداری بستر ساخت سازه خواهد شد. لایه‌های ضعیف تا حد امکان باید برداشت گردد. مواد زیرسطحی نامناسب (از نوع خاک‌های آلی و یا لای،

باتلاقی واگرا و یا رگه‌های گچی در پروفیل خاک) باید برداشت گردیده و یا در صورت عمیق بودن به نحو مقتضی اصلاح و تحکیم یابد. به طور مثال، با ریختن مخلوط درشت‌دانه قلوه‌سنگ و تخته‌سنگ (بدون مواد ریزدانه) و ایجاد تراکم نسبی، بستر مناسبی ایجاد کرد. روش‌های دیگر تحکیم بستر بسته به اهمیت پروژه و نوع و مصالح سازه تقاطعی می‌تواند مورد نظر قرارگیرد.

پ- **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 بهتر است که قبل از شروع حفاری بستر، شیب دیواره‌ها اصلاح و به طور طبیعی پایدار گردد. در شرایطی که ارتفاع دیواره رودخانه زیاد باشد، اصلاح شیب ممکن است همراه با سکوبندی باشد.

ت- **آماده سازی بستر طولی:** جهت کاهش عمق و گستره حفاری، کم‌تر شدن هزینه عملیات حفاری و حفظ بستر طبیعی رودخانه، بهتر است بستر رودخانه در امتداد سازه تقاطعی به صورت پلکانی و سکوبندی آماده گردد.

ث- **حفر ترانشه دیواره:** تکیه‌گاه سازه تقاطعی و به‌خصوص دیواره کوله‌ی پل 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 سازه تقاطعی خواهد شد. قفل شدگی تکیه‌گاه‌ها یک اقدام اساسی است. ترانشه دیواره رودخانه از نظر سهولت اجرا بهتر است به صورت سکوبندی حفر گردد، تا عمق کافی برای استقرار مصالح حفاظتی فراهم گردد.

ج- **حفر ترانشه آبشستگی:** ترانشه پنجه در پیرامون تکیه‌گاه سازه تقاطعی و در محل پایه‌های پل شرایط لازم برای قفل‌شدگی بدنه سازه در کف بستر و ایمنی سازه در برابر خطر آبشستگی را فراهم می‌کند. عمق و گستره عرضی ترانشه پنجه براساس برآورد عمق آبشستگی و پایداری مواد زیرسطحی و انتخاب گزینه مناسب حفاظت پنجه سازه تعیین می‌گردد.

۲- اجرای سازه تقاطعی

یکی از موارد مهم اجرایی، ترتیب مراحل ساخت سازه تقاطعی است. در این صورت می‌توان برنامه‌ریزی‌های مدیریتی را برای استفاده بهینه از زمان و استفاده از ماشین‌آلات به منظور کاهش هزینه طرح، اجرای به موقع و منطبق با زمان‌بندی طرح انجام داد. ترتیب مراحل زمانی اجرای یک سازه تقاطعی به شرح زیر است:

الف- اجرای حفاظت چاله آبشستگی: با حفر و آماده سازی ترانشه پنجه در محدوده اجزای سازه تقاطعی، حفاظت پنجه با گزینه مناسب انجام می‌گردد.

ب- **اجرای بدنه تکیه‌گاه سازه تقاطعی و یا دیواره کوله پل:** این مرحله همراه با قسمت الف (اجرای حفاظت چاله آبشستگی) و یا بعد از آن انجام می‌شود.

ج- **اجرای پایه‌های پل:** این مرحله همراه با قسمت الف (اجرای حفاظت چاله آبشستگی) و یا بعد از آن انجام می‌شود. در رودخانه‌های کوچک با جریان فصلی یا خشک‌رودهای کوچک، پایه‌های پل می‌تواند همراه با قسمت ب (اجرای تکیه‌گاه‌های دو طرف) و یا بعد از آن اجرا شوند. در رودخانه‌های با جریان دائمی و همچنین برای پل‌های بزرگ در رودخانه‌های دائمی یا فصلی یا خشک (که ممکن است زمان اجرا طولانی‌تر از یک فصل کاری بوده و ریسک سیلاب را به‌همراه داشته باشد)، بهتر است که پایه‌های پل در آبراهه اصلی رودخانه پس از اجرای تکیه‌گاه‌های دو طرف ساخته شوند. درصورتی‌که پل در بالاتر از تراز آبراهه اصلی بوده و در سیلابدشت رودخانه گسترش داشته باشد، پایه‌های پل در ناحیه سیلابدشت می‌توانند قبل یا هم‌زمان با اجرای تکیه‌گاه‌های دو طرف پل در آبراهه اصلی اجرا گردند. در شرایطی که تعداد پایه‌های پل بیش از دو باشد، بهتر است که پایه‌ها به طور هم‌زمان و متقارن از دو طرف رودخانه به‌سمت مرکز آبراهه اجرا شوند تا ریسک سیلاب و آسیب‌پذیری تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های ساخته شده کاهش یابند.

۳- 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 سازه تقاطعی ضروری است.

۴- حفاظت دیواره بالا و حریم رودخانه

ایمنی و کارکرد سازه تقاطعی مستقیما تحت تاثیر عوامل تخریبی و نحوه کاربری نوار ساحلی بالای رودخانه (یا حریم رودخانه) می‌باشد. در مراحل ساخت پروژه، حفاظت و تثبیت ساحل بالا و حریم رودخانه (با استفاده از روش‌های طبیعی-سازه‌ای) نباید کمرنگ و یا حذف و یا به مرحله بهره‌برداری و نگهداری پروژه انتقال داده شود.

۵- پایش در مرحله ساخت

در مرحله ساخت (به‌خصوص در شرایطی که از رویکرد مرحله‌ای استفاده شده و یا زمان‌بندی طرح بیش از یکسال باشد)، پایش فنی ضروری است. پایش و کنترل اجرا و احتمال اصلاحات لازم در طرح (قبل از ساخت کامل سازه تقاطعی)، از مشکلات آینده طرح و نیز از هزینه می‌کاهد. موارد پایش و ابزار و روش‌های پایش در طرح سازه‌های تقاطعی رودخانه‌ای در فصل پنجم ارائه شده است.

۶- تدوین برنامه اجرا

در طرح‌های 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 تدقیق گردد. فعالیت‌های 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 به صورت 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 پیش‌بینی‌نشده و راهکارهای پیشنهادی موثر واقع گردد.

به طور کلی رعایت اصول زیر در برنامه ساخت پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه باید مورد نظر قرارگیرد:

- تعیین بازه زمانی کار و برنامه زمان‌بندی مراحل مختلف ساخت بر اساس شرایط جریان رودخانه، امکان‌پذیری عملیات اجرایی، کم‌ترین تاثیرات منفی بر سامانه حیاتی رودخانه و تامین کمینه نیاز بهره‌برداران و حقابه محیط‌زیستی
- تعیین روش انحراف آب و تامین شرایط لازم برای میدان ساخت آبشکن‌ها براساس نوع، اندازه و شرایط جریان رودخانه، مسائل محیط‌زیستی 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 محیط‌زیستی در مراحل ساخت
- پیش‌بینی روند و مراحل اجرای پروژه منطبق بر روش برنامه‌ریزی مسیر بحرانی (CPM)

۴-۲- برپایی کارگاه، ساخت و نگهداری سازه با توجه به ریسک رخداد سیل در پهنه سیلابی رودخانه

با توجه به این‌که اجرای طرح ساخت پل‌ها و آبگذرها در بازه‌ی رودخانه از پیچیده‌ترین و دشوارترین کارهای رودخانه‌ای به‌شمار می‌آید، از این‌رو 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 تعیین‌کننده‌تر هستند. پیش‌بینی واقعی زمان پروژه، مراحل و زمان‌بندی اجرا، هزینه‌های ساخت، آثار منفی اجرای پروژه بر سامانه رودخانه، بهره برداران و محیط‌زیست در مرحله ساخت و جلوگیری از تخریب‌های احتمالی و گاهی فاجعه‌آمیز، ضروری می‌باشد. به طور کلی ضروری است تا موارد زیر رعایت شود:

۱- نیروی انسانی فنی

پیمانکار باید ترکیب نیروی انسانی فنی و کارآمد را برای مراحل مختلف کار تامین و معرفی نماید. مسئولین کارگاه و مهندسین باید از دانش و تجربیات لازم در کارهای آبی و به‌خصوص کارهای رودخانه‌ای برخوردار باشند. به‌کارگیری نیروی کار محلی در امور فنی و به‌خصوص در امور غیرفنی و نیز اجاره ماشین‌آلات محلی همراه با کاربران آن موجب تاثیرات مثبت و حمایت‌های روانی در حین اجرا خواهد شد. د ستگاه نظارت بر اجرای طرح باید از مهند سین 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 عدم‌امکان اجرا آگاه باشد.

۲- راه‌های دسترسی

اولین مرحله، پیدا کردن راه مناسب و یا ساخت راه دسترسی به بازه‌ی رودخانه مورد نظر است. سپس نوبت به احداث و تجهیز کارگاه می‌رسد 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.

خ صو صیات کلی در انتخاب راه د ستر سی برای اجرای پروژه ساماندهی رودخانه عبارتند از کم‌هزینه بودن ساخت و نگهداری مسیر، کم‌ترین آسیب به طبیعت و محیط‌زیست منطقه، عدم تنش اجتماعی و محلی و مسیر مناسب برای رفت و آمد ماشین‌آلات سنگین

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 آبراهه‌های طبیعی و یا انهار آبیاری و زهکشی، باید تمهیدات لازم (ساخت ابنیه‌های فنی شامل 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 کمینه دست‌خوردگی 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 زیرساخت 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 بسیاری برای بیرون آوردن آن‌ها همراه با صرف زمان باید متحمل شد.

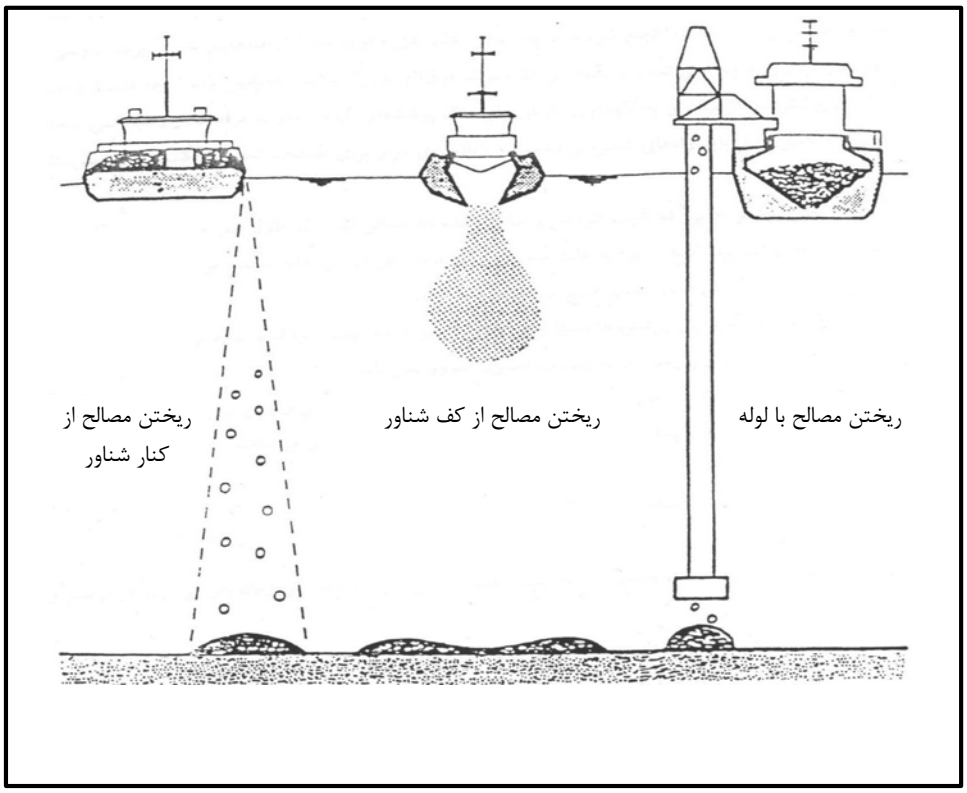
- باید از سواحل با شیب ناپایدار رودخانه دوری نمود و یا شیب دیواره را اصلاح نمود. در غیر این صورت، بر اثر وزن ماشین‌آلات بر روی دیواره بالای رودخانه و افزایش سربار، احتمال سقوط ماشین‌آلات به رودخانه وجود خواهد داشت.

۳- محل احداث و تجهیز کارگاه

در انتخاب محل مناسب برای احداث کارگاه باید شرایط زیر به طور 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 کمینه 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 زیست‌محیطی مقبول باشد.
- زمین کارگاه باید از مقاومت لازم برای رفت و آمد ماشین‌ها برخوردار 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.

با توجه به حجم گسترده‌ی کار و عملیات سنگین، ماشین‌آلات و تجهیزات موردنیاز را می‌توان به چند دسته حفار، سنگ‌شکن، حمل و نقل، متفرقه و شناور تقسیم نمود. در رودخانه‌های بزرگ و با جریان دائمی و نیز در رودخانه‌های بزرگ مرزی، عموما امکان انحراف آب و یا انحراف رودخانه میسر نبوده و ساخت سازه‌ها ناگزیر با وجود جریان آب انجام می‌پذیرد. در این شرایط از شناور یا بارج به‌عنوان سکوی استقرار ماشین‌آلات سنگین، به‌عنوان مخزن و حمل مصالح و برای استقرار مصالح در موقعیت ساخت استفاده می‌گردد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- کاربرد انواع شناور جهت ساخت سازه‌های رودخانه‌ای [۲۲]

محل دپوی مصالح باید تا جای ممکن به محدوده‌ی ساخت نزدیک بوده و مزاحم مسیرهای دسترسی نباشد. برای این‌که از هر طرف مصالح قابل دسترسی بوده و لودر و ماشین‌های دیگر قدرت مانور بیش‌تری داشته باشند. محل دپوی مصالح تا حد ممکن باید در فضای باز قرارگیرد. محل دپوی مصالح ممکن است در محدوده‌ی کارگاه و یا در دسترس موقعیت کاری انتخاب شود. این محل ممکن است در سیلابدشت رودخانه 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 قرارگیرد 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 محیط‌زیست و حیات جانداران صدمه‌ای وارد نماید.

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 باید در بازه زمانی خشک رودخانه و ترجیحا در یک سال 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.

۴- منابع قرضه

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 سازه‌ها ضروری است. منابع قرضه باید فراوان و نزدیک، با سهولت قابل برداشت و هزینه تامین و انتقال آن مناسب باشد. در خصوص برداشت مصالح، می‌توان به نشریاتی نظیر «مشخصات فنی عمومی راه» (نشریه شماره ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۲) و «راهنمای برداشت مصالح رودخانه‌ای» (نشریه شماره ۳۳۶ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۴۰۳) مراجعه کرد [۱۴].

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 دهیاری حل و فصل گردد.

۵- ملاحظات محیط‌زیستی

ملاحظات محیط‌زیستی زیر باید در انتخاب روش اجرا و مراحل ساخت سازه‌های تقاطعی رودخانه مورد توجه قرار گیرد:

الف- جلوگیری از آلودگی آب: در مرحله انحراف آب، پاکسازی بستر بازه رودخانه، حفر پی و آماده‌سازی بستر کار و ساخت سازه، حتی‌المقدور باید از گل‌آلود شدن آب در حین عملیات جلوگیری نمود. زیرا آلودگی آب علاوه بر نابودی آبزیان، بر کیفیت آب در پایین‌دست اثر داشته و مشکلات اجتماعی را نیز پدید خواهد آورد.

ب- جلوگیری از آسیب به زیست‌بوم: در احداث راه دسترسی، محل کارگاه و در میدان کار رودخانه‌ای، حتی‌المقدور باید از ناهنجاری در سامانه طبیعی (به صورت آسیب به لانه‌ها و پناهگاه پرندگان و سایر جانوران و حذف گیاهان حاشیه رودخانه) پرهیز گردد.

پ- زمان‌بندی اجرا: دوره‌ی زمانی اجرا بایستی به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی گردد که کمینه تاثیرات را بر حیات آبزیان و جانوران وابسته به سامانه رودخانه داشته باشد. به طور مثال زمان اجرا منطبق بر فصل تولیدمثل جانوران یا رشد و نمو گیاهان نباشد. هرچند که انطباق این شرایط با سهولت اجرای کار در فصل کم‌آبی رودخانه مشکل است.

ت- 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 کمینه ممکن کاهش یابد. در عین حال، پیش‌بینی لازم برای تردد مناسب مردم و احشام محلی در محدوده‌ی اجرای طرح و آبشخور رودخانه فراهم گردد.

۴-۳- شاخ صه‌های مرحله‌بندی کار در رودخانه، امکان‌پذیری اجرا، زمان‌بندی مراحل کار و سرعت اقدامات در سامانه رودخانه

۴-۳-۱- آماده‌سازی بستر کار در رودخانه

با احداث راه دسترسی، ساخت و تجهیز کارگاه و تامین مصالح اولیه، مهم‌ترین مرحله کار، آماده سازی میدان ساخت سازه تقاطعی در رودخانه از طریق انحراف آب و یا خشک انداختن محدوده‌ی عملیات رودخانه‌ای، یا تامین شرایط اجرا با حضور جریان آب است.

آماده سازی بستر کار رودخانه‌ای تابعی از عواملی مانند رژیم جریان در رودخانه (دائمی یا فصلی، سیلابی یا معتدل)، اندازه‌ی رود خانه (عرض و عمق)، محدودیت طبیعی و توپوگرافی در انحراف موقت جریان رود خانه، موقعیت بازه (محدوده‌ی 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.

به طورکلی بازه زمانی اجرای کار در رودخانه باید در دوره کم‌آبی، حتی‌الامکان یک ساله و با کم‌ترین ریسک سیل انجام گیرد. 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 سازه همراه با حجم مصالح مصرفی کم‌تر خواهد بود. شرایط اجرا در اعماق بیش‌تر از یک متر نیازمند ماشین‌آلات و روش‌های خاص (مانند استفاده از شناورها) است.

برای آماده سازی 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 سازه‌های تقاطعی، به گزینه‌های مختلفی به شرح زیر تقسیم می‌گردد:

۴-۳-۲- بهره‌گیری از الگوها و مشاهدات پل و پل‌بندهای تاریخی ایران و شاخصه‌های نوآورانه

از مهم‌ترین ویژگی‌های سازه‌های آبی تاریخی، انتخاب و ساخت سازه در مکان مناسب است که نشان از دانش مهندسان قدیم دارد. توجه به بستر رودخانه، مناسب بودن جای پایه‌ها و تقسیم نیروهای آب در بدنه باعث شده است که پل و بندهای تاریخی در ایران به خوبی و سالم باقی بمانند. به عنوان مثال، پایه‌ی بیش‌تر پل‌ها روی صخره‌های طبیعی قرار داده می‌شدند و در صورت نیاز در دوره‌های بعد باز هم روی همین پایه‌ها، پل‌های جدید ساخته می‌شدند.

پایه‌های پل‌ها عموما در قسمت بالادست نوک‌تیز بوده و در قسمت پایین‌دست شکل گرد داشته‌اند (مانند پل بابل بر روی رود فرات و پل آق‌قلا بر روی گرگانرود). این طرز ساختمان علاوه بر هدایت مناسب آب از لحاظ مکانیکی و مهندسی نیز صحیح و در دوام پل تاثیر زیادی داشته است. از این‌رو تقسیم آب به دهانه‌ها، هدایت جریان سیل و کاهش رسوب‌گذاری به سادگی در این پل‌ها انجام می شده است. این دوراندیشی و نبوغ طراحانه نه تنها باعث دوام آثار تاریخی

شده است، بلکه مرمت و نگهداری آن‌ها پس از سوانح را نیز آسان‌تر کرده است، درحالی‌که پل‌های معاصر در بسیاری از موارد فاقد چنین جزئیاتی هستند [۸].

برخی پل‌های باستانی ایران (مانند سی و سه پل و پل دزفول) علاوه بر پایداری ساختگاه، نوع مصالح و دوام سازه، به‌دلیل زیبایی منظر، شکل قوس‌ها و ظرافت ساختار بی‌نظیرند و هنوز کارایی دارند [۷۷،۷۳]. مصالح مورد نیاز عموما از نزدیک‌ترین جاها تامین می‌شده تا ساخت و ساز با شتاب بیش‌تری انجام شود و سازه با طبیعت پیرامون خود سازگارتر باشد. هنگام نوسازی آن نیز همیشه مصالح مورد نیاز در دسترس بود. بوم‌آورد بودن مصالح، دلیل اصلی بوده است که به وضوح در معماری تاریخی ایران پدیدار است [۴۹].

در دوره‌ی ساسانیان، تحول عظیمی در توسعه پل سازی ایران و فناوری طاق‌زنی به وجود آمد، و هنوز ۷۴ پل از این دوره باقی مانده که برخی کاملا سالم هستند [۷۳]. پس از اسلام تا قرن چهارم، پل سازی عملا تحت‌تاثیر دوره ساسانی بود و با وجود پل‌های بسیار بزرگ و تماشایی (مانند پل کلهر و پل کشکان در استان لرستان)، نوآوری خاصی در آن پدید نیامد. شاید حمله مغول یکی از دلایل باقی نماندن پل‌های این دوره باشد [۷۱].

۴-۳-۳- برچیدن کارگاه

برچیدن کارگاه عبارت است از جمع‌آوری مصالح، تاسیسات و ساختمان‌های موقت، خارج کردن مصالح، تجهیزات، ماشین‌آلات و دیگر تدارکات پیمانکار از کارگاه، تسطیح، تمیزکردن و در صورت لزوم به شکل اول برگرداندن زمین‌ها و محل‌های تحویلی کارفرما. هنگام برچیدن کارگاه باید به نکات زیر توجه شود:

- تعامل با دستگاه‌های دیگر جهت تسریع در برچیدن موانع و سازه‌های موقتی احداث شده در بستر رودخانه در مراحل بحران (پل، آبگذر، لوله‌ها، آبنما، خاکریزهای ساحلی و عرضی، خاکریزهای سیلابدشت و غیره) جهت آمادگی برای رخداد سیلاب بعدی و یا زلزله [۸].
- نظارت بر تسریع در برچیدن سازه‌های موقتی احداث شده در بستر رودخانه در مراحل بحران و جایگزینی سریع آن با طرح‌های پایدار و تاب‌آور جهت آمادگی برای رخداد سیلاب بعدی و یا زلزله [۸].
- پاک‌سازی بستر آبراهه از تمام اجزای سازه‌ای، دیواره‌ها ویا خاکریزهای هدایت و انحراف و حفاظت موقت، قبل از رخداد سیل بعدی و یا زلزله [۸].
- تخلیه مصالح اضافی، پاک‌سازی و برداشت اجزای سازه‌های تقاطعی موقتی از محیط رودخانه نباید به محیط بیرونی رودخانه نیز آسیب رساند [۱۲۰]. بنابراین قبل از تصمیم‌گیری در تخلیه مصالح و انتخاب محل تخلیه، دریافت مجوز قانونی و حقوقی تخلیه مد نظر قرار گیرد [۸].

۴-۴- ملاحظات محیط‌زیستی در زمان اجرا

مهم‌ترین شاخص‌های اکولوژیک در بررسی آثار محیط‌زیستی شامل موارد ذیل می‌باشد:

- تهدید گونه‌های گیاهی خاص
- تهدید رویشگاه‌های گیاهی
- تخریب و محدودیت زیستگاه‌ها
- تاثیر بر روی زون‌بندی اکولوژیکی رودخانه و محل‌های زیست و پراکنش ماهی‌ها در این زون‌ها
- تاثیر بر روی مهاجرت ماهیان، تخم‌ریزی و برگشت مولدین و بچه‌ماهی‌ها
- تاثیر بر روی دریاچه‌های پایاب رودخانه‌ها یا اکوسیستم‌های تالابی
- تاثیر بر روی ناحیه دهانه رودخانه‌ها یا مصب‌ها
- تاثیر بر روی مناطق حفاظت شده و حریم‌های حساس محیط‌زیستی

۱- ملاحظات محیط‌زیستی حین اجرای طرح در برداشت مصالح از بستر رودخانه

بهره‌برداری از منابع قرضه جهت تامین مصالح مورد نیاز برای انجام عملیات ساختمانی در هر یک از طرح‌های مهندسی رودخانه می‌تواند از محل‌های مختلفی نظیر معادن کوهی و یا رودخانه‌ای صورت پذیرد. اگر از محل منابع رودخانه‌ای یعنی آورده‌های رسوبی تجمع یافته در بستر و یا حاشیه و کناره‌های رودخانه‌ها تامین گردد، بسته به محل برداشت، حجم و نحوه بهره‌برداری، پیامدهای محیط‌زیستی مختلفی به شرح زیر به‌دنبال خواهد داشت.

در صورتی‌که، منابع قرضه از بستر فعال رودخانه‌ها برداشت شود، پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از این نحوه برداشت شدیدتر از زمانی است که از بسترهای غیرفعال یا متروکه که دارای ذخیره کافی هستند، برداشت گردد. در حالت اول، اکولوژی بستر رودخانه دستخوش تغییرات فیزیکی گردیده و زندگی آبزیان بستر دستخوش اختلالاتی خواهد گردید. این امر می‌تواند عناصر حیاتی وابسته را در زنجیره‌ای از معادلات اکولوژیکی بستر و موجودات زنده که با یکدیگر در ارتباط می‌باشند، تحت تاثیر خود قرار داده و باعث ایجاد اختلال در این زنجیره و شرایط طبیعی حاکم بر زیستگاه رودخانه‌ای محل برداشت منابع قرضه گردد. بسته به شرایط محیطی و نیز استفاده و یا عدم استفاده از ماشین‌آلات و دستگاه‌های سنگ شکن یا ماسه‌شور، اثرات محیط‌زیستی مختلفی ایجاد خواهد گردید. ناهنجاری در بستر رودخانه، فرسایش و رسوب‌گذاری و افزایش کدورت آب، همچنین آلودگی آب به انواع مواد روغنی یا مواد سوختی ممکن است از طریق ماشین‌آلات سنگین وارد محیط‌زیست رودخانه و آب گردد. آلودگی‌های هوا و صدای ناشی از فعالیت این ماشین‌آلات نیز، از جمله اثرات محیط‌زیستی اجرای طرح‌های پل یا آبگذر می‌باشد. چاله‌های برداشت مصالح از بستر آبراهه اصلی می‌تواند سبب ایجاد استخرهای عمیق، از دست رفتن خُرد اکوسیستم‌های آبی و زیستگاه‌های کوچک رودکناری رودخانه گردد. چاله‌های باقی‌مانده از برداشت مصالح از بستر رودخانه، در برخی شرایط سبب تشدید آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های پل در دوره پس از ساخت گردیده است. چاله‌های بزرگ و کوچک برداشت مصالح از خارج بستر آبراهه اصلی و در سیلابدشت رودخانه سبب به دام افتادن آبزیان کوچک و از بین رفتن آن‌ها در اثر تبخیر سطحی می‌گردد.

حجم و اندازه و میزان اثرات منفی محیط‌زیستی که از این طریق ایجاد می‌گردد، متفاوت و به حجم عملیات، گستردگی آن و نوع و میزان ماشین‌آلاتی که در این راستا مورد استفاده قرار می‌گیرد، بستگی دارد. لازم است با انجام تمهیدات محیط‌زیستی لازم و اعمال سیاست‌های مدیریتی نسبت به تعدیل و کاهش این آثار منفی مبادرت ورزید. در برخی مواقع نادر ممکن است بهره‌برداری از منابع قرضه نیازمند تغییر مسیر رودخانه و یا خشکانیدن موقت بخشی از مسیر آن باشد. در این صورت لازم است به منظور جلوگیری از مرگ و میر آبزیان و به‌ویژه ماهیان، نسبت به انجام این امر به صورتی کاملا اصولی، تدریجی و تحت نظارت کارشناسان سازمان حفاظت محیط‌زیست اقدام گردد به‌نحوی که اطمینان کامل از عدم تلف شدن گونه‌های آبزیان مهم و بقای آن‌ها حاصل شود. در برخی شرایط، با احداث کانال یا تونل انحراف آب در مجاورت رودخانه از آثار محیط‌زیستی منفی جلوگیری می‌گردد و یا در حدود قابل قبولی کاهش داده می‌شود.

برای تامین مصالح شن و ماسه در ساخت اجزای پل و آبگذر باید از آیین‌نامه‌ها و راهنماهای استاندارد ایران از نظر مجاز بودن برداشت مصالح، ضوابط انتخاب محل قرضه از سازه، میزان برداشت از بستر رودخانه، اثرات محیط‌زیستی، شرایط بهره‌برداری، پایان کار و نظارت بر روند برداشت پیروی نموده و مجوز لازم از وزارت نیرو و دیگر مراجع مسئول گرفته شود.

برای این منظور به نشریات و ضوابط موجود مانند: «راهنمای برداشت مصالح رودخانه‌ای» - ضابطه شماره ۳۳۶ سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۴۰۳) [۱۴]، «شرح خدمات مطالعات برداشت مصالح رودخانه‌ای» - ضابطه شماره ۳۲۹ سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۴۰۳)، «راهنمای ارزیابی و برآورد خسارات ناشی از اضافه برداشت و یا برداشت غیرقانونی مصالح رودخانه‌ای از اراضی بستر و حریم کمی و کیفی رودخانه‌ها» - نشریه شماره ۶۷، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور (۱۳۹۹)، «ضوابط محیط‌زیستی برداشت مصالح رودخانه‌ای» - ضابطه شماره ۵۶۳ سازمان برنامه و بودجه کشور(۱۳۹۰) و «شناسنامه فنی پل‌ها»، نشریه شماره ۳۶۷ وزارت راه و شهرسازی (۱۳۸۶) [۲۹] مراجعه گردد.

فصل ۵

راهنمای بهره‌برداری، نگهداری، پایش و بازرسی، ترمیم و بازسازی پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه

۵-۱- ارائه راهنمای پایش و بازرسی اجزای سازه‌ی پل و آبگذر

۵-۱-۱- عوامل تخریب پل و آبگذر

عوامل تخریب پل‌ها و آبگذرها در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- عوامل طبیعی شامل سیل، آبشستگی، جریان واریزه، رانش زمین، زلزله، وزش باد، طوفان و غیره) و ۲- عوامل انسانی شامل طراحی و ساخت ناقص، نبود پایش و نگهداری، تصادف و برخورد، اضافه بارگذاری، آتش سوزی و غیره [۱۱۴]. تخریب پل معمولا پدیده‌ی بسیار پیچیده‌ای است که در نتیجه تاثیر ترکیبی عوامل بسیار متعددی صورت می‌گیرد و به همین دلیل، گاهی یافتن عامل اصلی تخریب پل مشکل است [۱۱۴].

در سیل فروردین ماه ۱۳۹۸ در ایران، حدود ۱۰۰ پل در استان‌های غربی و شمالی دچار آسیب جدی شدند که دلایل عمده آن شامل آبشستگی پایه و تکیه‌گاه پل‌ها، جانمایی نامناسب، عمق ناکافی شالوده‌های عمقی و سطحی، طراحی یا ساخت نامناسب دیواره‌های هادی، آب‌گرفتگی عرشه پل، اثرات واریزه‌های شناور بر پایه‌ها و عرشه پل و طراحی نامناسب اتصالات عرشه پل به پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها می‌باشد [۳۷]. تخریب تعدادی پل در هر سیل در ایران نشان‌دهنده عدم توجه به شناخت مورفولوژیکی رودخانه بوده است. مجموعه اقدامات پایش و بازرسی در کل می‌تواند با بهره‌برداری و فعالیت‌های نگهداری ادغام شود.

عوامل طبیعی که در بالا به مواردی از آن‌ها اشاره شد در کل غیرقابل اجتناب هستند، هر چند فعالیت‌ها و اقدامات انسان می‌تواند موجب تشدید آن‌ها شود. به عنوان مثال از بین بردن پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی، برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه که سبب افزایش آبشستگی می شود و فعالیت‌های صنعتی انسان‌ها که موجب افزایش گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه تشدید گرمایش جهانی می‌شود، می‌تواند موجب افزایش قدرت تخریبی سیلاب‌ها گردد. نحوه‌ی اثرگذاری هر یک از عوامل طبیعی بر سازه‌ی پل متفاوت است. در ادامه عوامل اصلی نظیر سیل، آبشستگی و جریان‌های واریزه‌ای و سایر موارد که موجب تخریب پل‌ها هستند، به اختصار بررسی شده‌اند.

۵-۱-۱-۱- سیل

سیلاب‌های ناشی از بارندگی‌های شدید، پیامدهایی مانند آبشستگی، فرسایش، همگرایی رودخانه، عمق جاگذاری ناکافی، وقوع جریان‌های سرریزی و پرش هیدرولیکی ناشی از اقدامات محافظتی، صاف شدگی سنگ بستر، برداشت مصالح، برخورد واریزه‌ها و یا سایش شالوده پل و غیره را به دنبال دارد. یکی و یا ترکیبی از این عوامل می‌تواند منجر به صدمات شدید به مقاومت و پایداری اجزای کلیدی پل و یا در برخی موارد سبب تخریب کامل پل شود.

۵-۱-۱-۲- آبشستگی

آبشستگی پدیده‌ای است که در آن بستر رودخانه به‌دلیل فرسایش ناشی از جریان آب، پایین‌تر می‌رود و در نتیجه‌ی آن شالوده پل نمایان شده و در معرض خطر قرار می‌گیرد [۸۳]. پل‌هایی که در خاک‌های غیرچسبنده ساخته می شوند

نسبت به خاک‌های چسبنده بیش‌تر در معرض آبشستگی هستند [۱۶۵]. با افزایش عمق آبشستگی، مقاومت جانبی خاکی که شالوده‌ی پل را محصور می‌کند، کاهش می‌یابد. این مساله‌ی موجب انحراف جانبی شمع پل می‌گردد. به‌علاوه با رسیدن به عمق بحرانی آبشستگی ممکن است به‌دلیل اثر ترکیبی بار مرده‌ی روسازه‌ی پل و بار ترافیک، کمانش خمشی[1] شالوده اتفاق بیفتد. آبشستگی پل‌ها چهار نوع اصلی را شامل می‌شود: الف) آبشستگی موضعی، ب) آبشستگی تنگ‌شدگی که ممکن است به صورت تنگ‌شدگی قائم (که در این حالت آبشستگی جریان تحت فشار نیز نامیده می‌شود) یا شد. این نوع تنگ شدگی در شرایطی که تراز سطح جریان به وجه زیرین عرشه‌ی پل می‌رسد، اتفاق می‌افتد. نوع دوم تنگ شدگی به صورت تنگ شدگی جانبی است که به‌دلیل وجود پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل در مقطع رودخانه رخ می‌دهد. ج) آبشستگی عمومی و د) جابجایی آبراهه. انواع مختلف آبشستگی با وقوع سیل تشدید می‌شوند [۱۱۴]. اطلاعات بیش‌تر در خصوص انواع آبشستگی در فصل سوم و در پیوست شماره ۳ ارائه شده است.

در کل تاثیر آبشستگی در تخریب پل‌ها می‌تواند به صورت شکست قائم، شکست جانبی، شکست پیچشی و یا شکست عرشه‌ی پل باشد. حالت‌های مختلف شکست قائم و جانبی که نسبت به انواع دیگر شکست بیش‌تر رخ می‌دهند، در تحقیق دنگ و کای (۲۰۱۰) مرور جامعی در خصوص روش‌های مقابله با آبشستگی پل‌ها [۱۱۲] و همچنین در نشریه شماره ۲۶۰ سازمان برنامه و بودجه (۱۳۸۱) [۱۹] با عنوان «راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل» پدیده‌ی آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها، روش‌ها و معادله‌های تعیین عمق آبشستگی و نیز راهکارهای مهار فرسایش و حفاظت پایه‌های پل، ارائه شده است.

۵-۱-۱-۳- جریان واریزه

جریان واریزه معمولا در ادامه‌ی رانش زمین ناشی می‌شود. جریان آب با ضربه‌هایی که به دیواره‌های آبراهه وارد می‌کند، موجب می‌شود تا واریزه‌های به وجود آمده از رانش زمین، به جای لغزیدن، همانند یک سیال جاری شوند. جریان واریزه‌ها به‌ویژه هنگامی که سنگ‌های بزرگ انتقال می‌یابند، نیروهای ضربه‌ای مهیبی را به موانعی که در سر راه باشند وارد می‌کند. از طرفی جریان واریزه‌ای فزاینده و مداوم اثرات فرسایشی شدیدی را نیز موجب می شود. بنابراین هنگامی که یک جریان واریزه‌ای در مقیاس بزرگ از محل یک پل عبور می‌کند، خسارت‌های وارده به ساختمان پل می‌تواند ویرانگر باشد [۱۱۴]. گاهی نیز جریان واریزه‌ای به صورت حرکت مواد شناور مانند شاخه‌ها و تنه‌های درختان است که در محل پایه‌های پل تجمع می‌یابند و با کاستن از مقطع جریان موجب تشدید آبشستگی می‌شوند.

۱- Bending buckling

۵-۱-۲- پایش و ارزیابی

با توجه به مخاطرات متعددی که سازه پل یا آبگذر با آن مواجه می‌باشد، پایش و ارزیابی کارکرد سازه تقاطعی، پا سخگویی طرح به اهداف مورد نظر، کنترل معیارهای طراحی، برنامه نگهداری و راهکارهای منا سب ا صلاح و یا ترمیم، برای ایمنی و تداوم کارکرد سامانه سازه تقاطعی لازم و ضروری خواهد بود. اقدامات لازم برای پایش عبارتند از:

۵-۱-۲-۱- آسیب‌ها و خطرات احتمالی در سامانه سازه تقاطعی

با گذ شت دوره زمانی ارزیابی (متعاقب یک سیل بزرگ یا دو سیل متو سط و بعد از دو سال)، شنا سایی آ سیب‌های وارده به سازه و امکان بروز خطرات احتمالی در آینده، برای مدیریت و نگهداری رودخانه و سامانه سازه تقاطعی ضروری ا ست. بازبینی و ارزیابی شرایط رودخانه را می‌توان به سه بخش بستر ا صلی رودخانه، دیواره‌های رودخانه و سامانه سازه تقاطعی به شرح زیر تفکیک نمود:

- **بستر رودخانه:** احداث سازه تقاطعی سبب افزایش توان جریان و انحراف جریان به‌سوی دهانه‌ها و تکیه‌گاه‌های سازه گردیده و شرایط پیچانرودی شدن بازه اصلی جریان بالادست و توسعه شاخه‌های جریان به‌سوی دهانه‌های مختلف پل را فراهم می‌سازد. در مواقع سیلابی، اثرات حمله جریان و برخورد مواد جامد معلق و شناور به بدنه سازه تقاطعی و فرسایش بستر قابل انتظار است. در پیچ رودخانه، توسعه جریان ثانویه و حلزونی نیز سبب تشدید تغییرات در رشته‌های جریان می‌شود. برگشت جریان در بالادست سازه، باعث توسعه بارهای ر سوبی در بستر ا صلی رودخانه می‌گردد. فر سایش بستر رودخانه در محل سازه نیز سبب گسترش تدریجی بارهای رسوبی در پایین‌دست و تثبیت آن‌ها به صورت جزایر در میانه بستر خواهد شد. تاثیرات ریخت‌شناسی سازه تقاطعی بر روی هندسه جریان به تفصیل در فصل سوم ارائه شده است.
- **دیواره رودخانه:** فر سایش ب ستر و به‌خ صوص تو سعه پدیده کف‌کنی سبب ناپایداری دیواره رودخانه در بازه بالاد ست و پایین‌د ست گردیده و به فر سایش و تخریب دیواره می‌انجامد. رواناب سطحی بارش و یا آبیاری نیز به صورت یک عامل پیوسته و دائمی باعث توسعه فرسایش شیاری در دیواره بالا و حریم رودخانه خواهد شد و به صورت شکاف و خندق به‌جا می‌ماند.
- **سامانه سازه تقاطعی:** سازه تقاطعی بر اثر عوامل متعدد ممکن است کارایی موثر را نداشته باشند. از آن جمله می‌توان به دو مورد ا شاره کرد: ۱- عدم تقارن آرایش سازه تقاطعی در دو سمت رودخانه سبب حمله جریان سیلابی و فرسایش بستر در یک‌سو و رسوب‌گذاری در سوی دیگر خواهد شد. ۲- نیروهای جریان و پتانسیل آبشستگی و ضعف ساختار اولیه، از عوامل مهم ناپایداری سازه تقاطعی بوده که می‌تواند منجر به تخریب سازه گردد. فر سایش و آبشستگی از عوامل نشست و یا ایجاد ترک‌ها در اجزای سازه تقاطعی هستند که باید مورد بازبینی قرارگیرند.

۵-۱-۲-۲- روش‌ها و ابزار پایش سازه تقاطعی

طرح پایش و ارزیابی کارکرد سامانه سازه تقاطعی برای ایمنی طرح ضروری است. اهداف، مراحل، روش‌ها و ابزار پایش در طرح ساخت سازه تقاطعی به طور خلاصه شامل موارد زیر می‌باشد:

- **جمع‌آوری اطلاعات رودخانه قبل از اجرای طرح:** قبل از این‌که بازه رودخانه مورد پایش و بررسی قرار گیرد، لازم است تا نقشه‌ها، عکس‌ها و مشخصات عمومی رودخانه قبل از اجرای سازه جمع‌آوری گردد. این اطلاعات مبنای بررسی تاثیرات ریخت‌شناسی، جنبه‌های هیدرولیکی و زیستی احداث سازه تقاطعی بر سامانه رودخانه و ارزیابی درجه دست‌یابی به اهداف طرح می‌باشد.
- **بررسی میدانی بازه رودخانه:** 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 و وضعیت پایداری سازه تقاطعی به طور کیفی و مستند گزارش گردد. همچنین ابزاربندی پایش به صورت نصب وسایل اندازه‌گیری، اندازه‌گیری‌های ادواری از الگوی جریان در میدان تاثیر سازه تقاطعی و روش مناسب پایش (متناسب با شرایط محل و هماهنگ با شورای محلی) و غیره باید بر اساس بررسی محلی برنامه‌ریزی گردد.
- **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 سازه تقاطعی، درجه کارایی سازه تقاطعی و یا مخاطرات جدید را نشان خواهد داد. دوره‌های زمانی مناسب شامل زمان اجرای طرح سازه تقاطعی، قبل و بعد از سیلاب‌های شاخص و تناوب منا سب (سالانه یا چند سالانه) می‌با شد. آب‌نگاری کف بستر رودخانه‌های بزرگ و با جریان دائمی نیز مشابه عملیات آب‌نگاری کف مخازن سدها، با استفاده از سامانه قایق، GPS و عمق‌سنج‌های فراصوتی، امروزه در ایران به‌راحتی قابل انجام است.
- **نصب وسایل اندازه‌گیری:** گام اول ایجاد شبکه کنترل ارتفاعی و احداث نقاط کنترل مطمئن و دائمی نظیر محور راه‌های آسفالته، تیر و دکل خطوط حیاتی و ساختمان‌های دائمی در محل، مطمئن‌ترین کنترل‌ها به‌شمار می‌روند. ابزاربندی طرح پایش به صورت نصب وسایل اندازه‌گیری برای ارتفاع سطح آب، عمق فرسایش و رسوب‌گذاری در میدان تاثیر سازه تقاطعی و شدت تخریب ساحل رودخانه می‌تواند تجهیز گردد. تراز سنج‌های معمولی برای اندازه‌گیری هم‌زمان سطح آب و کف بستر در بالادست بازه، در میدان سازه تقاطعی و در پایین‌د ست بازه نصب می‌گردند. با نصب میل‌های مهاری شاخص در ساحل بالا می‌توان تغییرات دیواره اصلی رودخانه را در سال‌های بهره‌برداری پایش نمود.

۵-۱-۲-۳- روش‌های پایش آبشستگی در پل‌ها

پایش و بازرسی تراز بستر در اطراف هر پایه و تکیه‌گاه یکی از اقدامات ضروری نگهداری محسوب می‌شود. لازم است تا پروفیل طولی و عرضی بستر در محدوده پل (از بالادست تا پایین‌دست هر پایه و تکیه‌گاه) پس از ساخت و قبل از بهره‌برداری، اندازه‌گیری و ثبت شود. این اطلاعات مبنای بسیار خوبی برای پایش و ارزیابی الگوها و روندهای طولانی‌مدت در پروفیل بستر آبراهه (آبشستگی تنگ شدگی) و شناسایی هر نوع تغییر در عمق بستر در محل پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها (آبشستگی موضعی) را در اختیار قرار خواهند داد. ضروری است تا برای پل‌های مهم پس از هر سیلاب، پروفیل طولی و عرضی در همان محدوده که در زمان ساخت برداشت شده، برداشت گردد و این داده‌ها با هم مقایسه شوند.

۵-۱-۲-۳-۱- پایش چشمی

بازرسی‌های چشمی معمول‌ترین روش برای پایش آبشستگی پل هستند. در این روش، برای رودخانه‌های فصلی به راحتی می‌توان میزان آبشستگی را مشاهده کرد و در رودخانه‌های دائمی کم عمق نیز در فصول خشک با شاخص مدرج اندازه‌گیری نمود. برای رودخانه‌های عمیق دائمی می‌توان از غواص برای بازرسی استفاده کرد. البته نباید مقادیر برداشت شده در زمان غیر سیلابی ملاک قرارگیرند چرا که عمق آبشستگی در زمان سیلاب به بیشینه خود می‌رسد و با فروکش کردن سیل، بخشی از گودال آبشستگی را رسوبات پر می‌کنند [۹۱]. از این رو ضروری است تا حتی‌الامکان، از ابزار برخط دقیق ثابت یا گسسته برای پایش آبشستگی استفاده شود که شرح بیش‌تر آن در پیوست شماره ۵ ارائه شده است.

با توجه به اهمیت توسعه سیستم یکپارچه مدیریت پل‌ها و پایش سلامت آن‌ها، توصیه می‌شود تا برای بازرسی ایمنی پل‌های رودخانه‌ای از روشی که توسط Akay et al. (2019) ارائه شده است، استفاده گردد [۸۹]. این روش در کشور ترکیه و در حوضه‌ی آبخیز منطقه غرب دریای سیاه استفاده شده است. این حوضه‌ی آبخیز، منطقه‌ای کوهستانی با آب و هوای بارانی و سیل‌های ناگهانی پرتکرار است. روش مذکور از چهار بخش اصلی ارزیابی هیدرولوژی حوضه‌ی آبریز و پتانسیل وقوع سیل در آن، پایداری رودخانه، خصوصیات پل و ارزیابی سریع آبشستگی، تشکیل شده است.

این روش قابلیت شناسایی و رتبه‌بندی پل‌ها از نظر الزامات و نیازهای نگهداری را دارد و یک فرایند ارزیابی جامع را در اختیار مهندسان پل قرار می‌دهد. در این روش به راه‌اندازی و تدوین یک سامانه‌ی مدیریت پل[۱] (BMS) اشاره شده است که در آن تمام داده‌های سازه‌ای پل‌های موجود به همراه اطلاعات مربوط به الزامات بازرسی/ترمیم و نیز هزینه‌ی نگهداری آن‌ها به طور متمرکز جمع‌آوری می‌شود. در این سامانه، هر بخشی از پل به صورت چشمی و مشاهده‌ای و در صورت نیاز با استفاده از تجهیزات، بازرسی و بر اساس عمر سازه، خسارت‌ها، از بین رفتن اجزای سازه و میزان بدتر شدن شرایط سازه، درجه‌بندی می‌شوند. در این روش به ارزیابی سازه‌ای پل‌های رودخانه‌ای نیز توجه شده است که شامل ارزیابی بدنه‌ی اصلی، نگهداشت خاک و مولفه‌های بهره‌برداری پل بر مبنای خسارات، خرابی‌ها، عمر سازه و تغییرشکل آن

۱- Bridge Management System (BMS)

می شود. در روش مذکور، ارزیابی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به همراه بازر سی سازه‌ای، ارزیابی سطح یک[۱] را ت شکیل می‌دهند. بسته به نتایج ارزیابی سطح ۱، در صورت نیاز، ارزیابی سطح ۲ انجام خواهد شد که شامل تحلیل دقیق‌تر آبشستگی پل و شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال رسوب است. شرح بیش‌تر در بند ۵-۱-۲-۴ همراه با جدول‌های (۵-۴) و (۵-۵) و نیز شکل (۵-۱) آمده است.

۵-۱-۲-۳-۲- روش سریع برای بازرسی و کنترل آبشستگی

علاوه بر ارزیابی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، توصیه می شود تا یک کنترل سریع و آسان در مورد آبشستگی انجام شود تا در نتیجه‌ی آن پل‌های رودخانه‌ای که بر اساس روش توسعه داده شده (بازرسی ایمنی پل‌های رودخانه‌ای) جزو پل‌های ضعیف طبقه‌بندی نشده‌اند ولی در عین حال به لحاظ آبشستگی وضعیت بحرانی دارند، شناسایی می‌شوند. کنترل آبشستگی شامل اطلاعاتی نظیر شالوده‌ها، اعمال روش‌های مقابله با آبشستگی، خصوصیات جریان رودخانه و خصوصیات پل مانند درجه انحراف که به طور مستقیم در افزایش آبشستگی پیرامون اجزای زیرسازه‌ی پل نقش دارد، می‌باشد.

بر مبنای نتایج این ارزیابی، می‌توان در سطح ۲ ارزیابی ریسک آبشستگی را دقیق‌تر و با جزئیات بیش‌تری انجام داد (برای این منظور می‌توان از دستورالعمل مطالعات هیدرولیکی و آبشستگی پل (۱۳۸۱) - نشریه شماره ۳۰۲ سازمان برنامه و بودجه کشور [۱۳]، راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده‌ی پایه‌های پل (۱۳۸۱) - نشریه شماره ۲۶۰ سازمان برنامه و بودجه کشور [۱۹]، و همچنین از منابع خارجی [۱۰۷ و ۱۱۳ و ۱۱۶ و ۱۳۲ و ۱۵۳ و ۲۰۶] استفاده نمود. همان‌گونه که اشاره شد، این سطح از ارزیابی در صورتی توصیه می‌شود که پل در ارزیابی سطح ۱ «ضعیف» تشخیص داده شده باشد.

در طول دهه‌های گذشته، مدل‌های کامپیوتری (مدل‌های شبیه‌سازی عددی) متعددی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب، تغییرات تراز بستر آبراهه و اثرات سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه (مانند پل‌ها) ارائه شده است [۲۴ و ۲۶ و ۵۸] استفاده کرد. تعدادی از این مدل‌ها غیرتجاری و رایگان هستند که در جدول (۵-۱) سه مورد از آن‌ها معرفی شده‌اند. سایر مدل‌ها عمدتا توسط شرکت‌های تجاری ارائه شده‌اند و غیر رایگان هستند.

مدل یک و دو بعدی HEC-RAS توسط انجمن مهندسی ارتش آمریکا (USACE) قابلیت شبیه‌سازی شبه غیرماندگار و غیرماندگار انتقال رسوب را دارد.

اداره‌ی عمران ایالات متحده (USBR) مدل دو بعدی هیدرولیک رودخانه و رسوب[۲] (SRH2D) را تولید کرده است. این پلتفرم رایگان معمولا از یک واسط کاربر که سامانه مدل‌سازی آب سطحی[۳] (SMS) نامیده می‌شود برای تنظیم

۱- Level 1 assessment

۲- Sediment and River Hydraulics – Two-Dimension (SRH2D)

۳- Surface-water Modeling System (SMS)

داده‌های ورودی و مشاهده نتایج استفاده می‌کند. مدل SRH2D توانایی شبیه‌سازی هیدرولیک رودخانه و سازه‌هایی مانند پل، آبگذر و دریچه‌ها را داراست.

مرکز تحقیق و توسعه گروه مهندسان ارتش آمریکا (ERDC) سامانه مدل‌سازی هیدرولیکی تطبیقی[۱] (AdH) را ارائه داده است. از این پلتفرم قدرتمند برای طراحی سازه‌های حمل و نقل متقاطع با رودخانه و نیز اقدامات اصلاح و ساماندهی رودخانه استفاده می‌شود [۱۲۹].

جدول ۵-۱- پلتفرم‌های رایگان برای شبیه‌سازی فرایندهای رسوبی در اطراف پل‌ها [۱۲۸]

پلتفرم	توسعه دهنده	قابلیت مدل‌سازی	منبع
HEC-RAS	USACE	1D	www.hec.usace.army.mil
SRH2D	USBR	2D	www.usbr.gov/tsc
AdH	USACE	2D	www.erdc.usace.army.mil

۵-۱-۲-۳-۳- پایش سازه‌ای پل‌های رودخانه‌ای

اجزای پل‌های رودخانه‌ای هر دو سال یک‌بار باید از نظر پایداری سازه‌ای بازرسی و کنترل شوند [۱۰۴]. ارزیابی سازه‌ای شامل بدنه‌ی اصلی پل، حائل‌های زمینی و اجزای بهره‌برداری از پل است. جدول‌های (۵-۲) و (۵-۳) به‌ترتیب شاخص‌های ارزیابی سازه‌ای و طبقه‌بندی‌های مربوطه را نشان می‌دهند. خصوصیات پل که در این دو جدول مشخص شده‌اند، براساس بازرسی‌های چشمی یا پروژه‌های طراحی پل‌ها به‌دست آمده‌اند.

جدول ۵-۲- مشخصه‌های پل

مولفه‌های ارزیابی سازه‌ای			
مولفه‌های بدنه‌ی اصلی		مولفه‌های حائل زمینی	
عرشه	ترک	تکیه‌گاه‌ها	تغییر شکل
	گسیختگی بتن		ترک‌ها
	مسلح‌سازی ظاهری		گسیختگی بتن
	حفرات و کاواک‌ها		مسلح‌سازی ظاهری
	نشت آب		حفرات و کاواک‌ها
اتصالات	خسارت اصلی	خاکریز دسترسی	ساییدگی ناشی از جریان آب و واریزه
	بستر اتصال		آبشستگی در شالوده
	از بین رفتن اجزا		نشست و فروپاشی
	گیرداری		فرسایش روی سکوی جاده
	آرایش سطحی		فرسایش در خاکریز
	تغییر شکل		نشست و فروپاشی
تیرها	تغییر شکل	تثبیت	فرسایش
	ترک‌ها		آبشستگی در تراز بستر
	زنگ‌زدگی	مولفه‌های بهره‌برداری	
	پیچ و پرچ	پوشش	خیزآب
	گسیختگی بتن		رد تایرها

۱- Adaptive Hydraulic Modeling System (AdH)

ادامه جدول ۵-۲- مشخصه‌های پل

مولفه‌های ارزیابی سازه‌ای			
مولفه‌های بدنه‌ی اصلی			**مولفه‌های حائل زمینی**
مسلح‌سازی ظاهری حفرات و کاواک‌ها			ترک‌ها حفرات و کاواک‌ها
پایه‌ها	تغییر شکل ترک‌ها گسیختگی بتن مسلح‌سازی ظاهری حفرات و کاواک‌ها ساییدگی ناشی از جریان آب و واریزه آبشستگی در شالوده	مرز نرده‌ها درز انبساطی	ترک‌ها گسیختگی بتن مسلح‌سازی ظاهری تغییر شکل زنگ‌زدگی کمبود نویز نشت آب تغییر شکل حفرات و کاواک‌ها از بین رفتن اجزا مختل شدن عملکرد

جدول ۵-۳- مشخصه‌های پل

مولفه‌های سازه‌ای												
شاخص	طبقه‌بندی											
	عالی			خوب			قابل قبول			ضعیف		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
موارد جدول قبل	جدید یا بدون آسیب‌دیدگی، آسیب یا فرآیند تخریب در مراحل اولیه خود است.			آسیب کم ولی قابل ملاحظه، مشکلی ایجاد نمی‌کند.			آسیب‌دیده ولی قابل بهره‌برداری است، مشکلات پایداری شروع به رخ دادن کرده است.			آسیب شدید، مشکلات ایمنی جدی، اقدام فوری لازم است، آسیب اجزا قابل ارزیابی نیست.		

۵-۱-۲-۴- بازرسی پایداری و ایمنی پل‌های رودخانه‌ای

راهنمای توصیفی بازرسی پایداری و ایمنی پل‌ها به صورت جدول (۵-۴) ارائه شده است. شکل (۵-۱) مراحل اصلی الگوریتم بازرسی ایمنی توسعه داده شده را نشان می‌دهد. در این الگوریتم، تمام شاخص‌های مربوط به هیدرولوژی حوضه آبخیز، پتانسیل سیل ناگهانی، پایداری رودخانه و خصوصیات پل در چهار دسته‌ی عالی، خوب، قابل قبول و ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند و هر شاخص در دامنه‌ی ۱ تا ۱۲ رتبه‌دهی می‌شوند.

سپس به منظور تصمیم‌گیری، با استفاده از درجه‌ی شاخص‌ها یک نقطه‌ی ریسک[۱] (RP) تعریف می‌شود. طبق روش اتخاذ شده، مقدار اولیه RP برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و بر اساس آن، برای شاخص‌هایی که عالی و خوب طبقه‌بندی شده‌اند، مقدار RP تغییر نمی‌کند و در همان مقدار صفر باقی می‌ماند. برای شاخص‌هایی که در دسته‌ی قابل‌قبول طبقه‌بندی شده‌اند، مقدار RP به ۱ افزایش می‌یابد. برای شاخص‌هایی هم که در دسته‌ی ضعیف طبقه‌بندی

۱- Risk point

شده‌اند، مقدار RP به ۲ افزایش می‌یابد. جدول (۵-۵) تغییر در RP را بر اساس درجه‌ی شاخص‌های مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نشان می‌دهد. دامنه‌ی RP با تقسیم بیشینه مقدار ممکن RP به سه بخش مساوی تعیین می شود که هر بخش به مراحل محاسبه‌ی RP مربوط می‌شود: بدون تغییر، افزایش به ۱ و افزایش به ۲. سپس بخش نخست به دو قسمت تقسیم می‌شود و نشان‌دهنده‌ی دو طبقه‌ی عالی و خوب است.

با کمک روش بازرسی ایمنی، مدیریت و نگهداری پل‌های رودخانه‌ای ارتقا می‌یابد و بر اساس نتایج حاصل از این ارزیابی و نیز مقادیر RP می‌توان اقدامات نگهداری لازم را برنامه‌ریزی کرد. در نتیجه، طول عمر و قابلیت بهره‌برداری از پل‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با ا ستفاده از اطلاعات مربوط به رودخانه، سازه و میزان بحرانی بودن آ بشستگی می‌توان ریسک شکست و تخریب را نیز انجام داد.

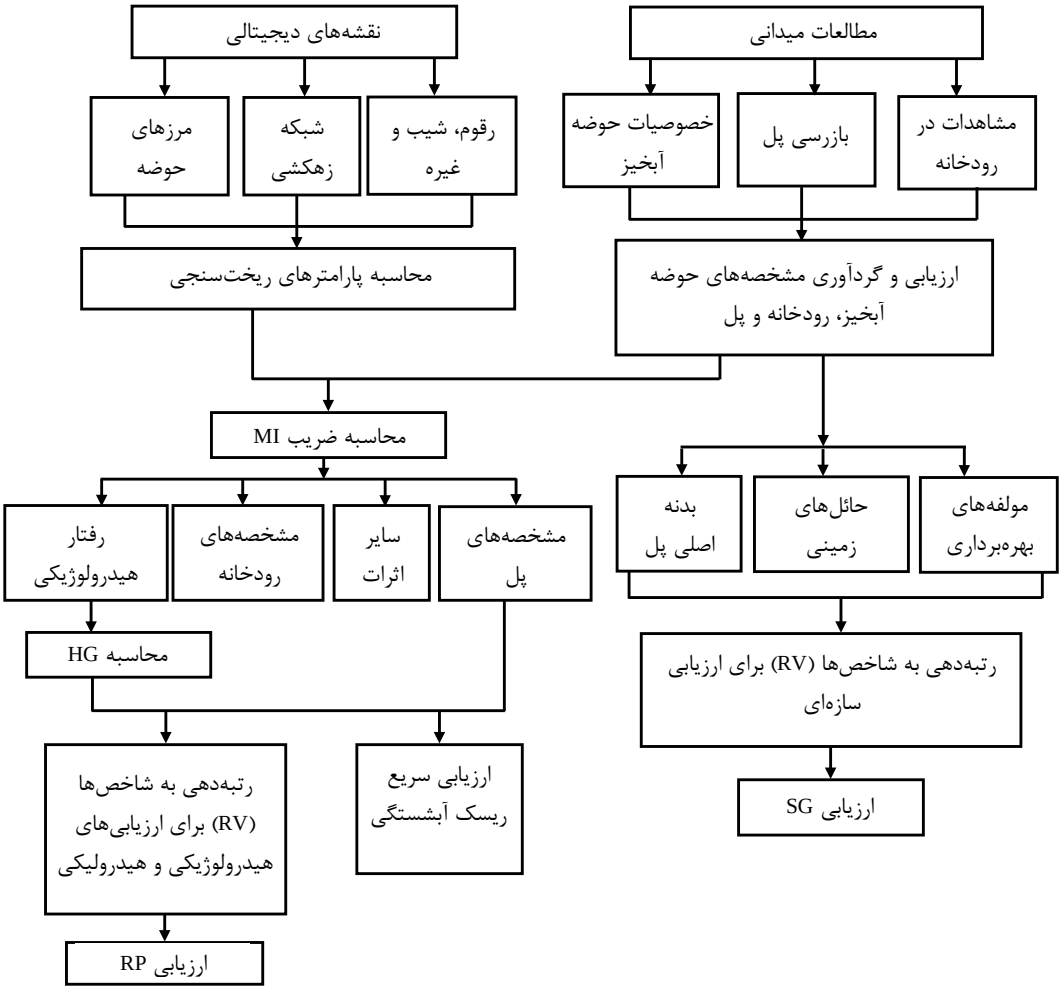
بازر سی پل‌ها باید به صورت دوره‌ای انجام شود. داده‌های جمع‌آوری شده از بازر سی‌ها در طولانی‌مدت، مانند داده‌های مربوط به مقاطع عرضی رودخانه، برای اهدافی نظیر ارزیابی پایداری رودخانه مفید هستند. همچنین در صورت نیاز به جایگزینی و ساخت پل جدید، این داده‌ها به طراحی سازه‌هایی با دوام بیش‌تر کمک خواهد کرد. هنگامی که داده‌های جمع‌آوری شده از پایش‌ها در طول زمان و بین چند پل که روی یک رودخانه بنا شده‌اند مقایسه شوند، نتایج حا صل نرخ افزایش یا کاهش تراز در طول بازه‌ی رودخانه را مشخص می‌کند. این نوع از تجریه و تحلیل همچنین مشخص می سازد که آیا این تغییرات موضعی هستند و یا این‌که به‌واسطه‌ی فرایندهایی در مقیاس بزرگ‌تر در حوضه‌ی آبخیز ایجاد شده‌اند. پایش‌های مربوط به تراز کف رودخانه برای ارزیابی شرایط پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها مهم است. گاهی چنانچه اندازه‌گیری‌ها فقط در محل پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها متمرکز باشند، تغییراتی که در رودخانه اتفاق می‌افتد آشکار نمی‌شود. یک روش برای انجام اندازه‌گیری‌های دوره‌ای این است که اندازه‌گیری‌ها در نقاط خاص مانند خطالقعر، پنجه کناره‌ی رودخانه، بالای کناره ی رودخانه و سایر محل‌هایی که شیب شکسته و تغییر کرده، انجام شود. این نوع اندازه‌گیری موجب می‌شود تا نتایج و تفسیرهای موثق‌تر و قابل اعتمادتری از شرایط پایداری رودخانه حاصل شود.

جدول ۵-۴- راهنمای بازرسی پایداری و ایمنی پل‌های رودخانه‌ای

شاخص	طبقه‌بندی											
	عالی			خوب			قابل قبول			ضعیف		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
محل پل	در ردیا یا تراز دریاچه			در آبراهه‌هایی با شیب ملایم			در آبراهه‌های واقع در دره‌ها			در دامنه کوه یا آبراهه‌هایی با شیب تند		
فاصله بالادست از محل پل تا نقطه تأثیر و مسیر پیچان	$D_m > 35\ m$			$20 < D_m \leq 35\ m$			$10 < D_m \leq 20\ m$			$0 < D_m \leq 10\ m$		
انحراف پل	$0 \leq \alpha \leq 5^\circ$			$5 < \alpha \leq 10^\circ$			$10 < \alpha \leq 30^\circ$			$\alpha > 30^\circ$		
جریان در دهانه‌های پل	بازشدگی کافی، عدم برگشت آب، جریان با سطح آزاد در دهانه‌ها برقرار است.			بازشدگی کافی، کمی برگشت آب رخ می‌دهد، جریان با سطح آزاد در دهانه‌ها برقرار است.			سطح آب تا سطح زیرین شاه‌تیر پل بالا می‌آید، جریان در دهانه‌ها به صورت تحت فشار است.			جریان روگذری و سرریزی کمینه یک بار در طول عمر پل اتفاق می‌افتد.		

ادامه جدول ۵-۴- راهنمای بازرسی پایداری و ایمنی پل‌های رودخانه‌ای

شاخص	طبقه‌بندی										
	عالی			خوب			قابل قبول			ضعیف		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
مشخصه‌های پایه‌ها												
نوع پایه، تک پایه یا گروه پایه‌ها، و زاویه‌ی انحراف	تک‌پایه، دماغه‌ی دایره‌ای یا نیم‌دایره، پدیده‌ی جریان یا رخ نمی‌دهد و یا وقوع آن قابل چشم‌پوشی است.			تک‌پایه، دماغه‌ی پایه در سمت بالادست یا پایین‌دست گرد نیست، جدایی جریان رخ می‌دهد ولی گردابه‌های تولید شده‌ی قوی نیستند.			دو پایه که پشت سر هم قرار گرفته‌اند، زاویه انحراف صفر است، گردابه‌های قوی تشکیل می‌شود.			دو پایه که پشت سر هم قرار گرفته‌اند، انحراف وجود دارد، و گردابه‌های قوی تشکیل می‌شود.	
نسبت طول به عرض	<2			$2-3$			$3-5$			>5		
قابلیت مشاهده و پایش‌پذیری	همواره قابل مشاهده است.			معمولا به دلیل عمق کم‌آب قابل مشاهده است.			فقط در فصل خشک که جریانی در رودخانه وجود ندارد، قابل مشاهده است.			همواره زیر سطح آب است، بنابراین امکان ارزیابی چشمی وجود ندارد.		
آبشستگی	نبود آبشستگی یا آبشستگی قابل چشم‌پوشی در اطراف پایه‌ها، لبه‌های شالوده بیرون‌زدگی نداشته و دیده نمی‌شوند.			آبشستگی کم، لبه‌های شالوده کمی بیرون‌زدگی دارند و تاحدی دیده می‌شوند.			مقدار آبشستگی قابل توجه است، طوری که لبه‌های شالوده دیده می‌شوند.			آبشستگی شدید پیرامون پایه‌های پل		
استفاده از راهکارهای مقابله با آبشستگی	نیازی به استفاده از راهکارهای مقابله با آبشستگی نیست.			از سنگ‌های بزرگ برای مقابله با آبشستگی استفاده می‌شود، این روش برای مقابله با آبشستگی کافی و مناسب است.			از سنگ‌های بزرگ برای مقابله آبشستگی استفاده می‌شود، ولی این روش برای مقابله با آبشستگی کافی و مناسب نیست. سنگ‌ها جابه‌جا می‌شوند و این روش کارایی ندارد.			برای مقابله با آبشستگی از هیچ روشی استفاده نمی‌شود و با روش استفاده شده مناسب نیست.		
مشخصه‌های تکیه‌گاه‌ها												
نوع و شرایط حفاظت	بدون خسارت در دیوار برشی بتن مسلح، بدون تغییر شکل			خسارت کم به دیوار بتن مسلح، ولی بدون تغییر شکل			ترک‌خوردگی و خسارت به دیوار برشی بتن مسلح، بدون تغییر شکل			ترک‌خوردگی و خسارت شدید به دیوار برشی بتن مسلح، وقوع تغییر شکل		
نشست و شرایط خاکریز دسترسی	نشست یا تغییر شکل بارزی مشاهده نمی‌شود.			نشست با تغییر شکل بارزی مشاهده نمی‌شود، مقدار کمی برشی در خاکریز			برش و تغییر شکل‌های شدید در خاکریز			نشست و برش شدید در خاکریز		
عوامل فیزیکی و محیطی که بر تکیه‌گاه‌ها تأثیر می‌گذارند.	بدون تغییر			خسارت کم به خاکریز دسترسی به دلیل گسترش جاده			به دلیل عواملی مانند زهکشی یا احیای رودخانه، نشست رخ داده است.			به دلیل تغییر ساختار جریان که در نتیجه احیای رودخانه و ... رخ داده، خسارت دیده است.		



شکل ۵-۱- مراحل روش بازرسی ایمنی پل‌های رودخانه‌ای

جدول ۵-۵- تعیین مقدار ریسک (RP) با استفاده از درجه هیدرولوژیکی و مقادیر رتبه‌دهی (RV)

عنوان	RP بدون تغییر است	RP به ۱ افزایش می‌یابد	RP به ۲ افزایش می‌یابد
ارزیابی هیدرولوژیکی	$HG < 33$	$33 \leq HG < 47$	$HG \geq 47$
ارزیابی هیدرولیکی	$1 < RV < 7$	$7 \leq RV \leq 9$	$10 \leq RV \leq 12$

۵-۱-۳- ارزیابی پایداری و کارایی محیط‌زیستی سازه تقاطعی

کنترل ادواری پایداری سازه تقاطعی و مقایسه ابعاد هندسی موجود با ابعاد نظیر آن در مرحله ساخت ضروری است. این ابعاد شامل طول، عرض و ارتفاع تاج سازه تقاطعی، شیب جانبی در وجوه بالادست و پایین‌دست تکیه‌گاه‌های سازه تقاطعی و همچنین عمق آبشستگی در پنجه و پای تکیه‌گاه‌ها و دیوارهای هادی بالادست و پایین‌دست، پایه‌های پل، آسیب‌پذیری‌های سطحی اجزای سازه (در اثر برخورد مواد جامد معلق و شناور و اثرات دائمی کیفیت آب) می‌باشد. ایمنی و کارایی سازه تقاطعی در برابر آبشستگی و حمله جریان، توسعه رسوبات در حد فاصل سازه تقاطعی و رویش طبیعی گیاهان در کناره‌ها، بهترین شواهد پایداری سازه تقاطعی در حفاظت دیواره‌های رودخانه هستند. تامین عمق آب کافی،

هدایت خط القعر و مسیر جریان اصلی در میانه بستر و عدم حضور بارهای رسوبی میانی، بیانگر کارایی سازه تقاطعی و 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 سازه تقاطعی به شمار می‌آیند. 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) به طور هم‌زمان در بازه بالادست، در بازه اصلاح شده و در بازه پایین‌دست رودخانه اندازه‌گیری و یا ارزیابی می‌گردد. مقایسه این داده‌ها در هر دوره زمانی و نیز در دوره‌های مختلف زمانی، ماتریس ارزیابی ارزش زیستی رودخانه را فراهم می‌سازد.

۵-۱-۴- پایش محیط‌زیستی پل‌ها و آبگذرها

مسائل و مشکلات محیط‌زیستی در رودخانه‌ها که غالبا ناشی از دخالت انسان در محیط طبیعی رودخانه‌ها است فراوان بوده و باعث نابودی و یا کاهش موجوداتی که در رودخانه زیست می‌کنند شده است و یک ضرورت فوری جهت حل این مشکلات و مسائل حتمی می‌طلبد. برای حل مشکل بایستی آن را از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی علمی قرار داد. بدون شناخت مشکل قطعا آن مساله حل نشده و راه حلی برای آن پیشنهاد نخواهد شد. بنابراین قدم اول در حل یک مشکل، شناخت دقیق از آن مساله می‌باشد.

کاهش انواع گونه‌های ماهیان مهاجر مهم اقتصادی در رودخانه‌های ایران و از بین رفتن تکثیر طبیعی آن‌ها از مسائل کاملا مشهود در رودخانه‌ها می‌باشد که توسط منابع و محققان مختلف داخلی و خارجی گزارش شده است. هم‌چنان‌که جاذبه‌ی رودخانه‌های ایران برای تخم‌ریزی ماهیان از بین می‌رود، ماهیان از سواحل ایران دور می‌شوند و در نتیجه ذخایر عمده صیادی ایران در محدوده آب‌های تحت مالکیت از بین رفته و یا به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. از دیگر مشکلات موجود در رودخانه‌ها که از احداث سازه‌های رودخانه‌ای مورد توجه محققان ناشی می‌شود، تغییرات فیزیکی در رودخانه، کنترل جریان، از بین رفتن محل‌های مناسب تخم‌ریزی، تغییرات شیمیایی آب رودخانه‌ها، تغییرات دما، کدورت آب، کاهش مواد مغذی در رودخانه‌ها و دیگر مواردی می‌باشد که اثرات زیان‌باری را بر زندگی و تولیدمثل انواع ماهیان گذاشته است. تعدادی از این مشکلات برای بعضی رودخانه‌ها شناخته شده است و مشکلات متعدد دیگری برای بسیاری از رودخانه‌ها موجود می‌باشد که جهت کاهش اثرات منفی و تبعات آن‌ها نیاز به تحقیقات وسیع‌تر و فوری است.

برای کاهش مخاطرات محیط‌زیستی ضروری است تا ابتدا در زمان طراحی اقدامات لازم پیش‌بینی گردد (در فصل ۳ این راهنما توضیح کافی ارائه شده است) و در زمان بهره‌برداری از سازه پل و آبگذر نیز پایش و ارزیابی از عملکرد این اقدامات انجام گیرد.

از دیگر پیشنهاداتی که ذکر آن‌ها بسیار ضروری است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- برای تمام موانع مصنوعی مهاجرت ماهیان، یک بانک اطلاعاتی شامل کلیه مشخصات آن‌ها توسط متخصصان هیدرولیک و بیولوژیست‌ها در رودخانه‌های ایران تاسیس شود و مطالعات بر روی شناسایی این موانع انجام

پذیرد. این موانع می‌تواند انواع سدهای انحرافی، سدهای مخزنی خاکی و بتنی و انواع دیگر سدها و بندها و یا بعضی از پل‌ها، آبگذرها و سرریزها، دراپ‌ها، شوت‌ها و موانعی از این قبیل باشد. مراحل بعدی، اولویت‌بندی این موانع براساس میزان صدمات آن‌ها در مهاجرت ماهیان و طراحی راه‌ماهی‌های مناسب برای آن‌ها و اجرای این سازه‌ها خواهد بود.

۲- انجام تحقیقات مشترک توسط متخصصان هیدرولیک و عمران با محققان شیلات و زیست‌شناسی در مورد انواع سازه‌های راه‌ماهی مناسب گونه‌های بومی با حمایت سازمان‌های حفاظت محیط‌زیست و شیلات بسیار ضروری بوده و نیاز به فوریت دارد.

۳- افزایش آگاهی مردم و فرهنگ‌سازی در زمینه مسائل مهاجرت ماهیان و سازه‌های مربوط به این مهاجرت دارای اهمیت می‌باشد. متاسفانه در بین اکثر مردم اعم از متخصصان، کارشناسان و حتی بهره‌برداران سدها این مساله ناشناخته بوده و مورد توجه قرار نمی‌گیرد که می‌توان با یادآوری مشکلات ناشی از احداث سدها و موانع و ضرر و زیان‌هایی که به محیط‌زیست و ذخایر ارزی شیلاتی کشور از این طریق وارد می‌شود، فرهنگ و آگاهی مردم را بالا برد. این اطلاع‌رسانی می‌تواند از طریق نشریات مختلف، روزنامه‌ها، رادیو و تلویزیون‌های ملی و محلی صورت پذیرد. برگزاری کنفرانس‌ها، سمینارها و کارگاه‌های آموزشی نیز در بالا بردن سطح معلومات متخصصان و سایر مردم بسیار پراهمیت است.

۴- متاسفانه در رودخانه‌های ایران حجم صید و صیادی به قدری بالا است که با کمین صیادان در مصب رودخانه‌ها اجازه عبور ماهیان به رودخانه‌ها سلب می‌شود. جلوگیری از این عمل توسط سازمان شیلات و برخورد قاطع با متخلفان از ضروریات می‌باشد چرا که در صورت ادامه یافتن این عمل حتی سازه‌های راه‌ماهی احداثی بر روی رودخانه‌ها نیز در بازیابی ذخایر ماهیان تاثیری نخواهند داشت. همچنین ممنوعیت صید در پایین‌دست سدها و موانع دیگر که محل تجمع ماهیان مهاجر است، بسیار پراهمیت می‌باشد.

۵- توصیه می شود هماهنگی لازم از طرف محیط‌زیست و شیلات جهت حفاظت رودخانه‌ها و نظارت بر آن‌ها در خصوص مسائل مهاجرت ماهیان و حفظ ذخایر آن‌ها انجام گردد. این هماهنگی می‌تواند در راستای کنترل کلیه مواردی که در مهاجرت ماهیان تاثیر منفی دارد را برعهده بگیرد و با نظارت‌های کافی و مداوم از آن‌ها جلوگیری نماید. جلوگیری از صید ماهیان در زمان تخم‌ریزی آن‌ها و ملزم نمودن کارفرمایان احداث سازه‌های تقاطعی، به ساخت راه‌ماهی‌هایی که توسط متخصصان این امر برای رودخانه‌ی مورد نظر تایید شده‌اند، از دیگر اقداماتی است که باید به آن‌ها توجه شود.

۶- جلوگیری از برداشت شن و ماسه رودخانه‌ها نیز بایستی تحت نظارت وزارت نیرو باشد تا نظارت بر برقراری جریان دائمی مطلوب در رودخانه‌ها و راه‌ماهی‌ها، مخصوصا در زمان مهاجرت ماهیان فراهم گردد.

۷- پایش راه‌ماهی‌ها و نظارت و ارزیابی عملکرد آن‌ها از موارد بسیار پراهمیت در شناخت و تشخیص نقاط ضعف و قوت راه‌ماهی‌های ساخته شده می‌باشد. موفقیت و پیشرفت در زمینه راه‌ماهی‌ها در کشورهایی حاصل شده

ا ست که با دقت ن سبت به مونیتورینگ و برر سی و ارزیابی سازه‌های راه‌ماهی اقدام نموده‌اند. با شناخت نقاط ضـعف راه‌ماهی‌ها با اسـتفاده از ارزیابی آن‌ها می‌توان به اصـلاح آن‌ها پرداخت و همچنین در طرح‌های مشـابه بعدی از نتایج این م شاهدات ا ستفاده نمود. با توجه به موارد فوق، الزامی ا ست که در تمام سازه‌های راه‌ماهی ابزار مونیتورینگ نصب شود و در صورت لزوم، نسبت به شمارش ماهیان، اندازه‌گیری آن‌ها، تعیین نوع گونه‌ها و زمان مهاجرت و غیره اقدام شود. همچنین علامت‌گذاری ماهی و تله‌متری آن جهت مشاهده رفتار ماهی مهاجر در مهاجرت‌های تخم‌ریزی انجام شود.

۵-۲- راهنمای نگهداری سازه‌ی پل و آبگذر در مقابله با جریان در حین رخداد سیلاب

عدم انجام بازدیدهای دوره‌ای نگهداری و ترمیم سـازه‌های هیدرولیکی از جمله عوامل افزایش خسـارت‌های سـیلاب می‌باشـد [۸]. پل‌های در حال بهره‌برداری به طور پیوسـته در معرض تاثیر عوامل محیطی و بارهای زنده قرار دارند. در نتیجه شرایط پل‌ها همواره به سمت وخیم شدن پیش می‌رود و هنگامی که به یک مرز بحرانی بر سد منجر به م شکلات جدی خواهد شد. ساز و کار وخیم شدن متاثر از عوامل متعددی شامل خ صو صیات م صالح و عوامل محرک و تنش‌زای مکانیکی و محیطی ا ست [۱۵۳] و [۱۵۴]. بنابراین در عین حال که خطر شک ست پل‌ها را نمی‌توان به طورکامل از بین برد ولی یک برنامه نگهداری خوب شامل پایش و بازرسی‌های منظم و نیز احیا و حفاظت صحیح، روند وخیم شدن شرایط پل‌ها را کند می‌کند و کمک می‌کند تا مشـکلات سـازه‌ای محتمل قبل از آن‌که به فاجعه و حوادث تلخ تبدیل شـوند، مشخص و رفع گردند [۹۷] و [۱۲۰].

در ارتباط با نگهداری سازه‌ی پل می‌بایست نکات کلی زیر مد نظر قرارگیرد:

سرویس یا نگهداری معمول، اقدامات تکرار شونده‌ی روزانه، دوره‌ای یا برنامه‌ریزی شده‌ای ا ست که به منظور حفاظت یا احیای سـازه پل مورد نیاز اسـت تا به صـورت موثر و طبق پیش‌بینی‌های انجام شـده بتوان از آن بهره‌برداری کرد. به عبارت دیگر نگهداری شـامل اقداماتی اسـت که از وارد آمدن خسـارت به سـازه و یا از بدتر شـدن شـرایط پل جلوگیری می‌کند و بی‌توجهی و انجام ن شدن این اقدامات موجب بروز خ سارت‌های سازه‌ای و تحمیل هزینه‌های سنگین ترمیم و بازسازی می‌شود [۱۹۶].

سرویس به معنی تعمیرات به‌موقع موارد و م شکلات کوچک و بالقوه ا ست. انجام این اقدامات موجب می‌شود تا نیازی به جایگزینی‌های پرهزینه پل نباشد. اقدامات سرویسی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- نگهداری پیشگیرانه
- نگهداری واکنشی

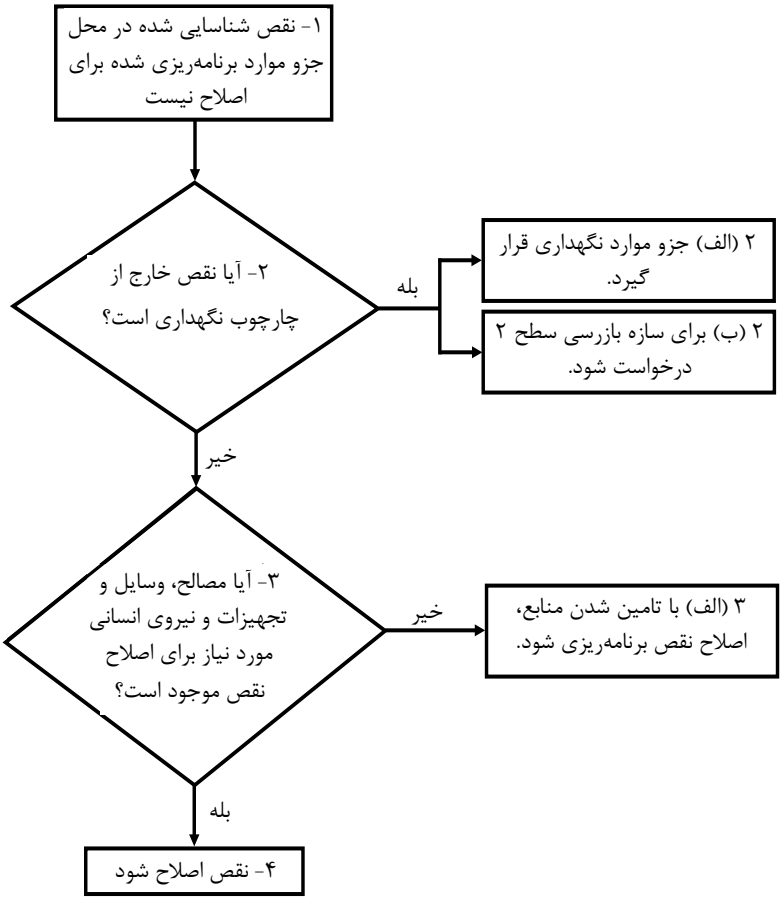
نگهداری پیشگیرانه شامل نگهداریی سیستماتیک سازه بر مبنای یک برنامه‌ریزی ا ست که دفعات انجام این اقدامات به عوامل زیر بستگی دارد:

- نوع اقدام و فعالیتی که باید انجام شود.

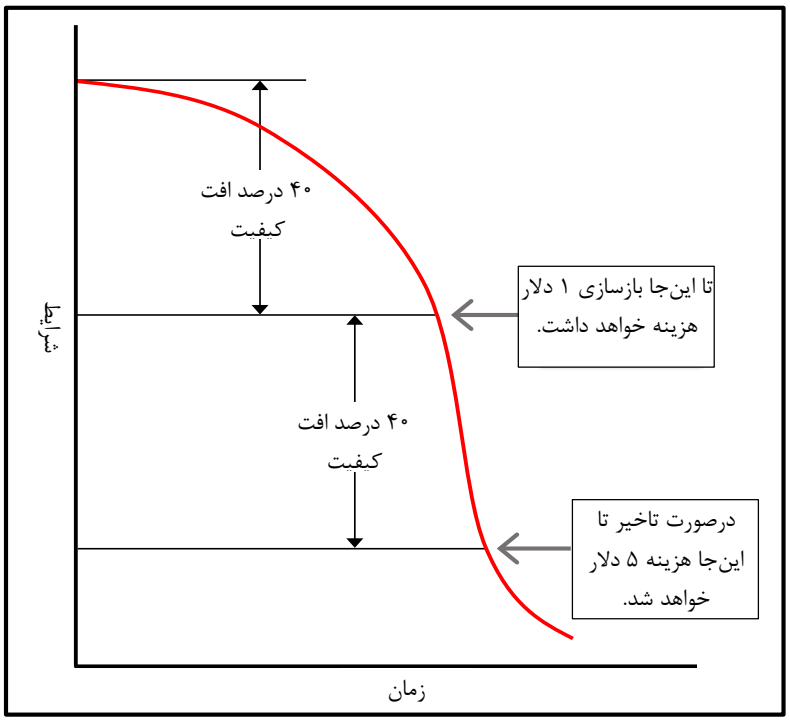
- ملاحظات محیط‌زیستی (مانند تیرهای فولادی در معرض آب شور)
- نوع مصالح
- نوع ساخت و ساز
- عمر سازه
- حجم ترافیک معمول وسایل نقلیه سنگین که از سازه استفاده می‌کنند.

نگهداری واکنشی زمانی انجام می‌شود که نیاز به نگهداری به منظور جلوگیری از بدتر شدن شرایط یا گسترش نقص‌ها ضروری تشخیص داده شود. ضرورت انجام این نوع نگهداری در حین بازرسی‌ها یا در هنگام انجام نگهداری پیشگیرانه معلوم می شود. چنانچه در محل سازه پل مواردی شناسایی شوند که در برنامه اصلاح و تعمیر دیده نشده باشند، لازم است تا فرایند نشان داده شده در شکل (۵-۲) دنبال شود تا اقدام مناسب تعیین گردد [۱۹۶].

دلیل اصلی برای نگهداری سازه، حفظ سرمایه‌ای است که برای ساخت آن صرف شده است و این‌که هزینه‌ی جایگزینی معمولا بیش‌تر از هزینه ساخت اولیه است. این نکته در شکل (۵-۳) نشان داده شده است. اطمینان از ایمنی کاربران و بهره‌برداران نیز از الزامات مهم نگهداری دوره‌ای است [۱۹۶].



شکل ۵-۲- نقص شناسایی شده در حین نگهداری سازه [۱۹۶]



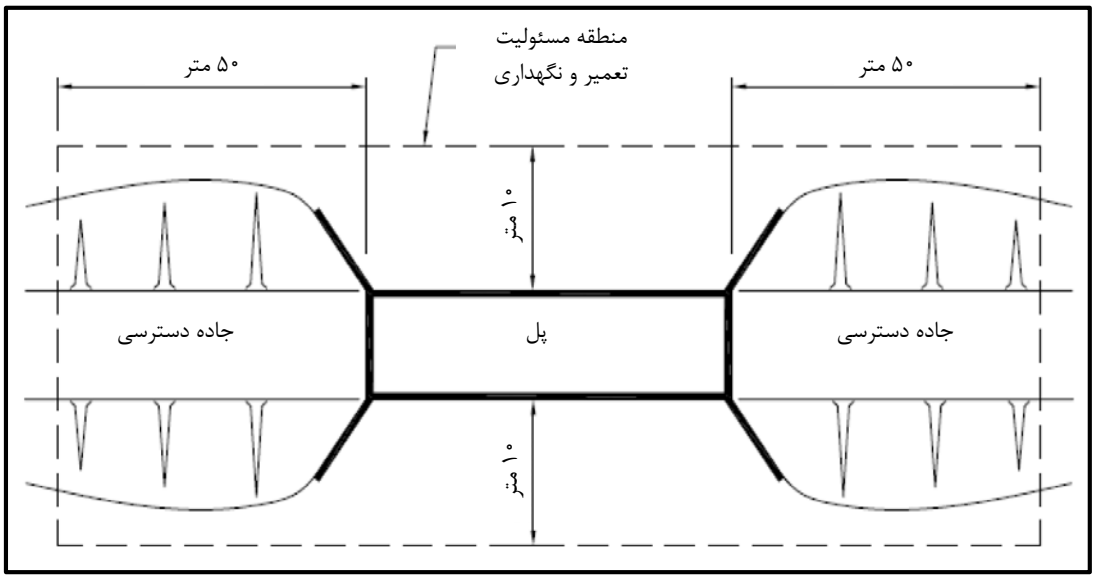
شکل ۵-۳- هزینه تاخیر در انجام نگهداری‌ها [۱۲۵]

۵-۲-۱- الزامات انجام نگهداری دوره‌ای

از آن‌جایی که پل‌ها اجزای مشترکی دارند، بهتر است تا الزامات انجام نگهداری بر اساس این گروه‌های مشترک تنظیم شوند. در زیر الزامات نگهداری استاندارد با توجه به اجزای مشترک تعیین شده‌اند:

- سطح عرشه
- زیرسازه پل
- روسازه پل
- نرده‌های محافظ
- آبگذر
- خاکریزهای دسترسی

اقدامات و فعالیت‌های مناسب و تناوب زمانی مربوطه برای هر یک از این گروه‌ها تعیین شده است. اگر مشخص شود که شرایط هر یک از اجزا نسبت به اقدامات نگهداری قبلی تغییر محسوسی نکرده (به‌عنوان مثال مجاری زهکشی کاملا بدون واریزه هستند)، تناوب زمانی مربوط به آن سرویس برای سازه‌ی مورد نظر افزایش داده می‌شود. البته قبل از هر تغییری در برنامه زمانی نگهداری، دو دور نگهداری معمول باید طبق برنامه‌ریزی اولیه انجام شود. از طرف دیگر چنانچه معلوم شود گام زمانی در نظرگرفته شده برای نگهداری اجزای سازه مورد نظر کافی نیست، تناوب زمانی اولیه باید نصف شود (یعنی به عنوان مثال ۱۲ ماه به ۶ ماه کاهش یابد). در ادامه چنانچه دفعات انجام نگهداری کافی نباشد، لازم است تا اقدامات علاج‌بخشی انجام شود. اقدامات نگهداری باید در محدوده‌ای که در شکل (۵-۴) مشخص شده است انجام گیرد [۱۹۶].



شکل ۵-۴- محدوده انجام اقدامات نگهداری - سرویس [۱۹۶ و ۱۲۵]

در صورت امکان بهتر است که نگهداری قبل و یا هم‌زمان با بازرسی‌های برنامه‌ریزی شده انجام شوند. مزایای این کار عبارتند از:

- اطمینان از این‌که بازرسی‌ها بدون موانع و وقفه‌های غیرضروری انجام می‌شوند
- مشخص شدن نقص‌هایی که خارج از چارچوب نگهداری‌های معمول هستند
- آشکار شدن نقص‌هایی که به‌واسطه‌ی واریزه‌ها پنهان مانده بودند.

وقوع سیلاب موجب فرسایش و تخریب کناره‌های رودخانه، افزایش آبشستگی در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها و تجمع مواد شناور در وجه بالادست سازه‌ی پل می‌شود. بنابراین نگهداری از سازه‌ی پل و آبگذر در هنگام وقوع سیل، به معنی حفاظت از کناره‌های رودخانه، استفاده از راهکارهای مقابله با آبشستگی (در انواع مختلف آن) و استفاده از راهکارهای جلوگیری از تجمع مواد شناور در محل سازه‌ی پل می‌باشد.

۵-۲-۲- روش‌های مقابله با آبشستگی پل‌ها

استفاده از روش‌های حفاظت پایه‌ها در مقابل آبشستگی، یکی از موضوعات مهم برای ایمنی پل است. بر مبنای ویژگی‌های فرایند آبشستگی، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. مطابق جدول (۵-۶)، این روش‌ها به دو دسته روش‌های فعال و روش‌های غیرفعال تقسیم می‌شوند. تعادل آبشستگی پل را می‌توان به صورت توازن بین بار آبشستگی اسمی و مقاومت در مقابل آبشستگی اسمی بیان کرد. روش‌های غیرفعال برای مقابله با آبشستگی به‌واسطه‌ی ایجاد یک مانع فیزیکی، موجب کاهش آبشستگی می‌شوند. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به سنگ‌ریزی، تورسنگ و بلوک‌ها اشاره کرد که باعث می‌شوند تا مقاومت اسمی مواد بستر به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. در مقابل روش‌های فعال با این

هدف طراحی می‌شوند که قدرت جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل‌اسبی را کم کنند تا بار اسمی میدان جریان موضعی کاهش یابد [۲۰۷]. معایب و مزایای انواع روش‌های مذکور در جدول (۵-۶) مشخص شده است:

جدول ۵-۶- مقایسه تعدادی از روش‌های مقابله با آبشستگی پل‌ها [۲۰۷]

نوع روش	تکنیک	مزیت‌ها	معایب	اقتصادی	راندمان	پایداری
روش‌های غیرفعال	سنگ‌ریزی	سهولت استفاده	دوست‌دار محیط‌زیست نیست. نیازمند تعمیرات دوره‌ای منظم	خوب	خوب	ضعیف
	سنگ‌ریزی به همراه دوغاب جزئی	پایداری بالا	نصب پیچیده	خوب	عالی	خوب
روش‌های فعال	شمع قربانی شونده	تعمیرات کمی نیاز دارد و پایداری بیش‌تر	راندمان پایین هنگامی که جهت جریان تغییر می‌کند.	عالی	خوب	عالی
	طوقه	دوست‌دار محیط‌زیست و پایداری بیش‌تر	شکل پایه پیچیده می‌شود. راندمان پایین هنگامی که تراز بستر رودخانه تغییر می‌کند.	خوب	خوب	خوب
	شکاف	مصالح دیگری نیاز ندارد	بر طراحی سازه تاثیر می‌گذارد	ضعیف	خوب	عالی

۵-۲-۲-۱- روش‌های مقابله غیرفعال

مبنا و ا ساس روش‌های غیرفعال، ا ضافه کردن یک لایه مانع روی سطح مواد ب ستر ا ست تا مقاومت آن در مقابل تنش برشی هیدرولیکی بهبود یابد و در نتیجه مقاومت موثر آن در مقابل آبشستگی افزایش یابد. روش سنگ‌ریزی که عمدتا روی سطح ب ستر رودخانه انجام می شود، به‌دلیل سهولت ا ستفاده و هزینه کم، در عمل به طور گ سترده‌ای ا ستفاده می شود. راندمان، پایداری و شکست این روش توسط محققان مختلفی بررسی شده است [۹۲] و [۱۵۹]. چیو (۱۹۹۵) گسیختگی سنگریزه در شرایط آب صاف را بررسی کرد و انواع مختلفی از فرایند گسیختگی را معرفی کرد که عبارتند از شکست برشی و تخریب ناشی از واپاشی [۹۲]. برای جلوگیری از حالات مختلف تخریب سنگریزی، مطالعات مختلفی در زمینه‌ی اندازه سنگ‌ها، تراز سنگریزی، پو شیدگی، ضخامت و درجه‌بندی لایه‌ی سنگریز انجام شده ا ست تا د ستورالعمل‌های اجرای سنگریزی مشخص شود [۱۶۱]، [۱۶۴] و [۱۶۸]. با وجودی که انواع و گزینه‌های مختلفی از سنگریزی مانند سنگریزه بدون ملات یا با دوغاب جزئی [۱۵۳]، بلوک‌های محافظ بتنی [۱۶۰] و تورسنگ [۱۷۸] وجود دارد ولی در هنگام وقوع سیل، به‌دلیل سرعت بالای جریان و تاثیر نیروهای شناوری، سنگدانه‌های پوشش سنگریزه‌ای ممکن است ناپایدار شوند و یا فرسایش یابند. همچنین اثرات آن بر سامانه‌ی زیست‌بوم محلی نیز باید بررسی شود [۲۰۸].

۵-۲-۲-۲- روش‌های مقابله فعال

آبشستگی مو ضعی معمولا به‌وا سطه‌ی سه عامل جریان رو به پایین در اطراف پل، گرداب نعل‌ا سبی در مرز م شترک جریان و بستر رسوبی و جریان دنباله‌دار در پایین‌دست سازه، رخ می‌دهد. روش‌های فعال به منظور مقابله با آبشستگی بر این ا ساس طراحی می شوند که با تغییر و ا صلاح الگوی جریان، قدرت تخریبی جریان حلزونی اطراف سازه را کاهش یا جهت آن را منحرف کنند که در نتیجه‌ی آن عمق آبشستگی کاهش یابد. مطالعات گسترده‌ای تاکنون در خصوص معرفی

روش‌های فعال ارائه شده است که بعضا تا ۴۰٪ موجب کاهش عمق آبشستگی می‌گردد ولی هنوز در مراحل تحقیق بوده و کم‌تر از این روش‌ها استفاده شده است. نمونه‌ای از این روش‌ها در پیوست شماره ۴ این گزارش ارائه شده‌اند.

از آن‌جایی که سنگ‌ریزی هم به منظور پیشگیری از آبشستگی و هم علاج‌بخشی و کنترل آبشستگی، گزینه‌ای متداول و کم‌هزینه محسوب می شود، در ادامه به طور خلاصه اصول طراحی آن ارائه شده است. برای اطلاعات تکمیلی می‌توان به «راهنمای مطالعات هیدرولیکی پل‌ها» (ضابطه شماره ۳۸۷ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۴) [۲۲] یا راهنمای FHWA 2009 (HEC-23, Vol. 2) مراجعه کرد [۱۰۴].

۵-۲-۲-۳- روش‌های مقابله با واریزه‌های شناور برای پل

روش‌های مقابله‌ای به منظور حفاظت و کاهش اثرات واریزه‌ها به نوع سازه بستگی دارد. درکل راهکارهای مقابله با واریزه‌های شناور نیز به دو دسته‌ی روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم می‌شوند. روش‌های سازه‌ای انواع مختلف دارند و از مصالح مختلفی نیز ساخته می شوند و روش‌های غیر سازه‌ای عمدتا رویکردهای بلند مدت را شامل می شوند [۱۲۰]. به طورکلی، احداث سازه‌های مقابله با جریان‌های واریزه‌ای در بالادست پل و آبگذر توصیه می‌شود ولی برای جلوگیری از انسداد پل و آبگذرها، برخی از روش‌های کاهش اثرات انسداد به‌ترتیب زیر معرفی شده است.

روش‌های مختلفی برای مقابله با جریان‌های واریزه‌ای در پل‌ها استفاده می‌شود که شامل روش‌های تله‌اندازی آن‌ها در بالادست پل، روش‌های انحراف و یا استفاده از روش‌های جمع‌آوری می‌باشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف- تیغه‌های واریزه

تیغه‌های واریزه، دیوارهای نازکی هستند که در بالادست پل و به موازات جریان ساخته می‌شوند. تیغه‌های واریزه به طور موفقیت‌آمیزی برای در یک ردیف قراردادن واریزه‌ها نسبت به باز شدگی آبگذر و جلوگیری از تجمع واریزه‌ها در پایه‌های پل به‌کار می‌روند. این روش در مواردی که واریزه عمدتا از مواد شناور تشکیل شده باشد، استفاده می‌شود. تیغه‌ها همچنین در کاهش انسداد ناشی از یخ، با جابجا کردن ورقه‌های یخ به سمت بالا روی وجه فوقانی شیب‌دار تیغه‌ها، عملکرد موفقی داشته‌اند. تیغه‌های واریزه معمولا بتنی هستند ولی از فولاد و شمع‌ها و مهارهایی که از الوار پرداخت شده هستند نیز ساخته می‌شوند. تیغه‌های واریزه معمولا روی خط مرکزی پایه‌های پل نصب می‌شوند و باید با دقت در امتداد جریان قرار داده شوند تا موجب افزایش عرض تصور شده پایه و در نتیجه افزایش عمق آبشستگی پایه نگردند. انتهای بالادست تیغه باید گرد شده و رو به بالا به‌طرف پل شیب‌دار با شد تا ضربه، تلاطم جریان و تجمع احتمالی واریزه کاهش یابد. تیغه واریزه از دو قسمت قائم و شیب‌دار تشکیل می‌شود. بخش قائم از وجه بالادست پایه شروع می‌شود تا ۱/۸ m در بالادست و کمینه ارتفاعی برابر با ۰/۷۶ m بالاتر از بیشینه تراز سطح آب مربوط به سیل طرح دارد. بخش شیب‌دار، ارتفاعی معادل با بیشینه عمق آب در انتهای بالادست بخش قائم دارد. بخش شیب‌دار تا فاصله‌ی معادل با دو برابر بیشینه عمق آب به‌طرف بالادست امتداد

می‌یابد. پروفیل طولی بخش شـــیب‌دار، از قطعه‌ای با شـــیب ۳:۱ و یک قطعه‌ی انحنادار با نقطه‌ی تقاطعی که در یک‌دوم بیشینه عمق آب بالا و پایین‌دست انتهای بالادست تیغه واقع شده است، تشکیل شده است. عرض تیغه واریزه از عرض پایه پل تا ۰/۳ m در طرف بالاد ست تیغه تغییر می‌کند. تیغه واریزه باید شالوده منا سبی دا شته با شد تا در مقابل آب ش ستگی پیش‌بینی شده مقاومت کند [۱۲۰].

ب- حوضچه‌های واریزه در داخل رودخانه یا احداث سد واریزه

حو ضچه‌های واریزه واقع در رودخانه، سازه‌هایی ه ستند که در امتداد عر ضی رودخانه‌هایی با شرایط منا سب ن صب می شوند تا حو ضچه‌هایی پدید آید که موجب نگهدا شت جریان می شود و فضای ذخیره‌ای برای نهشته‌های بار ر سوبات رودخانه و واریزه‌های شناور فراهم می‌کند. متا سفانه د ستورالعمل‌های طراحی برای این نوع از سازه‌ها در د ست نی ست. الگوی جریان در اطراف این سازه‌ها پیچیده ا ست و به‌آ سانی قابل پیش‌بینی نی ست بنابراین ا ستفاده از یک مدل فیزیکی برای طراحی و آنالیز سازه، به منظور اطمینان از عملکرد سازه در بده‌های مختلف، توصیه می‌شود.

حوضچه‌های واریزه واقع در داخل رودخانه، برای واریزه‌های شناور در بخش‌هایی از اروپا استفاده شده است. دو نمونه از این سازه‌ها، «Arzbach Treibholzfang» و «Lainbach Treibholzfang» هستند. هر دو سازه با استفاده از آزمایش‌های مدل فیزیکی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی مونیخ انجام شده بود، طراحی شده‌اند [۲۰۵]. ساختار کلی هر دو سازه مشابه است ولی در عین حال تفاوت‌هایی نیز دارند. سازه «Lainbach» از دو ردیف پایه ساخته شده بود که بعدا مشخص شد ضرورتی به این کار نبوده است در نتیجه سازه «Arzbach» فقط با یک ردیف از پایه‌ها ساخته شد. پایه‌های استفاده شده در هر دو سازه یکسان هستند. قطر آن‌ها ۰/۶۶ m و ارتفاع آن‌ها ۴ m بالای بستر آبراهه می‌باشد. پایه‌ها از یک پوسته فولادی با هسته‌ی بتنی تشکیل شده‌اند و در شالوده‌ای بتنی که توسط شمع‌هایی تقویت شده است، قرارگرفته‌اند. شمع‌ها تا عمق ۴/۴ m زیر بستر رودخانه کوبیده شده‌اند. هر دو سازه روکش سنگریزه در امتداد بستر و شیب‌های جانبی رودخانه در بالادست و پایین‌دست پایه دارند تا در مقابل آبشستگی حفاظت شوند. تفاوت دیگر بین دو سازه، چاله آبشستگی است که در پایین‌دست پایه‌ها شکل می‌گیرد و در طراحی سازه «Arzbach» لحاظ شده است. این سازه‌ها الزامات نگهداری زیادی دارند و در عین حال واریزه‌ها نیز باید به طور دوره‌ای و در صورت امکان سالانه، پاک‌سازی شوند [۱۲۰].

ج- منحرف‌کننده‌های واریزه

سازه‌هایی هستند که به منظور انحراف و هدایت واریزه‌های شناور، در بالادست پایه‌ها تعبیه می‌شوند. این سازه‌ها در نمای پلان معمولا V شکل دیده می‌شوند به طوری که راس آن‌ها به‌سمت بالادست قرار می‌گیرد. شکل (۵-۵) نیز عملکرد این سازه را نشان می‌دهد که به طور موثر از رسیدن واریزه‌های شناور به سازه‌ی پل جلوگیری می‌کند. نوع به‌خصوص منحرف‌کننده‌های واریزه، هیدروفویل است. هیدروفویل‌ها سازه‌های مستغرقی هستند که بلافاصله در بالادست

پایه‌های پل نصب می شوند و با تولید گردابه‌هایی با چرخش معکوس در ناحیه دنباله شان، واریزه‌های شناور را از اطراف پایه‌ها منحرف می‌کنند و از بازشدگی بین پایه‌ها عبور می‌دهند. استفاده از این تکنیک در تحقیقی با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی شده است [۱۹۳].

شکل ۵-۵- عملکرد موثر منحرف‌کننده‌های واریزه [۱۲۰]

منحرف‌کننده‌های واریزه در بالادست پایه‌های پل نصب می‌شوند تا موجب تغییر جهت واریزه‌ها و عبور آن‌ها از باز شدگی پل شود. منحرف‌کننده‌ها در مواردی که واریزه‌ها از قطعات شناور با اندازه متوسط تا بزرگ هستند، استفاده می شوند. منحرف‌کننده‌های واریزه متصل به پایه پل معمولا از ریل‌های فولادی ساخته می شوند، درحالی‌که شمع‌های فولادی پر شده با بتن برای منحرف‌کننده‌هایی که در فاصله‌ای در بالادست نصب می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو منحرف‌کننده واریزه ممکن است به پایه پل متصل شود و یا این‌که در فاصله‌ای در بالادست پایه قرارداده شود. اثربخشی منحرف‌کننده تا حد زیادی توسط جهت جریان رودخانه کنترل می شود. تغییرات جهت جریان می‌تواند باعث بی‌اثر شدن منحرف‌کننده شود و حتی در مواردی موجب بدتر شدن وضعیت نیز بشود. بنابراین اگر جهت جریان در رودخانه با استفاده از سازه‌های کمکی نظیر دیواره‌های هادی که موجب تثبیت و محدود شدن جریان در جهت معینی می‌شوند تثبیت گردد، عملکرد منحرف‌کننده‌ها به میزان زیادی بهبود می‌یابد. الگوی جریان در اطراف منحرف‌کننده پیچیده بوده و به آسانی قابل پیش‌بینی نیست. از آن‌جایی‌که دست‌یابی به شرایط اثربخشی این سازه مشکل است، برای مشخص شدن محل مناسب نصب و نحوه استقرار منحرف‌کننده، توصیه می شود از مدل فیزیکی استفاده شود تا از عملکرد صحیح منحرف‌کننده در بده‌های مختلف اطمینان حاصل شود [۱۲۰].

د- جاروب واریزه

جاروب واریزه وسیله‌ای است که به طور معمول از پلی‌اتیلن ساخته می‌شود و روی یک ستون یا کابل فولادی ضدزنگ که به طور قائم به وجه بالادست پایه پل متصل شده، نصب می‌شود. با بالا و پایین رفتن سطح آب، جاروب واریزه نیز می‌تواند در راستای قائم روی ستون یا کابل جابجا شود. جاروب واریزه همچنین می‌تواند توسط جریان به چرخش درآید و موجب می‌شود تا واریزه‌ها از پایه و دهانه پل دور شوند. گاهی می‌توان دو جاروب را روی یک ستون یا کابل نصب کرد که در این حالت یکی از جاروب‌ها کاملا مستغرق می شود و جاروب دیگر نزدیک به سطح آب می‌ماند. جاروب‌ها می‌توانند با پایه پل در یک ردیف قرار بگیرند و یا این‌که از پایه فاصله داشته باشند. برای نصب این وسیله در شرایطی که جهت جریان مورب باشد، ملاحظات ویژه‌ای نیاز است. برای نصب جاروب‌ها، چنانچه دسترسی به زیرسازه از طریق عرشه پل مشکل باشد، می‌توان از یک ستون کمکی و یا قایق برای نصب جاروب‌ها استفاده کرد. از جاروب‌های واریزه برای انواع مختلفی از واریزه‌های شناور می‌توان استفاده کرد. برای واریزه‌های سنگین‌تر و بزرگ‌تر، باید ستون‌های قوی‌تری نصب شوند.

توصیه می‌شود پس از هر سیل، بازرسی و اقدامات نگهداری برای جاروب‌ها انجام شود. تمام کابل‌ها و مهارهای سیستم نگهدارنده باید بررسی شوند تا کشش مناسبی داشته باشند و هرگونه واریزه در نزدیکی جاروب یا سیستم نگهدارنده باید سریعا پاک‌سازی شود تا عملکرد جاروب‌ها در رخدادهای بعدی مختل نشود.

یک نکته مهم، بررسی دقیق منطقه مورد نظر برای استفاده از جاروب می‌باشد. برای مثال چنانچه طول قطعات واریزه طرح[۱] بزرگ‌تر از بازشدگی موثر بین پایه‌ها باشد، استفاده از جاروب روش مناسبی نخواهد بود.

هـ- بازوهای واریزه جمع‌کن

بازوهای واریزه جمع‌کن،کنده یا الوارهایی هستند که در سطح آب شناور می شوند تا واریزه‌های شناور را جمع‌آوری کنند. این بازوها به مهار و اتصالاتی نیاز دارند تا آن‌ها را در موقعیت مناسب در سطح آب نگه دارد. البته استفاده از این روش بسیار محدود است.

و- سازه‌های اصلاح مسیر و ساماندهی رودخانه

سازه‌های ساماندهی رودخانه، سازه‌هایی هستند که در داخل جریان رودخانه نصب می‌شوند تا با تولید گردابه‌هایی با چرخش معکوس و در امتداد جریان که در ناحیه دنباله آن‌ها شکل می‌گیرد، الگوی جریان نزدیک بستر را اصلاح کنند و موجب بازتوزیع جریان و انتقال رسوب در مقطع عرضی رودخانه شوند. دستورالعمل‌های طراحی این نوع از سازه‌ها در استاندارد HEC-23 [۱۶۰] تحت‌عنوان دستورالعمل شماره ۹ ارائه شده است. دستورالعمل‌های ارائه شده در HEC-23 موضوعاتی از قبیل گستره طولی میدان آبشکن، طول آبشکن، جهت‌گیری آبشکن، تراوایی آبشکن، ارتفاع و نیمرخ تاج آبشکن، اتصال به بستر و کناره رودخانه، فاصله‌گذاری آبشکن‌ها، شکل و اندازه آبشکن‌ها و اندازه سنگ‌ها را شامل می‌شود [۱۲۰].

۱- Design log

ز- سازه‌های کاهنده قدرت سیل برای پل‌ها

سازه‌های کاهنده سیل، سازه‌هایی هستند که جریان می‌تواند از داخل یا از روی آن‌ها عبور کند. این سازه‌ها جریان اضافی و واریزه‌های شناور را منحرف و از سازه پل دور می‌کنند و با کاهش فشار جریان آب بر عرض افزایش یافته پایه (ناشی از تجمع واریزه) و نیز کاهش مقدار واریزه‌ای که به طرف پل منتقل می شود، می‌توانند ریسک خسارت شدید یا شکست سازه را کاهش دهند. این سازه‌ها در جلوگیری از شکست پل، با تجمع واریزه‌ها در حین سیل‌های شدید، بسیار موثر تشخیص داده شده‌اند [۱۷۴]. بنابراین استفاده از سازه‌های کاهنده قدرت سیل در پل‌هایی با احتمال بالای تجمع واریزه، باید مد نظر قرارگیرد. با توجه به این‌که محدودیت‌های فیزیکی مانع از استفاده از این روش می‌شود، بایستی فضای کافی نیز برای این منظور موجود باشد.

سازه‌های کاهنده قدرت سیل باید نزدیک به بخش‌های انتهایی پل قرارگیرند. این سازه‌ها می‌توانند در طراحی پل گنجانده شوند، یعنی با لحاظ کردن تجمع واریزه پیش‌بینی شده، سازه طوری طراحی می‌شود که به عنوان سازه اضطراری عمل کند و جریان‌های بزرگ‌تر از بده طرح را انتقال دهد. در شرایطی که تجمع واریزه در محل سازه به طور قابل‌ملاحظه‌ای بده عبوری از میان پل را کاهش می‌دهد و موجب افزایش قابل‌توجه سطح آب در بالادست می‌گردد، از این روش می‌توان برای پل‌های موجود نیز استفاده کرد [۱۲۰].

بده‌ای که یک سازه کاهنده قدرت سیل باید عبور دهد را می‌توان با استفاده از روند زیر برآورد کرد:

۱- پروفیل سطح آب از بین سازه پل را به ازای بده طرح حساب کنید، فرض کنید که تجمع واریزه در محل سازه رخ نداده باشد.

۲- موقعیت و مقدار تجمع واریزه را تخمین بزنید.

۳- مجددا پروفیل سطح آب از بین سازه پل را به ازای بده طرح و با در نظر گرفتن تجمع واریزه محاسبه کنید تا تاثیر انباشت واریزه بر تراز سطح آب بالادست مشخص گردد.

۴- یک منحنی سنجه به صورت بده در مقابل تراز سطح آب بالادست را برای سازه پل با تجمع واریزه محاسبه کنید.

۵- بیشینه تراز مجاز سطح آب را در بالادست سازه پل با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، اطلاعات مربوط به سیل‌های قبلی و اطلاعات حاصل از بازرسی‌های میدانی تعیین کنید. این تراز می‌تواند به عنوان تراز مربوط به شکست احتمالی پل، به‌دلیل افزایش بار هیدرولیکی وارد به سازه ناشی از تجمع واریزه، تعریف شود.

۶- جریان عبوری از سازه پل را برای بیشینه تراز مجاز سطح آب با استفاده از منحنی سنجه که در مرحله ۴ محاسبه شد، تعیین کنید.

۷- بده مربوط به سازه کاهنده قدرت سیل را با کم کردن بده محاسبه شده از مرحله قبل از بده طرح، به‌دست آورید.

سازه‌های کاهنده قدرت سیل به‌خصوص در قسمت‌هایی که سازه نباید صدمه ببیند یا هنگامی که اختلاف بین تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست زیاد است و احتمال وقوع سیلی مخرب در پایین‌دست سازه وجود دارد، باید با استفاده از روکش محافظت شوند. همچنین پوشش‌دارکردن شیب‌های پایین‌دست خاکریزهای جاده که برای جریان روگذر طراحی

شده‌اند یا در معرض روگذر شدن جریان هستند و افت پیش‌بینی شده تراز سطح آب در بالادست و پایین‌دست زیاد است، نیز بایستی مد نظر قرارگیرد.

ح- روش‌های غیرسازه‌ای

دو روش غیر سازه‌ای برای پل‌ها وجود دارد. اولین روش در واقع همان اقدامات تعمیر و نگهداری ا ضطراری و سالیانه می‌باشد. نگهداری اضطراری شامل جمع‌آوری واریزه‌ها از اطراف پایه و تکیه‌گاه‌های پل، سنگ‌ریزی در اطراف پایه و تکیه‌گاه‌ها و هر جایی که به‌دلیل تنگ شدگی نا شی از تجمع واریزه، آب‌ش ستگی و فر سایش ت شدید شده و لایروبی کف رودخانه می‌باشد. نگهداری سالیانه نیز شامل جمع‌آوری واریزه‌ها و تعمیرات مربوط به هر روش سازه‌ای می‌شود.

دومین روش غیر سازه‌ای، مدیریت حو ضه‌ی آبخیز بالاد ست ا ست. هدف این روش کاهش آورد واریزه از طریق کاهش منابع واریزه، جلوگیری از ورود واریزه به داخل آبراهه‌ها و پاک‌سازی و جمع‌آوری واریزه‌ها از داخل آبراهه‌ها و کانال‌ها می‌باشد. نوع روش مدیریتی انتخاب شده به نوع واریزه‌ها بستگی دارد. برای واریزه‌های ارگانیک شناور، اقدامات مدیریتی شامل جمع‌آوری درختان خشک شده و پوسیده و توده‌های واریزه، ایجاد مناطق حریم امن در قسمت‌هایی که فعالیت‌های چوب‌بری انجام می‌شود، استفاده از یک سیستم کابلی برای قطع درختان و تثبیت و مقاوم‌سازی دامنه‌ی تپه‌ها و کناره‌های آبراهه‌ها، می‌شود.

پیاده‌سازی یک برنامه مدیریت واریزه برای سازه‌های واقع در حوضه‌های کوچک می‌تواند موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها شود. هدف این طرح کاهش ورود واریزه ا ضافی به شبکه رودخانه از طریق پاک سازی آ شغال، توده‌های واریزه و درختان به زمین افتاده از آبراهه ا صلی و سیلابد شت رودخانه و از محدوده طرح‌های چندمنظوره تثبیت رودخانه ا ست. واریزه‌های چوبی بزرگ در یک رودخانه، از اجزای زمین‌ریخت‌شناختی و بوم‌شناختی سودمند و حیاتی یک سیستم رودخانه بوده و برنامه مدیریت واریزه باید این مزایا را شناسایی و مشخص کند. Thorne (1996) و Wallerstein با در نظر گرفتن رابطه بین شکل‌گیری توده‌های واریزه‌ای چوبی بزرگ و فرایندهای رودخانه‌ای، چنین برنامه‌ای را توسعه داده‌اند [۲۰۵]. این برنامه در جدول (۵-۷) خلاصه شده است.

بر اساس داده‌های یک بازه مشخص، برنامه مدیریت محیطی، اطلاعاتی را در خصوص محتمل‌ترین نوع تشکیل توده واریزه در این بازه، تاثیر نوع توده واریزه بر مورفولوژی رودخانه و ارائه یک استراتژی مدیریتی مناسب برای این بازه فراهم می‌آورد. اطلاعات مورد نظر برای این بازه شامل نوع پوشش گیاهی، ارتفاع متوسط درختان در حاشیه رودخانه، عرض متوسط رودخانه و نوع رسوبات موجود در بازه می‌باشد. نسبت ارتفاع درختان به عرض رودخانه به عنوان معیاری برای تعیین نوع توده واریزه‌ای که بیش‌ترین احتمال تشکیل در این بازه را دارد، استفاده می‌شود. محدوده‌های دقیقی که برای تعیین نوع توده واریزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، از طریق روابط تجربی به‌دست آمده از مطالعات میدانی توسعه یافته‌اند. همچنین نوع رسوبات که می‌تواند ریزدانه (ماسه) یا درشت‌دانه (شن) باشد، برای تشخیص این‌که آیا رسوبات تجمع یافته ناشی از برگشت جریان آب یا تشکیل پشته‌های رسوبی در پایین‌دست در محل توده‌های واریزه هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۷- برنامه مدیریتی برای شرایطی که توده‌های بزرگ واریزه‌های چوبی تشکیل می‌شود [۲۰۵]

نوع پوشش گیاهی	ارتفاع پوشش گیاهی / عرض آبراهه	رسوب	استراتژی مدیریتی
زمین کشاورزی یا فضای باز	موجود نیست	موجود نیست	احتمال شکل‌گیری توده‌های واریزه قابل‌توجه در بازه رودخانه کم است، چون نوار ساحلی مجاور رودخانه به صورت زمین کشاورزی و یا پیکره آبی باز بوده بنابراین پاک‌سازی واریزه نیز ضرورتی ندارد. وارد کردن مصنوعی واریزه شاید برای بهبود شرایط زیستگاه، تثبیت رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای به‌واسطه نگهداشت رسوبات در اثر پس‌زدگی آب و یا کاهش سرعت‌های کناره در سمت پیچ خارجی پیچانرودها مطلوب باشد.
جنگل	$1.3 \leq \frac{H}{W}$	موجود نیست	توده‌های جریان زیرسطحی در بازه رودخانه وجود دارد. از آن‌جایی که اثرات زمین‌ریخت شناسی معکوس مرتبط با واریزه کمینه است (ممکن است در سرعت‌های بالا آبشستگی موضعی در زیر واریزه رخ دهد) و احتمال انتقال مقدار قابل‌توجهی از واریزه‌های شناور سنگین به پایین‌دست اندک است، پاک سازی واریزه ضرورتی ندارد. بنابراین پل و سایر سازه‌های موجود در بازه نباید تحت‌تاثیر انباشت دائمی واریزه‌ها باشند.
جنگل	$0.95 \leq \frac{H}{W} < 1.3$	بار درشت‌دانه	توده‌های سدی در داخل بازه وجود دارد. توده‌های واریزه ممکن است موجب آبشستگی موضعی و فرسایش کناره زیادی در نتیجه تنگ‌شدگی جریان شوند. به‌دلیل این‌که بار رودخانه در شت‌دانه است، گوره‌ها و پشته‌های رسوبی ممکن است در بالادست توده‌های واریزه تشکیل شود. مقدار کمی از واریزه‌های شناور ممکن است به پایین‌دست بازه نیز منتقل شوند. چنانچه ورود واریزه‌های چوبی بزرگ به رودخانه روندی افزایشی داشته و این مساله موجب افزایش آبشستگی در بستر و کناره‌های رودخانه می شود، انجام پاک سازی ضروری است.
جنگل	$0.95 \leq \frac{H}{W} < 1.3$	بار ریزدانه	توده‌های سدی در داخل بازه وجود دارد. توده‌های واریزه ممکن است موجب آبشستگی موضعی و فرسایش کناره زیادی در نتیجه تنگ‌شدگی جریان شوند. به‌دلیل این‌که بار رودخانه ریزدانه است، تشکیل گوره‌ها و پشته‌های رسوبی ممکن در بالادست توده‌های واریزه نامحتمل است. توده‌های واریزه همچنین موجب افزایش مدت زمان سیل‌گرفتگی ساحلی می‌شوند. مقدار کمی از واریزه‌های شناور ممکن است به پایین‌دست بازه نیز منتقل شوند. چنانچه ورود واریزه‌های چوبی بزرگ به رودخانه روندی افزایشی داشته و این مساله موجب افزایش آبشستگی در بستر و کناره‌های رودخانه می شود، انجام پاک سازی ضروری است.
جنگل	$0.60 \leq \frac{H}{W} < 0.95$	بار درشت‌دانه	توده‌های منحرف‌کننده در بازه وجود دارد. توده‌ها ممکن است موجب فرسایش کناره زیادی در یک یا هر دو ساحل رودخانه شوند که این مساله می‌تواند موجب افزایش ورود واریزه‌های چوبی بزرگ به داخل رودخانه شود. از آن‌جایی که بار رودخانه درشت‌دانه است، آبشستگی موضعی بستر قابل صرف‌نظر کردن است و ممکن است گوره‌های رسوبی ناشی از پس‌زدگی آب در بالادست توده‌ها تشکیل شود. به جز در مواردی که فرسایش موضعی کناره باعث افزایش قابل‌توجه ورود واریزه‌های چوبی بزرگ به داخل رودخانه می‌شود، انجام پاک‌سازی ضرورتی ندارد.
جنگل	$0.60 \leq \frac{H}{W} < 0.95$	بار ریزدانه	توده‌های منحرف‌کننده در بازه وجود دارد. توده‌ها ممکن است موجب فرسایش کناره زیادی در یک یا هر دو ساحل رودخانه شوند، که این مساله می‌تواند موجب افزایش ورود واریزه‌های چوبی بزرگ به داخل رودخانه شود. از آن‌جایی که بار رودخانه ریزدانه است، آبشستگی موضعی بستر که توده‌های واریزه موجب آن می شوند، ممکن است قابل‌توجه باشد و گوره‌های رسوبی ناشی از پس‌زدگی آب در بالادست توده‌ها به احتمال زیاد تشکیل نمی‌شود. به منظور پیشگیری از فرسایش موضعی کناره، انجام پاک‌سازی ضرورتی است.
جنگل	$\frac{H}{W} < 0.60$	موجود نیست	توده‌های موازی با جریان در داخل بازه وجود دارد. در جریان‌های بزرگ، واریزه‌های بزرگ چوبی از این بازه به پایین‌دست انتقال می‌یابند و در کناره رودخانه و در پیچ‌ها و در سازه‌های واقع در رودخانه انباشت می شوند. اثرات معکوس زمین‌ریخت شناسی ناشی از توده‌های واریزه کم است. ممکن است کناره‌ها به‌دلیل شکل‌گیری واریزه‌ها تثبیت شوند و همچنین ممکن است واریزه‌ها تشکیل پشته‌های وسط رودخانه را تسریع کنند. درصورتی‌که

			توده‌ها در پنجه کناره رودخانه و در پشته‌ها جای گرفته باشند، پاک سازی واریزه ضرورتی نخواهد داشت.

در جدول فوق:

توده‌ی جریان زیرسطحی: نوعی از واریزه است که در نزدیکی تراز لب‌پر وجود دارد. این نوع از توده‌ها معمولا در حوضه‌های آبریز کوچک که ارتفاع درختان بیش‌تر از عرض رودخانه است، شکل می‌گیرند.

توده‌ی سدی: نوعی از واریزه است که به‌دلیل این‌که طول واریزه تقریبا برابر با عرض رودخانه است، در تمام عرض رودخانه گسترده می‌شود.

توده‌ی منحرف‌کننده: نوعی واریزه است که جهت جریان را به طرف یک و یا هر دو کناره تغییر می‌دهد. این نوع از توده‌ها معمولا هنگامی که عرض رودخانه کمی بیش‌تر از ارتفاع متوسط درختان است، به‌وجود می‌آیند.

۵-۲-۳- روش‌های مقابله با واریزه‌های شناور برای آبگذر

برای آبگذرها نیز روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای به شرح زیر استفاده می‌شوند:

برای آبگذرها، انواع مختلفی از روش‌های سازه‌ای وجود دارد. این سازه‌ها شکل‌های بسیار متنوعی دارند و از مصالح مختلفی نیز ساخته می‌شوند. سازه‌ها معمولا به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

الف- منحرف‌کننده‌های واریزه: سازه‌هایی هستند که در ورودی آبگذر نصب می‌شوند تا بخش عمده‌ی واریزه‌ها را از ورودی آبگذر دور کنند. آن‌ها در نمای پلان، معمولا V شکل هستند که راس آن به طرف بالادست قرار می‌گیرد.

ب- آشغال‌گیرها: سازه‌هایی هستند که در امتداد عرضی آبراهه اصلی رودخانه نصب می‌شوند تا واریزه‌ها را قبل از رسیدن به ورودی آبگذر جمع‌آوری کنند. آشغال‌گیرها معمولا به‌حالت قائم نصب می‌شوند و عمود بر جریان هستند اما ممکن است نسبت به جریان مورب یا نسبت به امتداد قائم، کج باشند.

ج- رایزر واریزه: سازه‌های بسته‌ای هستند که به طور مستقیم در بالای ورودی آبگذر نصب می‌شوند تا موجب ته‌نشست واریزه‌های شناور و بار رودخانه[1] قبل از رسیدن به ورودی آبگذر شوند. رایزرها معمولا از لوله‌های فلزی ساخته می‌شوند. در مواقعی که ورودی آبگذر به طور کامل با واریزه‌ها مسدود شده باشد، رایزرها می‌توانند در نقش مسیر کمکی عمل کنند.

د- چوب‌بست واریزه: سازه‌های داربستی هستند که به طور قائم بالای ورودی آبگذر قرار می‌گیرند تا از ورود رسوبات درشت‌دانه و واریزه‌های شناور کوچک جلوگیری کنند.

هـ- تیغه‌های واریزه: دیواره‌هایی هستند که در آبراهه اصلی رودخانه در بالادست آبگذر ساخته می‌شوند. هدف این سازه‌ها در واقع مرتب سازی و به خط کردن واریزه‌ها نسبت به آبگذر است تا این واریزه‌ها بدون تجمع و ایجاد انسداد در دهانه آبگذر، از آن عبورکنند. این سازه برای پل‌ها نیز قابل استفاده است.

ح- سد و حوضچه‌های واریزه: سازه‌هایی هستند که در رودخانه‌های با شرایط مناسب ساخته می‌شوند تا فضای ذخیره‌ای را به‌وجود آورند که موجب ته‌نشینی بار رودخانه و نیز واریزه‌های شناور شود.

۱- Detritus

ط- **سازه‌های ترکیبی:** ترکیبی از دو یا چند نوع سازه کنترل واریزه (که در بالا معرفی شدند) هستند که هم‌زمان برای یک آبگذر به کار برده می شوند تا بیش از یک نوع واریزه را کنترل کنند و در عین حال اطمینان بیش‌تری در مقابل انسداد دهانه آبگذر ایجاد نمایند.

تنها روش غیر سازه‌ای موجود برای آبگذرها، فراهم سازی نگهداری‌های اضطراری و سالانه است. اقدامات نگهداری برای آبگذرهای بزرگ که حوضه‌ی آبریز وسیعی دارند یک گزینه حیاتی می‌باشد. هرچند برای آبگذرهای دور از دسترس و آبگذرهایی با حوضه‌های آبریز کوچک ممکن است همیشه عملی نباشد. نگهداری اضطراری می‌تواند شامل پاک سازی و حذف واریزه‌ها از ورودی آبگذر و یا سازه کنترل واریزه نصب شده، باشد. نگهداری سالانه نیز پاک سازی واریزه‌های داخل آبگذر، ورودی آبگذر و بلافاصله در بالادست آبگذر و یا انجام تعمیرات مربوط به هر روش سازه‌ای موجود را در بر می‌گیرد.

۵-۲-۳-۱- انتخاب نوع روش کنترل واریزه

در بخش‌های قبل، انواع مختلفی از روش‌های مقابله با واریزه معرفی شد. ماتریسی برای روش‌های کنترل واریزه (جدول ۵-۸) ارائه شده است تا به عنوان راهنما در انتخاب روش کنترلی مناسب برای انواع مختلف واریزه استفاده شود. این ماتریس راهنمای ساده‌ای برای شناسایی و اولویت‌بندی دامنه وسیعی از روش‌های کنترلی ممکن برای حل مشکل واریزه در سازه‌های پل و آبگذر است. اطلاعات ارائه شده در جدول (۵-۸)، انتخاب اولیه گزینه‌های محتمل را قبل از پرداختن به جزئیات و ارزیابی‌های دقیق‌تر، آسان‌تر می‌کند.

در این ماتریس، روش‌ها به چند گروه تقسیم و مشخصات تکنیک‌های مربوط به هر گروه ارائه شده است. در هر ردیف از ماتریس، روش‌های مناسب برای شرایط مختلف با علامت ✓ نشان داده شده است.

علاوه بر اطلاعاتی که در ماتریس موجود است، در انتخاب روش کنترل باید هزینه‌های ساخت و نگهداری، ریسک شکست، ریسک خسارت به سازه و ملاحظات محیط‌زیستی و بصری نیز مدنظر قرارگیرد. همچنین در انتخاب روش کنترل، باید به ایمنی ترافیک جاده و بزرگراه نیز توجه شود. انتهای آبگذر و سازه کنترلی باید در فاصله‌ای دور از منطقه توقف و تعمیرات وسایط نقلیه عبوری باشد و یا این‌که سازه کنترلی باید طوری طراحی شود که امکان تعمیر برای رانندگان را افزایش دهد. در مکان‌هایی که انجام چنین اصلاحاتی ممکن نباشند باید وسایلی برای جلوگیری یا کاهش ضربه در کناره جاده در نظرگرفته شود [۱۲۰].

جدول ۵-۸- ماتریس روش‌های کنترل واریزه

روش‌های کنترل واریزه	مشخصات روش‌های کنترل واریزه									
	طبقه‌بندی واریزه							نگهداری	زیبایی‌شناختی	اثرات محیط‌زیستی
	واریزه‌های شناور			واریزه‌های جاری	مواد بستر			تخصیص تخمینی منابع	جنبه‌های	
	سبک	متوسط	بزرگ		بار ریزدانه	بار درشت‌دانه	تخته سنگ			
گروه ۱. روش‌های سازه‌ای										
گروه ۱. الف. آبگذرها										
منحرف‌کننده		✓	✓				✓	زیاد	قابل قبول	کم
آشغال‌گیر	✓	✓						زیاد	قابل قبول	کم
رایزر				✓	✓	✓		کم	قابل قبول	کم
چوب‌بست	✓					✓		متوسط	قابل قبول	کم
تیغه‌ها			✓					متوسط	قابل قبول	کم
سد و حوضچه				✓	✓	✓		زیاد	قابل قبول	زیاد
گروه ۱.ب. پل‌ها										
منحرف‌کننده		✓	✓				✓	متوسط- زیاد	نامناسب	کم
تیغه‌ها		✓	✓					متوسط	قابل قبول	کم
چوب‌بست		✓	✓						نامناسب	کم
سازه ساماندهی رودخانه – صفحات آیوا					✓			متوسط	قابل قبول	متوسط
سازه ساماندهی رودخانه – آبشکن تراوا				✓	✓	✓		متوسط	قابل قبول	متوسط
سازه ساماندهی رودخانه – آبشکن ناتراوا				✓	✓	✓		زیاد	قابل قبول	زیاد
حوضچه‌های واریزه در داخل رودخانه					✓	✓		زیاد	قابل قبول	زیاد
مقاطع تخفیف سیل		✓	✓					کم	قابل قبول	کم
جاروب واریزه		✓	✓					کم	قابل قبول	کم
بازوهای واریزه جمع‌کن	✓	✓						کم	نامناسب	متوسط
ارتفاع آزاد		✓	✓					کم	مطلوب	کم
نوع پایه، محل و فاصله‌گذاری		✓	✓					کم	مطلوب	کم
روسازه‌های موثر		✓	✓					کم	مطلوب	کم
گروه ۲. روش‌های غیرسازه‌ای										
نگهداری اضطراری و سالانه		✓	✓	✓				زیاد	نامناسب	متوسط
طرح مدیریت واریزه		✓	✓	✓				زیاد	مطلوب	کم

انتخاب و طراحی روش‌های کنترل واریزه که در جدول (۵-۸) معرفی شـــده‌اند به این‌که این روش‌ها برای یک ســـازه موجود (اجرا شده و درحال بهره‌برداری) استفاده خواهند شد یا یک سازه پیشنهادی، بستگی دارد. محدودیت‌های سازه موجود می‌تواند مانع از اســـتفاده از انواع به‌خصـــوصـــی از روش‌های کنترلی شـــود و یا این‌که بر طراحی آن‌ها تاثیر بگذارد. محدودیت‌ها ممکن است به شرایط فیزیکی محل، خود سازه، دلایل مالی، الزامات محیط‌زیستی و نگهداری، محدودیت یا عدم دسترسی به پل یا آبگذر و یا سایر موارد مربوط باشد. برای مثال، توسعه و ساخت و سازه‌ای جدید در مجاورت آبراهه

در بالادست سازه موجود ممکن است استفاده از روش سد یا حوضچه واریزه در داخل رودخانه را به‌دلیل اثرات احتمالی سیلاب‌ها و یا فشار و اعتراض ساکنین محلی غیرممکن کند. هندسه سازه موجود نیز می‌تواند بر ساختار و ترکیب و نیز ابعاد روش کنترلی انتخاب شده تاثیر بگذارد. برخی از روش‌های کنترلی نیازمند این هستند که بخشی از سازه موجود تخریب شود و یا اصلاحات اساسی در آن صورت گیرد و این مساله موجب می شود تا اجرای آن روش بسیار گران و پرهزینه شود. در بعضی موارد نیز محدودیت‌های محیط‌زیستی مربوط به راه ماهی یا حذف پوشش‌گیاهی، انتخاب و ساخت یک سازه کنترلی مورد نظر را محدود می‌کند.

همه روش‌های معرفی شده در جدول (۵-۸) را می‌توان برای سازه‌های پیشنهادی (و نه برای سازه‌های موجود) استفاده کرد. بیش‌تر روش‌های کنترلی معمول که برای پل‌ها به‌کار برده می شوند، برای پل‌های موجود غیرقابل استفاده هستند. اقدامات کاهش احتمال انباشت واریزه و انسداد عبارتند از ارتفاع آزاد کافی، استفاده از روسازه‌های ویژه و ملاحظات مربوط به نوع، محل و فاصله‌گذاری پایه‌ها. این تدابیر را می‌توان به آسانی در طراحی یک سازه پیشنهادی گنجاند ولی پیاده سازی آن‌ها برای یک سازه موجود مشکل است. تجمع واریزه مورد انتظار در پل پیشنهادی را می‌توان در موارد زیر لحاظ نمود: ۱- طراحی بازشدگی هیدرولیکی پل تا سیلاب طرح را به طور ایمن و بدون روگذر شدن از سازه عبور دهد، ۲- طراحی سازه‌ای اجزای پل به‌گونه‌ای که در مقابل افزایش نیروهای جانبی و واژگون کننده ناشی از تجمع واریزه‌ها مقاومت کند و ۳- طراحی شالوده‌ی پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل تا از زیرکنی سازه به‌واسطه آبشستگی‌های عمیق ناشی از تجمع واریزه‌ها جلوگیری شود.

سازه (پل یا آبگذر) پیشنهادی این مزیت را نسبت به سازه‌های موجود دارد که می‌توان راه دسترسی برای اقدامات تعمیر و نگهداری را نیز در طراحی آن لحاظ نمود. امکان دسترسی به سازه پیشنهادی را می‌توان در طراحی خاکریز جاده یا بزرگراه گنجاند درحالی‌که این کار برای خاکریز جاده موجود یک گزینه عملی محسوب نمی‌شود.

در سازه‌های موجود، مشکلات مربوط به واریزه به‌آسانی شناسایی و دیده می‌شوند. در چنین شرایطی، اطلاعات کافی در مورد نوع واریزه، مقدار واریزه‌ای که به محل منتقل شده و مشکلات مربوط به واریزه کاملا مشخص است و درنتیجه می‌توان روشی را انتخاب و طراحی کرد که موجب برطرف شدن مشکل گردد. در برخی موارد که سرمایه‌گذاری نسبتا محدود و احتمال اختلال در بهره‌برداری عادی از سازه نیز کم باشد، بهتر است انتخاب و طراحی روش کنترلی پس از این‌که مشکلات مربوط به واریزه به طور کامل آشکار و ابعاد مختلف آن درک شد، صورت پذیرد.

۵-۳- دستورالعمل پاک‌سازی دهانه پل‌ها و آبگذر قبل از فصل سیل

- پاک‌سازی دهانه پل‌ها و آبگذرها از رسوبات، نخاله‌ها و گیاهان به صورت دوره‌ای بعد از رخداد سیلاب و در شرایط اضطراری (قبل و بعد از هشدار رخداد سیلاب)، برنامه بهره‌برداری، راه دسترسی، تجهیزات لازم و روش پاک‌سازی باید پیش‌بینی شده باشد. در رودخانه‌های کوچک‌تر و یا در شرایط کم‌آبی از خودروهای باربر

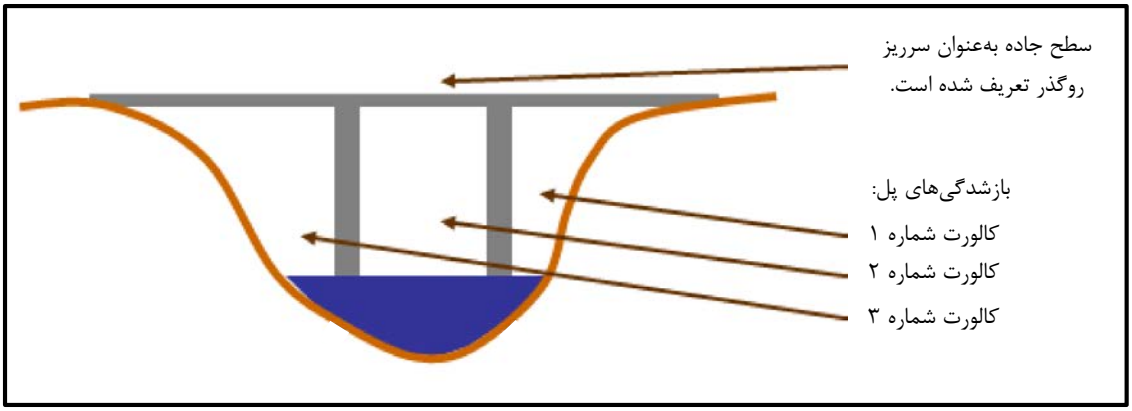
می‌توان اســتفاده کرد. در رودخانه‌های بزرگ‌تر با جریان دائمی از شــناور (مجهز به بیل و دراگلاین) اســتفاده می‌شود ولی باید لنگرگاه لازم برای مهار شناور در محل کار از پیش ساخته شده باشد [۱۲۰].

- پاک سازی م سیر رودخانه در بازه‌های بالاد ست و پایین‌د ست پل‌ها و آبگذرها. پاک سازی ب ستر رودخانه‌های شهری (که پل‌ها در آن حضور دارند)، به صورت دوره‌ای و قبل و بعد از رخداد سیلاب [۸].
- تخلیه م صالح حاصل از لایروبی و پاک سازی نباید در بستر فعال رودخانه و در پایین‌د ست سازه تقاطعی صورت گیرد که در این صورت تو سط جریان به پایین‌د ست انتقال یافته و سبب آ سیب به سازه‌های پایین‌د ست خواهد شــد. همچنین در محل‌های ورود آبراهه‌های فرعی و زهکش‌ها به رودخانه نباید تخلیه شــوند. تخلیه این مواد در محیط بیرونی رودخانه و سیلابد شت نباید به محیط‌زیست آ سیب ر ساند. از این‌رو قبل از تصمیم‌گیری در تخلیه مصالح و انتخاب محل تخلیه، دریافت مجوز قانونی و حقوقی تخلیه بایستی مورد نظر قرارگیرد [۱۲۰].
- مواد پاک سازی شده از نوع چوبی (شاخ و برگ و تنه درختان) ممکن ا ست که به چهار صورت ۱- سوزاندن، ۲- دفن کردن، ۳- ماده مصــرفی در گرماســازی و ۴- به صــورت خرده چوب فرآوری شــده و در باغبانی یا در صنعت ساختمانی مورد ا ستفاده قرارگیرند. گزینه چهارم، از نظر منافع اقت صادی و محیط‌زی ستی منا سب‌تر می‌باشد. [۱۲۰].

مطابق قوانین، نظارت بر ممنوعیت برداشت مصالح شن و ما سه و خاک رس معمولی در سامانه رودخانه و در حریم پل‌ها و آبگذرها (در فاصــله شــعاعی ۵۰۰ متری از بالادســت و ۱۰۰۰ متری در پایین‌دســت) باید انجام گیرد. به مراجع مربوطه مانند «تبصــره ۵ از ماده ۱ قانون اصــلاحی ایمنی راه‌ها و راه‌آهن، ۱۳۷۹» و «اصــلاح ضــوابط نظارت فنی بر بهره‌برداری از معادن شــن و ماســه و خاک رس، ۱۳۸۳» نقل از کتاب «پرتو قانون بر مهند سی رودخانه و سواحل، ۱۴۰۱، ص ۴۲ و ۱۶۴» مراجعه گردد. بر اساس د ستورالعمل وزارت نیرو (ضابطه شــماره ۳۳۶ ســازمان برنامه و بودجه کشــور)، حریم طولی پل برای برداشــت‌های مجاز مصــالح رودخانه‌ای از کمینه ۵۰۰ متر بالادســت تا ۱۰۰۰ متر در پایین‌دســت ســازه اســت. برای پل‌های مهم بر روی رودخانه‌های بزرگ، کمینه فاصله بالادست نیز به ۱۰۰۰ متر افزایش می‌یابد [۱۴].

- اگر سازه پل و آبگذر در رخداد سیلابی م ستغرق شده ولی آ سیب ندیده با شد، باید برر سی شود که آیا اثر مستغرق شدن عرشه در طراحی هیدرولیکی و سازه‌ای ملحوظ شده بود یا خیر (شناسنامه فنی پل‌ها، نشریه شماره ۳۶۷، سال ۱۳۸۶) [۲۹].
- تامین بودجه و تجهیزات و د سترسی لازم برای انجام عملیات نگهداری پل‌ها و آبگذرها و پاک‌سازی رودخانه‌ها در محدوده موثر در بالادست و پایین‌دست سازه تقاطعی
- برای تکمیل موارد بازرسی و ارزیابی هیدرومورفولوژیکی پل‌ها و آبگذرها در مرحله بهره‌برداری، به نشریه شماره ۳۶۷ سازمان برنامه و بودجه کشور مراجعه گردد [۲۹].

سازه‌های مرکب در یک تعریف ساده، به صورت ترکیب چند نوع سازه منفرد توصیف می شوند. سازه‌ی مرکبی مانند پل با چندین بازشدگی و جاده‌ای بر روی آن، به صورت ترکیبی از چند آبگذر و یک سرریز تعریف می‌شود. تنها الزام برای یک سازه‌ی مرکب این ا ست که تمام سازه‌های منفرد در سازه‌ی مرکب دقیقا در همان محل تعریف شوند. شکل زیر مثالی از یک سازه مرکب را نشان می‌دهد. یکی از مزایای تعریف سازه‌ی مرکب به صورتی که شکل زیر نشان می‌دهد این است که می‌توان تحلیل جریان عبوری از هر یک از سازه‌های منفرد تشکیل‌دهنده‌ی سازه‌ی مرکب را در اختیار داشت.



شکل ۵-۶- تصویر سازه مرکب پل که به صورت ترکیب تعدادی آبگذر و سرریز منفرد، دقیقا در همان موقعیت تعریف شده است

۵-۴- ملاحظات بازرسی، پایش و نگهداری آبگذرها

با توجه به توضیحات فوق، به‌دلیل ارتباط نزدیکی که دو سازه‌ی پل و آبگذر دارند، در ادامه جنبه‌های مختلف بازرسی و پایش و نگهداری آبگذرها ارائه شده است.

آبگذر عمدتا سازه‌ی مدفون در زیر خاکریزها و جاده‌ها بوده که یک بازشدگی و مجرای آبگذر را فراهم می‌کند. در این بخش ملاحظات مربوط به بازرسی و پایش آبگذرهایی که قطر کل آن‌ها و یا بازشدگی تمام دهانه‌های مجموع مجاری کم‌تر از ۳m است، ارائه شده است. پایش و نگهداری صحیح به منظور تحقق عمر طراحی آبگذر و نیز حفاظت از زیرساخت‌های حمل و نقل در مقابل خطرات ناشی از نوسانات جریان آب رودخانه و رواناب بارندگی و جلوگیری از آب‌گرفتگی زمین‌های بالادست، همچنین برای رعایت استانداردهای محیط‌زیستی، بسیار اهمیت دارد. انجام بازرسی‌های منظم مزایای متعددی به شرح زیر دارد:

- شناسایی نقص‌های جزئی قبل از آن‌که به مخاطرات ایمنی تبدیل شوند.
- کمینه‌سازی هزینه‌های تعمیرات با رفع منظم نقص‌ها و اشکالات جزئی
- بودجه‌بندی دقیق‌تر برای انجام تعمیرات و بازسازی‌ها
- جمع‌آوری اطلاعات مربوط به شرایط آبگذرها برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه و بلندمدت بهتر
- کمی‌سازی ارزش کل زیرساخت‌های حمل و نقل
- برطرف کردن خطرات ایمنی

- به منظور بیشینه سازی مزایا، لازم است تا یکپارچگی سازه‌ای، عملکرد هیدرولیکی و سازگاری کنار جاده‌ای آبگذرها به طور منظم و کافی ارزیابی شود.

۵-۵- برنامه‌ریزی بازرسی

۵-۵-۱- نوع ۱: برنامه بازرسی سالانه

زمانی برنامه‌ریزی شود که لیست اولیه آبگذرها موجود باشد. در این نوع بازرسی، ارزیابی شرایط انجام می‌شود و شاخص رتبه‌بندی آبگذر[۱] (CRI) به آن‌ها اختصاص می‌یابد. CRI معادل با شاخص نگهداری آبگذر[۲] (CMI) می‌باشد [۱۷۶]. با داشتن لیست اولیه، آبگذرها براساس آخرین CRI تخصیص داده شده، به صورت زیر برای انجام بازرسی برنامه‌ریزی می‌شوند:

- اگر $CRI \geq 85$ بازرسی هر ۱۰ سال
- اگر $75 < CRI < 84$ بازرسی هر ۵ سال
- اگر $35 < CRI < 75$ بازرسی هر سال
- اگر $CRI < 34$ اقدام فوری انجام شود

برای این‌منظور از شاخص درجه وضعیت هیدرولیکی (BCI) موجود در سامانه BMS وزارت راه و شهرسازی نیز باید استفاده گردد.

آبگذرهایی با شرایط زیر باید بازرسی شوند:

- از زیر خط مرکزی یک بزرگراه یا یک رمپ (شیب‌راهه) عبور می‌کنند.
- به زهکش‌های شهری سرویس می‌دهند.
- در زمین‌های مستعد سیل قرار دارند.

چنانچه در حین بازرسی‌های سالانه، بازرس با آبگذرهایی مواجه شود که در لیست نیستند، باید آن‌ها را در لیست وارد نماید و برای آن‌ها ارزیابی وضعیت انجام دهد. بازرسی‌های سالانه ممکن است از طریق قراردادهای نگهداری منطقه[۳] (AMC) یا بیرون‌سپاری مدیریت شده[۴] (MO) که در قرارداد قید شده است انجام پذیرد. برای آبگذرهایی با CRI کم‌تر از ۷۵ چنانچه بازرسی بصری ممکن نباشد، استفاده از تکنولوژی‌های بازرسی پیشرفته را براساس آنالیز سود - هزینه می‌توان در نظرگرفت.

۱- Culvert Raring Index (CRI)

۲- Culvert Maintenance Index (CMI)

۳- Area Maintenance Contracts (AMC)

۴- Managed Outsourcing (MO)

۵-۵-۲- نوع ۲: بازرسی برای ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری برنامه‌ریزی شده

در پروژه‌ای مانند یک سرمایه‌گذاری پنج‌ساله، تمام آبگذرهای در محدوده قرارداد یا موارد موردنظر باید در فاز ارزیابی پروژه، بازرسی شوند. براساس داده‌های بازرسی سالانه قبلی آبگذرها را می‌توان به صورت انتخابی شناسایی کرد. هنگام استفاده از داده‌های بازرسی سالانه قبلی باید یک مجموعه نمونه، بازبینی و کنترل شود.

۵-۵-۳- بازرسی پس از ساخت

به‌عنوان بخشی از بازرسی‌های پس از ساخت، اطلاعات پل‌ها و آبگذرهای جدید در « سامانه مدیریت پل‌ها: BMS» ثبت گردد. از این داده‌ها برای به‌روزرسانی نقشه‌ها و سیستم مدیریت لیست زیرساخت‌ها استفاده می‌شود [۱۷۶].

۵-۵-۴- آماده‌سازی بازرسی‌ها

برنامه‌ریزی و طراحی بازرسی آبگذرها باید با این هدف صورت گیرد که با توجه به بودجه و زمان موجود، هم اثربخشی و هم راندمان ماکزیمم شوند. برخی نکات آماده‌سازی به شرح زیر است:

- پیش از رفتن به بازرسی میدانی، داده‌ها و اطلاعات موجود بازبینی شوند:
  - نقشه‌های حوضه آبخیز
  - نقشه‌های مهندسی بزرگراه، قراردادهای پیشین و غیره
  - گزارش‌های فعلی و پیشین
- آبگذرهای مجاور یکدیگر به صورت گروهی بازرسی شوند تا زمان سفر کاهش یابد.
- در صورت امکان، بازرسی‌ها برای زمانی برنامه‌ریزی شوند که جریان آب کم‌ترین مقدار در طول سال را دارد تا بهترین دسترسی به بخش‌های داخلی آبگذرها، خاکریزها و شالوده آن‌ها فراهم گردد.
- به منظور ارزیابی ظرفیت هیدرولیکی، بازرسی‌هایی در حین و پس از بارندگی‌های سنگین انجام شود.
- چنانچه آبگذرها طبق برنامه مشخصی پاک‌سازی می‌شوند، پس از عملیات پاک‌سازی نیز بازرسی‌هایی برنامه‌ریزی شوند تا کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده از طریق بازرسی‌های چشمی افزایش یابد.
- در صورت امکان، بازرسی‌های متوالی به صورت گردشی توسط کارشناسان مختلف انجام شود. به این ترتیب، رتبه‌بندی‌های قبلی به طور مستقل تایید می‌شوند.
- هرگونه نیاز به تجهیزات ویژه شناسایی شود. برای راندمان بیشینه، ارزیابی آبگذرهایی با نیازهای مشابه به صورت گروهی انجام شود.
- شناسایی و اعلام هرگونه الزام برای هماهنگی با سایر نهادها مانند مجوزهای محیط‌زیستی و رسیدگی‌های اضطراری، شرکت‌های خدمات شهری یا اطلاع‌رسانی به مالکان زمین و مشاغل

- شناسایی ملک‌های خصوصی و نقاط دسترسی در امتداد ورودی آبگذرها و ارائه درخواست‌های مربوطه برای ورود به آن‌ها
- مرور گزارش‌ها و یادداشت‌های بازرسی‌های قبلی تا ضمن آشنایی با سازه آبگذر مورد نظر و شرایط محل و بزرگراه، تغییرات رخ داده در شرایط آن نیز شناسایی شود.
- شناسایی و اعلام اثرات بالقوه زیستگاه‌های آبی و ریخت‌شناسی رودخانه

۵-۶- ایمنی عملیات بازرسی

اولویت دادن به ایمنی شخصی هنگام انجام بازرسی آبگذرها اهمیت دارد. لازم است تا با داشتن آگاهی کافی و در نظر گرفتن اقدامات احتیاطی، از پیامدهای ناشی از انواع مخاطراتی که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود کاسته شود:

آبگذرها ورودی و خروجی محدودی دارند و از طرفی ممکن است حاوی گازهای خطرناک با اشتعال‌پذیری بالا نظیر سولفید هیدروژن یا متان باشند، بنابراین آبگذرها می‌توانند سلامتی و ایمنی فرد بازرس را در معرض خطر جدی قرار دهند.

- برای راهنمایی در خصوص ورود به آبگذرهایی که شرایط زیر را دارند، ملاحظات ایمنی و بهداشت و محیط زیستی رعایت گردد.
  - اگر آبگذر بخشی از یک سیستم فاضلاب مرکب باشد.
  - اگر احتمال می‌رود که مواد آلوده یا خطرناک داخل آبگذر باشد.
  - اگر آبگذر خیلی محدود یا خیلی طویل است به‌گونه‌ای که بازرس نمی‌تواند از یک انتهای آبگذر، انتهای دیگر آن را ببیند و یا ارتباط صوتی با افراد بیرون از آبگذر داشته باشد.
  - کار مداوم در داخل آبگذر فضای سمی بالقوه‌ای را ایجاد می‌کند (استفاده از ژنراتور یا تجهیزاتی که سوخت مصرف می‌کنند، جوشکاری، پوشش‌دار کردن، رنگ‌آمیزی و غیره)
- در صورت وجود شرایط زیر، بازرسی داخل آبگذر شخصا انجام نگیرد و به جای آن، بازرسی‌ها بدون ورود به داخل آبگذر و از راه دور صورت پذیرد:
  - آبگذر قطری برابر با ۹۰۰ mm یا کم‌تر دارد.
  - آبگذر با واریزه‌ها مسدود شده است به طوری‌که آب را در خود نگه می‌دارد.
  - سرعت جریان آب زیاد است.

۵-۶-۱- خطرات ترافیک

بازرسی آبگذر یا پارک وسایط بازرسی در نزدیکی یا روی جاده، خطر بالقوه‌ای را برای رانندگان عبوری و عابرین پیاده و بالعکس، ایجاد می‌کند. به عنوان اقدامات پیشگیرانه، در صورت امکان بهتر است از چنین جاده‌هایی دوری شود و یا در صورت لزوم از نیروهای کنترل ترافیک برای انجام بازرسی کمک گرفته شود.

۵-۶-۲- خطرات غرق شدن

چاله‌های آبشستگی و فرسایش بستر رودخانه هنگام اوج جریان‌ها، باعث ایجاد حفره‌های آب عمیق و خطر غرق شدن می‌شوند. عمق آب در این حفره‌ها ممکن است فریبنده باشد و بازرسان باید قبل از ورود به آب، با یک عصا یا میله بستر رودخانه را بررسی کنند تا عمق واقعی آب مشخص شود. جریان‌های شدید حاصل از رواناب‌های مناطق بالادست، ممکن است موجب شود تا تراز سطح آب در داخل آبگذر حتی قبل از این‌که بارشی در محل رخ دهد، به سرعت به ارتفاع خطرناکی بر سد. بنابراین بهتر ا ست برای زمان بازر سی، پیش‌بینی‌های هوا شنا سی برای منطقه‌ای که آبگذر در آن واقع شده و مناطق اطراف آن، کنترل شود.

۵-۶-۳- خطرات خاکریز

خاکریزهای مرتفع و با شیب تند و همچنین خاکریزهای پیش‌آویز ممکن است خطرناک باشند و پیدا کردن جای پای پایدار و ایمن در آن‌ها مشکل باشد. علاوه بر آن پوشش گیاهی روی خاکریز ممکن است خطر لغزیدن و افتادن را در پی داشته باشد.

اقدامات پیشگیرانه:

- هنگام بالا رفتن یا پایین آمدن از خاکریزها احتیاط لازم انجام شود.
- برای ثبات بیش‌تر از روش اول پاشنه استفاده شود.
- چنانچه خاکریز خیلی بلند ا ست یا شیب تندی دارد، تجهیزات باید با طناب به پایین به محل بازر سی آبگذر فرستاده شود.

۵-۶-۴- خطرات حیوانات و حشرات

حیواناتی مانند مار، عنکبوت، زنبورها و حشرات گزنده ممکن است خطراتی را برای سلامتی بازرس در پی داشته باشند.

اقدامات پیشگیرانه:

- از مواد دفع حشرات استفاده کنید.
- بازرسی‌ها را با پوشیدگی کامل انجام دهید.
- هنگام حرکت در بین بوته‌ها و پوشش‌های گیاهی و بیرون آوردن واریزه‌ها از داخل آبگذر احتیاط لازم انجام شود.

۵-۶-۵- خطر گیاهان سمی

گیاهانی مانند پیچک سمی، بلوط سمی، علف‌های سمی، سماق سمی و غیره ممکن است موجب واکنش‌های آلرژیک به صورت تحریکات پو ستی یا آنافیلاک سی شوند. شیره این گیاهان نیز ممکن ا ست روی کفش‌ها، لباس‌ها یا تجهیزات

باقی بمانند و برای کسی که بعدا از آن‌ها استفاده می‌کنند موجب حساسیت شوند. به منظور پیشگیری بهتر است با گونه‌های گیاهان سمی منطقه آشنا باشید تا آن‌ها را تشخیص دهید و از آن‌ها دوری کنید.

۵-۷- ایمنی تجهیزات

تجهیزاتی که از آن‌ها به طور نامناسب استفاده شده و یا معیوب باشند می‌توانند عواقب و خطراتی را در پی داشته باشند. اقدامات پیشگیرانه:

- تمام تجهیزات طبق دستورالعمل‌های شرکت سازنده وارسی شود تا اطمینان حاصل شود که همه آن‌ها در شرایط کاری خوبی هستند.
- هر دکل یا داربست مورد استفاده به‌درستی نصب شده باشد و کابل‌ها و تخته‌ها به‌خوبی محکم شده باشند.
- هنگام کار در قسمت‌های بالاتر بررسی شود که تسمه‌های ضربه‌گیر و مهارهای ایمنی به درستی نصب شده باشند.

۵-۸- ابزار و تجهیزات

- وسایط نقلیه بازرسی: برای دسترسی به محل بازرسی و نیز حمل سایر ابزار و تجهیزات
- GPS: برای شناسایی محل آبگذرها و نیز به‌روزرسانی و تایید لیست آبگذرهای موجود
- نردبان: برای دسترسی به بخش‌های بالاتر آبگذر
- چکمه‌های لاستیکی: برای رفتن به داخل آبراهه‌های کم‌عمق
- دستگاه‌های حسگر: برای چک کردن جای پای ایمن در زیر سطح آب
- قلاب درب منهول: برای دسترسی به قسمت‌های پشت منهول‌ها
- طناب و قلاب اتصال: برای ایمن‌سازی اقلام و پایین آوردن ابزار در زمین‌هایی که تغییرات شیب و ارتفاع دارند.
- جاروی کوچک: برای زدودن کثیفی و آشغال‌ها
- برس سیمی: برای زدودن رنگ‌های سست و خوردگی‌های سطحی از عضوهای فولادی
- لیسه (اسکریپر): برای حذف خوردگی از روی سطوح
- پیچ‌گشتی سر صاف: برای تمیز کردن مواد زاید و خوردگی از روی سطوح
- بیل: برای حذف کثیفی و آشغال از قسمت‌های کف
- کارد بزرگ: برای بریدن و حذف گیاهان بیش از حد رشد کرده در ورودی‌ها و خروجی‌ها

۵-۸-۱- ابزار بازرسی

- چکش اسکراب: برای کندن کثیفی و زنگار، امتحان کردن بتن و بررسی بست‌های بریده شده یا شل
- چکش یخ شکن: برای بررسی رویه سطوح چوبی، میزان خوردگی فولاد و عمق تخریب شده بتن

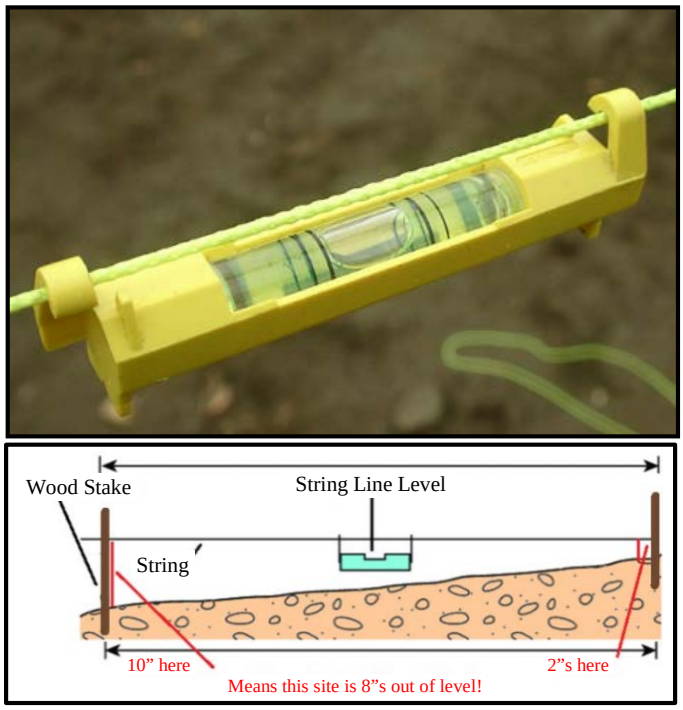
- شاقول: برای اندازه‌گیری تراز بودن قائم و جانبی آبگذر

۵-۸-۲- ابزار اندازه‌گیری

- متر نواری: برای اندازه‌گیری ابعاد اجزا
- متر ۳۰ متری: برای اندازه‌گیری طول‌های بزرگ‌تر، مانند طول آبگذر و بخش‌های دور از دسترس
- چرخ اندازه‌گیری: برای اندازه‌گیری و علامت‌گذاری ایستگاه‌ها و طول‌های بزرگ‌تر
- کولیس/ میکرومتر: برای اندازه‌گیری ضخامت یک جزء که در پشت یک لبه در معرض دید قرار گرفته است.
- ترک سنج: برای به‌دست آوردن اندازه‌های دقیق از عرض ترک‌ها
- عمق‌سنج حفره: برای اندازه‌گیری عمق حفرات خوردگی در سازه‌های فولادی
- لایه رنگ‌سنج: برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش، به‌ویژه در پوشش مشکوک یا کنده شده
- تراز نجاری با شیب‌سنج دیجیتال: برای اندازه‌گیری شیب آبگذر و مقدار کجی و انحراف سازه
- فا صله سنج الکترونیکی: برای اندازه‌گیری طول دهانه‌ها و ارتفاع پاک سازی. این و سیله برای انجام اندازه‌گیری در سازه‌های خارج از دسترس، استفاده می‌شوند. به پیوست ۵ مراجعه گردد.
- تراز حباب‌دار خطی (شکل ۵-۷): برای ارزیابی انحراف و ارزیابی تراز
- خط‌کش لبه مستقیم: خط‌کش سه متری برای تعیین فرورفتگی، خمیدگی و برآمدگی در روکش‌ها

۵-۸-۳- ابزار کمک بصری

- دوربین دوچشمی: برای کنترل اجزایی که در فواصل دورتری هستند و دیدن منطقه قبل از انجام بازرسی
- ذره‌بین نوری: برای بررسی دقیق‌تر ترک‌ها و نواحی مستعد ترک خوردن
- آینه بازرسی: برای بازرسی قسمت‌های غیرقابل دسترسی
- آینه سیگنال: برای انعکاس نور خور شید به داخل آبگذر به منظور ارزیابی‌های چ شمی در بازر سی‌های بدون ورود، این روش اغلب نور بهتری نسبت به چراغ‌قوه ارائه می‌دهد.
- چراغ‌قوه پرقدرت: برای تامین روشنایی در هنگام بازرسی‌ها
- چراغ پیشانی‌بند پرقدرت: برای ا ستفاده در حین انجام فعالیت‌های بازر سی که نیاز به ا ستفاده از هر دو د ست می‌باشد.



شکل ۵-۷- تراز حباب‌دار خطی برای کنترل تراز

۵-۸-۴- ابزار تهیه گزارش و مستندات

- تلفن‌همراه و لپ‌تاپ بادوام: برای مستندات بصری از شرایط آبگذر
- دوربین دیجیتال: برای تهیه و جمع‌آوری مستندات بصری از شرایط آبگذر
- دفترچه یادداشت صحرایی با کاغذ ضد آب: برای ثبت کروکی‌های فنی
- خط‌کش لبه مستقیم: برای رسم خطوط مستقیم در کروکی‌های فنی
- سنبه نشان: برای تعیین علائم مرجع در اجزای فولادی و بتنی برای مستندات مربوط به جابجایی
- فرم‌های بازرسی، مجوزها، تخته زیردستی و مداد، لپ‌تاپ یا تبلت برای ثبت و نگهداری نتایج بازرسی

۵-۹- فرایند بازرسی و راهنمای رتبه‌بندی

فرایند بازرسی و رتبه‌بندی سازه تقاطعی شامل سه مرحله زیر است [۱۷۶]:

الف- مشاهدات میدانی صورت پذیرد و دست‌کم پنج عکس گرفته شود. یک عکس از ورودی و یک عکس از خروجی آبگذر، طوری‌که شرایط باز شدگی آبگذر و وضعیت بالادست و پایین‌دست رودخانه را نشان دهند. از خاکریز و سطح جاده بالای آبگذر هم عکس گرفته شود. درصورتی‌که مواردی در داخل مجرای آبگذر، ملحقات آبگذر، مقاطع اتصالات و سایر بخش‌های ویژه شناسایی شوند، باید عکس‌های بیش‌تری گرفته شود.

ب- ارزیابی شرایط آبگذر با رتبه‌بندی هر یک از اجزای آبگذر، طبق راهنمای رتبه‌بندی توصیفی در بخش‌های زیر انجام یافته و سپس به منظور ارزیابی شرایط کل آبگذر، یک نمره داده می‌شود.

ج- تایید، به‌روزرسانی و یا تهیه لیست جدید برای پایگاه داده‌ی آبگذرها که وارد کردن رتبه‌بندی شرایط آبگذر را نیز شامل می‌شود.

۵-۹-۱- رتبه‌بندی آبگذرها

به منظور اطمینان از کارکرد صحیح تمام جنبه‌های با اهمیت آبگذر، راهنمای رتبه‌بندی به چندین بخش مجزا تقسیم شده است. در ادامه بخش‌هایی که باید بازرسی شوند، تشریح شده و جزئیات و دستورالعمل دقیق نحوه رتبه‌بندی عددی اجزای آبگذر ارائه شده است.

- مصالح

شرایط مجرای آبگذر برای این‌که آبگذر بتواند وظیفه‌اش را به‌درستی انجام دهد مهم است. فرسودگی و ترک‌های زیاد در مجرای آبگذر موجب نشت آب شده و در توانایی آبگذر برای انتقال آب، ایجاد اشکال می‌کند. وجود نقص در مصالح، مقاومت آبگذر برای تحمل نیروهای وارده را کاهش داده و احتمال شکست یا از بین رفتن یکپارچگی سازه‌ای آبگذر را افزایش می‌دهد.

- درزها

درزها برای عملکرد آبگذر اجزای مهمی محسوب می‌شوند. کیفیت و عملکرد درز بر پایداری سازه و نیز پایداری خاک‌ریزی که جاده بالای آبگذر را نگه می‌دارد، تاثیرگذار است. شرایط ضعیف درز موجب شکل‌گیری فروچاله‌ها و نشست‌های موضعی می‌شود.

- شکل

بازرسی شکل در آبگذرهای انعطاف‌پذیر، مانند آبگذرهایی که از فلز یا پلاستیک موجدار ساخته شده‌اند، مهم است. آبگذرهایی که فرورفتگی و تغییرشکل‌هایی در آن‌ها ایجاد شده باشد، دچار کاهش ظرفیت هیدرولیکی و نیز کاهش مقاومت در مقابل بارهای وارده می‌شوند (که این مساله وضعیت تغییرشکل آن‌ها را بدتر می‌کند). این تغییرشکل‌ها همچنین مانع از استفاده از فناوری‌های بدون نیاز به حفر ترانشه و حفاری در عملیات بازسازی و نوسازی می‌شود.

- ظرفیت

انباشتگی رسوبات در داخل و اطراف مجرای آبگذر، موجب گرفتگی و انسداد و کاهش ظرفیت سازه برای انتقال آب و کنترل شرایط جریان اوج می‌شود. تجمع رسوبات می‌تواند موجب موارد زیر گردد:

- آب‌گرفتگی جاده
- شسته‌شدن و جابجایی آبگذر در جریان‌های شدید

- احتمال خسارت به‌دلیل نیروهای شناوری
- غوطه‌ور شدن بیش از حد آبگذر
- آبشستگی کناره رودخانه و خاکریزهای جاده
- فرسایش سطح آبگذرهای بتنی و در نتیجه تحمیل هزینه‌های تعمیر و بازسازی زودهنگام

- خاکریز

شناسایی مشکلات مربوط به خاکریز، به منظور تعیین الزامات تعمیر و نگهداری سیستم زهکشی سطحی اهمیت دارد. مشاهده فرسایش در خاکریزها ممکن است نشان‌دهنده این موضوع باشد که سیستم‌های جمع‌آوری جریان‌های ناشی از بارندگی‌های شدید در جاده و شانه آن، عملکرد درست و کافی ندارند. ریزش، رانش، یا فروپاشی شیب خاک موجب می شود تا درز لوله‌ها به راحتی باز شود که ناپایداری و بی‌ثباتی آبگذر و خاکریز جاده را در پی دارد. ناپایداری خاکریزها به‌دلیل تراوش و لوله‌زایی که در آن آب در امتداد سطح بیرونی آبگذر جریان می‌یابد، احتمال دارد نشانه‌ای از گرفتگی و انسداد مجرای آبگذر و یا سایر عواملی باشد که موجب افزایش سطح آب در بالادست شده‌اند. شواهد مربوط به روگذر شدن جریان و توده‌های یخی نیز باید ثبت و گزارش شوند [۱۷۶].

- آبراهه اصلی رودخانه

تغییر در شرایط بستر رودخانه ممکن است موجب شود تا آبگذر در آینده برای جریان‌های طراحی شده، عملکرد مناسب و کافی نداشته باشد. آبراهه اصلی رودخانه باید برای شناسایی موارد زیر بازرسی شود:

- افزایش یا کاهش تراز و گودبرداری‌های مصنوعی
- زبری بستر و کناره‌ها / نوع روکش یا پوشش گیاهی
- آیا بالادست (US) و پایین‌دست (DS) آبگذر با واریزه‌ها گرفته شده است.
- آیا رودخانه در نزدیکی بازشدگی آبگذر تغییر مسیر می‌دهد.
- تغییر در کاربری اراضی در بالادست یا پایین‌دست، مانند تغییرشکل در نتیجه آتش‌سوزی یا سیل، پاک‌سازی و آب‌بندهای سگ آبی ممکن است پایداری آبراهه اصلی رودخانه را کاهش دهد.
- سدها و سایر کنترل‌های رودخانه، مانند دریاچه‌ها، آبشارها یا آبراهه‌های بزرگ‌تر در بالادست یا پایین‌دست
- موقعیت سایر آبگذرها یا پل‌ها در پایین‌دست

- وضعیت جاده

وضعیت جاده بالای آبگذر می‌تواند نشان‌دهنده برخی از مشکلات آبگذر باشد. نشست‌های جاده، چاله‌ها، وجود حفرات و مشکلات مربوط به پوشش جاده، احتمال دارد نشانه‌ای از موارد زیر باشد:

- به وجود آمدن حفرات و شرایط غیرعادی در اطراف لوله مدفون به‌علت لوله‌زایی یا نصب نامناسب

- جدا شدن درز لوله یا تغییرشکل مصالح
- احتمال نفوذ خاک به داخل آبگذر که بر خاکریز و در نتیجه پوشش جاده تاثیر گذاشته است.

- آبشستگی

منظور از آبشستگی، پایین افتادن بستر رودخانه در ورودی و خروجی آبگذر به‌دلیل فرسایش ناشی از جریان آب است. آبشستگی‌های موضعی در محل ممکن است نشان‌دهنده انسداد جریان و مواد ناکافی بستر رودخانه باشد.

- دیوارهای پیشانی و انتهایی

یکپارچگی دیوارهای پیشانی و انتهایی (نبود درز و ترک لوله) به منظور عملکرد مناسب به ویژه برای هدایت جریان و حفاظت در مقابل فرسایش، بسیار مهم و ضروری است.

۵-۹-۲- تعیین سطح اضطرار

تخصیص رتبه‌ی سطح اضطرار، بخش مهمی از فرایند بازرسی است که یک شاخص کیفی و کمی برای شرایط هر یک از اجزای آبگذر را به طور مجزا، در اختیار قرار می‌دهد و برنامه زمانی تعمیر و نگهداری مورد نیاز را مشخص می‌کند. رتبه‌بندی سطح اضطرار مقیاسی با درجات ۱ تا ۵ بوده که در جدول (۵-۹) مشخص شده است.

هنگام بازرسی اجزای آبگذر مورد نظر، تخصیص رتبه سطح اضطرار باید برای آبشستگی آبگذر، جریان آبگذر، دیوارهای پیشانی، دیواره‌های باله‌ای، کف‌بندها، هر یک از مجراها و دال‌های پی آبگذر انجام شود. سطح اضطرار، مقیاس گسترده‌ای برای شناسایی وضعیت و در نتیجه تعیین اهمیت و زمان‌بندی کارها است.

جدول ۵-۹- رتبه‌بندی سطح اضطرار برای سازه تقاطعی

سطح اضطرار	توصیف شرایط
۱	آبگذر در شرایط «عالی» (مانند سازه نو و تازه‌ساخت) است. نقصی دیده نمی‌شود.
۲	سازه در شرایط «خوب» است. نقص و مشکلات قابل ذکری که عملکرد آبگذر را تحت‌تاثیر قرار دهد وجود ندارد. آسیب و نقص‌های جزئی و مقداری غیر هم محور شدن و تغییر مسیر که قابل صرف‌نظر کردن است وجود دارد. اقداماتی نیاز نیست.
۳	سازه در شرایط «قابل قبول» است ولی قبل از بازرسی بعدی نیاز به رسیدگی دارد. تمام اجزای اصلی سازه، طبق اهداف بهره‌برداری، عملکرد صحیح خود را دارند اما قسمت‌هایی جزئی تخریب شده‌اند. ترک‌ها، کنده شدگی‌ها و آبشستگی جزئی نیز دیده می شود. غیر هم‌محور شدن و تغییر مسیر و نشست جزئی و عدم یکپارچگی در حد متوسط دیده می‌شود.
۴	سازه در شرایط «ضعیف» قرار گرفته و در سال مالی بعدی نیاز به توجه دارد. در صورت عدم انجام تعمیرات، احتمال تخریب سازه و قرار گرفتن در وضعیت بحرانی وجود دارد. زوال و از بین رفتن قسمت‌ها در سطح پیشرفته است. کنده‌شدگی و آبشستگی‌های قابل‌توجه، اجزای اصلی سازه را تحت‌تاثیر قرار داده است. نشست و غیرهم‌محور شدن و تغییر مسیر زیاد و قابل‌ملاحظه است.
۵	شرایط سازه «بحرانی» است. هر لحظه امکان تخریب وجود دارد و نیاز به اقدام فوری است. آسیب‌های شدید وارد بر اجزای اصلی، پایداری سازه را تحت‌تاثیر قرار داده است.

توجه به اهمیت تحمل بار و مسائل پایداری ناحیه آسیب‌دیده هر جزء از پدیده آبشستگی، در تعیین رتبه سطح اضطرار و چارچوب زمانی تعمیر و نگهداری مورد نیاز مهم است. برای مثال، آسیب‌های وارده به بخش‌های انتهایی آبگذر

ممکن است به اندازه نقصی قابل مقایسه در زیر خطوط ترافیک جاده، جدی و اضطراری نباشد. از مشاهدات و عکس‌ها و با ا ستفاده از جدول (۵-۱۰) می‌توان به عنوان راهنمایی برای تخ صیص رتبه‌ای متنا سب با سطح ا ضطرار و میزان حاد بودن شرایط پایداری سازه در برابر آبشستگی استفاده کرد. همچنین برای رتبه‌بندی، از امکانات سامانه BMS وزارت راه و شهرسازی نیز استفاده گردد.

جدول ۵-۱۰- رتبه‌بندی سطح اضطرار- از نظر آبشستگی در محیط سازه تقاطعی

سطح اضطرار	توصیف شرایط
۱	مسائل مربوط به آبگذر و نیز آبشستگی مشاهده نشد.
۲	آبشستگی جزئی ممکن است در کانال‌های ورودی و خروجی، روی خاکریز جاده در هر رو طرف دیواره‌های باله‌ای، یا روی شانه جاده در پشت هر یک از دیوارهای پیشانی وجود داشته باشد.
۳	آبشستگی زیاد و قابل‌توجه در کانال‌های ورودی و خروجی، روی خاکریز جاده در هر رو طرف دیواره‌های باله‌ای و روی شانه جاده در پشت هر یک از دیوارهای پیشانی وجود دارد. مقدار آبشستگی به اندازه‌ای نیست که موجب خطر ناپایداری و یا خسارت‌های سازه‌ای شدید در کوتاه مدت شود.
۴	آبشستگی زیاد و قابل‌ملاحظه در کانال‌های ورودی و خروجی، روی خاکریز جاده در هر رو طرف دیواره‌های باله‌ای و روی شانه جاده در پشت هر یک از دیوارهای پیشانی وجود دارد. مقدار آبشستگی به اندازه‌ای رسیده است که موجب خطر ناپایداری و یا خسارت‌های سازه‌ای شدید در کوتاه مدت می‌شود.
۵	آبشستگی شدید موجب بروز مشکلات پایداری سازه شده است و یا این‌که به‌زودی خسارات سازه‌ای قابل‌توجهی به آبگذر وارد می‌کند.

- جریان

مانع اصلی حرکت جریان در آبگذرها، رسوب‌گذاری است. براین اساس، میزان سطح اضطرار بستگی به مقدار و موقعیت رسوبات نهشته شده دارد که در جدول (۵-۱۱) ارائه شده است.

جدول ۵-۱۱- رتبه‌بندی سطح اضطرار- از نظر رسوبگذاری و انسداد سازه تقاطعی

سطح اضطرار	توصیف شرایط
۱	مشکلات مرتبط با آبگذر وجود ندارد. هیچ مانع یا عامل بازدارنده‌ای برای جریان در واحدهای آبگذر وجود ندارد.
۲	رسوب‌گذاری یا انسداد جزئی آبگذر کم‌تر از ۱۰ درصد ورودی/ خروجی است.
۳	رسوب‌گذاری یا گرفتگی بین ٪ ۱۰ تا ٪ ۲۵ ورودی/خروجی آبگذر است. رسوب‌گذاری در امتداد طول آبگذر مشهود است.
۴	رسوب‌گذاری یا گرفتگی بیش از ٪ ۲۵ ورودی/خروجی آبگذر است.
۵	رسوب‌گذاری یا انسداد آبگذر در ورودی/خروجی بسیار شدید است، به‌گونه‌ای که احتمال دارد جریان آب موجب خسارت سازه‌ای به آبگذر شود.

۵-۹-۳- فناوری‌های پیشرفته بازرسی

روش‌های بازر سی فعلی عمدتا بر بازر سی‌های چ شمی در ورودی و خروجی آبگذرها و ا ستفاده از ابزارهای ساده‌ای نظیر چراغ‌قوه، سنجه‌های دستی و آینه تکیه دارند. برای آبگذرهای کوچک تا متوسط (قطر mm ۲۵۰ تا mm ۱۰۰۰) که فضای محدودی دارند، روش‌های مذکور کارایی کمی دارند. احتمال دارد دسترسی به آبگذرها فقط از یک طرف امکان‌پذیر باشد و طول آن‌ها ممکن است به‌گونه‌ای باشد که فقط یک بازرسی سطحی و گذرا قابل انجام باشد. به‌علاوه، داخل آبگذرها عمدتا در زمان بازرسی، آب یا خاک وجود دارد که این مساله مانع از دیدن جزء مورد نظر می‌شود و از تعیین

وضعیت سالم بودن و عملکرد آن جلوگیری می‌کند. در ادامه به طور خلاصه، روش‌های پیشرفته‌تری معرفی شده است که در صورت نیاز به بازرسی‌های دقیق‌تر می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.

- دوربین فشاری[۱]

دوربین‌های فشاری را می‌توان در حین بازرسی‌های چشمی استفاده کرد تا شرایط داخلی آبگذر بر روی فیلم ثبت شود. دوربین‌های فشاری حدود ۵۰ mm قطر دارند، ضد آب بوده و مجهز به نور LED و فوکوس از راه دور هستند، همچنین می‌توانند فاصله را محاسبه نمایند.

- تلویزیون مدار بسته نصب شده بر نقاله خزشی[۲] (CCTV)

از CCTV نصب شده بر ریل خزشی می‌توان هنگام بازرسی‌های چشمی استفاده کرد. در این تکنیک یک دوربین CCTV بر روی روباتی که می‌تواند در داخل لوله حرکت کند، بسته می‌شود. دوربین‌های با قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه حول محورهای افقی و قائم که در این روش استفاده می‌شوند، از راه دور کنترل می‌گردد. نصب و تنظیمات باید به‌گونه‌ای باشد که تصاویر و ویدئوهای واضح و شفافی در دامنه ۰/۶ m تا ۳ m از لنز تولید شود. دوربین‌های CCTV محتوای ضبط شده را در زمان واقعی به خودروهای بازرسی می‌فرستند و بازرس می‌تواند با کنترل دستی شرایط لوله را ارزیابی کند.

- فناوری ارزیابی اسکن جانبی[۳] (SSET)

فناوری اسکن جانبی به منظور غلبه بر چالش‌های CCTV استفاده می‌شود. فناوری ارزیابی اسکن جانبی (SSET) نیز همانند CCTV بر روی یک نقاله خزشی سوار می‌شود با این تفاوت که با سرعت بالا، عکس‌های پانوراما[۴] (عکس‌های پهنه‌نما) می‌گیرد. با این روش پرسنل آفلاین به سرعت می‌توانند تمام فضای داخلی لوله را به صورت یک اسکن تصویر مسطح[۵] ببینند و یا این‌که با استفاده از این فناوری در داخل یک مدل مجازی از لوله حرکت کنند. این فناوری همچنین به پرسنل امکان می‌دهد تا هر زمان که نیاز باشد، بازرسی‌های بعدی را خارج از محل و از راه دور انجام دهند. چالش مربوط به SSET، ضرورت تفسیر دستی نتایج اسکن می‌باشد.

- سیستم‌های تهیه پروفیل لیزری

۱- Push camera

۲- Crawler Mounted Closed-Circuit Television (CCTV)

۳- Side Scanning Evaluation Technology (SSET)

۴- Panoramic images

۵- Flat image scan

سیستم‌های تهیه پروفیل لیزری نسبت به سیستم CCTV/ ویدئو پیشرفته‌تر هستند، زیرا از هندسه پراکنش نور[۱] برای ارزیابی فاصله بین سطح آبگذر و منبع نور استفاده می‌کنند تا پروفیل کاملی از آبگذر مورد بررسی تهیه شود. بزرگ‌ترین مزیت سیستم تهیه پروفیل لیزری، قابلیت استفاده از آن بدون نیاز به روشنایی روز است. با این حال، استفاده از این فناوری محدودیت دارد زیرا استفاده از آن فقط در آبگذرهایی امکان‌پذیر است که مسیرهای دسترسی به آن‌ها انسدادی نداشته باشند. بنابراین قبل از به‌کارگیری این روش، آبگذر باید زهکشی و سرویس شده باشد.

- تهیه پروفیل صوتی (سونار)[۲]

تهیه پروفیل سوناری، در اصل شبیه تهیه پروفیل لیزری است. به این ترتیب که در این روش از انتشار موج صوتی برای ردیابی اجسام در بالا و یا زیر سطح آب استفاده می‌کند. تست پژواک ضربه و آنالیز طیفی امواج سطحی[۳] (SASW) دو تکنیک آکاستیکی هستند که در کنار هم می‌توانند موارد غیرعادی نظیر لایه‌لایه شدن، ترک‌ها، حفرات و لانه‌های زنبور را در دیوارهای آبگذر شناسایی کنند. این روش برای آبگذرهایی که از بتن، سنگ، پلاستیک و یا مصالح بنایی با قطر بزرگ‌تر از ۱۵۰ mm ساخته شده باشند، قابل استفاده است. روش تهیه پروفیل سوناری به تجربه بیش‌تری برای آنالیز و بازرسی دقیق و درست آبگذر نیاز دارد.

- رادار نفوذ به زمین[۴] (GPR)

رادار نفوذ به زمین (GPR) برای ارزیابی وضعیت سالم بودن یا زوال پوشش بتنی و تشخیص موارد غیرعادی در داخل لوله استفاده می شود. سیستم‌های GPR از طریق ارسال پالس‌های کوتاهی از امواج الکترومغناطیس به داخل زمین کار می‌کند. این پالس‌ها به یک آنتن با فرکانس تنظیم شده بازتاب و منعکس می شوند. تاخیرهای زمانی در انعکاس یا جذب امواج برای ارزیابی شرایط زیر سطحی استفاده می شود. این روش انعطاف‌پذیر بوده که هم روی سطح جاده و هم داخل آبگذر می‌توان با آن کارکرد. با استفاده از روش GPR همچنین می‌توان ساختمان خاک اطراف آبگذر، فصل‌مشترک بین آبگذر و خاک پیرامون آن و نشت آب از آبگذر (با شناسایی حفرات زیرزمینی در خاک که به‌دلیل نشت آب ایجاد شده‌اند ویا با شناسایی موارد غیرعادی در عمق لوله) را نیز تشخیص داد.

- اسکن فراصوت[۵]

اسکن فراصوت از امواج صوتی فرکانس بالا استفاده می‌کند. این روش اطلاعات مربوط به وجود و محل مرزها را در دیواره لوله که به واسطه موارد غیرعادی، حفرات، قسمت‌های با تراکم خیلی بالا یا با خوردگی و پوسیدگی شدید ایجاد

۱- Light scatter geometry

۲- Sonar profiling

۳- Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)

۴- Ground Penetrating Radar (GPR)

۵- Ultrasonic

شده‌اند، ارائه می‌دهد. این روش نیز انعطاف‌پذیر است و از آن می‌توان برای آبگذرهایی با هر نوع مصالح و قطرهای بزرگ‌تر از ۱۰۰ mm استفاده کرد.

- پرتونگاری کامپیوتری پس‌پراکنش[۱] (BCT)

پرتونگاری کامپیوتری پس‌پراکنش (BCT) نوعی تست رادیوگرافی است که برای نقشه‌نگاری «زیرکنی[۲]» در خاکی که مجرای آبگذر را نگه می‌دارد اتفاق می‌افتد، استفاده می‌شود. در واقع این روش استفاده غیرپزشکی از سی‌تی اسکن[۳] برای تهیه تصویر از دیوار آبگذر و مصالح خاکی پشت آن می‌باشد. این تصاویر، خاکریز دست‌نخورده و بی‌نقص و مصالح خاکی که زیرکنی در آن اتفاق افتاده را تفکیک و مشخص می‌کند.

- گرمانگاری مادون قرمز[۴] (IRT)

گرمانگاری مادون قرمز (IRT) روش غیرتماسی برای تشخیص موارد غیرعادی زیر سطحی در آبگذرهای بتنی است. در این روش، سطح مورد نظر با استفاده از یک منبع گرمایشی، گرم می‌شود سپس خصوصیات سرد شدن سطح با استفاده از دوربین مادون قرمز (فرو سرخ) اندازه‌گیری می شود، تابش مادون قرمز نیز به تصویر قابل مشاهده‌ای تبدیل می شود. این روش IRT فعال[۵] نامیده می‌شود. در مقابل، IRT غیرفعال نیازی به منبع گرمایشی خارجی ندارد و به این دلیل ارجح‌تر است.

۵-۹-۴- سایر موارد نیازمند بازرسی

مواردی نیز وجود دارد که به مصالح ساخت آبگذر ارتباطی ندارد ولی لازم است که بازرسی شوند. این موارد به شرح زیر می‌باشد [۱۹۶]:

- آسیب ناشی از ضربه تصادفات

از اجزایی که در اثر تصادف و سایل نقلیه آسیب می‌بینند، نشانگرها و دیواره‌های باله‌ای هستند که ممکن است به شدت ساییده و یا پوسته‌پوسته شوند. معمولا خسارت‌ها به طور آشکار قابل مشاهده هستند.

- زهکشی

جمع‌آوری ناکافی رواناب از مسیرهای دسترسی به‌ویژه در بخش‌هایی که جریان در دو انتهای مجرای آبگذر متمرکز و متراکم شده است، می‌تواند موجب فرسایش، لوله‌زایی و تندشویی و یا آبشستگی خاکریزهای دسترسی و تخریب شیب‌ها می‌شود. این بخش‌ها مخصوصا پس از بارندگی‌های سنگین یا وقوع سیلاب، باید بازرسی شوند.

۱- Backscatter Computer Tomography

۲- Undermining

۳- CT-scan

۴- Infrared Thermography (IRT)

۵- Active IRT

- واریزه

تجمع واریزه در بالادست آبگذر در یک آبگذر مستعد وقوع سیل، بارگذاری زیادی را بر آبگذر تحمیل می‌کند. انباشت واریزه‌ها همچنین موجب سیل‌گرفتگی و در برخی موارد حاد، انسداد کامل و انحراف مسیر جریان می شود. تجمع واریزه‌ها به شرایط حوضه آبخیز بالادست بستگی دارد و در آبگذرهایی با بازشدگی کوچک یا ارتفاع آزاد کم، بسیار شدید است.

- پوشش گیاهی

رشد اضافی و کنترل نشده پوشش گیاهی در زیر یا نزدیک آبگذر به‌خودی خود موجب خسارت نمی‌شود. برخی پوشش‌های گیاهی برای پایداری خاکریز و پیرامون آن مفید هستند و از تهنشینی رسوبات در آبگذر و بروز آبشستگی جلوگیری می‌کنند. در عین حال پوشش گیاهی می‌تواند خطر آتش‌سوزی، انسداد آبگذر، تجمع واریزه و نگهداشت رطوبت را موجب شود و به این دلایل باید گزارش شود.

در کل یک ناحیه‌ی ۲ تا ۳ متری فراتر از اجزای بیرونی آبگذر یا در محدوده حریم جاده (هر کدام زودتر اتفاق بیافتد) را می‌توان به عنوان مقدار توصیه شده برای منطقه عاری از پوشش گیاهی در نظرگرفت. مناسب بودن این معیار سرانگشتی و تقریبی برای یک محل به‌خصوص نیاز به بررسی شرایط پوشش گیاهی، محیط و آبگذر در آن محل دارد.

- آبشستگی

آبشستگی پی که به‌دلیل جریان‌های شدید یا تغییر در مسیر رودخانه ایجاد می‌شود، می‌تواند موجب نشست یا جابجایی پیش‌رونده اجزای آبگذر شود که در صورت عدم اصلاح، موجب تخریب کامل می‌شود. هرگاه شواهدی از آبشستگی، افزایش یا کاهش تراز بستر وجود داشته باشد، این مشکلات باید تحت عنوان گزارش شرایط فعلی توسط بازرس اعلام شود تا با داده‌های قبلی و آتی مربوطه مقایسه گردد. تغییر در شرایط بستر رودخانه در بالادست و پایین‌دست آبگذر که در فاصله بین بازرسی‌ها رخ می‌دهد نیز باید مورد توجه قرارگیرد. هرگونه آبشستگی در زیر کف‌بند خروجی، این پتانسیل را دارد که موجب زیرکنی در تمام طول مجرای آبگذر شود. به این ترتیب چیزی به نام فاصله ایمن آبشستگی از کف‌بند خروجی وجود ندارد. جزئیاتی که در بالا به آن‌ها اشاره شد باید برای تمام آبشستگی‌ها ثبت شوند تا در خصوص اضطرار و حاد بودن آن‌ها قضاوت شود.

- جابجایی/ نشست

جابجایی اجزای آبگذر یا تکیه‌گاه‌های دیوار ممکن است ناشی از آبشستگی، حرکت زمین، تراکم ضعیف خاکریز، فشار اضافی خاک (به دلیل جابجایی یا نشست خاکریز دسترسی) ایجاد می‌شود و سبب فرسایش و تندشویی مسیر دسترسی گردد.

فصل ۶

شرح خدمات مطالعات پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه

در ایران، جایگاه استفاده از دانش و فن مهندسی رودخانه در پروژه‌های غیررودخانه‌ای (مانند احداث سازه‌ها و خطوط تقاطعی مانند پل، آبگذر، سیفون و خطوط انتقال آب و نفت و گاز و برق و مخابرات) نادیده گرفته شده و یا کمرنگ است. هدف اصلی از تدوین «راهنمای جامع طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه»، توجه به بخش مطالعات رودخانه‌ای، در کنار دیگر راهنماهای مربوط به پی و سازه می‌باشد.

در فرایند تهیه شرح خدمات مطالعات پروژه‌های پل‌ها و آبگذرها، شرح خدمات مطالعات رودخانه‌ای زیر برای کاهش آسیب‌پذیری‌ها و خطرات سیل و برای دوام و پایداری سازه پل و آبگذر در مراحل مختلف (شامل ۱- مطالعات شناخت و امکان سنجی، ۲- مطالعات پایه، ۳- مطالعات طراحی تفصیلی، ۴- نظارت و اجرا و ۵- بهره‌برداری و نگهداری) ارائه شده است.

شرح کلی خدمات مطالعات پروژه با استفاده از شرح خدمات زیر و بنابر ضرورت، اهمیت و اندازه پروژه توسط کارفرما تعیین و انتخاب می‌گردد.

۶-۱- اقدامات اولیه

۶-۱-۱- برنامه‌ریزی برای انجام کار

۶-۱-۱-۱- مذاکره با کارفرما، سازمان‌های ذی‌ربط و مسئولین محلی به منظور تبیین اهداف و ابعاد مطالعات و انتظارات، روش کار، نیازها و محدودیت‌ها

۶-۱-۱-۲- مشخص کردن اجزای کار و تقسیم‌بندی و تشریح نوع فعالیت‌ها و تیم کارشناسی

۶-۱-۱-۳- برنامه‌ریزی بازدیدهای میدانی از محدوده رودخانه مورد مطالعه

۶-۱-۱-۴- تهیه برنامه تقسیم کار (WBS) و برنامه زمان‌بندی کل مطالعات در سامانه کنترل پروژه با توجه به رژیم جریان ماهانه و سیلابی رودخانه و ریسک کار در رودخانه مورد مطالعه

۶-۱-۱-۵- تعیین برنامه ارائه گزارش دوره‌ای پیشرفت مطالعات و جلسات هماهنگی با ناظرین کارفرما

۶-۱-۲- گردآوری آمار، اطلاعات، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌ها و گزارش‌ها

۶-۱-۲-۱- آمار و اطلاعات مورد نیاز برای به‌روزرسانی مطالعات پایه و تخصصی در صورت نیاز به‌خصوص آمار بده‌های سیلابی، رسوب و کیفیت آب

۶-۱-۲-۲- گزارش‌های مطالعات قبلی مرتبط با پروژه به ویژه گزارش سیلاب‌های گذشته رودخانه در اسناد و مدارک تاریخی موجود و گزارشات مطالعات پایه و تخصصی تعیین حد بستر و حریم و پهنه‌بندی سیلاب رودخانه مورد نظر

۶-۱-۲-۳- جمع‌آوری اطلاعات مربوط به طرح‌های اجرا شده، در دست اجرا و طرح‌های مصوب آینده در سامانه رودخانه در محدوده طرح

۶-۱-۲-۴- عکس‌های هوایی پیشین، تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های رقومی موجود در دوره‌های زمانی مختلف، در محدوده رودخانه مورد مطالعه

۶-۱-۲-۵- نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و اطلاعات ژئوتکنیک از محدوده رودخانه مورد مطالعه

۶-۱-۲-۶- آلبوم نقشه‌های حد بستر و حریم و پهنه‌بندی سیلاب از رودخانه مورد مطالعه

۶-۱-۲-۷- ایجاد لایه‌های اطلاعاتی GIS از داده‌های موجود

۶-۱-۳- بازدیدها و بررسی‌های صحرایی

۶-۱-۳-۱- شناسایی و بررسی پهنه‌های با خطر سیلاب در آبراهه اصلی و سیلابدشت رودخانه مورد مطالعه در محدوده طرح، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به سیلاب‌های گذشته رودخانه از طریق پرس و جو از ساکنین منطقه

۶-۱-۳-۲- بررسی پایداری آبراهه اصلی رودخانه و آبراهه‌های فرعی در محدوده اثر سازه

۶-۱-۳-۳- بررسی پایداری و آثار سیلاب‌های گذشته بر پل و آبگذرها، دیگر سازه‌ها و خطوط تقاطعی و سازه‌ها و روش‌های حفاظت ساحلی انجام شده در محدوده رودخانه مورد مطالعه به‌ویژه از دیدگاه فرسایش و رسوب‌گذاری و تخریب‌ها

۶-۱-۳-۴- بررسی محدوده اثر بخشی و اثرگذاری طرح بر مورفولوژی و هیدرولیک رودخانه شامل طول و عرض مناسبی از بالادست تا پایین‌دست محل اجرای پروژه

۶-۱-۳-۵- جمع‌آوری اطلاعات اولیه به کمک بررسی‌های صحرایی شامل ایستگاه‌های هیدرومتری، اطلاعات هیدرولیکی، ریخت‌شناسی، سیل، فرسایش، زمین‌شناسی، رسوبات بستر رودخانه و جنس دیواره، منابع قرضه و مصالح برای ساخت پل و آبگذر

۶-۱-۳-۶- شناسایی و بررسی دانه‌بندی مصالح بستر (تا عمق مورد انتظار آبشستگی) و مواد دیواره رودخانه

۶-۱-۳-۷- ارزیابی اطلاعات موجود و تهیه دستورالعمل تهیه نقشه‌های توپوگرافی و عملیات ژئوتکنیک مورد نیاز برای طراحی (فراتر از عمق مورد انتظار آبشستگی)

۶-۱-۴- تهیه و ارائه گزارش اقدامات اولیه

۶-۱-۴-۱- جمع‌بندی نتایج بررسی اطلاعات و بازدیدهای میدانی

۶-۱-۴-۲- جمع‌بندی نتایج ارزیابی کفایت داده‌ها برای انجام مطالعات و تعیین ریسک اطلاعات موجود در روش‌شناسی انجام کار

۶-۱-۴-۳- جمع‌بندی و تهیه دستورالعمل‌های لازم برای تکمیل اطلاعات و داده‌های مورد نیاز مطالعات

۶-۱-۴-۴- معرفی کارشناسان کلیدی در بخش‌های مختلف (به‌ویژه شامل هیدرولوژی، کاربری بستر و اراضی سیلابدشت رودخانه، حقوقی، GIS، محیط‌زیست، مهندسی رودخانه، هیدرولیک، سیلاب، فرسایش و رسوب، ریخت‌شناسی و تلفیق)، متناسب با اندازه و اهمیت سازه

۶-۱-۴-۵- تعیین محدوده بازه مطالعات مورفولوژیکی و هیدرولیکی رودخانه شامل طول و عرض مناسبی از اثر بخشی و اثرگذاری طرح در بالادست تا پایین‌دست محل اجرای پروژه

۶-۱-۴-۶- تهیه روش‌شناسی انجام مطالعات

۶-۱-۴-۷- ارائه گزارش اقدامات اولیه و اخذ تاییدیه از کارفرما به منزله تایید روش‌شناسی برای انجام ادامه مطالعات

۶-۲- مطالعات پایه

۶-۲-۱- مطالعات هواشناسی و هیدرولوژی

هدف از انجام این بخش از مطالعات استخراج اطلاعات سیلاب و رسوب و کیفیت آب رودخانه در بازه مورد مطالعه است. در صورت وجود نتایج قابل استناد از مطالعات انجام شده گذشته در محدوده مورد مطالعه، اطلاعات لازم در مطالعات حا ضر مورد ا ستفاده قرار می‌گیرد. در صورت عدم انجام مطالعات گذ شته و یا عدم اطمینان به نتایج مطالعات، شرح خدمات مطالعات این بخش انجام و نتایج آن در سایر بخش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶-۲-۱-۱- تعیین پارامترهای فیزیوگرافی حوضه آبریز منتهی به رودخانه در محل طرح

۶-۲-۱-۲- برر سی شبکه ایستگاه‌های هوا شنا سی و هیدرومتری (آب و ر سوب سنجی) و تهیه نقشه ایستگاه‌ها در منطقه اثر طرح

۶-۲-۱-۳- بررسی دقت و صحت آمارهای بارندگی جمع آوری شده، حذف و تصحیح آمار مشکوک، انتخاب دوره آماری و تکمیل و تطویل آمار ایستگاه‌های با دوره آماری کوتاه‌تر تا دوره پایه یا شاخص

۶-۲-۱-۴- تجزیه و تحلیل بارندگی‌های کوتاه مدت ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعته و تعیین رگبارهای منطقه با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال

۶-۲-۱-۵- بررسی، اصلاح و تکمیل داده‌های هیدرومتری شامل داده‌های آبدهی، رسوب و کیفیت آب

۶-۲-۱-۶- برآورد متوسط بده ماهانه و سالانه رودخانه محدوده طرح

۶-۲-۱-۷- تهیه منحنی تداوم جریان روزانه و یا ماهانه

۶-۲-۱-۸- برآورد مقادیر سیلاب‌ها روزانه برای دوره‌های بازگشت مختلف ۲ تا ۲۰۰ سال (و درصورت لزوم بیش‌تر) برای برآورد سیلاب اوج (لحظه‌ای)

۶-۲-۱-۹- برآورد مقادیر نقطه اوج سیلاب‌ها برای دوره‌های بازگ شت مختلف ۲ تا ۲۰۰ سال (و در صورت لزوم بیش‌تر) و تعیین آبنگار سیلاب‌های مربوطه

۶-۲-۱-۱۰- تعیین دانه‌بندی مواد بستر، مواد بار بستر و مواد معلق و تعیین میزان بار معلق و بار بستر و بار کل رودخانه و تعیین متوسط ماهانه و سالانه آن‌ها و رسم آبنگار سالانه بارهای رسوبی

۶-۲-۱-۱۱- تعیین شاخص های کیفیت آب از نظر پایداری یا فرسایش اجزای سازه پل و آبگذر

۶-۲-۲- مطالعات کاربری اراضی اطراف رودخانه

۶-۲-۲-۱- تعیین کاربری‌های مختلف بستر آبراهه و سیلابدشت رودخانه شامل کاربری‌های کشاورزی، مسکونی، جنگل و غیره (تا پهنه سیلاب طراحی) براساس تصاویر ماهواره‌ای و تدقیق آن با استفاده از بازدیدهای میدانی

۶-۲-۲-۲- تهیه نقشه کاربری اراضی با استفاده از نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای موجود

۶-۲-۲-۳- دسته‌بندی و ارزیابی کاربری‌ها در پهنه‌های مختلف خطر سیلاب

۶-۲-۲-۴- بررسی میزان تجاوز به حد بستر و حریم رودخانه و در پهنه سیلاب طراحی، به تفکیک کاربری‌ها و اثربخشی آن‌ها در پایداری یا آسیب‌پذیری طرح پل و آبگذر

۶-۲-۳- مطالعات حقوقی

۶-۲-۳-۱- بررسی ملاحظات و رعایت قوانین و آیین‌نامه‌های حد بستر وحریم رودخانه در جانمایی پل و آبگذر و اجزای وابسته

۶-۲-۳-۲- بررسی کاربری مجاز و غیرمجاز در بستر و حریم رودخانه و تعیین استقرار مناسب کاربری‌های مرتبط با پل و آبگذر در صورت وجود و کاربری‌های موقت تجهیز کارگاه در زمان ساخت پل و آبگذر

۶-۲-۳-۳- بررسی حریم قانونی پل و آبگذرها و حریم منابع آب در سیلابدشت و اراضی مجاور رودخانه

۶-۲-۴- مطالعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیک و منابع قرضه

۶-۲-۴-۱- شناخت و توصیف سازندهای زمین شناسی (مواد سنگی و آبرفتی) در محدوده اثر ساختگاه سازه تقاطعی (در عرض و طول رودخانه)، شامل سنگ شناسی، ضخامت، دانه‌بندی و لایه‌بندی و ضخامت مواد آبرفتی، هوازدگی و فرسایش‌پذیری و اثرات آن بر پایداری سازه تقاطعی

۶-۲-۴-۲- شناخت عوارض ساختاری (گسل، چین‌خوردگی، شکستگی و درز و شکاف) و اثرات آن بر پایداری سازه تقاطعی

۶-۲-۴-۳- بررسی وضعیت و پتانسیل مصالح و منابع قرضه ساخت پل و آبگذر و تهیه نقشه منابع قرضه

۶-۲-۴-۴- بررسی پایداری شیروانی‌های کناره‌های رودخانه‌ها در بازه‌های مختلف

۶-۲-۴-۵- تعیین ساخت و بافت سنگ‌ها و خاک‌های محل پل و آبگذرها برای تشریح ویژگی‌های دوام، رفتار و خواص مکانیکی

۶-۲-۴-۶- بررسی دانه‌بندی مصالح بستر (فراتر از عمق مورد انتظار آبشستگی) و کناره‌های رودخانه مورد مطالعه

۶-۲-۴-۷- تعیین انواع مصالح مورد نیاز برای اجرای طرح

۶-۲-۴-۸- پیشنهاد انجام مطالعات تکمیلی ژئوتکنیک (در صورت نیاز)

۶-۲-۴-۹- تعیین موقعیت مکانی و محدوده و برآورد میزان تقریبی هر یک از منابع قرضه شناسایی شده با توجه به محدودیت‌های موجود (نظامی، محیط‌زیستی، آثار باستانی و غیره)

۶-۲-۴-۱۰- ارائه اطلاعات مربوط به منابع قرضه و مصالح بر روی نقشه با مقیاس مناسب

۶-۲-۴-۱۱- برآورد قیمت واحد تمام شده هرکدام از مصالح مورد نیاز در محل پروژه

۶-۲-۵- مطالعات محیط‌زیستی

۶-۲-۵-۱- بررسی تاثیر پل و آبگذر بر پیوستگی طولی و پیوستگی عرضی محیط‌زیستی رودخانه

۶-۲-۵-۲- بررسی روش‌های حفظ پیوستگی طولی و عرضی محیط بیولوژیکی رودخانه و دستر سی آسان پس از اجرای پل و آبگذر و ارائه راهکارهای مناسب

۶-۲-۵-۳- بررسی پارامترهای محیط‌زیستی در طراحی پل و آبگذر (کنترل عمق جریان، سرعت جریان، آشفتگی جریان، زمان مهاجرت و ورودی و خروجی راه ماهی)

۶-۲-۵-۴- بررسی ملاحظات محیط‌زیستی حین اجرای طرح و راهکارهای جلوگیری از آلودگی آب، آسیب به زیست بوم و آلودگی صوتی و سایر موارد

۶-۲-۵-۵- بررسی ملاحظات محیط‌زیستی برداشت مصالح مورد نیاز از منابع قرضه

۶-۲-۶- تهیه و ارائه گزارش مطالعات پایه

۶-۳- مطالعات تخصصی

۶-۳-۱- مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه

۶-۳-۱-۱- بررسی نوع رودخانه (مستقیم، شریانی، پیچانرود، پایدار یا فرسایشی یا رسوب‌گذار و غیره) و شناسایی رفتار ریخت‌شناسی رودخانه

۶-۳-۱-۲- بررسی نحوه تغییرات زمانی مسیر رودخانه‌های مورد مطالعه از گذشته تاکنون بالاخص تغییرات ایجاد شده در مسیر جریان رودخانه‌ها با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای

۶-۳-۱-۳- بررسی تغییرات پارامترهای ریخت شناسی از جمله راستا، جابجایی‌های عرضی، میان‌بری، انحراف مسیر، تغییر تراز بستر (ترازکاهی و یا ترازافزایی بستر)، تغییر مواد بستری و تغییر در ویژگی‌های هندسی رودخانه (شامل عرض- عمق- شیب، شعاع انحنای پیچ و ضریب پیچانرودی)

۶-۳-۱-۴- پیش‌بینی پاسخ ریخت‌شناسی رودخانه به تغییرات انسان ساخت ناشی از ساخت پل و آبگذر مورد نظر در بازه رودخانه مورد مطالعه و تعیین میزان خطرپذیری سیلاب و انسداد جریان با وجود پل و آبگذر

۶-۳-۱-۵- تعیین معیارهای آسیب‌پذیری به لحاظ پارامترهای ریخت‌شناسی در رودخانه‌های محدوده مطالعاتی مانند احتمال جابجایی‌های رودخانه، میان‌بری پیچ‌ها، تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه، آسیب‌پذیری ناشی از پل و آبگذرها

۶-۳-۱-۶- بررسی طول تاثیر برداشت شن و ماسه بر ریخت‌شناسی رودخانه و احتمال آسیب‌رسانی به پل و آبگذر

۶-۳-۱-۷- بررسی اثر سازه‌های بالادست و پایین‌دست بر پل و آبگذر از لحاظ فرسایش و رسوب

۶-۳-۱-۸- بررسی اثر پل‌ها و آبگذرهای موجود بر شرایط مورفوهیدرولیکی محل پل و آبگذر

۶-۳-۱-۹- محاسبه عرض تعادل رودخانه برای کاهش اثرات بر ظرفیت جریان آزاد سیلاب طراحی و انتقال رسوبات رودخانه

۶-۳-۱-۱۰- تعیین بیشینه عرض تنگ‌شدگی مجاز مقطع رودخانه در محل پل و آبگذر

۶-۳-۱-۱۱- بررسی پایداری رودخانه از نظر فرسایش بستر و دیواره‌ها و احتمال انحراف جریان و بستر رودخانه ناشی از جانمایی پل و آبگذرها و ارائه راهکارهای مناسب حفاظت و تثبیت رودخانه و سازه پل و آبگذر

۶-۳-۲- مطالعات هیدرولیک سیلاب رودخانه

۶-۳-۲-۱- بررسی آمار وگزارش‌های سیلاب‌های قبلی و تاریخی در گذشته و بررسی وضعیت خسارت آن‌ها بر رودخانه و سازه‌های تقاطعی و ساحلی موجود

۶-۳-۲-۲- تعیین دوره بازگشت سیلاب طراحی با رعایت معیارهای موروفوهیدرولیکی رودخانه در طراحی پل و آبگذر و تحلیل ریسک سیلاب برای سازه تقاطعی مورد نظر

۶-۳-۲-۳- جمع‌آوری اطلاعات هندسی موجود شامل نقشه‌های توپوگرافی رقومی از مسیر رودخانه و سیلابدشت آن، موقعیت و ابعاد سازه‌های تقاطعی و ساحلی رودخانه، اطلاعات سدها و بندهای موجود و غیره

۶-۳-۲-۴- انتخاب مدل ریاضی و مناسب برای شبیه سازی اثرات متقابل جریان آب و انتقال رسوب رودخانه و پل و آبگذر و تعیین نوع مدل سازی مناسب (یک بعدی، دو بعدی یا ترکیبی، مدل سازی جریان رودخانه با بستر ثابت و یا متحرک)

۶-۳-۲-۵- صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی با توجه به اطلاعات سیلاب‌های گذشته و مورفولوژی رودخانه مورد مطالعه

۶-۳-۲-۶- بررسی و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان در سیلاب‌های مختلف به تفکیک در آبراهه اصلی و سیلابدشت و مقایسه در دو شرایط با و بدون پل و آبگذر

۶-۳-۲-۷- تعیین ظرفیت عبور ایمن سیلاب در پل و آبگذرهای تقاطعی موجود در محدوده بالا دست و پایین‌دست اثر پل و آبگذر

۶-۳-۲-۸- تهیه نقشه‌های پهنه‌های سیلابی رودخانه با دوره بازگشت‌های مختلف در دو شرایط با و بدون پل و آبگذر (و اجزای وابسته آن) و مقایسه پارامترهای هیدرولیکی

۶-۳-۲-۹- تحلیل هیدرولیکی و مقایسه جریان رودخانه در بده‌های سیلابی با دوره بازگشت‌های مختلف قبل و بعد از اجرای پل و آبگذر

۶-۳-۲-۱۰- بررسی تاثیر تعداد، عرض و شکل دهانه‌های مختلف در آبگذری و انتقال رسوبات از پل و آبگذر

۶-۳-۲-۱۱- تعیین ظرفیت عبور ایمن سیلاب و رسوبات و واریزه‌ها (سنگی و درختی، شناور و غیره) از پل و آبگذر مورد نظر و تعیین شرایط برای آستانه روگذری

۶-۳-۲-۱۲- مدل‌سازی برای ارزیابی کارایی روش‌های پیشنهادی کنترل سیل، اصلاح مسیر و حفاظت و تثبیت رودخانه در محدوده اثر پل و آبگذر در بالادست و پایین‌دست سازه تقاطعی

۶-۳-۳- مطالعات فرسایش و رسوب

۶-۳-۳-۱- بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه در دو شرایط با و بدون پل و آبگذر

۶-۳-۳-۲- بررسی احتمال وقوع جریان‌های واریزه‌ای و جریان گلی همراه با اجسام شناور و آثار آن‌ها در عملکرد تاسیسات پل و آبگذرهای تقاطعی

۶-۳-۳-۳- بررسی شرایط انتقال مواد و اجسام شناور در رودخانه و وضعیت انسداد محتمل پل و آبگذر

۶-۳-۳-۴- برآورد میزان ترازکاهی یا ترازافزایی بستر (تغییرات بلندمدت در تراز بستر رودخانه)

۶-۳-۳-۵- برآورد عمق آبشستگی تنگ‌شدگی و عمومی و گستره طولی آن در بازه‌های بالادست و پایین‌دست پل و آبگذر

۶-۳-۳-۶- برآورد عمق و هندسه حفره آبشستگی موضعی پیرامون پایه و تکیه‌گاه پل و آبگذر و آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه تقاطعی

۶-۳-۳-۷- برآورد عمق و گستره آبشستگی کل (شامل میزان ترازکاهی بستر، آبشستگی عمومی و موضعی) در بازه اثر پل و آبگذر

۶-۳-۳-۸- بررسی روش‌های مختلف حفاظت و تثبیت بستر و کناره رودخانه در بازه‌های بالادست و پایین‌دست پل و آبگذر و پیشنهاد گزینه‌های مناسب برای مدل‌سازی هیدرولیک

۶-۳-۳-۹- بررسی و پیشنهاد روش‌های مناسب حفاظت بستر رودخانه از آبشستگی کل در بازه پل و آبگذر

۶-۳-۴- تهیه و ارائه گزارش مطالعات تخصصی

۶-۴- تلفیق مطالعات

۶-۴-۱- انتخاب محل مناسب و پایدار یا اطمینان از پایداری آبراهه و سازه برای جانمایی پل و آبگذر

۶-۴-۲- تعیین موقعیت و راستای پل و آبگذر با رعایت معیارهای مورفوهیدرولیکی و پایداری دینامیکی رودخانه

۶-۴-۲- طرح مورفوهیدرولیکی پل و آبگذر (تعیین ابعاد، ارتفاع، طول، تعداد دهانه و عرض دهانه‌ها و غیره)

۶-۴-۳- طرح ساماندهی رودخانه و حفاظت و تثبیت بستر و کناره‌های رودخانه در بازه اثر پل و آبگذر با انتخاب روش‌های مناسب طبیعی- سازه‌ای پایدار و با رعایت ملاحظات محیط‌زیستی، زیبایی و گردشگری

۶-۴-۴- طرح کنترل آبشستگی کل تکیه‌گاه‌ها، پایه‌ها و بستر پایین‌دست پل و آبگذر

۶-۴-۵- طرح انحراف جریان رودخانه در محدوده پل و آبگذر (در صورت نیاز)

۶-۴-۶- تعیین موقعیت محل تجهیز کارگاه با رعایت ملاحظات ایمنی، ریسک سیلاب، محیط‌زیستی، و نتایج مطالعات تخصصی

۶-۴-۷- تهیه مراحل و برنامه زمان‌بندی اجرای طرح و کلیه‌ی لوازم و تجهیزات پیشنهادی در مرحله‌ی اجرای طرح با توجه به نتایج مطالعات پایه و تخصصی مطالعات مورفوهیدرولیکی رودخانه و ریسک سیلاب

۶-۴-۸- تهیه و ارائه گزارش تلفیق مطالعات

۶-۵- تهیه نقشه‌های اجرایی از دیدگاه مورفوهیدرولیکی

۶-۵-۱- نقشه پایه (موقعیت طرح، حوضه آبریز و رودخانه‌های اصلی، راه‌های دسترسی، مراکز جمعیتی و غیره)

۶-۵-۲- نقشه پهنه سیلاب طراحی با نمایش عرض آبراهه اصلی و محدوده‌های بستر و حریم قانونی رودخانه به تفکیک برای دو شرایط با و بدون پل و آبگذر

۶-۵-۳- نقشه پلان و پروفیل طولی و مقاطع عرضی رودخانه در بازه بالادست تا پایین‌دست پل و آبگذر برای دو شرایط با و بدون پل و آبگذر

۶-۵-۴- نقشه پلان جانمایی و مقطع هندسی در طراحی مورفوهیدرولیکی پل و آبگذر

۶-۵-۵- نقشه طرح ساماندهی رودخانه و حفاظت و تثبیت در بازه اثر پل و آبگذر

۶-۵-۶- نقشه طرح کنترل آبشستگی تکیه‌گاه‌ها، پایه‌ها و بستر پایین‌دست

۶-۵-۷- نقشه طرح انحراف جریان رودخانه (در صورت نیاز)

۶-۵-۸- نقشه موقعیت منابع قرضه

۶-۵-۹- نقشه محل تجهیز کارگاه با رعایت ملاحظات ایمنی و نتایج مطالعات تخصصی و محل دپوی مصالح (در صورت نیاز)

۶-۵-۱۰- تهیه و ارائه آلبوم نقشه‌های پایه و نقشه‌های اجرایی

۶-۶- فهرست ملاحظات دوره قبل و حین اجرا

۶-۶-۱- تدوین روش و مراحل و زمان‌بندی ساخت پل و آبگذر با توجه به نتایج ملاحظات مورفوهیدرولیکی رودخانه و ریسک سیلاب در بخش‌های پیشین

۶-۶-۲- برپایی و تجهیز کارگاه با رعایت ملاحظات ایمنی، ریسک سیلاب، محیط‌زیستی و نتایج مطالعات تخصصی

۶-۶-۳- کنترل کیفیت مواد و مصالح به‌کار رفته در اجرای طرح (انجام آزمایش‌های کنترل در معدن و یا کارگاه)

۶-۶-۴- رعایت ملاحظات محیط‌زیستی راهنمای مورفوهیدرولیکی رودخانه در حین اجرای طرح

۶-۶-۵- تعیین روش ساخت منا سب پل و آبگذر با رعایت ملاحظات ایمنی، ریسک سیلاب، کاهش آلودگی آب در پایین‌دست و کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی

۶-۶-۶- تهیه و ارائه دستورالعمل دوره قبل و حین اجرا در آبراهه برای پل و آبگذر

۶-۷- فهرست ملاحظات دوره بهره‌برداری و نگهداری پس از اجرا

۶-۷-۱- ارائه برنامه اقدام و نظارت بر برچیدن کارگاه و عوارض ساخت و ساز با توجه به ملاحظات مشروح در راهنمای مورفوهیدرولیکی رودخانه

۶-۷-۲- تعیین روش و ارائه برنامه بازسازی عوارض طبیعی و پوشش گیاهی در بخش‌های آسیب دیده دردوره زمانی ساخت پل و آبگذر با استفاده از روش‌های طبیعی یا طبیعی- سازه‌ای

۶-۷-۳- بررسی تغییرات محتمل مورفولوژی رودخانه و میزان انطباق آن با شرایط زمان طراحی و بررسی دلایل و راهکارهای اصلاحی

۶-۷-۴- ارزیابی کارایی طرح ساماندهی رودخانه و حفاظت و تثبیت بستر و کناره‌های رودخانه در بازه اثر پل و آبگذر و ارائه برنامه بازسازی یا بهسازی با رعایت ملاحظات محیط‌زیستی، زیبایی و گردشگری

۶-۷-۵- بررسی تغییرات محیطی ناشی از احداث پل و آبگذر یا راه دسترسی در بالادست پل و آبگذر بر ظرفیت ایمن جریان و انتقال رسوبات و واریزه‌ها از سازه و ارائه راهکارهای اصلاحی

۶-۷-۶- بررسی ضرورت بازنگری در طراحی پل و آبگذر در صورت تغییر مورفولوژی و شرایط جدید تعادل دینامیکی رودخانه و یا بعد از رخداد سیلاب آسیب‌رسان

۶-۷-۷- پایش حفظ پیوستگی طولی و عرضی محیط‌زیستی رودخانه، ارزیابی کارایی آن و راهکارهای اصلاحی بعد از اجرای پل وآبگذر

۶-۷-۸- تهیه و ارائه دستورالعمل دوره بهره‌برداری و نگهداری آبراهه، پل و آبگذر

پیوست ۱

ضوابط، قوانین و آیین‌نامه‌ها و منابع مطالعات مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها

مجموعه ضابطه‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنماهای مرتبط با موضوعات مورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی آبراهه‌ها برای مراحل مطالعه، طراحی و اجرای پل‌ها و آبگذرها در جدول (پ.۱-۱) معرفی شده ا ست. در این جدول، ردیف‌های ۱ تا ۲۱ مربوط به منابع فارسی و ردیف‌های ۲۲ تا ۴۴ از منابع علمی- فنی انگلیسی می‌باشد.

جدول پ.۱-۱- فهرست منابع منتخب برای مطالعات مورفوهیدرولیکی رودخانه در طرح پل‌ها و آبگذرها

شماره	عنوان	سال	مرجع تهیه	زبان	پل / آبگذر	شرح و کاربرد
۱	فهرست مطالب مطالعات پل‌ها	۱۳۸۸	معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	با هدف یکسان‌سازی مطالعات و ایجاد وحدت رویه در مطالعات پل، نحوه تهیه آلبوم نقشه‌های اجرایی و مطالعات تکمیلی، اجرایی و برآورد پل تدوین شده است.
۲	شناسنامه فنی پل‌ها	۱۳۸۶	سازمان برنامه و بودجه کشور معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	این نشریه به منظور همسان‌سازی ارزیابی و رتبه‌بندی وضعیت پل‌های مختلف از دیدگاه آسیب‌پذیری تحت تاثیر عوامل متفاوت، تدوین برنامه‌های بهره‌برداری، نگهداری، سطوح بازرسی فنی، شیوه‌های پایش و همچنین برنامه‌های مطالعاتی و عملیاتی برای ایمن‌سازی، تهیه شده است.
۳	آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها	۱۳۷۹	دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه کشور	فارسی	پل	این نشریه به مبانی بارگذاری پایه‌های پل‌های راه و راه‌آهن (بارهای دائمی، بارهای بهره‌برداری، اثر باد، دما، جریان آب، غوطه‌وری، نشست پایه‌ها و غیره) پرداخته است.
۴	راهنمای مطالعات هیدرولیکی پل‌ها (نشریه ۳۸۷)	۱۳۹۴	سازمان برنامه و بودجه کشور مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	در این راهنما گام‌های مطالعات و ضوابط مهندسی در طراحی هیدرولیکی پل‌ها (محاسبه بده، فراآب، تراز سطح آب پایین‌دست پل، نیروهای وارده بر پایه پل‌ها و غیره) می‌پردازد.
۵	دستورالعمل مطالعات هیدرولیکی و آبشستگی پل (نشریه ۳۰۲)	۱۳۸۴	سازمان برنامه و بودجه کشور معاونت معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	در این دستورالعمل، به مطالعات هیدرولیکی پل‌ها، شامل آبشستگی می‌پردازد.
۶	راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی (نشریه۵۴۹)	۱۳۹۰	سازمان برنامه و بودجه کشور طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور	فارسی	پل	این راهنما برای تخمین آبشستگی موضعی تدوین گردیده است. در این نشریه به انواع آبشستگی، مبانی فرسایش و رسوب در رودخانه، تخمین عمق آبشستگی و غیره پرداخته شده است. بخشی از این راهنما نیز به آبشستگی اطراف پایه پل‌ها اختصاص داده شده است.
۷	راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل (نشریه ۲۶۰)	۱۳۸۱	سازمان برنامه و بودجه کشور طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور	فارسی	پل	در این راهنما، مبانی و انواع مختلف فرسایش در محدوده پایه‌های پل و عوامل موثر در وقوع فرسایش‌های بازه‌ای و موضعی بررسی گردیده است. روش‌های مختلف تعیین عمق آبشستگی، همراه با روش‌های کنترل آبشستگی ارائه شده است.
۸	ضوابط طراحی هیدرولیکی سیفون‌ها و آبگذر زیر جاده (نشریه	۱۳۸۴	سازمان برنامه و بودجه کشور طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور	فارسی	آبگذر	در بخش دوم این راهنما، ضوابط طراحی هیدرولیکی آبگذر زیر جاده ارائه شده است.

	(۳۲۱					
۹	راهنمای تعیین دوره بازگشت سیلاب طراحی برای کارهای مهندسی رودخانه (نشریه ۳۱۶)	۱۳۸۴	سازمان برنامه و بودجه کشور طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور	فارسی	پل	روش انتخاب دوره بازگشت سیلاب طراحی و ملاحظات مربوطه برای پروژه‌های مهندسی رودخانه از جمله طراحی پل‌ها معرفی شده است.
۱۰	نقشه‌های همسان پل‌ها و عرشه پل‌های راه‌آهن دهانه ۱۰ تا ۲۵ متر (نشریه ۲۹۵)	۱۳۸۶	سازمان برنامه و بودجه کشور	فارسی	پل	این نشریه، به همسان‌سازی تهیه نقشه‌های پل توسط پیمانکاران و به تبع آن کاهش هزینه‌ها، کمک به کارفرمایان در بررسی و تصویب پرداخته، و جهت استفاده در پل‌های رودخانه‌ای و غیر رودخانه‌ای کاربرد دارد.
۱۱	شرح خدمات همسان مطالعات طرح‌های بهسازی راه (نشریه ۴۱۲)	۱۳۸۹	سازمان برنامه و بودجه کشور	فارسی	پل	در این راهنما به شرح خدمات مطالعات بهسازی راه‌ها پرداخته شده است. با توجه به نیاز کارفرما برای دستیابی به بهترین گزینه، شرح خدمات مراحل مختلف راه‌های اصلی، بزرگراه‌ها، آزاد راه‌ها، تقاطع‌ها، پل‌ها (رودخانه‌ای و غیر رودخانه‌ای)، تونل‌ها و شرح خدمات مطالعات احداث راه‌آهن، پوشش داده شده است.
۱۲	آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران (نشریه ۴۱۵)	۱۳۹۱	سازمان برنامه و بودجه کشور	فارسی	پل و آبگذر	هدایت بده سیلاب (رواناب سطحی) از یک طرف حریم راه به طرف دیگر، نیازمند ساخت ابنیه فنی مناسب مانند پل‌ها و آبروها است، از این‌رو در بخشی از این راهنما به مطالعات و طراحی هیدرولیکی پل‌ها و آبروها پرداخته شده است
۱۳	آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله (نشریه ۴۶۳)	۱۳۸۷	سازمان برنامه و بودجه کشور معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری دفتر مطالعات فناوری و ایمنی، وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	نشریه شماره ۴۶۳، برای طراحی و اجرای پل‌های رودخانه‌ای و غیر رودخانه‌ای از نوع فولادی، بتن مسلح، مختلط و بتن پیش‌تنیده به کار می‌رود. پل‌هایی که پایه‌های آن‌ها با بتن بدون آرماتور یا با مصالح بنایی ساخته می‌شوند، مشمول این آیین‌نامه نمی‌شوند. همچنین پل‌های آبرو مدفون در خاک، معمولا نیاز به محاسبه خاصی برای زلزله ندارند.
۱۴	راهنمای بهسازی لرزه‌ای پل‌ها (نشریه ۵۱۱)	۱۳۹۰	سازمان برنامه و بودجه کشور	فارسی	پل	این نشریه شامل کنترل پل‌های رودخانه‌ای و غیر رودخانه‌ای در شرایط لرزه می‌باشد.
۱۵	راهنمای برداشت مصالح رودخانه‌ای (نشریه ۳۳۶)	۱۳۸۴	سازمان برنامه و بودجه کشور طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور	فارسی	رودخانه و پل	این راهنما با هدف ضابطه‌مندکردن برداشت شن و ماسه از رودخانه، و برای جهت‌دهی روند شناسایی، برنامه‌ریزی، انجام عملیات و خاتمه کار در محل برداشت مصالح طراحی شده است.
۱۶	راهنمای پیشگیری و تعمیر خرابی‌های ناشی از آبشستگی در پل‌ها (کتاب)	۱۳۹۶	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	در این کتاب، مکانیسم آبشستگی در کوله و پایه پل تشریح گردیده و پل‌ها از نظر حساسیت در برابر انواع آبشستگی دسته بندی گردیده‌اند. برای همسان برآورد آبشستگی، مدل برآورد مخاطره آبشستگی و روش غربالگری اولیه ارائه شده است. روش‌های پیشگیری، و مرمت در برابر آبشستگی تشریح گردیده است. ملاحظات لازم در زمینه بازرسی و نگهداری دورهای پل‌ها بیان شده است.
۱۷	مدیریت پل (ترجمه کتاب)	۱۳۸۵	معاونت آموزش تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و	فارسی	پل	این کتاب به مدیریت ساخت و اجرا و نگهداری پل‌ها می‌پردازد.

			شهرسازی			
۱۸	راهنمای پهنه‌بندی سیل و تعیین حد بستر و حریم رودخانه (نشریه ۳۰۷)	۱۳۸۴	سازمان برنامه و بودجه کشور طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور	فارسی	رودخانه	این راهنما به روش‌های مطالعه پهنه‌بندی سیل و تعیین حد بستر و حریم رودخانه، همچنین به ملاحظات مربوط به جانمایی سازه‌های رودخانه‌ای می‌پردازد.
۱۹	تعمیر و مقاوم سازی زیرسازه پل‌ها (ترجمه کتاب)	۱۳۹۱	دفتر مطالعات فناوری و ایمنی وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	ترجمه نشریه تعمیر و مقاوم سازی پل‌ها است.
۲۰	ارائه ضوابط طراحی پل‌های راه و راه‌آهن با توجه به اثرات رواناب‌ها، آبشستگی و دیگر مسائل هیدرولیکی و زمین‌شناسی	۱۳۸۱	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی وزارت راه و شهرسازی	فارسی	پل	این راهنما به ضوابط طراحی پل‌های راه و راه‌آهن با توجه به اثرات رواناب‌ها، آبشستگی و دیگر مسائل هیدرولیکی و زمین‌شناسی می‌پردازد.
۲۱	نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل	۱۳۸۲	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر	فارسی	پل	این کتاب به روش¬های ساده و کاربردی در طراحی هیدرولیک پل با ملاحظات ریخت¬شناسی پرداخته، و مثال¬های متعددی از تخریب پل¬ها را ارائه می¬نماید
۲۲	راهنمای آبروها (شماره ۳-۱)	۱۴۰۰	انجمن مالکین جنگل‌ها، انجمن صنایع جنگل‌ها انجمن پیمانکاران صنعتی نیوزلند	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل نکات طراحی و تعیین مکان مناسب برای نصب آبگذرهای چند مجرایی دایره‌ای و مستطیلی با اندازه‌های متفاوت در جریان‌های با عمق کم است، که در زمان سیلاب امکان جریان روگذری را دارند.
۲۳	راهنمای آبروها (شماره ۳-۲)	۱۴۰۰	انجمن مالکین جنگل‌ها، انجمن صنایع جنگل‌ها انجمن پیمانکاران صنعتی نیوزلند	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل نکات طراحی و تعیین مکان مناسب برای نصب آبگذرهای چند مجرایی U شکل با بستر طبیعی و آبگذرهای بتنی مستطیلی پیش ساخته در جریان‌های با عمق کم است که در زمان سیلاب امکان جریان روگذری را فراهم می‌کند.
۲۴	راهنمای آبروها (شماره ۳-۳)	۱۴۰۰	انجمن مالکین جنگل‌ها، انجمن صنایع جنگل‌ها انجمن پیمانکاران صنعتی نیوزلند	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل نکات طراحی و تعیین مکان مناسب برای بسترهای بتنی، شنی و آبگذرهای کوچک در جاده‌های کم تردد است. این سازه‌ها برای جلوگیری از انتقال رسوبات رودخانه‌ای در اثر عبور و مرور وسایل نقلیه احداث می‌شوند.
۲۵	راهنمای آبروها (شماره ۳-۴)	۱۴۰۰	انجمن مالکین جنگل‌ها، انجمن صنایع جنگل‌ها انجمن پیمانکاران صنعتی نیوزلند	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل نکات طراحی و تعیین مکان مناسب برای نصب آبگذرهای تک مجرایی است.
۲۶	راهنمای آبروها (شماره ۳-۵)	۱۴۰۰	انجمن مالکین جنگل‌ها، انجمن صنایع جنگل‌ها انجمن پیمانکاران صنعتی نیوزلند	انگلیسی	پل	این راهنما شامل نکات طراحی و تعیین مکان مناسب برای نصب پل‌های تک دهنه است.
۲۷	راهنمای آبروها (شماره ۳-۶)	۱۴۰۰	انجمن مالکین جنگل‌ها، انجمن صنایع جنگل‌ها انجمن پیمانکاران صنعتی نیوزلند	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل نکات طراحی و تعیین مکان مناسب برای نصب آبگذرها و پل‌ها برای منحرف کردن جریان به صورت موقت است.

۲۸	راهنمای کنترل فرسایش و رسوب آبگذرها	۱۴۰۰	انجمن مالکین جنگل‌ها، انجمن صنایع جنگل‌ها انجمن پیمانکاران صنعتی نیوزلند	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل توصیه‌های طراحی و ساخت آبگذرها به منظور کاهش ریسک فرسایش و کنترل رسوب است.
۲۹	راهنمای آبگذرها و گذرگاه‌های ماهی موقت	۱۴۰۰	گروه مشاوره‌ای گذرگاه ماهی بخش مطالعات فنی دولت نیوزلند	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل توصیه‌های ساخت و جاگذاری آبگذرها و گذرگاه‌های ماهی مناسب در مواقع اضطراری و معرفی موارد نامطلوب این سازه‌ها است.
۳۰	راهنمای طراحی آبگذرها	۱۳۹۳	اداره آبزیان و حیات وحش واشنگتن دفتر راهنماهای زیستآبی ایالتی واشنگتن	انگلیسی	آبگذر	این راهنما به تفصیل به مراحل طراحی و ساخت آبگذرها بر اساس اطلاعات ژئو مورفولوژیک می‌پردازد.
۳۱	انسداد در سازه‌های هیدرولیکی	۱۳۹۴	اداره بارش و رواناب استرالیا	انگلیسی	آبگذر و پل	این راهنما شامل توصیه‌هایی برای مراحل و ساخت سازه‌های هیدورلیکی برای کاهش مشکلات ناشی از انسداد در زمان سیل و خطرات و مشکلات ناشی از آن است.
۳۲	راهنمای طراحی و بهره‌برداری آبگذر	۱۳۹۱	انجمن تحقیقات و اطلاع رسانی صنعت ساختمان لندن	انگلیسی	آبگذر	این راهنما برای طراحی ژئوموفولوژیک و هیدرولوژیک آبگذر، ملاحظات محیط زیستی و ساخت آبگذر ارائه شده‌است. همچنین شامل دستوالعمل بهره‌برداری و نگهداری آبگذر است.
۳۳	تغییرات اقلیمی و تغییر سایز طراحی آبگذرها در نروژ	۱۳۹۶	مرکز مطالعات حمل و نقل نروژ	انگلیسی	آبگذر	این راهنما شامل توصیه‌های طراحی آبگذر با درنظر گرفتن عوامل تغییرات اقلیمی است.
۳۴	راهنمای زهکشی جاده: طراحی آبگذر	۱۳۹۴	اداره حمل و نقل جاده‌های اصلی کوییزلند، استرالیا	انگلیسی	آبگذر	این راهنما برای طراحی هیدرولیکی و کاربردی با ملاحظات محیط زیستی آبگذر ارائه شده است.
۳۵	گزارش فنی انتقال رسوب در آبگذر	۱۳۹۴	اداره حمل و نقل مینسوتا، آمریکا مرکز مطالعه و تحقیق، دفتر مدیریت سیستم‌های حمل و نقل	انگلیسی	آبگذر	این گزارش شامل نتایج مطالعات آزمایشگاهی انتقال رسوب در آبگذر با ملاحظات ژئومورفولوژیکی و زیست محیطی است. روش‌های طراحی متناسب با شرایط طبیعی محل قرار گیری آبگذر ارائه شده‌است.
۳۶	گزارش فنی خرابی آبگذرها: ملاحظات فنی و اقتصادی	۱۳۹۳	شرکت تخصصی تنبوش آمریکا	انگلیسی	آبگذر	این گزارش شامل بررسی علل و چگونگی خرابی آبگذرها است. همچنین هزینه‌های نگهداری و جایگزینی آبگذر در صورت عدم نگهداری اصولی در این گزارش ارائه شده است.
۳۷	راهنمای فناوری پل قسمت ۸: طراحی هیدرولیک سازه‌های آبراه	۱۳۹۸	طرح توسعه و تجهیز ملی خدمات جنگل‌داری وزارت کشاورزی آمریکا	انگلیسی	پل و آبگذر	این راهنما شامل روش‌های انتخاب سیلاب طرح، سازه متقاطع و روش‌های مناسب حفاظت از سازه است.
۳۸	برگشت آب در پل‌ها و آبگذرها: بررسی دانش و عملکرد فعلی	۱۳۸۲	گزارش فنی سازمان محیط زیست بریستول، بریتانیا	انگلیسی	پل و آبگذر	این راهنما به بررسی پدیده برگشت آب در بالادست سازه‌های متقاطع و مدیریت آن می‌پردازد.
۳۹	راهنمای مدیریت انسداد	۱۳۹۹	گزارش فنی سازمان محیط زیست بریستول، بریتانیا	انگلیسی	پل و آبگذر	این راهنما مشکل انسداد در سازه‌ها را بررسی کرده و برای مدیریت این مشکل در مناطق مختلف با پتانسیل متفاوت انسداد در سازه‌ها راه‌حل‌هایی ارائه می‌کند.
۴۰	سازه‌های کنترل	۱۳۸۴	انجمن مهندسین هیدرولیک ارتش	انگلیسی	پل و	این راهنما شامل راه‌حل‌های سازه‌ای برای کاهش مواد معلق

	انسداد: ارزیابی و اقدامات متقابل		آمریکا وزارت حمل و نقل و بزرگراه‌های آمریکا		آبگذر	از جمله بقایای گیاهی و رسوبات برای کاهش احتمال انسداد در سازه‌های متقاطع رودخانه از جمله آبگذر و پل است.
۴۱	رهنمودهایی در مورد پل‌های رودخانه، آبگذرها و سایر سازه‌های متقاطع رودخانه	۱۴۰۱	وزارت حمل و نقل و بزرگراه‌های آمریکا	انگلیسی	پل و آبگذر	این راهنما شامل توصیه‌هایی برای کاهش خسارت‌های وارده از سیل به سازه‌های متقاطع و مناطق اطراف این سازه‌ها است. این راهنما بر اساس طراحی مورفولوژیک سازه‌ها ارئه شده‌است.
۴۲	استانداردهای فنی و دستورالعمل‌های برنامه‌ریزی و طراحی: کنترل سیل	۱۳۸۱	وزارت فعالیت‌های عمومی و بزرگراه‌ها آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن	انگلیسی	پل و آبگذر	این راهنما برای هماهنگی در روند طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های متقاطع و کنترل سیلاب به منظور کاهش خسارت ناشی از سیل ارائه شده است. این برنامه مدون شامل مراحل مطالعات، راخی و ساخت این سازه‌ها است.
۴۳	مهندسی در محیط آبی: راهنمای عمکرد مناسب عبور از رودخانه	۱۳۹۰	سازمان حفاظت از محیط زیست اسکاتلند	انگلیسی	پل و آبگذر	این راهنما شامل دستورالعمل‌های طرای و اجرا برای سازه‌های متقاطع با حداقل میزان تغییر در مسیر طبیعی جریان و تاثیر در محیط زیست رودخانه است.
۴۴	آبگذرهای کم عمق: ملاحظات طراحی ژئومورفیک، بیولوژیکی و مهندسی.	۱۳۸۵	طرح توسعه و تجهیز ملی خدمات جنگل‌داری وزارت کشاورزی آمریکا	انگلیسی	آبگذر	این راهنما برای طراحی، ساخت و مکانیابی آبگذرهای کم عمق ارائه شده است. سازه‌های مورد نظر در شرایط جریان روگذری، مواد معلق و لایه‌های یخ را با کم‌ترین خسارت و تاثیر در محیط عبور می‌دهند.

پیوست ۲

آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران

هرساله و با رخداد سیلاب‌های کوچک و یا بزرگ، تعدادی از پل‌ها و آبگذرها که در بستر، حریم و یا پهنه سیلابی رودخانه احداث شده‌اند، تخریب یا آسیب جدی دیده‌اند که منجر به قطع راه ارتباطی، انسداد نسبی جریان و کاهش آبگذری پل، انتقال قطعات آسیب دیده پل به پایین‌دست و تغییرات رودخانه‌ای شده که باعث تشدید خسارات در مناطق دیگر (در پایین‌دست و حتی در بالادست) نیز می‌گردد.

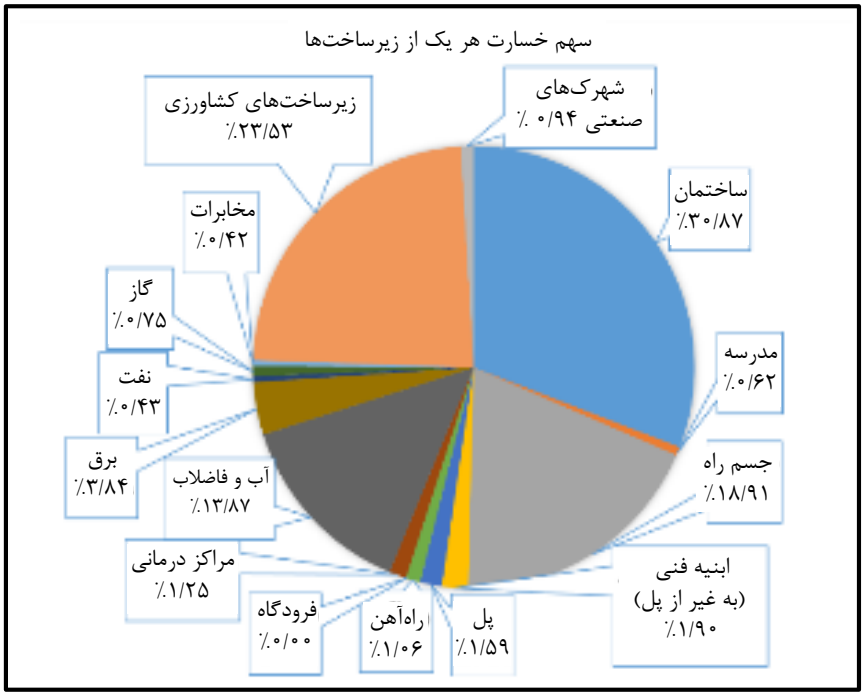
براساس گزارش رسمی وزارت راه و شهرسازی به هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸ [۳۷]، در جریان سیل فراگیر سال ۱۳۹۸به حدود ۱۰۷۵۰ کیلومتر از جاده‌های کشور خسارت وارد شد که از این مقدار بیش از ۷۷۹۱ کیلومتر راه‌های روستایی و فرعی بودند. این سیلاب‌ها در مجموع به حدود ۴۴۱۴ دستگاه ابنیه فنی شامل پل، آبگذر، آبنما، تونل و زیرگذر نیز خسارت وارد کرد. عمده ابنیه فنی آسیب دیده، آبگذر و آبنما و بیش‌ترین خسارت به راه‌های روستایی بود. زیرساخت‌های ریلی کشور هم از سیل در امان نبودند و در میان آن‌ها راه‌آهن جنوب در خوزستان بیش‌ترین خسارت را متحمل گردید. با توجه به مجموعه اطلاعات موجود، تعداد پل‌های آسیب دیده حدود ۵۸۱ دستگاه بوده و میزان خسارات وارده به پل‌ها ۲۶۷۳ میلیارد ریال (سال ۱۳۹۸) برآورد شده است. همچنین با توجه به گزارش رسمی وزارت نفت، ۷۲۶ میلیارد ریال خسارت به زیرساخت‌های وزارت نفت (شامل خطوط لوله فرآورده و نفت خام، خطوط انتقال، مسیرها و پل‌های دسترسی در مناطق نفتی مختلف) وارد شد. میزان خسارت وارد بر زیرساخت‌های کشور در جدول (پ.۲-۱) و سهم خسارت برای هر یک از زیرساخت‌های کشور و در استان‌های مختلف در سیلاب ۱۳۹۸، به‌ترتیب در شکل‌های (پ.۲-۱) و (پ.۲-۲) ارائه شده است (گزارش جامع هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸). براساس پایش وزارت نیرو در سال ۱۳۹۸، تعداد ۵۸۰۰ پل کشور فاقد آبگذری لازم برای سیلاب بوده است (شکل پ.۲-۳).

براساس گزارش هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸ [۳۷]، علت آسیب های سیل به پل‌ها و آبگذرهای کشور، به تفکیک برای سه مرحله (مطالعات و طراحی، اجرا و نظارت و پایش و نگهداری)، به‌ترتیب در جدول‌های (پ.۲-۲)، (پ.۲-۳) و (پ.۲-۴) جمع‌بندی و خلاصه شده است.

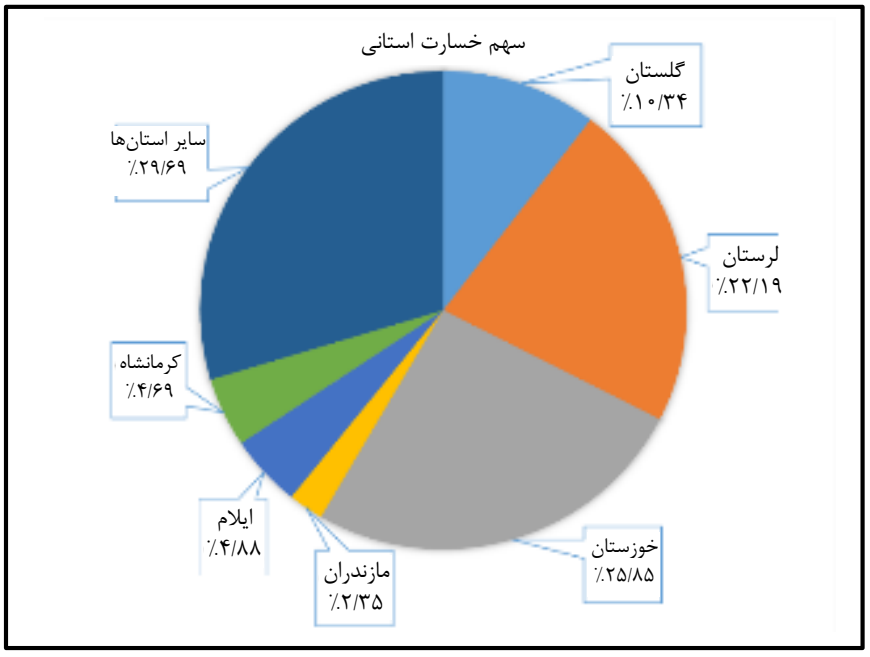
از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه، محورهای اصلی و فرعی آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران همراه با شواهد تصویری و مستند در جدول (پ.۲-۵) ارائه شده است.

جدول پ.۲-۱- میزان خسارت وارد بر زیرساخت‌های کشور در سیل فراگیر اسفند ۱۳۹۷ و فروردین ۱۳۹۸ (گزارش جامع هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸) [۳۷]

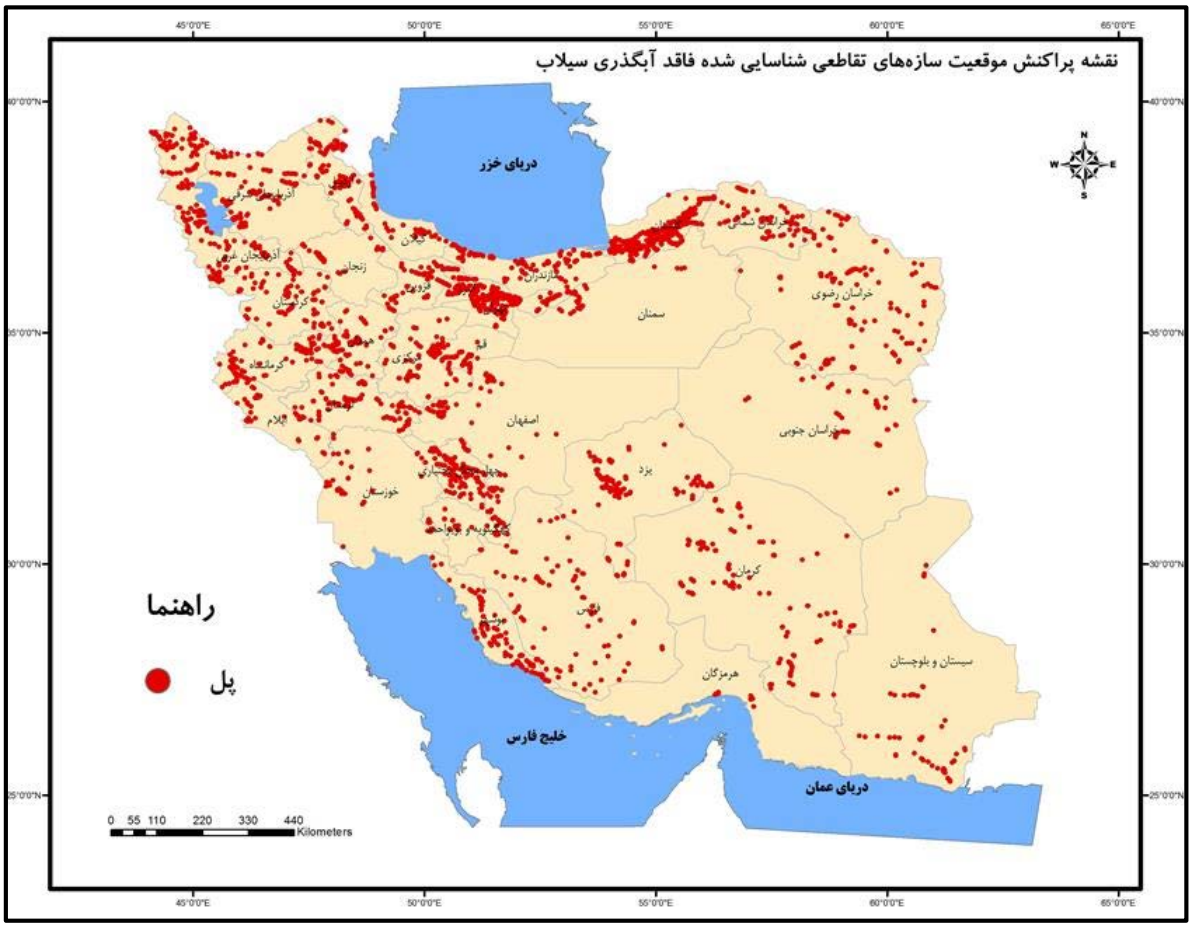
نوع زیرساخت	میزان خسارت (میلیارد ریال)							
	گلستان	لرستان	خوزستان	مازندران	ایلام	کرمانشاه	سایر استان‌ها	مجموع
راه	۲۲۷۲/۱۰	۷۶۷۰/۰۰	۵۲۴۴/۱۹	۱۱۶۴/۰۰	۳۰۳۰/۳۰	۱۳۵۴/۷۷	۱۱۰۲۰/۱۰	۳۱۷۵۵
راه‌آهن	---	---	۱۶۵۳/۲۰	---	---	---	۱۳۳/۸۰	۱۷۸۷
پل	۵۴/۷۱	۱۵۳۰/۰۰	۷۱/۴۰	۱۹۸/۷۰	۱۳۵/۰۰	---	۶۸۳/۲۴	۲۶۷۳



شکل پ.۲-۱- سهم خسارت زیرساخت‌های کشور در سیلاب ۱۳۹۸ (گزارش هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸)



شکل پ.۲-۲- سهم خسارت استان‌های کشور در سیلاب ۱۳۹۸ (گزارش هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸)



شکل پ.۲-۳- نقشه پراکنش پل‌های فاقد آبگذری لازم برای سیلاب در ایران (دفتر مهندسی رودخانه و سواحل وزارت نیرو، ۱۳۹۸)

جدول پ.۲-۲- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای کشور در برابر سیل- مرحله مطالعات و طراحی (گزارش هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸) [۳۷]

شماره	موارد آسیب‌پذیری در مرحله مطالعات و طراحی
۱	عدم توجه کافی به علم مهندسی رودخانه در جانمایی و طرح هندسی راه و پل‌ها آبگذرها و آبنماها
۲	مطالعه ناکافی برای جانمایی و راستای قرارگیری پل‌ها، عبور جاده و یا خط راه‌آهن از روی رودخانه‌ها و تعیین ارتفاع مناسب پل‌ها
۳	عدم انجام مطالعات کامل و درست در طراحی پروژه‌های راه، راه‌آهن و فرودگاه در خصوص مسائل آبگذری و سیلاب
۴	عدم نظارت و کنترل مناسب کارفرما بر روند مطالعات و انحراف برخی شرکت‌های مهندسان مشاور از بکارگیری ساز و کارها و ضوابط و معیارهای فنی و مهندسی
۵	مداخلات کارفرمایی در جهت عدول از ضوابط و معیارهای فنی به منظور دست‌یابی به پروژه ارزان‌تر یا اتمام سریع‌تر آن به‌خصوص در پروژه‌های کوچک (و یا بخش‌های کوچک شده از پروژه‌های بزرگ) و کاهش غیر اصولی و بدون ضابطه تعداد آبگذرها در طراحی راه‌ها و یا تغییر ابعاد دهانه‌ها و تراز پل‌ها بدون رعایت معیارهای طراحی هیدرولیکی، نمونه‌هایی از مداخلات کارفرمایی ه ستند که م ستقیما تاثیر منفی در تاب‌آوری این زیرساخت‌ها در برابر سیل‌های بزرگ دارد.
۶	ارتباط ضعیف و در برخی موارد عدم وجود ارتباط بین دستگاه‌های کارفرمایی یا مشاوران طرح‌ها با وزارت نیرو در خصوص رعایت حد بستر و حریم رودخانه‌ها و پهنه‌بندی خطر سیل که باید الزام قانونی و آیین‌نامه‌ای بیش‌تری برای هماهنگی داشته باشند.
۷	کم بودن عرض دهانه پل‌ها نسبت به عرض رودخانه و ارتفاع کم عرشه پل‌ها
۸	جانمایی نامناسب پل‌ها و آبنماها در محورهای روستایی
۹	مطالعه ناکافی برای نوع پی و طراحی صحیح عمق آن براساس معیارهای سازه‌ای و ژئوتکنیکی، با درنظر گرفتن مساله آبشستگی
۱۰	عدم طراحی و یا طراحی نادرست اجزای روسازه و زیرسازه و تکیه‌گاهی برای سیل طرح و سیل محتمل بزرگ‌تر

ادامه جدول پ.۲-۲- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای کشور در برابر سیل- مرحله مطالعات و طراحی (گزارش هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸)

شماره	موارد آسیب‌پذیری در مرحله مطالعات و طراحی
۱۱	عدم توجه به تجربه پیشینیان در مکان‌یابی، جانمایی و طرح هندسی پل‌های تاریخی و ماندگار. به طور مثال در پل‌های تاریخی لرستان، ارتفاع این پل‌ها از سطح رودخانه به مراتب بیش‌تر از پل‌های جدید است که نشانه توجه به تغییر سطح آب در هنگام سیلاب بوده است. گاه طول این پل‌ها در یک مقطع خاص سه برابر پل‌های زمان حاضر هستند. طول بیش‌تر نشانه توجه به تغییرات عرض رودخانه در هنگام سیل بوده است. همچنین فرم قوسی پل فضای آزاد برای عبور اجسام شناور را در جریان سیلابی می‌دهد. تحلیل پایه‌های پل تاریخی آق قلا بر روی گرگانرود نشان داد که طراحان گذشته به جزییات فرم مناسب برای شرایط بحرانی توجه داشته‌اند و با طراحی آیرودینامیک به رسوبگذاری حداقلی و همچنین هدایت جریان سیل دست یافته‌اند. این درحالی است که پل‌های معاصر در بسیاری از موارد فاقد چنین جزییاتی است.
۱۲	عدم کفایت آبگذری پل که موجب پس‌زدگی جریان به بالادست و سرازیر رواناب به منطقه گردید.
۱۳	عمق آزاد برای طراحی تراز عرشه کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. مثلا در آیین‌نامه ۴۱۵، عمق آزاد برابر ۶۰ سانتی متر در نظرگرفته شده است درصورتی‌که این مقدار به نوع پوشش گیاهی منطقه بستگی دارد.
۱۴	کمبود ظرفیت عبور آبگذر، مکان‌یابی نامناسب و یا عدم کارایی آبگذر در عبور جریان
۱۵	عدم پیش‌بینی روگذری از پل برای سیلاب‌های شدید
۱۶	عدم پیش‌بینی بار و تاثیر اجسام شناور بر سازه پل‌ها
۱۷	در مناطق کوهستانی و دره‌های تنگ، احداث جاده با ایجاد ترانشه و ریختن خاک آن در بستر رودخانه و عدم اجرای سازه‌های حفاظتی منجر به کاهش عرض رودخانه، افزایش سرعت و عمق سیلاب و در نتیجه فرسایش پاشنه خاکریز و تخریب آن و خود جاده می‌شود. از جمله می‌توان به جاده خرم آباد به پل‌دختر که در سیلاب ۱۳۹۸ به طول بیش از ۶۰ کیلومتر تخریب شد، اشاره کرد.
۱۸	در مناطق جلگه‌ای (مانند دشت خوزستان و گرگان)، معمولا جاده‌ها در چنین شرایطی در ترازهای بالای سطح آب قرار گرفته و درصورتی‌که در بستر و پهنه سیلابدشت رودخانه نباشند، تاثیری بر شرایط سیلابی ندارند. با این وجود می‌توانند نقش مخربی در تخریب رودخانه داشته باشند که عمدتا ناشی از عدم طراحی مناسب کالورت‌های زیر جاده و رهاسازی بدون پوشش آن‌ها به سمت رودخانه است که منجر به فرسایش پسرونده، تخریب خود سازه و ساحل رودخانه می‌شوند. در سیلاب ۱۳۹۸، در استان خوزستان، اجرای سطح ریل دوم اهواز- اندیمشک با ارتفاع کم باعث آبگذری از روی ریل و تخریب آن به طول ۱۲ کیلومتر شده است. در دشت گرگان نیز ساخت راه و راه‌آهن در تراز پایین و با تعداد کم آبگذرها عامل تشدید خسارت سیل بودند.
۱۹	ناکافی بودن تعداد آبگذرها در راه و راه‌آهن‌های احداثی در سیلابدشت رودخانه که در حین سیلاب، منجر به عملیات انفجاری و تخریب راه برای آبگذری گردید. به طور مثال تعداد ۱۰ تخریب و عرض بین ۱۰ و ۲۰ متر بر روی جاده‌ی گمیشان- خواجه نفس، استان گلستان
۲۰	جانمایی نا صحیح پل در پیچ رودخانه و یا با راستای مایل نسبت به جریان باعث می شود شرایط لازم برای رسوبگذاری در یک سمت (پیچ داخلی) و فرسایش در سمت دیگر (پیچ خارجی) فراهم شود در نتیجه از ظرفیت عبور جریان در دهانه‌های پل واقع در سمت پیچ داخلی، به دلیل رسوبگذاری، کاسته و یا حتی در زمان‌های غیر سیلابی آبی عبور نمی‌دهند در نتیجه در شرایط غیرسیلابی کل جریان از دهانه‌های واقع در پیچ خارجی حرکت کرده و باعث فرسایش و گودشدن بستر رودخانه در محل کوله پل و تخریب آن شود. ضمن این‌که در این شرایط پایه‌های پل نیز در معرض آبشستگی شدید قرارگرفته و تخریب می‌شوند. در سیل اخیر طراحی نامناسب پل آخوندآباد در شهر گنبد و رسوبگذاری در یک سمت رودخانه، منجر به کاهش ظرفیت عبور بده و در نتیجه بالاآمدن تراز سطح آب در بالادست پل و پخش سیلاب شده بود.
۲۱	عدم در نظر گرفتن سیلاب با دوره بازگشت مناسب در طراحی پل. همچنین در سیلاب طراحی پل‌ها تجدید نظر شود و علاوه بر سیلاب طراحی، یک سیلاب بزرگ‌تر به عنوان سیلاب کنترل نیز برای پل‌ها تعیین شود که در آن بنا بر اهمیت و موقعیت قرارگیری پل اگر تخریبی صورت می‌گیرد پل فرو نریزد، در صورت روگذری عرشه مقاومت کند و یا در اثر تعریض رودخانه یکی از شانه‌ها به صورت فیوز پلاگ عمل کرده و آب را عبور دهد.
۲۲	عدم توجه به موضوع آبشستگی پایه‌های پل، کوله‌ها و حفاظت اطراف و زیر آبگذرها. عدم استقرار و حفاظت مناسب پی‌های دیوارهایی که در مجاورت رودخانه بوده و در اثر آبشستگی پی و افت بستر رودخانه در محل قرارگیری دیوار، دچار واژگونی و تخریب می‌گردند. ضرورت توجه به استقرار محل اتکای پی پایه‌ها و کوله‌ها درعمقی پایین‌تر از عمق آبشستگی و یا طراحی گزینه مناسب برای کاهش عمق حفاظت آبشستگی
۲۳	عدم طراحی دیوارهای هدایت مناسب در بالادست پل به‌خصوص ناکافی بودن طول دستک‌های پل‌های روستایی
۲۴	عدم وجود دیواره‌های هدایت جانبی مناسب در ورودی آبروها باعث تخریب راه در اثر نفوذ جریان به خاکریزهای راه و تخریب آن گردیده است.
۲۵	بی‌توجهی به طرح سازه‌های مناسب تثبیت بستر رودخانه در محل پل و آبگذر و یا عدم طراحی مناسب هیدرولیکی و سازه‌ای آن‌ها
۲۶	فقدان هماهنگی با سازمان‌های نظارتی و محیط‌زیستی برای رعایت ضوابط محیط‌زیستی در مرحله طراحی سازه‌های تقاطعی و طراحی گزینه‌های طبیعی- سازه‌ای برای حفاظت از پیوستگی طولی و عرضی سامانه حیاتی رودخانه (جهت عبور ماهی و زیستگاه حیات وحش)
۲۷	اگر لایروبی به مفهوم افزایش ظرفیت و عمق رودخانه در بازه‌های طولانی مورد نظر قرار گیرد، نیازمند انجام مطالعات دقیق مهندسی رودخانه و عملیات حساب شده می‌باشد.
۲۸	بی‌توجهی به آسیب شناسی و همانند سازی (باز سازی) زیر ساخت ها (پل، راه، ریل و غیره)، با توجه به تغییرات رودخانه در عرض و راستا در سیلاب رخداده

جدول پ.۲-۳- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای کشور در برابر سیل- مرحله اجرا و نظارت (گزارش هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸) [۳۷]

شماره	موارد آسیب‌پذیری در مرحله اجرا و نظارت
۱	اجرای فنی ضعیف سازه‌های تقاطعی
۲	نبود نظارت قوی از طرف مشاور و کارفرما در حین اجرا
۳	نبود نظارت بر کیفیت مواد و مصالح مصرفی در ساخت و ساز
۴	عدم ا ستقرار و حفاظت منا سب پی دیوارهایی که در مجاورت رودخانه بوده و در اثر آ ب ش ستگی پی و افت ب ستر رودخانه در محل قرارگیری دیوار، دچار واژگونی و تخریب می‌گردند.
۵	نبود دیواره‌های هدایت جانبی مناسب در ورودی آبروها باعث تخریب راه در اثر نفوذ جریان به خاکریزهای راه و تخریب آن گردیده است.
۶	رهایی اجرای سازه‌های مناسب تثبیت بستر رودخانه در محل پل و آبگذر
۷	استفاده از نخاله و خاک در میان سازه‌های اسکلتی پل‌ها
۸	ناکافی بودن تعداد آبگذرها در راه و راه‌آهن‌های احداثی در سیلابدشت رودخانه که در حین سیلاب منجر به عملیات انفجاری و تخریب راه برای آبگذری گردید. به طور مثال تعداد ۱۰ تخریب و عرض بین ۱۰ و ۲۰ متر بر روی جاده‌ی گمیشان- خواجه نفس، استان گلستان
۹	عدم توجه به جانمایی سازه‌های پیش ساخته، موقتی و اضطراری سبب ناهنجاری در سامانه رودخانه می‌گردد و تا جایگزینی آن با سازه دائم، گاهی اثرات آن تا سال‌ها باقی مانده و یا برای سیلاب بعدی خطرآفرین می‌گردد.
۱۰	فقدان هماهنگی با سازمان‌های نظارتی و محیط‌زیستی برای رعایت ضوابط محیط زیستی در مرحله ساخت سازه‌های تقاطعی و اجرای گزینه‌های طبیعی- سازه‌ای برای حفاظت از پیوستگی طولی و عرضی سامانه حیاتی رودخانه
۱۱	نظارت بر ت سریع در برچیدن سازه‌های موقتی احداث شده در ب ستر رودخانه در مراحل بحران (پل، ای ستگاه‌های پمپاژ و غیره) و جایگزینی سریع آن با طرح‌های پایدار و تاب‌آور جهت آمادگی برای رخداد سیلاب بعدی
۱۲	بی‌توجهی به آ سیب شنا سی و همانند سازی (باز سازی) زیر ساخت‌ها (پل، راه، ریل و غیره)، با توجه به تغییرات رودخانه در عرض و را ستا در سیلاب رخداده
۱۳	تغییر مسیر رودخانه و یا تعریض آن از بالادست که سبب سرازیر شدن جریان به دشت‌های اطراف، دور زدن و تخریب کوله‌ها می‌گردد.

جدول پ.۲-۴- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای کشور در برابر سیل- مرحله پایش و نگهداری (گزارش هیات ویژه سیلاب ۱۳۹۸)

شماره	موارد آسیب‌پذیری در مرحله پایش و نگهداری
۱	نگهداری نامناسب سازه‌های تقاطعی
۲	فرسایش و رسوبگذاری در طول آبراهه به ویژه در دهانه پل‌ها مانند مسیل سعدی در شیراز
۳	در بسیاری از موارد، برداشت مصالح از پایین‌دست پل‌ها باعث ایجاد و توسعه گودال آبشستگی به سمت پایه‌های پل می‌شود.
۴	عدم لایروبی (به مفهوم پاکسازی و بهسازی مقاطع رودخانه از رسوبات، نخاله‌ها و گیاهان) و رفع موانع در محدوده پل‌ها و آبگذرها عامل انسداد و سبب عبور جریان از برخی دهانه‌های دیگر با سرعت و یا عمق بیش‌تر گردیده و موجبات آبشستگی و در برخی موارد روگذری جریان از پل را فراهم آورده است.
۵	عدم تنقیه و بازگشایی آبگذرها باعث نفوذ آب به جسم راه و نهایتا باعث شستگی خاک بستر و رانش جسم راه شده است.
۶	عدم توجه به جانمایی سازه‌های پیش ساخته، موقتی و اضطراری، سبب ناهنجاری در سامانه رودخانه می‌گردد و تا جایگزینی آن با سازه دائم، گاهی اثرات آن تا سال‌ها باقی مانده و یا برای سیلاب بعدی خطرآفرین می‌گردد.
۷	فقدان هماهنگی با سازمان‌های نظارتی و محیط‌زیستی برای رعایت ضوابط محیط‌زیستی در مرحله نگهداری و مرمت سازه‌های تقاطعی رودخانه و تداوم کارآیی روش‌های حفاظت از پیوستگی طولی و عرضی سامانه حیاتی رودخانه
۸	تعامل با دستگاه‌های دیگر جهت تسریع در برچیدن موانع و سازه‌های موقتی احداث شده در بستر رودخانه در مراحل بحران (پل، لوله‌ها، آبنما، خاکریزهای ساحلی و عرضی، خاکریزهای سیلابدشت و غیره) جهت آمادگی برای رخداد سیلاب بعدی
۹	نظارت بر ت سریع در برچیدن سازه‌های موقتی احداث شده در ب ستر رودخانه در مراحل بحران (پل، ای ستگاه‌های پمپاژ و غیره) و جایگزینی سریع آن با طرح‌های پایدار و تاب‌آور جهت آمادگی برای رخداد سیلاب بعدی
۱۰	توجه به ایجاد پل یا آبگذر مناسب در مقاطعی از جاده‌ها و ریل‌ها که در مرحله بحران سیلاب شکافته شده و کارآیی موثری در کنترل سیلاب و کاهش خسارات داشته‌اند.
۱۱	آسیب‌شناسی جهت اصلاح و یا تغییر جانمایی پل‌ها و آبگذرهای آسیب‌دیده بر اساس تراز و پهنه خطر سیلاب‌های رخداده
۱۲	توجه به ثبت فیزیکی داغاب و مشخصات کلی سیلاب‌های تاریخی به صورت پلاک‌کوبی، تابلو و غیره در محل پل‌ها، کناره راه و ریل و مناطق مسکونی (شهری و روستایی) جهت آگاهی عمومی
۱۳	تامین بودجه برای انجام عملیات نگهداری پل‌ها و لایروبی رودخانه‌ها در محدوده موثر در بالا دست و پایین‌دست پل‌ها به‌خصوص در ناحیه شهری و بالادست آن
۱۴	مستندات کافی از سازه‌های زیرساختی مهمی که در معرض سیل قرار گرفتند مثل پل‌ها، تهیه نموده و با استفاده از کارشناسان خبره جزییات

	علل خرابی‌های را احصا نماید.

جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
جانمایی سازه در رودخانه: توجه به ریخت‌شناسی رودخانه، اندازه آبراهه اصلی و حد بستر رودخانه	در بازه مستقیم و یا شریانی	رودخانه خشک، شیراز، استان فارس، کاهش عرض بستر رودخانه و افزایش خطر وقوع سیل در مقطع کاهش یافته تجاوز به بستر رودخانه با ساخت و ساز در کناره و در راستای دهانه پل معمولان، استان لرستان، سیل ۱۳۹۸ رودخانه قره آغاج، بخش چغاد، جهرم، استان فارس، هماهنگ نبودن طول دهانه پل با مقاطع رودخانه در بالادست و پایین‌دست رود کشکان، عدم توجه به حد بستر رودخانه، تغییر مسیر رودخانه به ساحل راست و تخریب کوله پل، سیل ۱۳۹۸ 	جانمایی آبگذر به جای پل، رودخانه عباس آباد، بزرگراه الغدیر، استان البرز جانمایی آبگذر به جای پل، رودخانه خرتوت، استان خراسان شمالی عدم انطباق مسیر رودخانه نهر اعظم با جهت آبگذر، جاده شهرک صدرا، شیراز، استان فارس، سال ۱۳۸۳

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
		 نمایی از ایستگاه هیدرومتری در محدوده روستای آناخاتون بر روی رودخانه کمورچای	
	در بازه پیچانرودی و یا در پیچ	عدم توجه به مسائل ریخت‌شناسی رودخانه در جانمایی نامناسب پل نسبت به اندازه رودخانه و عدم توجه به حد بستر و حریم رودخانه آبراهه آفرینه، معمولان، استان لرستان، سیل ۱۳۹۸ رود سیستان، پل - بند زهک، ۱۳۶۴ 	

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
تناسب آبراهه با معماری و هندسه سازه	طول کل سازه- ارتفاع عرشه- نسبت عرض و ارتفاع دهانه باز سازه به آبراهه (نسبت انسداد)	کاهش عرض بستر رودخانه و تخریب کوله پل، رودخانه آذر شهر، استان آذربایجان شرقی سیل فروردین ۱۳۹۶ پل ملاقات، رودخانه سومبارچای، استان خراسان شمالی، ۱۳۹۸ تخریب دیواره‌های رود کشکان، پل‌دختر، سیل ۱۳۹۸ کاهش عرض رودخانه در محل پل، رودخانه رودخانه فیروزه، استان خراسان شمالی 	نصب نامناسب آبگذر به جای پل، منطقه لامرد، استان فارس
	جهت برخورد آب به پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های سازه	برخورد نامتقارن جریان به پایه‌های پل، رودخانه سیمره، سه راه سیمره، محور خرم آباد – ایلام همسو نبودن پایه پل با جهت جریان و افزایش فرسایش، بزرگراه شیراز- جهرم، استان فارس، سال ۱۳۹۸	عدم انطباق مسیر رودخانه با جهت آبگذر، تقاطع نهر اعظم و جاده شهرک صدرا، شیراز، استان فارس، سال ۱۳۸۳

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
	تبدیل جریان در بالادست و پایین‌دست سازه	کاهش ۸۰ درصدی حد بستر رودخانه کرج و تبدیل بازشدگی در بالادست پل اتوبان کرج 	کافی نبودن طول تبدیل ورودی آبگذر، شهرک صنعتی شیراز، استان فارس تخریب پایین‌دست آبگذر به دلیل عدم اجرای خروجی حفاظتی مناسب، جاده فیروزآباد- عسلویه، سال ۱۳۹۸
	رادیه‌بندی (بستر صلب در محدوده سازه)	نتیجه استفاده از رادیه به جای شمع‌کوبی در رودخانه‌های آبرفتی و استفاده از جک جهت بهره‌برداری موقت حین مرمت پل، پل کازرون فراشبند، ۱۳۷۸ 	فرسایش پایین‌دست آبگذر و افزایش سالانه طول رادیه جهت جلوگیری از فرسایش به جای استفاده از شمع‌کوبی، دینا چال، غرب گیلان

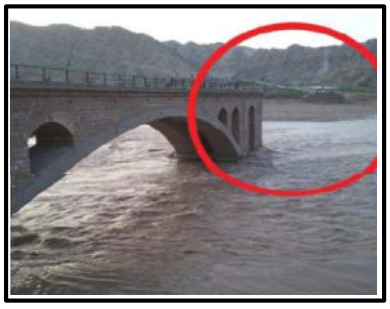
ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
		 پل نازلو، رود نازلو، ارومیه رودخانه‌های استان گلستان پل رود کن- جاده کرج- ۱۳۹۶	

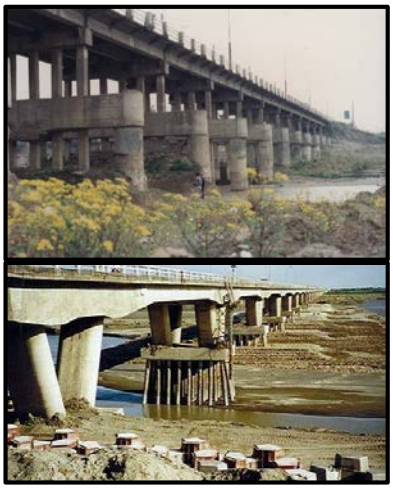
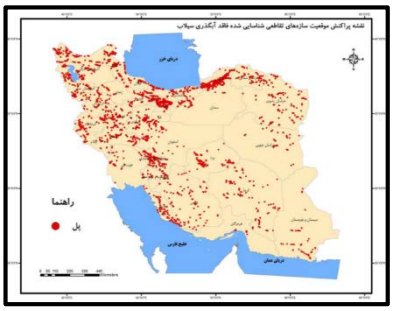
ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
		   با رادیه‌بندی، آبشستگی در پایین‌دست پل بابارستم کیاکلا رودخانه تالار به عمق ۴ متر	
	ناسازگاری با محیط‌زیست در سامانه رودخانه	پل‌های رودهای استان گلستان پل آلش رود، استان مازندران آبنمای راه، رودخانه شهری، استان خراسان شمالی- سیل ۱۳۹۸	

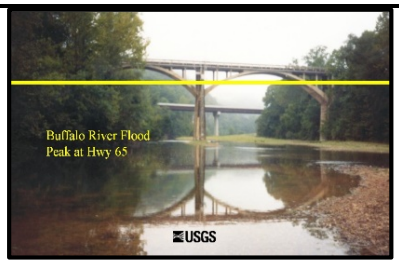
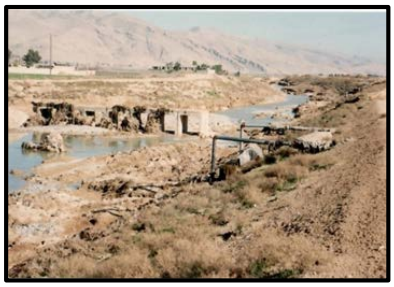
ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
تغییرات رودخانه در اثر سازه	تغییر مسیر رودخانه- تغییر خط‌القعر رودخانه	عدم توجه به مسائل ریخت‌شناسی رودخانه در جانمایی نامناسب پل نسبت به اندازه رودخانه و عدم توجه به حد بستر و حریم رودخانه تغییر مسیر رودخانه و تخریب خاکریز پشت کوله غربی پل قوسی بتنی بابازید، رود کشکان درتقاطع مسیر پل‌دختر، استان کرمانشاه  تغییر مسیر رودخانه و تخریب ساحل راست پل چم دیوان در محور خرم - پل‌دختر 	تغییر مسیر رودخانه، و تخریب ساحل راست، در اثر رسوبگذاری بالادست آبگذر، نورآباد، استان لرستان

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
	فرسایش و یا رسوبگذاری آبراهه در بازه بالادست و پایین‌دست سازه	آبشستگی عمومی بستر در مسیر رودخانه تالار، قائم شهر، استان مازندران 	تخریب آبگذر مسیر فیروزآباد به عسلویه در سیل ۱۳۹۸
سیل	سیل طراحی: تناسب ظرفیت آبگذری با ریسک قابل قبول و برآورد درست سیلاب طراحی	نقشه پراکنش سازه‌های تقاطعی (پل و آبگذر) فاقد آبگذری سیلاب. تعداد کل گلوگاه های آبگذری شناسایی شده: ۵۸۰۰ مورد (۱۳۹۸)  عدم تناسب ظرفیت آبگذری با ریسک قابل قبول (با توجه به نوع کاربری ارضی مجاور) و عدم برآورد صحیح سیلاب طراحی (تخریب پل کشکان، سیل ۱۳۹۸) داغاب بسیار بالاتر از تراز عرشه پل سیلاب طرح پل رودخانه بوفالو، آمریکا	تخریب آبگذرهای شهرک صنعتی ایلام در سیل ۱۳۹۸

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
			
	ظرفیت انتقال سازه، برگشت آب در بالا دست سازه، روگذری و تخریب سازه	رودخانه شاپور، بوشکان، استان فارس، سیل سال ۱۳۶۵  تخریب عرشه پل شهدای صنعت نفت در اثر پس‌زدگی سیلاب سیل کال پسته، پل گلستان، استان خراسان شمالی، ۱۳۹۸ 	تخریب آبگذر در منطقه گله دار شهرستان لامرد استان فارس، سیل ۱۳۶۵ عدم توجه به جریان روگذری در طراحی آبگذرها باعث افزایش آب گرفتگی، تخریب سازه و راه ارتباطی خواهد شد. مثل آبگذرهای داخل شهر ایلام در سیلاب ۱۳۹۸. عدم تخلیه جریان در بیش از ۵۰ درصد آبگذرهای اصلی به دلیل انسداد موقت در لحظه وقوع اوج سیلاب است. (آمار مربوط به آمریکا و استرالیا است. در ایران این آمار به احتمال زیاد بیش‌تر خواهد بود).
	انسداد در اثر رسوبگذاری، واریزه‌ها و اجسام شناور	تجمع رسوبات و تنه های درخت نخل، رودخانه گنج، استان هرمزگان، سال ۱۳۷۱ 	انسداد اکثر آبگذرهای استان ایلام و لرستان

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
		تجمع درختچه‌ها در دهانه‌های پل ورودی شهر گناوه، استان بوشهر تجمع رسوبات در ورودی پل منطقه لامرد استان فارس تجمع رسوبات در مجاورت پایه‌های کناری پل، جاده شیراز-جهرم، سیل ۱۳۹۵ تجمع شاخ و برگ درختان پیرامون پایه‌های پل تخریب پل خرپایی دوآب ویسیان در اثر پیچش شاخ و برگ درختان به پایه‌ها 	بیش از ۷۰ درصد آبگذرهایی که دارای مشکل هستند، متاثر از عدم بررسی‌های رسوبی در طراحی اولیه است (درس آموخته‌های مهندسی سازمان زمین‌شناسی آمریکا). کاهش توان عبور جریان درآبگذرها با الوار و سایر مواد شناور در سیل‌های شدید. انسداد آبگذر با واریزه‌های سنگی در سیلاب ۲۰۲۳ استرالیا

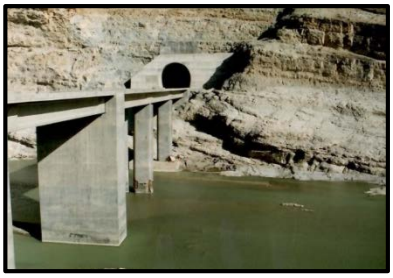
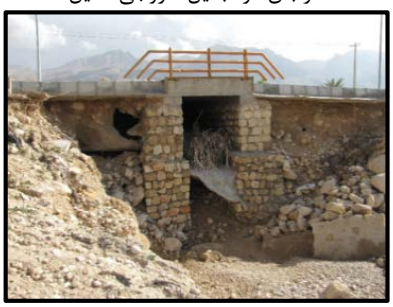
ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
		انسداد پل ابتدای شهر ماسوله توسط تخته‌سنگ‌ها و انحراف سیل به سمت شهر در سیلاب سال ۱۳۷۷	
آبشستگی	آبشستگی تکیه‌گاه‌ها	کافی نبودن طول تکیه‌گاه پل جاده شیراز استهبان، استان فارس، سیل ۱۳۶۵ آبشستگی کوله پل در مسیر رامهرمز -بهبهان 	آبشستگی اطراف تکیه‌گاه آبگذر به دلیل کافی نبودن طول تبدیل ورودی، جاده فیروزآباد - عسلویه، سال ۱۳۹۸
	آبشستگی پایه‌ها	پل قدیم و جدید کاکارضا لرستان، سیل ۱۳۹۸ فرسایش شدید بستر رودخانه در محل پل، شمال ایران آبشستگی پایه‌های پل ماشلک و بیرون زدن شمع‌ها- نوشهر، سیلاب ۱۳۹۷	

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
	آبشستگی پایین‌دست سازه	فرسایش پیشبند پایین‌دست پل شمال ایران از بین رفتن حفاظت پایین‌دست پل دیناچال - غرب استان گیلان 	جاده داراب- بندرعباس، منطقه فُرک داراب، فارس فرسایش خروجی آبگذرهای شهر جهرم، استان فارس، در سیل ۱۳۹۸
فرسایش سازه	فرسایش فیزیکی سطح سازه (تکیه‌گاه‌ها و پایه‌ها) در اثر برخورد و سایش توسط رسوبات، واریزه‌ها و اجسام شناور و در اثر کیفیت آب	برخورد تخته سنگ با اندازه حدود ۱/۵ متر به پایه پل روستای وطن (سیل ۱۳۹۸) عدم توجه به مسئله رسوب و فرسایش سطحی پایه‌های پل رودخانه کُل، مسیر قطار بافق- بندرعباس، ارتفاع پل: ۵۵ متر از بستر رودخانه	استفاده از بتن مقاوم

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
		 خوردگی سازه‌ها در اثر کلر آب در بتن و بتن مسلح در پل‌های استان‌های جنوبی ایران	
روش‌های نامناسب اجرا شده در رودخانه	انسداد بیش‌تر	کاستی در حفاظت و نگهداری از ظرفیت پل‌ها (تقاطع اتوبان کرج و قزوین) 	
	آبشستگی سازه		
آسیب‌پذیری در مرحله ساخت سازه	نشست و فروپاشی	نشست تکیه‌گاه پل در اثر نامناسب بودن پی و آبشستگی، تلمبه خانه حسنی، جاده هریجان به نورآباد و ممسنی تخریب پل روستای چم گرگعلی در استان لرستان در اثر ریزش کوله	فرسایش پایین‌دست آبگذر شهر جهرم به دلیل عدم استفاده از بتن در تبدیل خروجی، سیل ۱۳۹۸  بارمرده بسیار زیاد بر روی آبگذر نورآباد ممسنی، استان فارس

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
		   پل بام اسفراین، خراسان شمالی، سیل ۱۳۹۸ پل شهدای صنعت نفت، منطقه سرکان، ۱۳۹۷ 	
	زمان‌بندی و ایمنی کار و کارگاه در رودخانه و ترتیب مراحل کار در رودخانه	رعایت ایمنی و ترتیب مراحل ساخت در آبراهه با توجه به ریسک سیلاب	تخریب آبگذر مسیر فیروزآباد به عسلویه در سیل ۱۳۹۸

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
آسیب‌پذیری در مرحله بهره‌برداری، مرمت و بازسازی سازه بعد از سیل	انسداد آبراهه	کاهش ظرفیت عبور سیلاب در پل مجاور بیمارستان نمازی بر روی رودخانه خشک، شیراز، استان فارس، سال ۱۳۸۱ کاهش ظرفیت عبور سیلاب در اثر عبور لوله‌های آب و فاضلاب، رودخانه خشک، شیراز، فارس، سال ۱۳۸۰ کاهش ظرفیت عبور سیلاب با ایجاد موانع (پایه‌ها و لوله‌های انتقال آب و گاز) در پل علی بن حمزه (و پل الله وردیخان با قدمت ۴۰۰ سال)، رودخانه خشک، شیراز گرگانرود- پل باستانی آق قلا استان گلستان رود اترک، شیروان، استان خراسان شمالی	

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
	برداشت مصالح و لایروبی و پاکسازی و پایش منظم سازه‌ها	عدم لایروبی و رفع موانع در محدوده پل‌ها، مقطع مفید را کاهش داده و خطر سیل‌گیری را به شدت افزایش می‌دهد.	آبگذرها، با توجه به اندازه کوچک‌تر از پل، به انسداد در اثر رسوبگذاری، تله اندازی واریزه‌ها و اجسام شناور و رشد گیاهان حساس‌تر هستند.
	سازه‌های موقتی بعد از سیل که سال‌ها می‌مانند.	پل موقت، پسا سیلاب ۱۳۹۸، رود کشکان، مسیر خرم آباد و پل‌دختر گذشت دو سال از ساخت پل موقت هلیلان رود سیمره، استان ایلام، ۱۳۹۸ 	
	بازسازی و همانندسازی بعد از سیل	مرمت رادیه فرسایش یافته پایین‌دست پل شیراز- جهرم در سیل ۱۳۹۸ 	آبگذرهایی که برای جاده‌های فرعی و دسترسی روستایی استفاده می‌شوند، پس از تخریب در سیلاب فروردین ۱۳۹۸در بسیاری از موارد دوباره همانندسازی شدند.

ادامه جدول پ.۲-۵- آسیب‌شناسی پل‌ها و آبگذرهای ایران از دیدگاه دانش مورفوهیدرولیکی سامانه رودخانه

محورهای اصلی آسیب‌پذیری	محورهای فرعی آسیب‌پذیری	پل	آبگذر
	بازسازی و همانندسازی بعد از سیل	 بازسازی‌های تکراری پل میرزارسول، سیمینه‌رود، میاندوآب همانندسازی کوله پل، بعد از تغییر مسیر رودخانه کشکان و تخریب ساحل راست رود، سیل ۱۳۹۸ 	

پیوست ۳

معادلات محاسبه انواع آبشستگی و مثال‌های کاربردی

پ.۳-۱- محاسبات آبشستگی تنگ‌شدگی (جانبی)

آبشستگی تنگ‌شدگی زمانی رخ می‌دهد که مساحت جریان رودخانه در تراز سیل به دلیل انقباض طبیعی آبراهه اصلی رودخانه و یا به دلیل سازه پل، کاهش می‌یابد. این نوع آبشستگی در شرایطی‌که جریان در سیلابدشت هنگام نزدیک شدن به پل، توسط خاکریزهای جاده وادار می‌شود از آبراهه اصلی رودخانه عبور کند، نیز اتفاق می‌افتد. در بیش‌تر موارد، آبشستگی موضعی موجب کاهش تراز بستر در امتداد عرضی بازشدگی پل می‌شود. این نوع آبشستگی، آبشستگی موضعی در شالوده‌ها یا تغییرات بلندمدت در تراز بستر رودخانه (ترازافزایی یا ترازکاهی) را شامل نمی‌شود. همچنین آبشستگی تنگ‌شدگی ممکن است عمق یکنواختی در عرض بازشدگی نداشته باشد. آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک ممکن است چرخه‌ای و تناوبی بوده به این معنی که تراز بستر رودخانه حین عبور یک سیل ممکن است افزایش و کاهش متناوب داشته باشد.

در حالت کلی آبشستگی تنگ‌شدگی را می‌توان با دو معادله اساسی تحلیل کرد: ۱- معادله آبشستگی بستر متحرک و ۲- معادله آبشستگی آب صاف. در هر یک از حالت‌ها، فقط کافی است تا معلوم شود که آیا در آبراهه اصلی یا بخش ساحلی در بالادست پل یا در نزدیکی یک پل امدادی، مواد بستر انتقال می‌یابند (بستر متحرک) یا خیر (آب صاف) سپس با استفاده از معادله مناسب و تعریف متغیرهای متناسب با محل آبشستگی تنگ‌شدگی (آبراهه اصلی یا ساحل)، آبشستگی برآورد می‌شود.

برای تعیین این‌که آیا جریان در بالادست پل، مواد بستر را انتقال می‌دهد یا خیر، سرعت بحرانی V_c را برای شروع حرکت ذراتی به اندازه D_{50} محاسبه و با سرعت متوسط جریان در آبراهه اصلی رودخانه یا ناحیه ساحلی بالادست آبگذر پل مقایسه می‌شود. اگر سرعت بحرانی مواد بستر بزرگ‌تر از سرعت متوسط جریان باشد ($V_c > V$)، یعنی آبشستگی تنگ‌شدگی آب صاف رخ می‌دهد و در صورتی که $V_c < V$ باشد، یعنی آبشستگی تنگ‌شدگی به صورت بستر متحرک اتفاق خواهد افتاد. برای محاسبه سرعت بحرانی از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$V_c = K_u\, y^{\frac{1}{6}}\, D^{\frac{1}{3}} \qquad (پ.۳-۱)$$

که در آن:

V_c = سرعت بحرانی که در سرعت‌های جریان بیش‌تر از آن، مواد بستر با اندازه D و کوچک‌تر از آن منتقل می‌شود، m/s

y= عمق متوسط جریان در بالادست پل، m

D= اندازه ذره برای V_c، m

D_{50} = اندازه ذره در مخلوطی از رسوبات که ۵۰ درصد رسوبات از این اندازه کوچک‌تر هستند.

K_u = 6.19 (سیستم آحاد SI)

K_u = 11.17 (سیستم آحاد FPS)

پ.۳-۱-۱- آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک

نسخه اصلاح شده معادله لارسن (Laursen 1960) برای آبشستگی بستر متحرک در یک تنگ شدگی طولانی به منظور پیش‌بینی عمق آبشستگی در مقطع تنگ‌شده توصیه می‌شود. اصلاحاتی که نسبت به نسخه اصلی معادله انجام شده است، به حذف نسبت n مانینگ مربوط می‌شود (نکته شماره ۳ که در ادامه به آن اشاره شده است). معادله فرض می‌کند که مواد بستر از بازه بالادست انتقال می‌یابند [۱۶۲].

$$\frac{y_2}{y_1}=\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{\frac{6}{7}}\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_1} \qquad (پ.۳-۲)$$

$$y_s = y_2 - y_o = (\text{عمق متوسط آبشستگی تنگ‌شدگی}) \qquad (پ.۳-۳)$$

که در آن:

y_1 = عمق متوسط جریان در آبراهه اصلی بالادست، m

y_2 = عمق متوسط جریان مقطع تنگ‌شده، m

y_o = عمق موجود در مقطع تنگ‌شده قبل از آبشستگی، m

Q_1 = جریان در آبراهه بالادست که رسوب را انتقال می‌دهد، m^3/s

Q_2 = جریان در مقطع تنگ شده، m^3/s

W_1 = عرض کف آبراهه اصلی بالادست که مواد بستر را انتقال می‌دهد، m

W_2 = عرض کف آبراهه اصلی در مقطع تنگ‌شده، پس از کسر پهنای پایه‌ها، m

k_1 = نمایی که به صورت زیر تعیین می‌شود:

الگوی انتقال مواد بستر	k_1	V_*/ω
عمدتا به صورت بار بستر	0.59	<0.50
مقداری به صورت بار بستر معلق شده	0.64	0.5 تا 2.0
عمدتا به صورت بار بستر معلق شده	0.69	>2.0

$V_* = (\tau_o/\rho)^{\frac{1}{2}} = (g\,y_1 S_1)^{\frac{1}{2}}$ سرعت برشی در مقطع بالادست، m/s

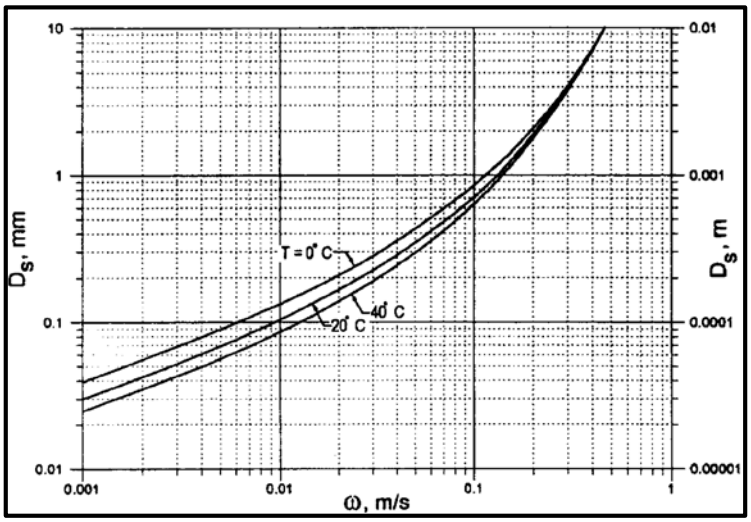
ω = سرعت سقوط مواد بستر بر مبنای D_{50}، m/s (شکل پ.۳-۱)

g= شتاب گرانش ($9.81 m/s^2$)

S_1 = شیب خط تراز انرژی، m/m

τ_o = تنش برشی بستر، ($Pa\ (N/m^2)$)

ρ = چگالی آب، ($1000 kg/m^3$)



شکل پ.۳-۱- سرعت سقوط ذرات ماسه‌ای با سنگینی ویژه

نکات:

۱- ممکن است Q_2 کل بده عبوری از بازشدگی پل در حالت‌های ۱- الف و ۱- ب باشد ولی تمام بده عبوری برای حالت ۱- ج را شامل نمی شود. برای حالت ۱- ج باید آبشستگی تنگ شدگی به صورت جداگانه برای آبراهه اصلی و بخش‌های ساحلی چپ و راست حساب شود.

۱- Q_1 جریان در آبراهه اصلی بالادست پل است و شامل جریان‌های روکرانه (ساحلی) نمی‌شود.

۲- در معادله بستر متحرک لارسن (معادله پ.۳-۲) نسبت مانینگ حذف شده است. دلیل این اصلاح این است که این نسبت در شرایطی که در آبراهه بالادست، فرم بستر تلماسه[۱] و در آبراهه تنگ شده بستر مسطح، تلماسه شسته شده[۲] یا پاد تلماسه[۳] باشد، عدد قابل‌توجه و بزرگی خواهد بود. البته معادله لارسن به طور صحیح افزایش انتقال رسوب که در نتیجه مسطح شدن بستر (این تغییر موجب کاهش مقاومت در مقابل جریان و در نتیجه سبب افزایش سرعت جریان و انتقال مواد بستر در محل پل می شود) اتفاق می‌افتد را لحاظ نمی‌کند. بنابراین در چنین شرایطی که در اصل عمق آبشستگی افزایش می‌یابد، معادله لارسن کاهش آبشستگی را نشان می‌دهد. به علاوه در جریان‌های سیلابی، معمولا فرم بستر مسطح در بالادست و در آبگذر پل وجود خواهد داشت و در نتیجه مقادیر n مانینگ در این دو بخش مساوی خواهد بود. در نتیجه لحاظ کردن نسبت n در معادله توصیه نمی‌شود.

۱- Dune

۲- Washed out dune

۳- Antidune

۳- W_1 و W_2 همیشه به آسانی تعریف نمی‌شوند. در برخی موارد از عرض فوقانی آبراهه اصلی رودخانه برای تعیین این عرض‌ها استفاده می‌شود. رعایت یکنواختی در استفاده از عرض فوقانی یا عرض کف برای W_1 و W_2 مهم است.

۴- به طور معمول عرض متوسط بازشدگی پل W_2 پس از کم کردن عرض پایه‌ها از آن، به عنوان عرض کف در نظر گرفته می‌شود.

۵- اگر پل در انتهای بالادست یک تنگ‌شدگی طبیعی قرارگرفته باشد و یا اگر تنگ‌شدگی در نتیجه تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های پل ایجاد شده است، در این صورت معادله لارسن عمق آبشستگی را بیش از مقدار واقعی برآورد خواهد کرد.

۶- در رودخانه‌هایی با بستر ماسه‌ای که حفره آبشستگی تنگ‌شدگی هنگام فروکش کردن سیل دوباره با رسوبات پر می شود، عمق y_0 را به طور تقریبی می‌توان با y_1 مساوی گرفت. با پایش و بازرسی می‌توان رقوم بستر فعلی را تعیین کرد.

۷- عمق آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک ممکن است به دلیل وجود ذرات درشت‌دانه مواد بستر که در نقش لایه‌ی محافظ (سپر) عمل می‌کنند، محدود می‌شود. بر این اساس در مواردی که ذرات درشت‌دانه در رسوبات وجود داشته باشد، توصیه می‌شود عمق آبشستگی برای شرایط بستر متحرک علاوه بر این‌که با معادله مربوط به شرایط بستر متحرک محاسبه می‌شود، با استفاده از معادله آبشستگی آب صاف (که در بخش بعدی ارائه می‌شود) نیز حساب شود، سپس عدد کوچک‌تر به عنوان عمق آبشستگی در نظر گرفته شود.

پ.۳-۱-۲- عمق آبشستگی آب صاف

معادله توصیه شده برای آبشستگی آب صاف، معادله لارسن (Laursen, 1963) است که به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶۲]:

$$y_2 = \left[\frac{K_u Q^2}{D_m^{\frac{2}{3}} W^2}\right]^{\frac{3}{7}} \qquad (پ.۳-۴)$$

$$y_s = y_2 - y_o = (\text{عمق متوسط آبشستگی تنگ‌شدگی}) \qquad (پ.۳-۵)$$

که در آن:

y_2 = عمق تعادلی متوسط در مقطع تنگ‌شده پس از آبشستگی تنگ‌شدگی، m

Q = بده عبوری از پل یا روی بخش روکرانه در محل پل متناظر با عرض W، m^3/s

D_m = قطر کوچک‌ترین ذره غیرقابل انتقال در مواد بستر ($1.25D_{50}$) در مقطع تنگ‌شده، m

D_{50} = قطر میانه مواد بستر، m

W= عرض کف در مقطع تنگ شده پس از کم کردن عرض پایه‌ها، m

y_o = عمق فعلی متوسط در مقطع تنگ‌شده، m

K_u = 0.0077 (سیستم آحاد FPS)

K_u = 0.025 (سیستم آحاد SI)

همان‌گونه که در بالا اشـــاره شـــد یک حد پایین منطقی برای D_{50} برابر با 0.2 mm را می‌توان به این معادله اعمال کرد. استفاده از مقادیر کوچک‌تر از 0.2 mm موجب بیش برآورد عمق آبشستگی آب صاف می‌شود.

از آن‌جایی‌که D_{50} بزرگ‌ترین ذره موجود در مواد بستر نیست، لذا ناحیه آبشستگی تا حدودی ممکن است محافظت شده (سپری شده) باشد. بنابراین D_m برابر با $1.25\ D_{50}$ فرض می‌شود. برای مواد بستر لایه‌ای[1]، عمق آبشستگی با به‌کار بردن معادله آبشستگی آب صاف به طور متوالی با D_m متوالی مربوط به لایه بعدی مواد بستر محاسبه می‌شود.

پ.۳-۱-۳- آبشستگی تنگ‌شدگی با خیزآب

معادله آبشستگی تنگ شدگی بستر متحرک، با فرض بازه‌ای یکنواخت در بالادست و یک تنگ شدگی طویل که در بازه‌ی یکنواخت پایین‌دست پل امتداد یافته، استخراج می شود. در شرایط بستر متحرک، معادله عمق آبشستگی را در حالتی که رسوب انتقالی به بازه پایین‌دست با رسوب انتقالی خروجی برابر می‌شود، محاسبه می‌کنند. معادلات آبشستگی آب صاف بر مبنای این فرض که عمق آبشستگی در محل پل تا زمانی افزایش می‌یابد که تنش برشی و سرعت کاهش بیابند و دیگر هیچ انتقال رسوبی صورت نگیرد، بدست آمده‌اند. همچنین در معادلات مربوط به آب صاف فرض شده است که جریان از یک شرایط یکنواخت به شرایط یکنواخت دیگر تبدیل می‌شود. هر دو دسته معادلات، عمق آبشستگی تنگ‌شدگی را با فرض سطح آب یکنواخت ($y_s = y_2 - y_o$) محاسبه می‌کنند.

با نوشـــتن تعادل انرژی قبل و بعد از وقوع آبشـــستگی می‌توان محاســـبات دقیق‌تری را انجام داد. در شـــرایط بســـتر متحرک، تعادل انرژی بین مقطع نزدیک شونده ۱ و مقطع تنگ شده ۲ نوشته می شود. ولی در شرایط آب صاف، انرژی قبل از ۱ و بعد از ۲ در نظر گرفته می‌شود.

برگشت آب درصورتی‌که شدید باشد، موجب می‌شود سرعت، تنش برشی و انتقال رسوب در مقطع بالادست کاهش یابد و این مسئله، آبشستگی در مقطع تنگ‌شده را افزایش می‌دهد. برگشت آب (با ذخیره رسوب در بازه بالادست) موجب تغییر آبشستگی از بستر متحرک به آب صاف می‌شود.

۱- Stratified bed material

پ.۳-۱-۴- مسائل نمونه از آبشستگی تنگ‌شدگی (جانبی)

مسئله نمونه ۱- آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک

داده‌ها:

عرض آبراهه بالادست = $322\,\text{ft}$ ($98.2\,\text{m}$)، عمق = $8.6\,\text{ft}$ ($2.62\,\text{m}$)

بده جریان $27300\,\text{cfs}$ ($773\,\text{m}^3/\text{s}$) است و به طور کامل در داخل آبراهه اصلی رودخانه است.

شیب آبراهه = $0.004(\text{ft}/\text{ft})(\text{m}/\text{m})$

تکیه‌گاه‌های پل از دیوارهای قائم با دیواره‌های بالهای تشکیل شده‌اند، عرض = $122\,\text{ft}(37.2\,\text{m})$، با ۳ سری پایه متشکل از ۳ ستون به قطر 15 اینچ ($0.38\,\text{m}$)

اندازه مواد بستر: از C تا عمق $3\,\text{ft}$ زیر بستر ($0.9\,\text{m}$ تا C) مقدار D_{50} برابر است با $0.0010\,\text{ft}$ ($0.31\,\text{mm}$) و در پایین‌تر از عمق $3\,\text{ft}$ ($0.9\,\text{m}$) زیر بستر مساوی است با $0.0023\,\text{ft}$ ($0.70\,\text{mm}$) با سرعت سقوط معادل با $0.33\,\text{ft}/\text{sec}$ ($0.10\,\text{m}/\text{s}$)

عمق اولیه در محل پل، $7.1\,\text{ft}$ تخمین زده شده است.

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تنگ‌شدگی

حل:

گام ۱. تعیین کنید آبشستگی بستر متحرک است یا آب صاف

سرعت متوسط در بازه بالادست:

$$V=\frac{27300}{(8.6\times 322)}=9.86\frac{\text{ft}}{\text{s}}(=3.0\,\text{m}/\text{s})$$

با سرعت‌هایی به این بزرگی و با توجه به ریزدانه بودن مواد بستر، نوع آبشستگی بستر متحرک است. این نتیجه با محاسبه V_c به ازای اندازه مواد بستر $0.70\,\text{mm}$ کنترل می‌شود. اگر برای ذرات $0.70\,\text{mm}$ آبشستگی به صورت بستر متحرک است، برای ذرات $0.30\,\text{mm}$ نیز آبشستگی بستر متحرک اتفاق می‌افتد.

$$V_c=11.17(8.6)^{\frac{1}{6}}(0.0023)^{\frac{1}{3}}=2.11\frac{\text{ft}}{\text{s}}(=0.65\,\text{m}/\text{s})$$

بنابراین وقوع آبشستگی بستر متحرک تایید می‌شود.

گام ۲. آبشستگی تنگ‌شدگی محاسبه می‌شود.

الف- مقدار برای الگوی انتقال بار بستر تعیین می‌شود:

$$V_*=(32.2\times 8.6\times 0.004)^{0.5}=1.05\frac{\text{ft}}{\text{s}}(=0.32\,\text{m}/\text{s})$$

$$\omega = 0.33\frac{\text{ft}}{\text{s}};\qquad V_* / \omega = 3.2;\ \xrightarrow{\text{از جدول}}\ K_1 = 0.69$$

ب- محاسبه عمق آبشستگی بستر متحرک

$$Q_1 = Q_1$$

$$\frac{y_2}{8.6} = \left[\frac{322}{118.25}\right]^{0.69} = 2.00$$

$y_2 = 8.6 \times 2.00 = 17.2\,\text{ft}(5.24\,\text{m})$ از سطح آب

$y_s = 17.2 - 7.1 = 10.1\text{ft}(3.08\,\text{m})$ نسبت به سطح بستر اولیه

مسئله نمونه ۲ – روش جایگزین

در این‌جا روشی جایگزین برای محاسبه y_s در مسئله ۱ ارائه شده است تا مشخص شود که آیا آبشستگی آب صاف یا بستر متحرک به وا سطه پدیده سپری شدن یا انتقال ر سوب از بالاد ست به مقطع پل، محدود می شود یا خیر، در این روش عمق آبشستگی با هر دو معادله آبشستگی‌های بستر متحرک و آب صاف محاسبه شده و سپس مقدار کوچک‌تر انتخاب می‌شود.

الف- عمق آبشستگی بستر متحرک از مسئله ۱، برابر با $10.1\text{ft}(3.08\,\text{m})$ حساب شد.

محاسبه عمق آبشستگی آب صاف (معادله پ.۳-۴)

$$D_m = 1.25D_{50} = 1.25(0.0023) = 0.0030\,\text{ft}(0.0009\,\text{m})$$

$$y_2 = \left[\frac{0.0077(27300)^2}{(0.0030)^{\frac{2}{3}}(118.25)^2}\right]^{\frac{3}{7}} = 69.31\text{ft}(21.12\,\text{m})$$

$y_s = 69.31 - 7.1 = 62.2\,\text{ft}(18.96\,\text{m})$ نسبت به سطح بستر اولی

ج- آبشستگی بستر متحرک ($10.1\text{ft}(3.08\,\text{m}) < 62.2\,\text{ft}(18.96\,\text{m})$). بنابراین انتقال ر سوبات، به‌جای اندازه مواد بستر، عمق آبشستگی تنگ‌شدگی را محدود می‌کند.

مسئله نمونه ۳ - آبشستگی تنگ‌شدگی در پل امدادی

داده‌ها:

بده عبوری از پل امدادی = $13012\,\text{cfs}$ ($368\,\text{m}^3/\text{s}$)، عرض پل (منهای پایه‌ها) = $300\,\text{ft}$ ($91.4\,\text{m}$)

y_0 = $6.4\,\text{ft}$ ($1.95\,\text{m}$)، $V_{\text{متوسط}}$ = $1.71\,\text{ft}/\text{s}$

D_{50} = $0.24\,\text{mm}$ ($D_m = 1.25 \times 0.24 = 0.3\,\text{mm}$)

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تنگ‌شدگی

حل:

به دلیل سرعت پایین جریان در سیلابدشت، آبشستگی از نوع آب صاف است بنابراین از معادله (پ.۳-۴) استفاده می‌شود.

$$y_2 = \left[\frac{0.0077(13012)^2}{(0.0010)^{\frac{2}{3}}(300)^2}\right]^{\frac{3}{7}} = 22.6\,\text{ft}(6.89\,\text{m})$$ (نسبت به سطح آب)

مقدار y_2 محاسبه شده با مقدار اندازه‌گیری شده در محل ($25.3\,\text{ft}(7.71\,\text{m})$) مطابقت دارد.

$$y_s = y_2 - y_0 = 22.6 - 6.4 = 16.2\,\text{ft}(9.94\,\text{m})$$

پ.۳-۱-۵- مسائل نمونه آبشستگی جریان تحت‌فشار

مسئله نمونه ۱ – شرایط آب صاف

داده‌ها:

تمام جریان از آبگذر پل عبور می‌کند و روگذری جریان اتفاق نمی‌افتد.

پل پایه‌ای ندارد (دهانه آزاد[۱])

عرض آبراهه بالادست و عرض بازشدگی پل (W) = $40\,\text{ft}$ ($12.2\,\text{m}$)

بده کل (Q) = $2800\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($79.3\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده آبراهه اصلی (Q_1) = $2000\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($56.6\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده سیلابدشت بالادست = $800\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($22.7\,\text{m}^3/\text{s}$)

عمق جریان در آبراهه بالادست (h_u) = $10.0\,\text{ft}$ ($3.0\,\text{m}$)

ارتفاع بازشدگی پل (h_b) = $8.0\,\text{ft}$ ($2.4\,\text{m}$)

ضخامت عرشه (T) = $3.0\,\text{ft}$ ($0.91\,\text{m}$)

مواد بستر D_{50} = $15\,\text{mm}$ ($V_c = 6.0\,\text{ft/s} = 1.8\,\text{m/s}$)

سرعت آبراهه بالادست ($V = \frac{Q_1}{(W h_u)} = \frac{2000}{(40\times10)} = 5.0\frac{\text{ft}}{\text{s}} = 1.5\frac{\text{m}}{\text{s}}$)

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تنگ‌شدگی برای جریان تحت‌فشار را تعیین کنید.

حل:

۱- Clear span

گام ۱. برای جریان عبوری از پل، y_2 با استفاده از معادله زیر حساب می‌شود.

$$y_2 = \left[\frac{K_u Q^2}{D_m^{\frac{2}{3}} W^2}\right]^{\frac{3}{7}} = \left[\frac{0.0077\times 2800^2}{\left(\frac{1.25\times 15.0}{304.8}\right)^{\frac{2}{3}} 40^2}\right]^{\frac{3}{7}} = 10.5\,\text{ft}\,(3.2\,\text{m})$$

گام ۲. ضخامت ناحیه جدا شدگی را با ا ستفاده از معادله (۳-۳۶) برای شرایط نبود جریان روگذر ($h_w = 0$) حساب می‌شود.

$$t = 0.5\left(\frac{h_b.h_t}{h_u^2}\right)^{0.2}\left(1-\frac{h_w}{h_t}\right)^{-0.1}.h_b = 0.5\left(\frac{8\times 2}{10^2}\right)^{0.2}\times 1\times 8 = 2.77\,\text{ft}\,(=0.85\,\text{m})$$

گام ۳. عمق آبشستگی با معادله (۳-۳۴) تعیین می‌شود.

$$y_s = y_2 + t - h_b = 10.5 + 2.77 - 8.0 = 5.27\,\text{ft}\,(=1.6\,\text{m})$$

عدد به‌دست آمده با عمق آبشستگی آب صاف به مقدار 0.5ft (0.15m) در شرایطی که عرشه مستغرق نبود قابل مقایسه است.

مسئله نمونه ۲- شرایط بستر متحرک بدون روگذری جریان

داده‌ها:

تمام جریان از آبگذر پل عبور می‌کند و روگذری جریان اتفاق نمی‌افتد.

پل پایه‌ای ندارد (دهانه آزاد)

عرض آبراهه بالادست (W_1) و عرض بازشدگی پل (W_2) = 40ft (12.2m)

بده کل (Q) = $2800\text{ft}^3/\text{s}$ ($79.3\text{m}^3/\text{s}$)

بده آبراهه اصلی (Q_1) = $2000\text{ft}^3/\text{s}$ ($56.6\ \text{m}^3/\text{s}$)

بده سیلابدشت بالادست = $800\text{ft}^3/\text{s}$ ($22.7\text{m}^3/\text{s}$)

عمق جریان در آبراهه بالادست ($y_1 = h_u$) = 10.0ft (3.0m)

ارتفاع بازشدگی پل (h_b) = 8.0ft (2.4m)

ضخامت عرشه (T) = 3.0ft (0.91m)، در این مسئله از این داده استفاده نمی‌شود.

D_{50} مواد بستر = 1mm ($V_c = 2.4\,\text{ft/s} = 0.74\,\text{m/s}$)

سرعت آبراهه بالادست ($V = \frac{Q_1}{(W h_u)} = \frac{2000}{(40\times 10)} = 5.0\frac{\text{ft}}{\text{s}} = 1.5\frac{\text{m}}{\text{s}}$)

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک در شرایط جریان تحت فشار را تعیین کنید.

حل:

گام ۱. عمق موثر جریان در آبراهه بالادست (h_{ue}) حساب می‌شود.

$h_{ue} = h_u$ (عدم روگذری جریان) $= 10.0\,\text{ft} (= 3.0\,\text{m})$

گام ۲. y_2 برای جریان عبوری از پل حساب می‌شود (معادله پ.۳-۲).

$$y_2 = y_1\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{\frac{6}{7}}\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_1} = 10.0\left(\frac{2800}{2000}\right)^{\frac{6}{7}}\left(\frac{40}{40}\right)^{0.69} = 13.3\,\text{ft}\,(= 4.1\,\text{m})$$

گام ۳. ضخامت ناحیه جداشدگی را با استفاده از معادله (۳-۳۶) برای شرایط نبود جریان روگذر ($h_w = 0$) حساب می‌شود.

$$t = 0.5\left(\frac{h_b.h_t}{h_u^2}\right)^{0.2}\left(1-\frac{h_w}{h_t}\right)^{-0.1}.h_b = 0.5\left(\frac{8\times 2}{10^2}\right)^{0.2}\times 1\times 8 = 2.77\,\text{ft}\,(= 0.85\,\text{m})$$

گام ۴. عمق آبشستگی با معادله (۳-۳۴) تعیین می‌شود.

$$y_s = y_2 + t - h_b = 13.3 + 2.77 - 8.0 = 8.07\,\text{ft}\,(= 2.5\,\text{m})$$

جواب حاصل با عمق آبشستگی بستر متحرک به مقدار $3.3\,\text{ft}$ ($1.0\,\text{m}$) در شرایطی که عرشه مستغرق نبود، قابل مقایسه است.

مسئله نمونه ۳ – شرایط بستر متحرک شامل جریان روگذر از پل

داده‌ها:

پل پایه‌ای ندارد (دهانه آزاد)

عرض آبراهه بالادست (W_1) و عرض بازشدگی پل (W_2) = $40\,\text{ft}$ ($12.2\,\text{m}$)

بده کل (Q) = $2800\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($79.3\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده آبراهه اصلی (Q_1) = $2000\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($56.6\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده سیلابدشت بالادست = $800\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($22.7\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده عبوری از پل (Q_2) = $2200\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($62.3\,\text{m}^3/\text{s}$)

عمق جریان در آبراهه بالادست (h_u) = $12.0\,\text{ft}$ ($3.7\,\text{m}$)

ارتفاع بازشدگی پل (h_b) = $8.0\,\text{ft}$ ($2.4\,\text{m}$)

ضخامت عرشه (T) = $3.0\,\text{ft}$ ($0.91\,\text{m}$)، در این مسئله از این داده استفاده نمی‌شود.

مواد بستر D_{50} = $1\,\text{mm}$ ($V_c = 2.5\,\text{ft/s} = 0.77\,\text{m/s}$)

سرعت آبراهه بالادست ($V = \frac{Q_1}{(W_1 h_u)} = \frac{2000}{(40\times 12)} = 4.2\frac{\text{ft}}{\text{s}} = 1.3\frac{\text{m}}{\text{s}}$)

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک در شرایط جریان تحت‌فشار را تعیین کنید.

حل:

گام ۱. عمق (h_{ue}) و بده (Q_{ue}) موثر جریان در آبراهه بالادست حساب می‌شود.

$$h_{ue} = h_b + T = 8.0 + 3.0 = 11\text{ft}\left(=3.4\text{m}\right)$$

$$Q_{ue} = Q_1\left(\frac{h_{ue}}{h_u}\right)^{\frac{8}{7}} = 2000\left(\frac{11}{12}\right)^{\frac{8}{7}} = 1811\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}\left(=51.3\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

گام ۲. y_2 برای جریان عبوری از پل حساب می‌شود (معادله پ.۳-۲).

$$y_2 = y_1\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{\frac{6}{7}}\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_1} = 11.0\left(\frac{2200}{1811}\right)^{\frac{6}{7}}\left(\frac{40}{40}\right)^{0.69} = 13.0\,\text{ft}\left(=3.9\,\text{m}\right)$$

گام ۳. ضخامت ناحیه جداشدگی را با استفاده از معادله (۳-۳۶) برای شرایط جریان روگذر حساب می‌شود.

$$t = 0.5\left(\frac{h_b.h_t}{h_u^2}\right)^{0.2}\left(1-\frac{h_w}{h_t}\right)^{-0.1}.h_b = 0.5\left(\frac{8\times4}{12^2}\right)^{0.2}\left(1-\frac{4-3}{12-8}\right)^{-0.1}\times8 = 3.05\,\text{ft}\left(=0.93\text{m}\right)$$

گام ۴. عمق آبشستگی با معادله (۳-۳۴) تعیین می‌شود.

$$y_s = y_2 + t - h_b = 13.0 + 3.05 - 8.0 = 8.05\,\text{ft}\left(=2.5\text{m}\right)$$

جواب حاصل با عمق آبشستگی بستر متحرک به مقدار $4.0\,\text{ft}$ ($1.2\,\text{m}$) در شرایطی که عرشه مستغرق نبود و تمام بده از بازشدگی پل عبور می‌کرد قابل مقایسه است.

مسئله نمونه ۴ – شرایط آب صاف، شامل جریان روگذر از پل

داده‌ها:

پل پایه‌ای ندارد (دهانه آزاد)

عرض آبراهه بالادست و عرض بازشدگی پل (W) = $32\,\text{ft}$. ($9.7\,\text{m}$)

بده کل (Q) = $2800\,\text{ft}^3/\text{s}$. ($79.3\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده آبراهه اصلی (Q_1) = $2000\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($56.6\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده سیلابدشت بالادست = $800\,\text{ft}^3/\text{s}$ ($22.7\,\text{m}^3/\text{s}$)

بده عبوری از پل (Q_2) = $2200\text{ft}^3/\text{s}$ ($62.3\text{m}^3/\text{s}$)

ع جریان در آبراهه بالادست (h_u) = $12.0\,\text{ft}$. ($3.7\,\text{m}$)

ارتفاع بازشدگی پل (h_b) = $8.0\,\text{ft}$ ($2.4\,\text{m}$)

ضخامت عرشه (T) = $3.0\,\text{ft}$ (0.91m)، در این مسئله از این داده استفاده نمی‌شود.

مواد بستر D_{50} = $15.0\,\text{mm}$ ($V_c = 6.2\,\text{ft/s} = 1.9\,\text{m/s}$)

سرعت آبراهه بالادست ($V=\frac{Q_1}{(W h_u)}=\frac{2000}{(32\times12)}=5.2\frac{ft}{s}=1.6\frac{m}{s}$)

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تنگ‌شدگی آب صاف در شرایط جریان تحت‌فشار را تعیین کنید.

حل:

گام ۱. y_2 برای جریان عبوری از پل حساب می‌شود.

$$y_2=\left[\frac{K_u Q^2}{D_m^{\frac{2}{3}} W^2}\right]^{\frac{3}{7}}=\left[\frac{0.0077\times2200^2}{\left(\frac{1.25\times15.0}{304.8}\right)^{\frac{2}{3}}32^2}\right]^{\frac{3}{7}}=10.4\,ft\,(3.1m)$$

گام ۲. ضخامت ناحیه جداشدگی را با استفاده از برای شرایط جریان روگذر حساب می‌شود.

$$t=0.5\left(\frac{h_b.h_t}{h_u^2}\right)^{0.2}\left(1-\frac{h_w}{h_t}\right)^{-0.1}.h_b=0.5\left(\frac{8\times4}{12^2}\right)^{0.2}\left(1-\frac{4-3}{12-8}\right)^{-0.1}\times8=3.05\,ft\,(=0.93m)$$

گام ۳. عمق آبشستگی تعیین می‌شود.

$$y_s=y_2+t-h_b=10.4+3.05-8.0=5.45\,ft\,(=1.7m)$$

جواب حاصل با عمق آبشستگی آب صاف به مقدار $2.3ft$ ($0.7m$) در شرایطی که عرشه مستغرق نبود و تمام بده از بازشدگی پل عبور می‌کرد قابل مقایسه است.

پ.۳-۱-۶- آبشستگی موضعی پایه پل‌ها

- معادله HEC-18 (CSU) برای آبشستگی پایه پل

معادله HEC-18 (بر مبنای معادله CSU) برای محاسبه آبشستگی پایه پل در هر دو شرایط آب صاف و بستر متحرک توصیه شده است. این معادله بیشینه عمق آبشستگی را برآورد می‌کند. کاربردهای اصلی این معادله شامل پایه‌های ساده واقع در رودخانه‌های آبرفتی با بستر ماسه‌ای می‌باشد. کاربرد این معادله را می‌توان به پایه‌های عریض، زیرسازه‌های پیچیده (متشکل از ۳ بخش)، محاسبه آبشستگی ناشی از واریزه‌ها و نیز آبشستگی در آبراهه‌های جذر و مدی نیز تعمیم داد. در بخش‌های بعدی، روشی جایگزین با عنوان FDOT که پیچیدگی میدان جریان در پدیده آبشستگی موضعی پایه پل و دامنه کاملی از هندسه پایه را پوشش می‌دهد، معرفی خواهد شد.

معادله HEC-18 به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{y_s}{y_1}=2.0\,K_1\,K_2\,K_3\left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65}Fr_1^{0.43} \qquad (پ.۳-۶)$$

به طور تقریبی برای پایه‌هایی با دماغه گرد که در امتداد جریان قرار گرفته‌اند، بیشینه عمق آبشستگی در محدوده‌های زیر خواهد بود:

$y_s \le 2.4\ a\ ,\quad Fr \le 0.8$ برای (پ.۳-۷)

$y_s \le 3.0\ a\ ,\quad Fr > 0.8$ برای

در روابط فوق، a عرض پایه است.

بر اساس نسبت عمق آبشستگی به عرض پایه (y_s / a)، معادله (پ. ۳-۶) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{y_s}{a} = 2.0\ K_1\ K_2\ K_3 \left(\frac{y_1}{a}\right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \qquad \text{(پ.۳-۸)}$$

که در آن:

y_s = عمق آبشستگی، m (ft)

y_1 = عمق جریان بلافاصله در بالادست پایه، m (ft)

K_1 = ضریب تصحیح مربوط به شکل دماغه پایه با استفاده از شکل (۳-۵۳) یا جدول (پ. ۳-۱)

K_2 = ضریب تصحیح مربوط به زاویه حمله جریان با استفاده از معادله (پ. ۳-۹) یا جدول (پ. ۳-۲)

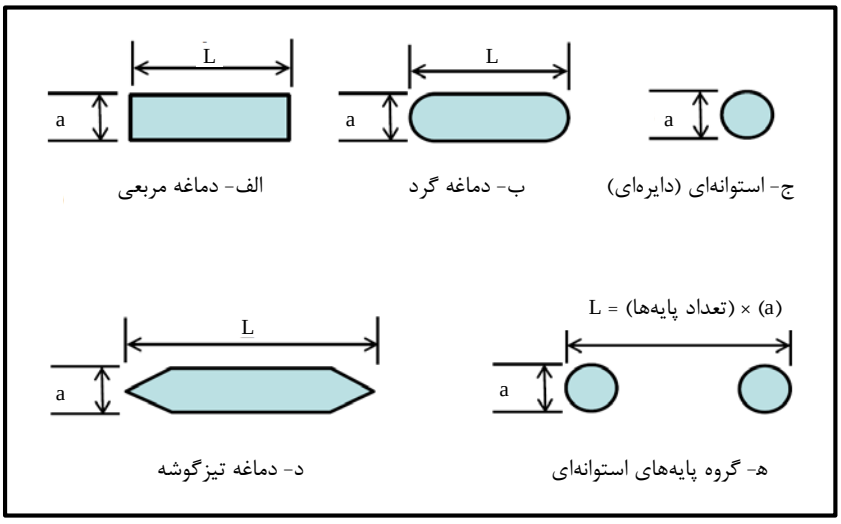
K_3 = ضریب تصحیح مربوط به شرایط بستر با استفاده از جدول (پ. ۳-۳)

a= عرض پایه، m (ft)

L= طول پایه، m (ft)

Fr_1 = عدد فرود بلافاصله در بالادست پایه = $V_1 / (g\ y_1)^{\frac{1}{2}}$

V_1 = سرعت متوسط جریان بلافاصله در بالادست پایه، m/s، g = شتاب گرانش، ($9.81\ m/s^2$)



شکل پ.۳-۲- شکل‌های متداول پایه‌های پل [۱۲۷]

جدول پ. ۳-۱- ضریب تصحیح K_1، مربوط به شکل دماغه پایه‌ها

شکل دماغه پایه	K_1
(الف) دماغه مربعی	1.1
(ب) دماغه گرد	1.0
(ج) دماغه استوانه‌ای (دایره‌ای)	1.0
(د) دماغه تیزگوشه	0.9
(ه) گروه پایه‌های استوانه‌ای	1.0

ضریب تصحیح K_2، برای زاویه حمله جریان با رابطه زیر حساب می‌شود:

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{a}\sin\theta \right)^{0.65} \qquad \text{(پ.۳-۹)}$$

اگر نسبت L/a بزرگ‌تر از ۱۲ است، از $L/a = 12$ به‌عنوان ماکزیمم در معادله بالا و جدول (پ.۳-۲) استفاده کنید. جدول (پ. ۳-۲) میزان تاثیر زاویه حمله جریان بر آبشستگی موضعی پایه پل را نشان می‌دهد.

جدول پ. ۳-۲- ضریب تصحیح K_2 مربوط به زاویه حمله جریان

$L/a = 12$	$L/a = 8$		
1.0	1.0	1.0	0
2.5	2.0	1.5	15
3.5	2.75	2.0	30
4.3	3.3	2.3	45
5.0	3.9	2.5	90
زاویه = زاویه انحراف جریان[۱]			
L = طول پایه پل			

جدول پ. ۳-۳- میزان افزایش در عمق آبشستگی تعادلی پایه، K_3، مربوط به شرایط بستر

شرایط بستر	ارتفاع تلماسه	K_3
آبشستگی آب صاف	وجود ندارد (N/A)	1.1
بستر مسطح و پادتلماسه	وجود ندارد (N/A)	1.1
تلماسه‌های کوچک	$2 \le H < 10$	1.1
تلماسه‌های متوسط	$10 \le H < 30$	1 تا 1.2
تلماسه‌های بزرگ	$30 \le H$	1.3

نکات:

۱- مقدار ضریب تصحیح K_1 برای شکل دماغه پایه برای زاویه‌های حمله تا ۵ درجه باید از جدول (پ.۳-۱) تعیین شود. برای زاویه‌های بزرگ‌تر، ضریب K_2 غالب بوده و K_1 باید برابر با ۱ در نظرگرفته شود. اگر L/a بزرگ‌تر از ۱۲ است، مقادیر مربوط به $L/a = 12$ را به‌عنوان ماکزیمم در جدول (پ.۳-۲) و معادله (پ.۳-۹) استفاده کنید.

۱- Skew angle

۲- مقادیر ضریب تصحیح K_2 فقط هنگامی باید اعمال شوند که شرایط میدانی به‌گونه‌ای باشد که تمام طول پایه در معرض زاویه حمله جریان قرار می‌گیرد. اگر از برخورد مستقیم جریان به بخشی از یک پایه به‌دلیل وجود یک تکیه‌گاه یا پایه دیگری جلوگیری شود یا تکیه‌گاه یا پایه دیگری، جریان را در جهتی موازی با پایه مورد نظر تغییر جهت دهد، استفاده از این ضریب منجر به بیش برآورد قابل ملاحظه‌ای در عمق آبشستگی می‌شود. در چنین مواردی، باید با انتخاب طول موثر پایه که واقعا در معرض زاویه حمله جریان قرار دارد، مقدار ضریب K_2 اصلاح و تعدیل شود. معادله (پ.۳-۹) باید برای ارزیابی و طراحی استفاده شود. جدول (۳-۱۱) در نظر دارد تا اهمیت زاویه حمله جریان در محاسبات آبشستگی پایه پل را نشان دهد و در عین حال یک حد نهایی برای آن مشخص نماید (یعنی بیشینه مقدار ۵).

۳- ضریب تصحیح K_3 بر اساس این واقعیت در نظر گرفته شده است که برای شرایط بستر مسطح که به ازای دوره بازگشت‌های سیل که در طراحی آبشستگی اعمال می‌شود، در بیش‌تر محل‌های ساخت پل معمول است، بیشینه عمق آبشستگی ممکن است ۱۰٪ بیش‌تر از مقدار محاسبه شده با معادله (پ.۳-۶) باشد. در شرایط غیرمعمول در هنگام جریان‌های سیلابی ممکن است تلماسه‌های بزرگی روی بستر تشکیل شده باشد، در این وضعیت بیشینه عمق آبشستگی ممکن است ۳۰٪ بزرگ‌تر از مقدار محاسبه شده با معادله مذکور باشد. این وضعیت ممکن است در رودخانه‌های بزرگ رخ دهد. در رودخانه‌های کوچک‌تر که روی بستر تلماسه شکل می‌گیرد، تلماسه‌ها کوچک‌تر هستند و بیشینه عمق آبشستگی ممکن است فقط ۱۰ تا ۲۰ درصد بیش‌تر از مقدار محاسبه شده باشد. برای فرم بسترهای پادتلماسه، بیشینه عمق آبشستگی ممکن است ۱۰ در صد بزرگ‌تر از مقدار محاسبه شده باشد.

۴- برای پایه‌هایی که نزدیک به تکیه‌گاه‌ها هستند (برای مثال در پنجه یک تکیه‌گاه ریزشی)، باید زاویه حمله و سرعت جریانی که از طرف تکیه‌گاه می‌آید به دقت بررسی و تعیین شود.

پ.۳-۱-۷- روش اداره حمل و نقل فلوریدا[۱] (FDOT) برای محاسبه آبشستگی پایه پل

روش FDOT بر مبنای آنالیز ابعادی کامل‌تری نسبت به معادله HEC-18، به‌دست آمده است. در این روش علاوه بر سرعت، عمق، زاویه حمله جریان، هندسه و شکل پایه، اندازه ذرات رسوب نیز لحاظ شده است. همچنین در این روش با استفاده از هندسه و شکل پایه و زاویه حمله، عرض موثر پایه (a^*) حساب می‌شود و علاوه بر آن شرایط آبشستگی آب صاف و بستر متحرک هم تفکیک می‌شوند.

۱- Florida DOT methodology

با وجود این‌که معادله HEC-18 در بیش‌تر موارد نتایج خوبی می‌دهد، روش FDOT باید به عنوان یک روش جایگزین در نظر گرفته شـود، به‌ویژه برای پایه‌های عریض ($y/a<0.2$) در جریان‌های کم‌عمق و سـطحی با مواد بسـتر ریزدانه. روش FDOT به صورت مجموعه معادله‌های زیر بیان می‌شود:

$$\frac{y_s}{a^*}=2.5f_1f_2f_3 \quad \text{برای} \quad 0.4\le\frac{V_1}{V_c}<1.0 \qquad \text{(پ.۳-۱۰)}$$

$$\frac{y_s}{a^*}=f_1\left[2.2\left(\frac{\frac{V_1}{V_c}-1}{\frac{V_{lp}}{V_c}-1}\right)+2.5f_3\left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c}-\frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c}-1}\right)\right] \quad \text{برای} \quad 1.0\le\frac{V_1}{V_c}<\frac{V_{lp}}{V_c} \qquad \text{(پ.۳-۱۱)}$$

$$\frac{y_s}{a^*}=2.2f_1 \quad \text{برای} \quad \frac{V_{lp}}{V_c}<\frac{V_1}{V_c} \qquad \text{(پ.۳-۱۲)}$$

$$f_1=\tanh\left[\left(\frac{y_1}{a^*}\right)^{0.4}\right] \qquad \text{(پ.۳-۱۳)}$$

$$f_2=\left\{1-1.2\left[\ln\left(\frac{V_1}{V_c}\right)\right]^2\right\} \qquad \text{(پ.۳-۱۴)}$$

$$f_3=\left[\frac{\left(\frac{a^*}{D_{50}}\right)^{1.13}}{10.6+0.4\left(\frac{a^*}{D_{50}}\right)^{1.33}}\right] \qquad \text{(پ.۳-۱۵)}$$

که در آن:

y_s = عمق آبشستگی پایه پل، m (f)

a^* = عرض موثر پایه، m

V_1 = سرعت متوسط جریان بلافاصله در بالادست پایه، m / s

V_{lp} = سرعت بیشینه در شرایط بستر متحرک[۱]، m / s

V_c = سرعت بحرانی برای جابجایی و حرکت ذراتی با اندازه D_{50} که در زیر تعریف شده است، m / s

D_{50} = اندازه میانه ذرات مواد بستر، m

$$V_{lp}=5V_c \quad \text{یا} \quad 0.6\sqrt{g\,y_1} \quad \text{(هرکدام که بزرگ‌تر باشد)} \qquad \text{(پ.۳-۱۶)}$$

$$V_c=5.75u_c^*\log\left(5.53\frac{y_1}{D_{50}}\right) \qquad \text{(پ.۳-۱۷)}$$

در رابطه بالا، D_{50} اندازه میانه مواد بستر (m) است، و u_c^* نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

۱- Live-bed peak velocity

$$u_c^* = K_u\left(0.0377 + 0.041 D_{50}^{1.4}\right) \quad (0.1\ \text{mm} < D_{50} < 1\text{mm} \text{ برای}) \qquad (پ.۳-۱۸)$$

$$u_c^* = K_u\left(0.1 D_{50}^{0.5} - \frac{0.0213}{D_{50}}\right) \quad (1\ \text{mm} < D_{50} < 100\,\text{mm} \text{ برای}) \qquad (پ.۳-۱۹)$$

توجه شود که در روابط u_c^*، یکای D_{50} باید حسب mm باشد.

در دو رابطه بالا:

D_{50} = اندازه میانه مواد بستر، mm.

$K_u = 1.0$ (در سیستم آحاد انگلیسی)

$K_u = 0.3048$ (در سیستم آحاد متریک)

عرض موثر پایه (a^*) از حاصلضرب عرض تصویر شده‌ی پایه و فاکتور شکل[۱] K_{sf} به‌دست می‌آید.

$$a^* = K_{sf}\, a_{proj} \qquad (پ.۳-۲۰)$$

فاکتور شکل برای پایه‌های استوانه‌ای یا با دماغه گرد برابر با ۱ و برای پایه‌هایی با دماغه مربعی، به زاویه حمله جریان بستگی دارد:

$$K_{sf} = 1.0 \quad (\text{برای پایه‌های استوانه‌ای یا با دماغه گرد}) \qquad (پ.۳-۲۱)$$

$$K_{sf} = 0.86 + 0.97\left(\left|\frac{\pi\theta}{180} - \frac{\pi}{4}\right|\right) \quad (\text{برای پایه‌هایی با دماغه مربعی}) \qquad (پ.۳-۲۲)$$

که در آن:

θ = زاویه حمله جریان حسب درجه

عرض تصویر شده پایه نیز با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$a_{proj} = a\cos\theta + L\sin\theta \qquad (پ.۳-۲۳)$$

در رابطه بالا:

a_{proj} = عرض تصویر شده پایه در جهت جریان، m

a = عرض پایه، m

L= طول پایه، m

برای استفاده از روش FDOT مراحل زیر به صورت گام به گام انجام می‌شود:

۱- V_c با معادله (پ.۳-۱۷) حساب می‌شود.

۲- V_{lp} با معادله (پ.۳-۱۶) حساب می‌شود.

۳- a^* با معادله (پ.۳-۲۰) حساب می‌شود.

۱- Shape factor

۴- f_1 با معادله (پ.۳-۱۳) حساب می‌شود (توجه: مقادیر تانژانت هایپربولیک در جدول (پ.۳-۴) ارائه شده است).

۵- f_3 با معادله (پ.۳-۱۵) حساب می‌شود.

۶- نسبت $\frac{y_{s-c}}{a^*}$ و y_{s-c} (در ادامه تعریف شده است) حساب می‌شود.

۷- نسبت $\frac{y_{s-lp}}{a^*}$ و y_{s-lp} (در ادامه تعریف شده است) حساب می‌شود.

۸- اگر $V_1 < 0.4V_c$، آنگاه $y_s = 0$

۹- اگر $0.4V_c < V_1 \le V_c$ آنگاه f_2 محاسبه می‌شود و $y_s = f_2\, y_{s-c}$

۱۰- اگر $V_{lp} \le V_1$ آنگاه $y_s = y_{s-lp}$

۱۱- اگر $V_c < V_1 < V_{lp}$ آنگاه y_s از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$y_s = y_{s-c} + \frac{(V_1 - V_c)}{(V_{lp} - V_c)}\left(y_{s-lp} - y_{s-c}\right) \qquad \text{(پ.۳-۲۴)}$$

معادله بالا، نسخه ساده شده معادله (پ.۳-۱۱) است. y_{s-c} آبشستگی در سرعت بحرانی برای حرکت مواد بستر (V_c) است و با رابطه تعیین می‌شود. y_{s-lp} آبشستگی در سرعت بیشینه شرایط بستر متحرک (V_{lp}) است و با رابطه $2.2f_1a^*$ محاسبه می‌شود.

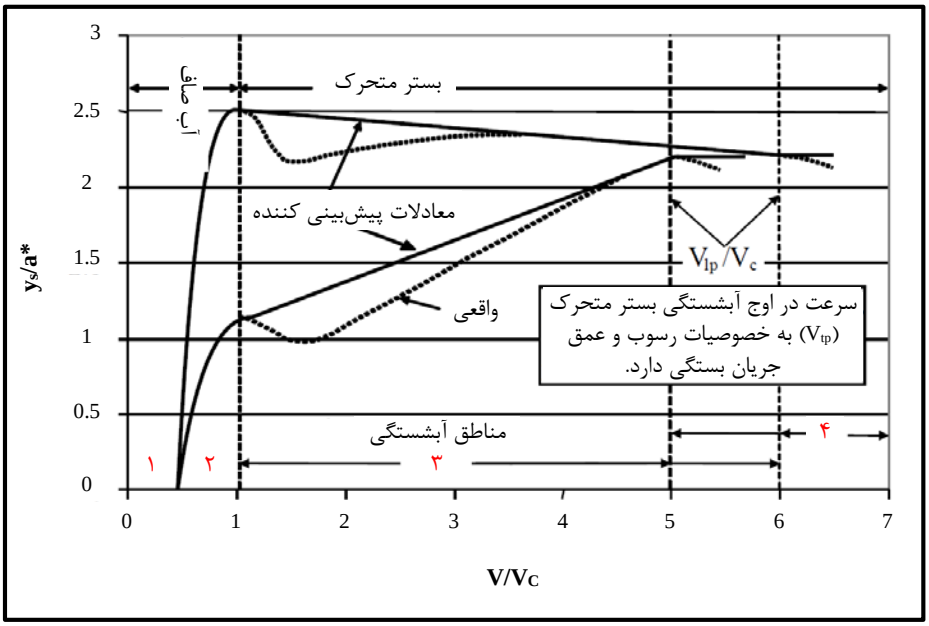
جدول پ. ۳-۴- مقادیر تانژانت هایپربولیک X ((tanh(x))

X	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹
۰/۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹
۰/۱	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۹
۰/۲	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۸
۰/۳	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۳۷
۰/۴	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۴۵
۰/۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۳
۰/۶	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۶۰
۰/۷	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۶
۰/۸	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۷۱
۰/۹	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۶
۱/۰	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۸۰
۱/۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۳
۱/۱	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۳
۱/۲	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۶
۱/۳	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸
۱/۴	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰
۱/۵	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲
۱/۶	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳

۱/۷	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۵
۱/۸	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۶
۱/۹	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶
۲/۰	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷
۲/۱	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸
۲/۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
۲/۳	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
۲/۴	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
۲/۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
۲/۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
۲/۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
۲/۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
۲/۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
> =۳/۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

روش FDOT برای آبشستگی پایه پل دارای چهار بخش می‌باشد که در شکل (پ.۳-۳) نشان داده شده است.

- ناحیه آبشستگی ۱ (گام ۸، بالا) برای شرایط آب صاف که سرعت جریان به اندازه‌ای کم است که موجب آبشستگی نمی شود، می‌باشد. این ناحیه مربوط به سرعت‌های کم‌تر از $0.4V_c$ است. به‌ندرت ممکن است در برخی موارد آزمایشگاهی در این حالت هم آبشستگی رخ دهد.
- ناحیه آبشستگی ۲ نیز برای شرایط آب صاف که با سرعت‌های جریانی که به اندازه کافی بزرگ هستند تا موجب آبشستگی پایه پل شوند ($0.4V_c < V_1 < V_c$) همان‌گونه که در بالا در گام ۹، تعریف شد، می‌باشد.
- ناحیه آبشستگی ۴ با سرعت بیشینه شرایط بستر متحرک (V_{lp}) تعریف شده است، جایی که بیشینه آبشستگی بستر متحرک در سرعت‌های $5V_c$ یا بیش‌تر رخ می‌دهد. برای سرعت‌های بزرگ‌تر از V_{lp}، عمق آبشستگی y_{s-lp} (گام ۱۰) محاسبه می‌شود.
- آبشستگی‌های بستر متحرک که به ازای سرعت‌های جریان بین سرعت بحرانی و سرعت بیشینه شرایط بستر متحرک ($V_c < V_1 < V_{lp}$) رخ می‌دهند، در ناحیه ۳ آبشستگی قرار می‌گیرند، همان‌گونه که در گام ۱۱ و معادله (پ.۳-۲۴) تعریف شده است.



شکل پ.۳-۳- چهار ناحیه آبشستگی در روش FDOT

پ.۳-۱-۸- مسائل نمونه آبشستگی موضعی پایه پل

مسئله نمونه ۱- آبشستگی در اطراف یک پایه ساده

داده‌ها:

هندسه پایه: $a = 4.0\ \text{ft}\,(1.22\ \text{m})$، $L = 59\ \text{ft}\,(18\ \text{m})$، دماغه گرد

متغیرهای جریان: $y_1 = 10.2\ \text{ft}\,(3.12\ \text{m})$، $V_1 = 11.02\ \text{ft/s}\,(3.36\ \text{m/s})$

زاویه حمله جریان: صفر درجه، $g = 32.2\ \text{ft/s}^2\ (9.81\ \text{m/s}^2)$

عدد فرود: $\text{Fr} = 11.02/(32.2\times10.2)^{0.5} = 0.61$

مواد بستر: $D_{50} = 7.3\ \text{mm}\,(0.024\ \text{ft})$

ساختار بستر: بستر مسطح

تعیین کنید: عمق آبشستگی پایه پل

حل:

برای محاسبه عمق آبشستگی از معادله (پ.۳-۶) استفاده می‌شود:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0\ K_1\ K_2\ K_3 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} \text{Fr}_1^{0.43}$$

$$\frac{y_s}{10.2} = 2.0\,(1.0)(1.0)(1.1)\left(\frac{4.0}{10.2}\right)^{0.65} \times (0.61)^{0.43} = 0.97$$

$$y_s = 0.97\times10.2 = 9.9\ \text{ft}\,(3\ \text{m})$$

کنترل:

$y_{s\ max} = 2.4\ a$

$y_{s\ max} = 2.4(4.0) = 9.6\ ft$

مسئله نمونه ۲- زاویه حمله

داده‌ها:

داده‌ها همان داده‌های مسئله ۱ است با این تفاوت که در این‌جا زاویه حمله ۲۰ درجه است.

تعیین کنید: عمق آبشستگی پایه پل

حل:

برای محاسبه عمق آبشستگی از معادله (پ.۳-۸) استفاده می‌شود:

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{a}\sin\theta\right)^{0.65}$$

اگر نسبت L/a بزرگ‌تر از ۱۲ باشد، از $L/a = 12$ به‌عنوان ماکزیمم در معادله بالا استفاده می‌شود (جدول پ.۳-۲)

$\frac{L}{a} = \frac{59}{4.0} = 14.8 > 12 \rightarrow$ از مقدار ۱۲ استفاده می‌شود.

$K_2 = (\cos 20 + 12\sin 20)^{0.65} = 2.86$

$y_s = 9.9 \times 2.86 = 28.3\ ft\ (8.6\ m)$

مسئله نمونه ۳ – روش FDOT برای محاسبه عمق آبشستگی

داده‌ها:

شرایط همانند مسئله ۲ است.

تعیین کنید: عمق آبشستگی پایه پل

حل:

گام ۱: سرعت بحرانی V_c به ازای $D_{50} = 7.3\ mm\ (0.024\ ft)$ و $y_1 = 10.2\ ft$ حساب می‌شود.

$$u_c^* = K_u\left(0.1 D_{50}^{0.5} - \frac{0.0213}{D_{50}}\right) = 1.0\left(0.1 \times 7.3^{0.5} - \frac{0.0213}{7.3}\right) = 0.27\frac{ft}{s}\left(=0.081\frac{m}{s}\right)$$

$$V_c = 5.75\ u_c^* \log\left(5.53 \times \frac{y_1}{D_{50}}\right) = 5.75 \times 0.27 \times \log\left(5.53 \times \frac{10.2}{0.024}\right) = 5.2\frac{ft}{s}\left(=1.6\frac{m}{s}\right)$$

گام ۲: سرعت بحرانی V_{lp} به ازای $D_{50} = 7.3\ mm$ و $y_1 = 10.2\ ft$ حساب می‌شود.

$$5\ V_c = 5 \times 5.2 = 26.0\frac{ft}{s}\left(=7.9\frac{m}{s}\right)$$

$$0.6\sqrt{g\ y_1} = 0.6\sqrt{32.2 \times 10.2} = 10.9\frac{ft}{s}\left(=3.3\frac{m}{s}\right)$$

بنابراین:

$$V_{lp} = 26.0\,\frac{ft}{s}\left(= 7.9\,\frac{m}{s}\right)$$

گام ۳: مقدار a^* برای پایه با دماغه گرد، به ازای $a = 4.0$ ft و $L = 48$ ft حساب می‌شود.

توجه: در این مثال نسبت L/a برابر با ۱۲ برای روش FDOT اعمال شده است.

$$K_{sf} = 1.0$$

$$a_{proj} = a\cos\theta + L\sin\theta = 4.0\cos(20) + 48\sin(20) = 20.2\ \text{ft}\,(= 6.16\ \text{m})$$

$$a^* = K_{sf} \times a_{proj} = 1.0 \times 20.2 = 20.2\ \text{ft}\,(6.16\ \text{m})$$

گام ۴: محاسبه f_1

$$f_1 = \tanh\left[\left(\frac{y_1}{a^*}\right)^{0.4}\right] = \tanh\left[\left(\frac{10.2}{20.2}\right)^{0.4}\right] = \tanh(0.76) = 0.64$$

گام ۵: محاسبه f_3

$$D_{50} = \frac{7.3}{304.8} = 0.024\ \text{ft}\,(0.0073\ \text{m})$$

$$\frac{a^*}{D_{50}} = \frac{20.2}{0.024} = 842$$

$$f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{D_{50}}\right)^{1.13}}{10.6 + 0.4\left(\frac{a^*}{D_{50}}\right)^{1.33}}\right] = \left[\frac{842^{1.13}}{10.6 + 0.4(842)^{1.33}}\right] = 0.65$$

گام ۶: محاسبه $\frac{y_{s_c}}{a^*}$ و y_{s_c}

$$y_{s_c} = 1.04\ a^* = 1.04(20.2) = 21.0\ \text{ft}\,(6.4\ \text{m})$$

گام ۷: محاسبه $\frac{y_{s_lp}}{a^*}$ و y_{s_lp}

$$\frac{y_{s_lp}}{a^*} = 2.2\ f_1 = 2.2\,(0.64) = 1.41$$

$$y_{s_lp} = 1.41\ a^* = 1.41(20.2) = 28.5\ \text{ft}\,(8.68\ \text{m})$$

پس از گام ۷، به گام ۱۱ می‌رویم، چون V_1 بزرگ‌تر از V_c و کوچک‌تر از V_{lp} است ($V_c < V_1 < V_{lp}$).

گام ۱۱: y_s با معادله (پ.۳-۲۴) حساب می‌شود:

$$y_s = y_{s_c} + \frac{(V_1 - V_c)}{(V_{lp} - V_c)}\left(y_{s_lp} - y_{s_c}\right) = 21.0 + \frac{(11.02 - 5.2)}{(26.0 - 5.2)}(28.5 - 21.0) = 23.1\ \text{ft}\,(7.04\ \text{m})$$

با مقایسه این عمق آبشستگی به‌دست آمده با مقدار $28.3\ \text{ft}(8.6\ \text{m})$ از مسئله نمونه ۲، کاهش $5.2\ \text{ft}(1.58\ \text{m})$ یا ۱۹ درصد مشاهده می‌شود.

پ.۳-۱-۹- معادله‌های تخمین آبشستگی تکیه‌گاه‌ها

برای کنترل عمق آبشستگی احتمالی، به منظور استفاده در طراحی شالوده و جانمایی سنگریزه یا دیواره‌های هادی، می‌توان از معادله فروهلیچ برای آبشستگی در شرایط بستر متحرک یا معادله HIRE [۱۲۶] استفاده کرد. در ادامه دو معادله مذکور و یک روش جدیدتر [۱۹۸] برای محاسبه آبشستگی تکیه‌گاه پل ارائه شده است.

- معادله فروهلیچ[1] (Froehlich) برای آبشستگی تکیه‌گاه پل

فروهلیچ (TRB 1989) [۱۹۹]، با بررسی ۱۷۰ اندازه‌گیری عمق آبشستگی بستر متحرک در فلوم‌های آزمایشگاهی و با استفاده از تحلیل رگرسیونی، معادله زیر را به‌دست آورد:

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27\ K_1\ K_2 \left(\frac{L'}{y_a}\right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1 \qquad (پ.۳-۲۵)$$

که در آن:

K_1 = ضریب شکل تکیه‌گاه (جدول پ.۳-۱)

K_2 = ضریب مربوط به زاویه تکیه‌گاه نسبت به جریان، $K_2 = (\theta/90)^{0.13}$ (تعریف θ در شکل (۳-۶۴) نشان داده شده است).

اگر تگیه‌گاه به سمت پایین‌دست متمایل شده ($\theta < 90°$) و چنانچه تکیه‌گاه به طرف بالادست قرارگرفته باشد ($\theta > 90°$)

L' = طول جریان فعال[2] که توسط خاکریز سد شده است، m (ft)

A_e = مساحت جریان در مقطع جریان نزدیک‌شونده که توسط خاکریز مسدود شده است، m^2 (ft^2)

Fr= عدد فرود جریان نزدیک‌شونده در بالادست تکیه‌گاه، $V_e / (g\ y_a)^{\frac{1}{2}}$

$V_e = Q_e / A_e$ ، m/s (ft/s)

Q_e = جریان مسدود شده توسط تکیه‌گاه و خاکریز دسترسی، m^3 (ft^3)

y_a = عمق متوسط جریان در سیلابدشت (A_e / L)، m (ft)

L= طول خاکریز در امتداد عمود بر جریان، m (ft)

y_s = عمق آبشستگی تکیه‌گاه، m (ft)

۱- Froehlich’s abutment scour equation

۲- Active flow

- معادله HIRE برای آبشستگی تکیه‌گاه پل

از این معادله که در اصل با استفاده از داده‌های میدانی مربوط به انتهای آبشکن‌ها استخراج شده است می‌توان برای تخمین آبشستگی تکیه‌گاه پل استفاده کرد. نسخه اصلاح شده این معادله را در شرایطی که طول تصویر شده تکیه‌گاه (L) به عمق جریان (y_1) بزرگ‌تر از ۲۵ باشد، می‌توان به‌کار برد. از این معادله برای تخمین عمق آبشستگی (y_s) تکیه‌گاه‌هایی که شرایط آن‌ها مشابه شرایط استخراج معادله باشد، می‌توان استفاده کرد. معادله HIRE به صورت زیر است:

$$\frac{y_s}{y_1} = 4\ Fr^{0.33}\ \frac{K_1}{0.55}\ K_2 \qquad \text{(پ.۳-۲۶)}$$

که در آن:

y_s = عمق آبشستگی تکیه‌گاه، m (ft)

y_1 = عمق جریان در محل تکیه‌گاه در روکرانه یا آبراهه اصلی رودخانه، m (ft)

Fr= عدد فرود که بر مبنای سرعت و عمق جریان در مجاورت و بالادست تکیه‌گاه محاسبه می‌شود.

K_1 = ضریب شکل تکیه‌گاه (جدول پ.۳-۱)

K_2 = ضریب مربوط به زاویه تکیه‌گاه نسبت به جریان، $K_2 = (\theta/90)^{0.13}$ (همانند معادله فروهلیچ)

- روش NCHRP 24-20 برای محاسبه آبشستگی تکیه‌گاه

NCHRP (2010b) برای محدوده‌ای از شرایط نظیر نوع تکیه‌گاه، موقعیت تکیه‌گاه، شرایط جریان و شرابط انتقال رسوب، معادله‌هایی را توسعه داده است. در شکل (پ.۳-۴-) مشخصه‌های سه نوع آبشستگی شامل (الف) وقوع آبشستگی هنگامی که تکیه‌گاه در داخل آبراهه اصلی و یا نزدیک به آن قرار دارد، (ب) آبشستگی هنگامی که تکیه‌گاه از آبراهه اصلی فاصله دارد و (ج) آبشستگی هنگامی که تکیه‌گاه شکافته[۱] شده و شالوده تکیه‌گاه به‌عنوان پایه عمل می‌کند، نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (پ.۳-۴) نشان داده شده است، بر اساس نتایج مطالعات NCHRP، هنگامی که پایداری ژئوتکنیکی خاکریز و کناره رودخانه تامین باشد، عمق آبشستگی تکیه‌گاه به مقدار مشخصی محدود می شود. عمق آبشستگی تکیه‌گاه که با روش NCHRP حساب می‌شود، آبشستگی کل[۲] می‌باشد به این معنی که عمق محاسبه شده به آبشستگی تنگ‌شدگی اضافه نمی‌شود و عمق آبشستگی به‌دست آمده از روش NCHRP، آبشستگی تنگ‌شدگی را نیز در بردارد. مزایای استفاده از روش NCHRP عبارتند از ۱- عدم استفاده از طول موثر خاکریز که در بسیاری از موارد تعیین آن مشکل است، ۲- معادله‌های روش NCHRP، فیزیک فرایندهای آبشستگی تکیه‌گاه را بهتر نشان می‌دهند

۱- Breached

۲- Total scour

و ۳- معادله‌های روش NCHRP، آبشستگی کل را محاسبه می‌کنند (آبشستگی تکیه‌گاه و آبشستگی تنگ شدگی). معادله‌های روش مذکور، برای آبشستگی‌های نوع (الف) و (ب) به صورت زیر است:

$$y_{max} = \alpha_A \, y_c \quad \text{یا} \quad y_{max} = \alpha_B \, y_c \qquad \text{(پ.۳-۲۷)}$$

$$y_s = y_{max} - y_0 \qquad \text{(پ.۳-۲۸)}$$

که در آن:

y_{max} = بیشینه عمق جریان، ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه m (ft)

y_c = عمق جریان شامل آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک یا آب صاف، m (ft)

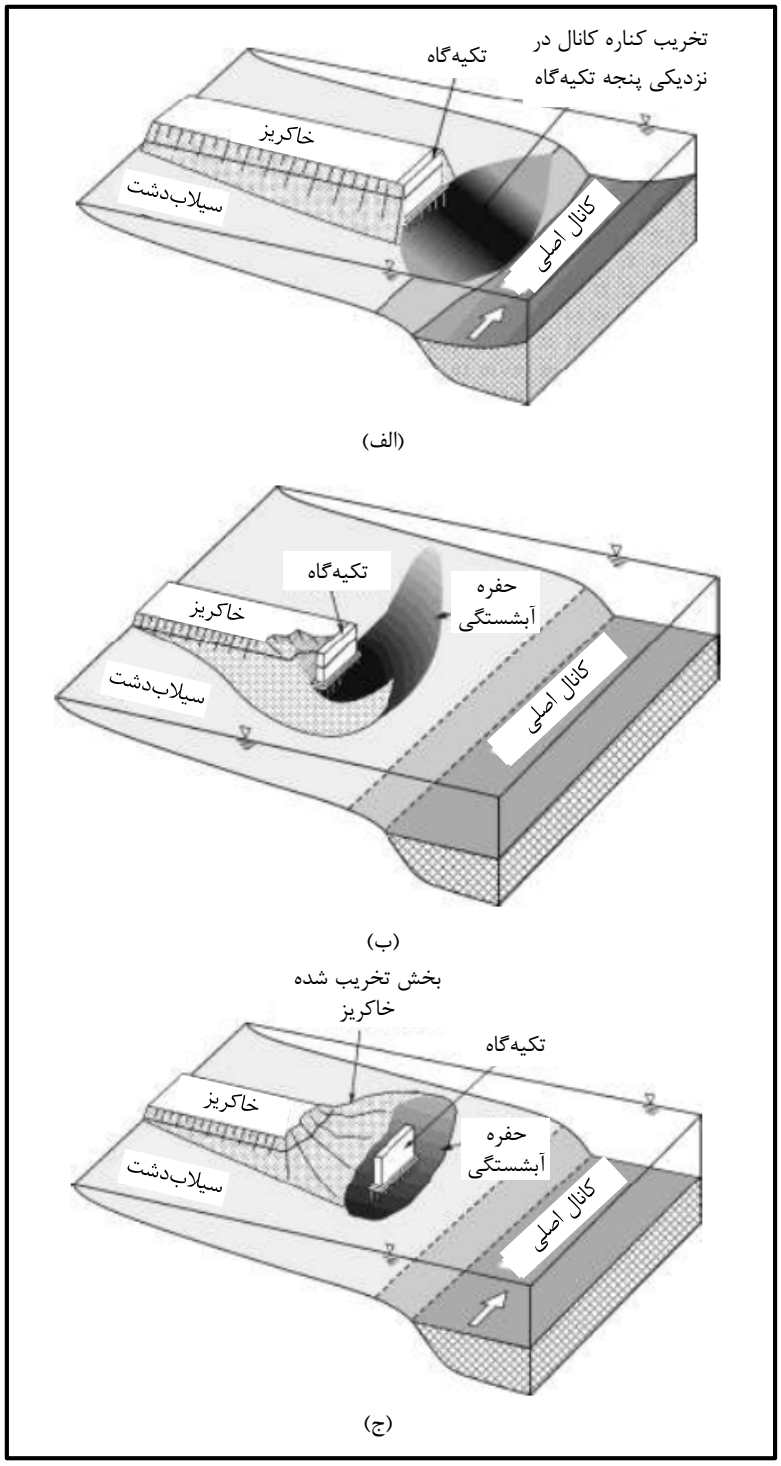
α_A = ضریب تشدید[1] برای شرایط بستر زنده

α_B = ضریب تشدید برای شرایط آب صاف

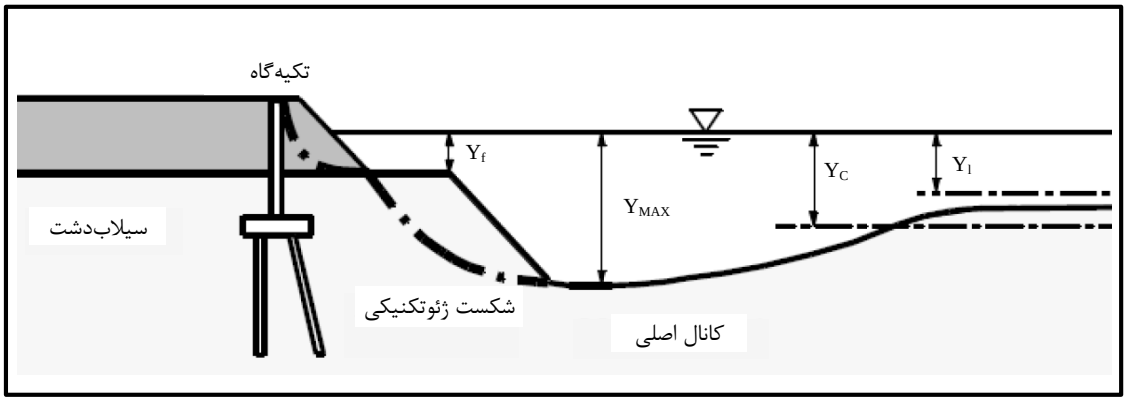
y_s = عمق آبشستگی تکیه‌گاه m (ft)

y_0 = عمق جریان قبل از آبشستگی، m (ft)

۱- Amplification factor



شکل پ.۳-۴- شرایط سه نوع آبشستگی تکیه‌گاه [۱۲۷]



شکل پ.۳-۵- شماتیک شکست ژئوتکنیکی ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه [۱۲۷]

بر اساس مطالعات NCHRP (2010b) [۱۹۷]، اگر طول تصویر شده خاکریز L، حدود ۷۵ در صد و یا بیش‌تر از عرض سیلابدشت (B_f) باشد، آبشستگی نوع (الف) در شکل (پ.۳-۴) رخ می‌دهد و محاسبات آبشستگی تنگ‌شدگی بر مبنای شرایط بستر متحرک انجام می‌شود. معادله آبشستگی تنگ‌شدگی که در این‌جا استفاده می‌شود، نسخه ساده شده‌ای از معادله آبشستگی بستر متحرک است که در بخش‌های پیشین ارائه شده است. معادله نسبت‌های مربوط به بده و عرض را به دلیل مشابه بودن نماها ادغام می‌کند. از طرفی عدم‌قطعیت‌های دیگر اهمیت بیش‌تری دارند. با ادغام بده و عرض، معادله آبشستگی بستر متحرک، به نسبت دو بده در واحد عرض کاهش می‌یابد. بده واحد (q) را می‌توان هم از تقسیم بده بر عرض و هم از حاصل‌ضرب سرعت و عمق، به‌دست آورد. بنابراین معادله آبشستگی تنگ‌شدگی به صورت زیر خواهد بود:

$$y_c = y_1\left(\frac{q_{2c}}{q_1}\right)^{\frac{6}{7}} \qquad \text{(پ.۳-۲۹)}$$

که در آن:

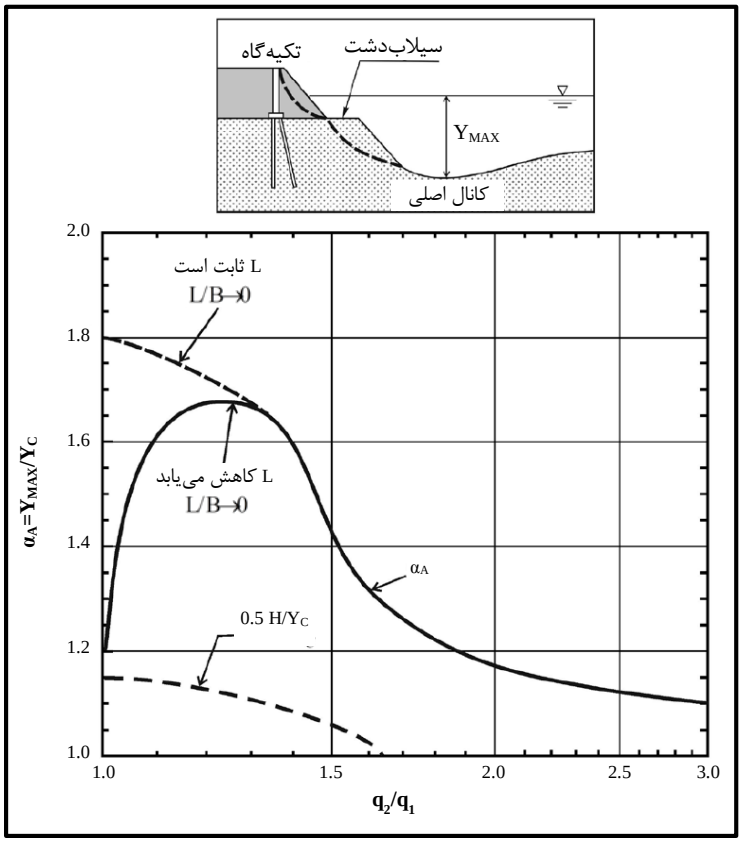
y_c = عمق جریان، شامل آبشستگی تنگ‌شدگی بستر متحرک m (ft)

y_1 = عمق جریان بالادست، m (ft)

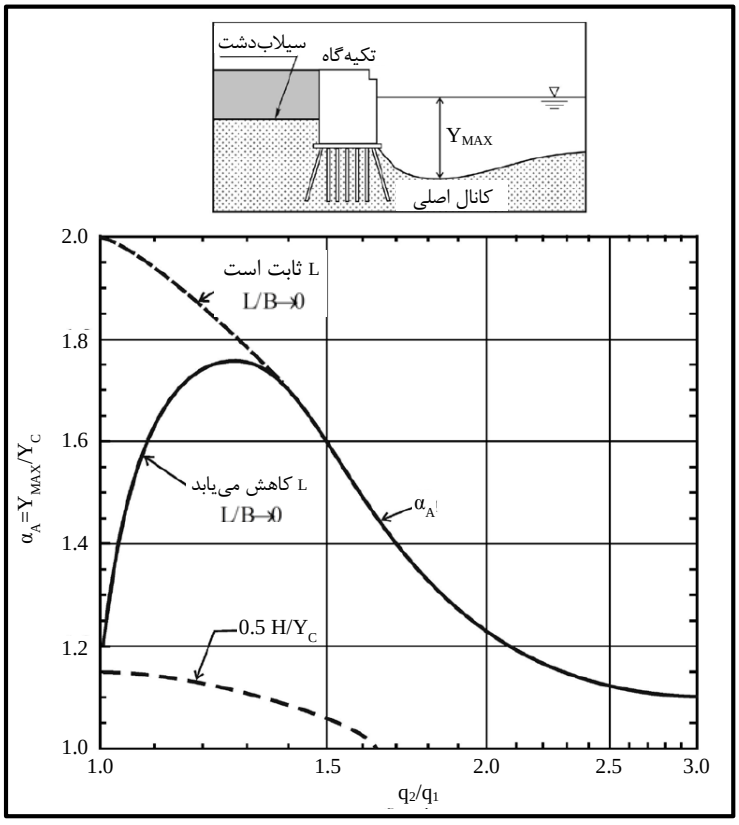
q_1 = بده واحد بالادست، m^2/s (ft^2/s)

q_{2c} = بده واحد در مقطع تنگ‌شده که توزیع جریان غیریکنواخت را بیان می‌کند، m^2/s (ft^2/s)

مقدار q_{2c} را می‌توان با تقسیم بده کل در بازشدگی پل به عرض بازشدگی به‌دست آورد. سپس y_c در معادله (پ.۳-۲۷) قرار می‌گیرد تا عمق کل جریان در محل تکیه‌گاه محاسبه شود. مقدار α_A، برای تکیه‌گاه‌های ریزشی از شکل (پ.۳-۶) و برای تکیه‌گاه با دیواره باله‌ای از شکل (پ.۳-۷) تعیین می‌شود. منحنی خط‌چین شرایط تئوریکی را نشان می‌دهد که می‌بایست با انجام آزمایش تایید و اثبات شود. برای مقادیر کم q_2/q_1، آبشستگی تنگ شدگی کوچک ولی با این وجود ضریب تشدید بزرگ است، زیرا تلاطم و جدایی جریان بر فرایند آبشستگی تکیه‌گاه غالب است. برای مقادیر بزرگ q_2/q_1، آبشستگی تنگ‌شدگی بر فرایند آبشستگی تکیه‌گاه غلبه می‌کند و در نتیجه ضریب تشدید کوچک است.



شکل پ.۳-۶- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های ریزشی در شرایط بستر متحرک [۱۲۶]



شکل پ.۳-۷- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های با دیواره باله‌ای در شرایط بستر متحرک [۱۲۶]

اگر طول تصویر شده خاکریز L، کم‌تر از ۷۵ در صد عرض سیلابدشت (B_f) است، آبشستگی نوع (ب) در شکل (پ.۳-۴) رخ می‌دهد و محاسبه آبشستگی تنگ‌شدگی با استفاده از معادله آبشستگی آب صاف انجام می‌شود. در معادله آبشستگی آب صاف هم از بده واحد (q) استفاده می‌شود که با استفاده از تقسیم بده بر عرض و یا حاصل‌ضرب سرعت و عمق، تعیین می‌شود. برای آبشستگی تنگ‌شدگی آب صاف از دو معادله می‌توان استفاده کرد. معادله اول معادله استاندارد بر پایه اندازه ذرات است.

$$y_c = \left(\frac{q_{2f}}{K_u D_{50}^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{6}{7}} \qquad \text{(پ.۳-۳۰)}$$

که در آن:

y_c = عمق جریان، شامل آبشستگی تنگ‌شدگی آب صاف m (ft)

q_{2f} = بده واحد در مقطع تنگ‌شده که توزیع جریان غیریکنواخت را بیان می‌کند، m^2/s (ft^2/s)

K_u = 11.17 (سیستم انگلیسی)

K_u = 6.19 (سیستم متریک)

D_{50} = اندازه‌ای که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر هستند، m (ft)

باید به این نکته توجه شود که اندازه ذره 0.2 mm حد پایین منطقی محسوب می‌شود، زیرا ویژگی چسبندگی، سرعت بحرانی و تنش برشی در خاک‌های چسبنده را محدود می‌کند. اگر تنش برشی بحرانی برای خاک سیلابدشت معلوم باشد، آنگاه از معادله‌ی جایگزین دیگری می‌توان استفاده کرد:

$$y_c = \left(\frac{\gamma}{\tau_c} \right)^{\frac{3}{7}} \left(\frac{n q_{2f}}{K_u} \right)^{\frac{6}{7}} \qquad \text{(پ.۳-۳۱)}$$

که در آن:

n = n مانینگ مصالح سیلابدشت در زیر پل

τ_c = تنش برشی بحرانی برای مصالح سیلابدشت، N/m^2 (lb/ft^2)

γ = وزن مخصوص آب، N/m^3 (lb/ft^3)

K_u = 1.486 (سیستم انگلیسی)

K_u = 1.0 (سیستم متریک)

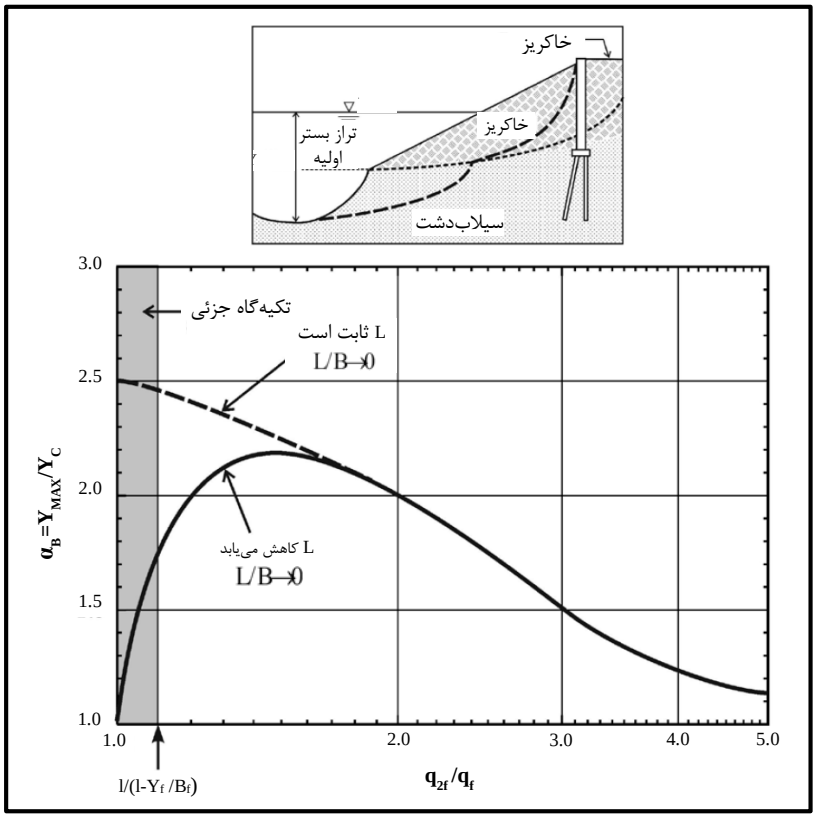
مقدار q_{2f} باید به‌گونه‌ای برآورد شود که تمرکز موضعی جریان[۱] در تکیه‌گاه (کوله) پل را شامل شود. مقدار q_f جریان سیلابدشت در بالادست پل است. سپس برای محاسبه عمق جریان کل در تکیه‌گاه، مقدار y_c در معادله (پ.۳-

۱- Local concentration of flow

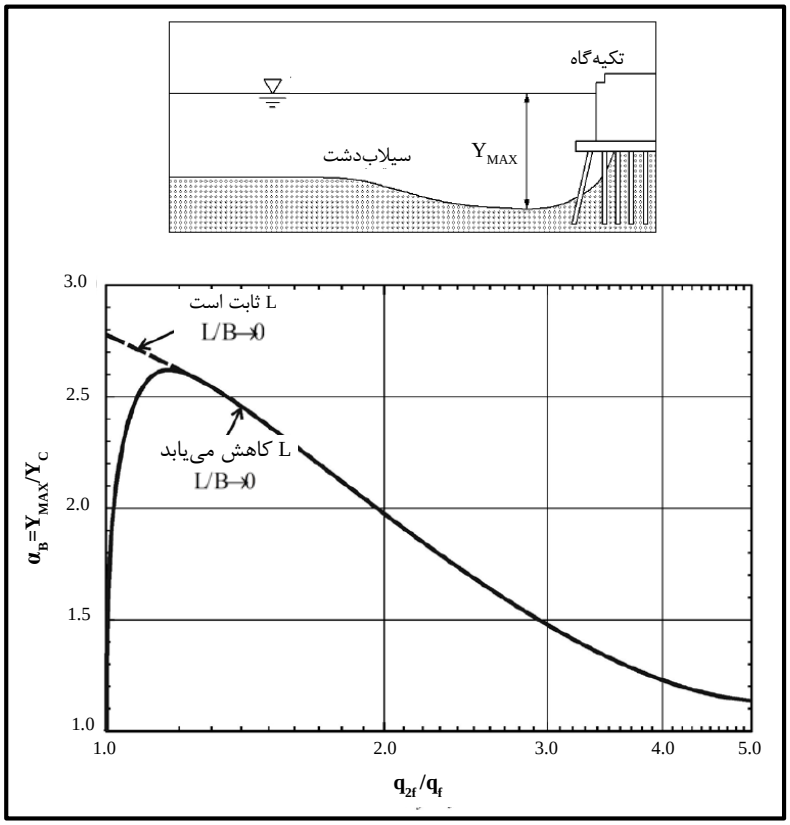
۲۶) استفاده می‌شود. مقدار α_B از شکل (پ.۳-۸) برای تکیه‌گاه‌های ریزشی و از شکل (پ.۳-۹) برای تکیه‌گاه با دیواره باله‌ای استخراج می‌شود. منحنی‌های پر به منظور طراحی استفاده می‌شوند. منحنی‌های خط‌چین بیانگر شرایط تئوریکی هستند که باید از طریق آزمایش اثبات شوند. برای مقادیر کم q_2 / q_1، آبشستگی تنگ شدگی کوچک است ولی چون جدایی جریان و تلاطم بر فرایند آبشستگی تکیه‌گاه غالب است، ضریب تشدید مقدار بزرگی است. برای مقادیر بزرگ q_2 / q_1، آبشستگی تنگ‌شدگی بر فرایند آبشستگی تکیه‌گاه غالب شده و در نتیجه در این حالت، ضریب تشدید مقدار کوچکی است.

در برآورد مقادیر آبشستگی برای هر یک از دو نوع (الف) یا (ب)، پایداری ژئوتکنیکی کناره رودخانه یا خاکریز باید بررسی شود. اگر کناره رودخانه یا خاکریز احتمال ریزش و تخریب داشته باشد، عمق آبشستگی محدود کننده، عمق پایدار ژئوتکنیکی بوده و فرسایش به صورت جانبی گسترش خواهد یافت. این مسئله ممکن است موجب شکست خاکریز شود و در این صورت با فرض شالوده تکیه‌گاه به‌عنوان پایه می‌توان تخمین آبشستگی دیگری را انجام داد.

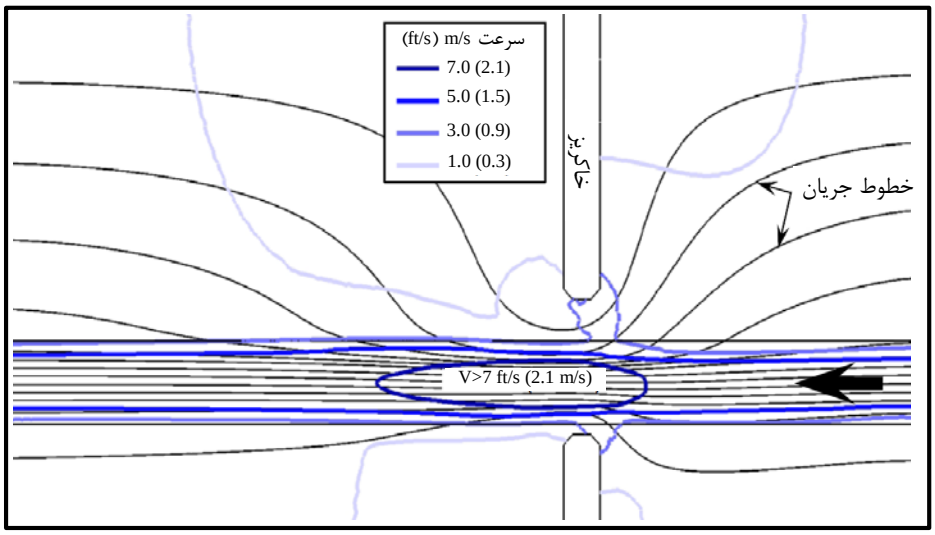
به این نکته نیز باید توجه شود که در تعیین متغیرهای موجود در معادله‌های آبشستگی تکیه‌گاه، عدم قطعیت‌های زیادی وجود دارد. تعیین اندازه ذرات یا تنش برشی بحرانی در خاک‌های سیلابدشت یکی از منابع عدم قطعیت است. تعیین بده واحد در نزدیکی تکیه‌گاه یکی دیگر از منابع عدم قطعیت می‌باشد. مدل‌های دوبعدی تخمین‌های بسیار بهتری از بده واحد در بازشدگی پل در مقایسه با مدل‌های یک‌بعدی، ارائه می‌دهد. این واقعیت در شکل (پ.۳-۴) نشان داده شده است. در میدان جریان دو بعدی، بده واحد در هر نقطه را می‌توان از حاصل‌ضرب سرعت و عمق محاسبه کرد. ضمن این‌که استفاده از مدل‌های دو بعدی برای طراحی هیدرولیکی پل، قویا توصیه می‌شود. در دستورالعمل HEC-23 (FHWA, 2009)، روشی برای تخمین سرعت در محل تکیه‌گاه ارائه شده است. روش مذکور در اصل برای تعیین اندازه سنگریزه برای تکیه‌گاه است ولی برای تعیین بده واحد در محل تکیه‌گاه نیز می‌توان از آن استفاده کرد [۱۲۴].



شکل پ.۳-۸- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های ریزشی در شرایط آب صاف [۱۲۶]



شکل پ.۳-۹- ضریب تشدید آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های با دیواره باله‌ای در شرایط آب صاف [۱۲۶]



شکل پ.۳-۱۰- سرعت و خطوط جریان در تنگ‌شدگی پل

همان‌گونه که گفته شد، روش توصیه شده برای تعیین سرعت و بده واحد در محاسبات آبشستگی تکیه‌گاه، استفاده از مدل‌سازی دوبعدی است. در صورت استفاده از مدل‌سازی یک‌بعدی، سرعت و بده واحد طبق مراحل زیر برآورد می‌شوند:

گام ۱. نسبت عقب‌نشینی[1] هر تکیه‌گاه (SBR) تعیین شود. SBR نسبت طول عقب‌نشینی به عمق جریان آبراهه است. طول عقب‌نشینی فاصله از لبه آبراهه اصلی تا پنجه خاکریز است. بنابراین:

$$SBR = \frac{\text{طول عقب‌نشینی}}{\text{عمق جریان متوسط کانال}} \qquad \text{(پ.۳-۳۲)}$$

الف- اگر SBR برای هر دو تکیه‌گاه (کوله) کم‌تر از ۵ باشد (پ.۳-۱۱-)، مقدار سرعت (Q/A) با در نظرگرفتن تمام مساحت مقطع منقبض در بازشدگی پل حساب می‌شود که این شامل کل جریان در بالادست به جز آن بخشی که ممکن است از روی جاده سرریز شود، می‌باشد. بده واحد در آبراهه (رودخانه) از حاصل‌ضرب سرعت و عمق جریان به‌دست می‌آید و بده واحد در محل تکیه‌گاه از حاصل‌ضرب سرعت و عمق جریان سیلابدشت حاصل می‌شود.

ب- اگر SBR برای یکی از تکیه‌گاه‌ها بزرگ‌تر از ۵ باشد (پ.۳-۱۲)، سرعت (Q/A) فقط برای جریان روکرانه مربوط به آن حساب می‌شود. بده واحد در محل تکیه‌گاه از حاصل‌ضرب سرعت و عمق جریان سیلابدشت حاصل می‌شود.

ج- اگر SBR برای یک تکیه‌گاه کم‌تر از ۵ و برای تکیه‌گاه دیگر همان پل بیش‌تر از ۵ باشد (پ.۳-۱۳)، محاسبه سرعت از گام ۱- الف برای تکیه‌گاه با SBR کم‌تر از ۵، ممکن است به طور غیر واقعی کم باشد. البته این مسئله به مقدار بده در ساحل طرف مقابل و نیز به این نکته که تکیه‌گاه سمت مقابل تا چه فاصله‌ای عقب‌نشینی داشته نیز بستگی دارد. در این حالت، برای تکیه‌گاه با SBR کم‌تر از ۵، سرعت بر مبنای سطح جریان محدود شده

۱- Set-back ration (SBR)

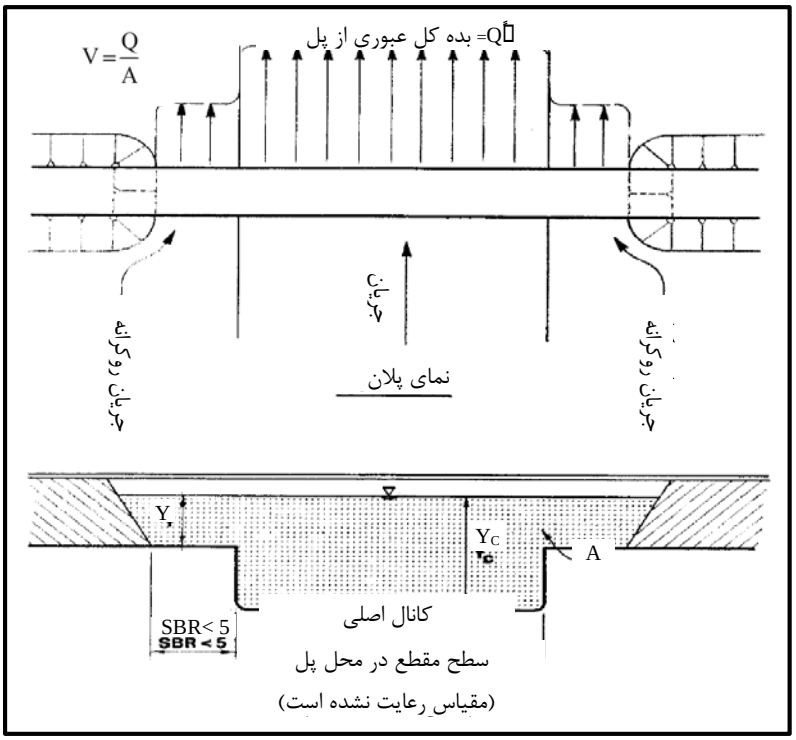
توسط تکیه‌گاه و کناره آبراهه مقابل محاسبه می‌شود. مقدار صحیح بده، جریان آبراهه بالادست و جریان سیلابدشت بالاد ست مرتبط با آن تکیه‌گاه ا ست. بده واحد در آبراهه (رودخانه) از حا صل ضرب سرعت و عمق جریان به‌د ست می‌آید و بده واحد در محل تکیه‌گاه از حاصل‌ضرب سرعت و عمق جریان سیلابدشت حاصل می‌شود.

گام ۲. در تحقیقاتی که نتایج آن درگزارش شماره NCHRP ۵۸۷ با عنوان «روش‌های کنترلی برای حفاظت تکیه‌گاه پل‌ها در مقابل آبشستگی[۱]» منتشر شده است بر استفاده از نسبت SBR برای دانه‌بندی سنگریزه در تکیه‌گاه‌های ریزشی تاکید شده است (NCHRP 2007). گزارش NCHRP ۵۶۸ با عنوان «معیار کنترل سنگریزه، مشخصه‌های توصیه شده و کنترل کیفیت[۲]» نیز برای مواردی که از روش SBR استفاده می‌شود، معیار اضافی دیگری را برای تعیین سرعت پیشنهاد کرده است (NCHRP 2006). گزارش مذکور بر مبنای نتایج مدل‌سازی رایان‌های دوبعدی یک سازه‌ی تکیه‌گاه تیپ، توصیه‌های زیر را ارائه داده است:

الف- هرگاه SBR کم‌تر از ۵ باشد، سرعت متوسط در بازشدگی پل، تقریب خوبی برای سرعت در تکیه‌گاه است.

ب- در مواردی که SBR بزرگ‌تر از ۵ باشد، دستورالعمل توصیه شده به این ترتیب است که سرعت به‌دست آمده از روش SBR با بیشینه سرعت در آبراهه در داخل بازشدگی پل مقایسه و سرعت کوچک‌تر انتخاب شود.

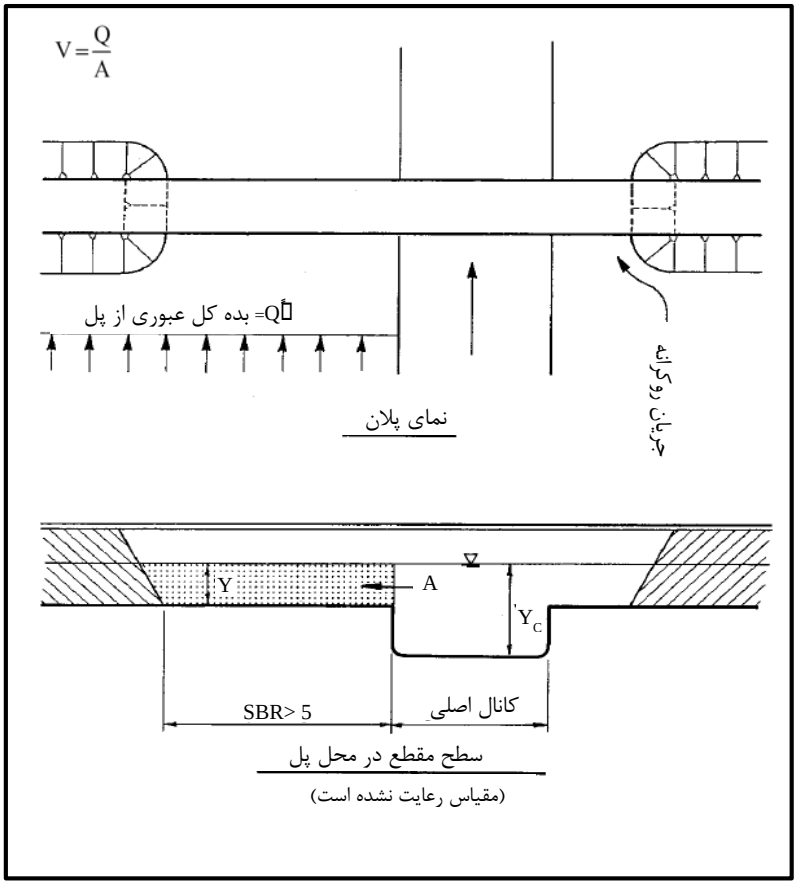
ج- در شرایطی که سرعت برآورد شده از بیشینه سرعت در آبراهه بیش‌تر نباشد، روش SBR برای تخمین سرعت در تکیه‌گاه مناسب‌تر است.



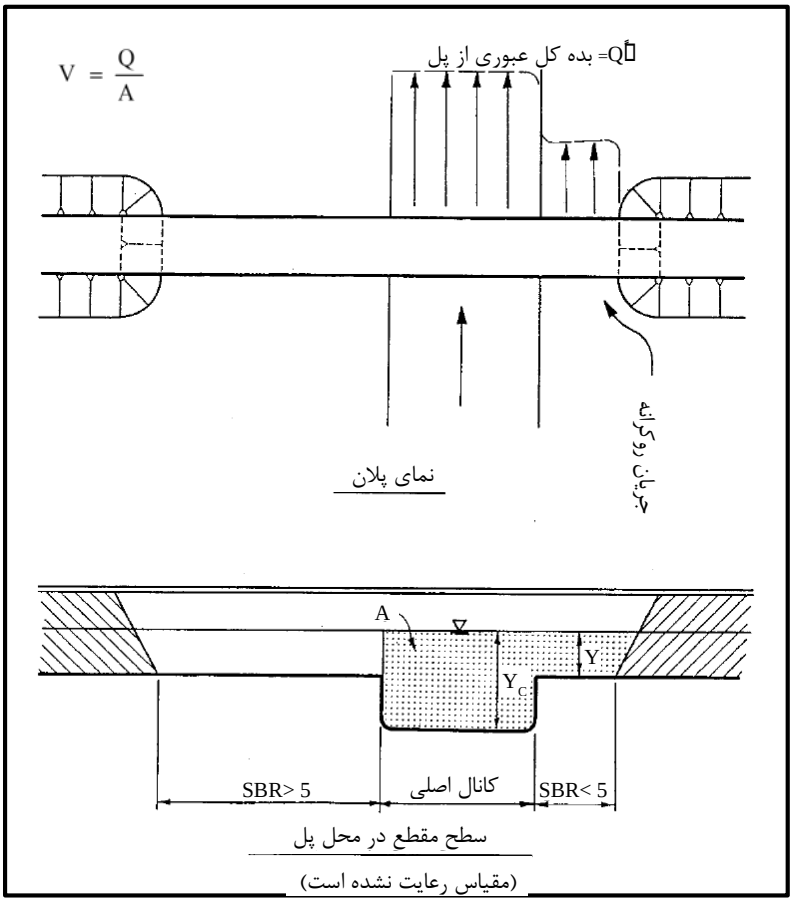
۱- Countermeasures to Protect Bridge Abutments from Scour

۲- Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control

شکل پ. ۳-۱۱- سرعت برای SBR<5



شکل پ.۳-۱۲- سرعت برای SBR> 5

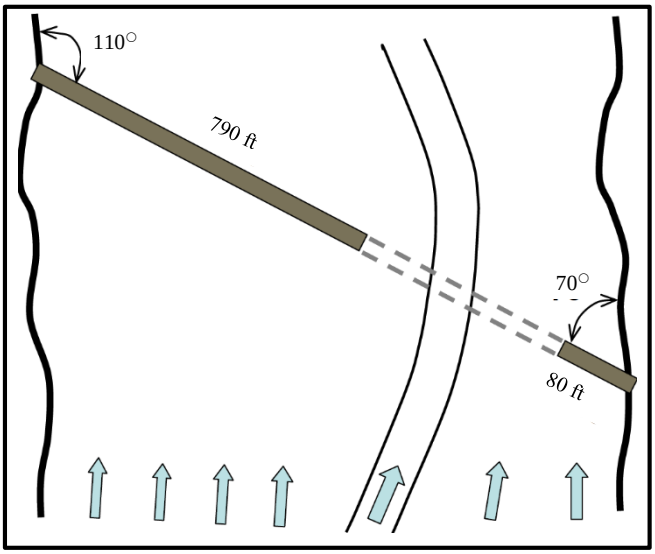


شکل پ. ۳-۱۳- سرعت برای SBR<5 و SBR>5

پ.۳-۱-۱۰- مسائل نمونه آبشستگی تکیه‌گاه

مسئله نمونه ۱- کاربرد معادله فروهلیچ

عمق آبشستگی تکیه‌گاه را برای شرایط زیر تعیین کنید تا در ارزیابی آبشستگی و طراحی روش‌های کنترل استفاده شود. خاکریز دسترسی و تکیه‌گاه سمت راست به اندازه ۲۴ متر وارد سیلابدشت شده است. زاویه آن نیز ۷۰ درجه از لبه پایین‌دست سیلابدشت اندازه‌گیری شده است. خاکریز دسترسی و تکیه‌گاه سمت چپ به طول ۲۴۰ متر وارد سیلابدشت شده‌اند. سازه تکیه‌گاه پل، دیوار قائم با دیواره‌های باله‌ای است.



شکل پ. ۳-۱۴- نمای پلان از آبشستگی تکیه‌گاه (مسئله‌های نمونه ۱ و ۲)

داده‌های تکیه‌گاه راست:

جریان سد شده در سیلابدشت راست = $26.7\,m^3/s$ ($960\,ft^3/s$)

عمق متوسط جریان در سیلابدشت در بالادست خاکریز = $1.6\,m$ ($3.5\,ft$)

تعیین کنید:

مقدار آبشستگی در تکیه‌گاه راست را تعیین کنید.

$$L = 80\cos(90° - 70°) = 75\,ft\,(22.8\,m)$$

$$y_a = 3.5\,ft$$

$\frac{L}{y_a} = \frac{75}{3.5} = 21.4 < 25 \rightarrow$ بنابراین معادله فروهلیچ استفاده می‌شود.

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{y_a}\right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1$$

$K_1 = 0.82$ (برای دیوار قائم با دیواره باله‌ای)

$$K_2 = \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13} = \left(\frac{70}{90}\right)^{0.13} = 0.97$$

$$A_e = y_a \times L = 3.5 \times 75 = 262.5\,ft^2$$

$$V_e = \frac{Q_e}{A_e} = \frac{960}{262.5} = 3.65\,ft/s$$

$$Fr = \frac{V_e}{\sqrt{g y_a}} = \frac{3.65}{\sqrt{(32.2)(3.5)}} = 0.34$$

در ادامه باید L'، طول جریان فعال که توسط خاکریز سد می‌شود، محاسبه شود:

بر مبنای لوله جریان[۱] HEC-RAS در بالادست از دماغه خاکریز

$$V_{tube} = 4.6\,ft/s\,(1.4\,m/s)$$

$$y_{tube} = 5.0\,ft\,(1.5\,m)$$

$$q_{tube} = 4.6\times 5.0 = 23.0\,ft^3/s/ft\ \left(2.1\,m^3/s/m\right)$$

$$L' = \frac{Q_e}{q_{tube}} = \frac{960}{23} = 42\,ft\,(12.7\,m)$$

حال مقادیر محاسبه شده در معادله فروهلیچ جایگذاری می‌شوند:

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27\,K_1\,K_2\left(\frac{L'}{y_a}\right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1$$

$$\frac{y_s}{3.5} = 2.27(0.82)(0.97)\left(\frac{42}{3.5}\right)^{0.43}(0.34)^{0.61} + 1$$

$$y_s = 3.5(2.72+1) = 13.0\,ft\ \ (3.9\,m)$$

مسئله نمونه ۲- کاربرد معادله HIRE

داده‌ها:

شکل مربوط به مسئله‌های نمونه ۱ و ۲ را ببینید.

عمق جریان در دماغه خاکریز $6.2\,ft$ ($1.9\,m$) است.

سرعت در دماغه تکیه‌گاه $V_1 = 9.9\,ft/s\ (3.0\,m/s)$، از لوله جریان HEC-RAS

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تکیه‌گاه سمت چپ را تعیین کنید.

$$L = 790\cos(110° - 90°) = 742\,ft$$

$$y_1 = 6.2\,ft$$

$$\frac{L}{y_1} = \frac{742}{6.2} = 120 > 25$$ (بنابراین باید از معادله HIRE استفاده شود.)

$$\frac{y_s}{y_1} = 4\,Fr^{0.33}\,\frac{K_1}{0.55}\,K_2$$

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{g\,y_1}} = \frac{9.9}{\sqrt{(32.2\times 6.2)}} = 0.70$$

$$K_1 = 0.82$$

$$K_2 = \left(\frac{110}{90}\right)^{0.13} = 1.03$$

۱- Stream tube

$$\frac{y_s}{y_1} = 4(0.70)^{0.33}\frac{0.82}{0.55}(1.03) = 5.46$$

$$y_s = 5.46 \times 6.2 = 33.9\,\text{ft}$$

مسئله نمونه ۳– آبشستگی بستر متحرک NCHRP

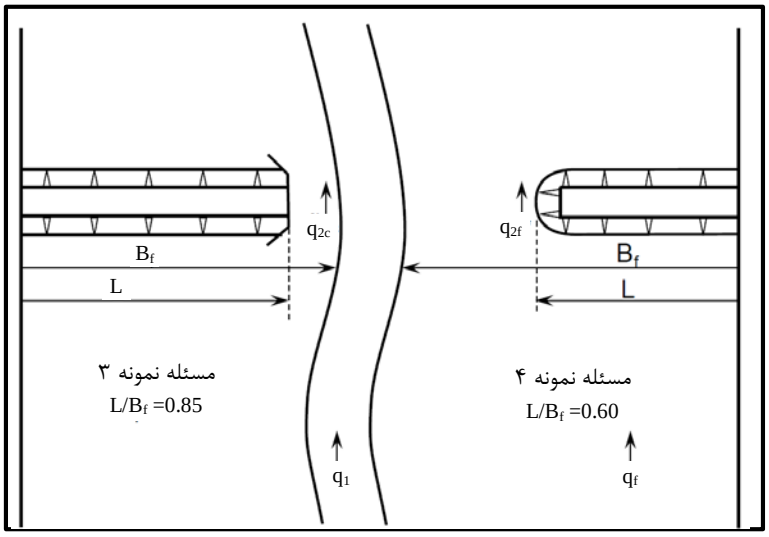
داده‌ها:

تکیه‌گاه‌های بستر متحرک در مجاورت آبراهه اصلی با $L/B_f = 0.85$ واقع شده‌اند.

بده واحد در آبراهه بالادست = $57.0\,\text{ft}^2/\text{s} = \left(5.3\text{m}^2/\text{s}\right)$

بده واحد در مقطع پل = $78.6\,\text{ft}^2/\text{s} = \left(7.3\text{m}^2/\text{s}\right)$

عمق جریان بالادست (y_1) و عمق جریان در مقطع پل قبل از آبشستگی (y_0) = $10.0\,\text{ft} = (3\text{m})$



شکل پ. ۳-۱۵- نمای پلان از آبشستگی تکیه‌گاه (مسئله‌های نمونه ۳ و ۴)

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تکیه‌گاه با روش NCHRP، را برای شرایط (الف) حساب کنید.

$$\frac{q_{2c}}{q_1} = \frac{78.6}{57.0} = 1.4$$

$$y_c = y_1\left(\frac{q_{2c}}{q_1}\right)^{\frac{6}{7}} = 10.0(1.4)^{\frac{6}{7}} = 13.3\,\text{ft}(4\,\text{m})$$

با استفاده از شکل (پ.۳-۱۵) مقدار $\alpha_A = 1.7$ تعیین می‌شود.

$$y_{max} = \alpha_A\, y_c = 1.7 \times 13.3 = 22.6\,\text{ft}(6.9\,\text{m})$$

$$y_s = y_{max} - y_0 = 22.6 - 10.0 = 12.6\,\text{ft}(3.8\,\text{m})$$

مسئله نمونه ۴ – آبشستگی آب صاف NCHRP (اندازه ذرات)

داده‌ها:

تکیه‌گاه ریزشی از آبراهه اصلی عقب‌نشینی دارد، با $L/B_f = 0.6$

بده واحد سیلابدشت بالادست = $5.7\,ft^2/s\ \left(0.53 m^2/s\right)$

بده واحد مربوط به تکیه‌گاه: $10.1 ft^2/s\ \left(0.94 m^2/s\right)$

عمق جریان سیلابدشت بالادست (y_1) و عمق جریان در محل تکیه‌گاه قبل از آبشستگی (y_0) مساوی است با $3.5 ft\,(1.1\ m)$

اندازه ذرات: $D_{50} = 0.3 mm\ (0.001 ft)$

تعیین کنید:

عمق آبشستگی تکیه‌گاه با روش NCHRP را برای شرایط (ب) حساب کنید.

$$y_c = \left(\frac{q_{2f}}{K_u D_{50}^{\frac{1}{3}}}\right)^{\frac{6}{7}} = \left(\frac{10.1}{11.17 \times 0.001^{\frac{1}{3}}}\right)^{\frac{6}{7}} = 6.6 ft\,(2.0 m)$$

با استفاده از شکل (پ.۳-۸) مقدار $\alpha_B = 2.1$ تعیین می‌شود.

$$y_{max} = \alpha_B y_c = 2.1 \times 6.6 = 13.9 ft\,(4.2 m)$$
$$y_s = y_{max} - y_0 = 13.9 - 3.5 = 10.4 ft\,(3.2 m)$$

مسئله نمونه ۵ – آبشستگی آب صاف NCHRP (تنش برشی)

داده‌ها:

همانند مسئله نمونه ۴، به استثنای این‌که تنش برشی بحرانی = $0.04 lb/ft^2\ \left(1.9 N/m^2\right)$

ضریب زبری n مانینگ را 0.025 در نظر بگیرید. تعیین کنید:

عمق آبشستگی تکیه‌گاه با روش NCHRP، را برای شرایط (ب) حساب کنید.

$$\frac{q_{2f}}{q_f} = \frac{10.1}{5.7} = 1.8$$

$$y_c = \left(\frac{\gamma}{\tau_c}\right)^{\frac{3}{7}} \left(\frac{n q_{2f}}{K_u}\right)^{\frac{6}{7}} = \left(\frac{62.4}{0.04}\right)^{\frac{3}{7}} \left(\frac{0.025 \times 10.1}{1.486}\right)^{\frac{6}{7}} = 5.1 ft\,(=1.6 m)$$

با استفاده از شکل (پ.۳-۸) مقدار $\alpha_B = 2.1$ تعیین می‌شود.

$$y_{max} = \alpha_B y_c = 2.1 \times 5.1 = 10.7 ft\,(3.3 m)$$
$$y_s = y_{max} - y_0 = 10.7 - 3.5 = 7.2 ft\,(2.2 m)$$

پ.۳-۲- تخمین آبشستگی در خروجی آبگذرها

در این بخش، روش‌های پیش‌بینی آبشستگی در خروجی آبگذرها ارائه شده است که بر مبنای بده، شکل آبگذر، نوع خاک، مدت زمان جریان، شیب آبگذر، ارتفاع آبگذر در بالای بستر و عمق پایاب می‌باشند. البته طراح باید تاریخچه تعمیر و نگهداری، بازدید محل، داده‌های خاک، جریان و تداوم جریان را نیز بررسی کند تا بهترین برآورد از خطر آبشستگی بالقوه را تعیین نماید [۱۳۵].

معادله‌های پیش‌بینی آبشستگی که در این بخش ارائه شده است باید با بازدید میدانی و شناسایی محل همراه باشند تا ضرورت استفاده از مستهلک‌کننده‌های انرژی[1] در خروجی آبگذر نیز مشخص شود. این نکته نیز باید مدنظر طراح قرار گیرد که این معادله‌ها، کاهش تراز بستر[2] کانال پایین‌دست که در طولانی‌مدت اتفاق می‌افتد را لحاظ نمی‌کنند. همچنین این معادله‌ها، هندسه آبشستگی حداکثر که می‌تواند بدترین حالت ممکن باشد را نیز نشان می‌دهند [۱۳۵].

پ.۳-۲-۱- خاک‌های غیرچسبنده

فرم کلی معادله‌ای که برای تعیین هندسه آبشستگی در خاک‌های غیرچسبنده در خروجی آبگذرها به‌کار می‌رود به صورت زیر است [۱۳۵]:

$$\left[\frac{h_s}{R_c},\frac{W_s}{R_c},\frac{L_s}{R_c},\frac{V_s}{R_c^3}\right]=C_sC_h\left(\frac{\alpha}{\sigma^{\frac{1}{3}}}\right)\left(\frac{Q}{\sqrt{g}\left(R_c^{2.5}\right)}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta} \qquad \text{(پ. ۳-۳۳)}$$

که در آن:

h_s = عمق آبشستگی (m)

W_s = عرض آبشستگی (m)

L_s = طول آبشستگی (m)

V_s = حجم آبشستگی (m^3)

R_c = شعاع هیدرولیکی در انتهای آبگذر (با فرض این‌که پر کار می‌کند)

Q = بده (m^3/s)

g = شتاب گرانش ($9/81\ m/s^2$)

t = زمان (دقیقه)

σ = انحراف از معیار مواد ($=\left(D_{84}/D_{16}\right)^{0.5}$)

α، β و θ = مقادیر ثابت (جدول پ. ۳-۵)

C_h = ضریب تنظیم ارتفاع پایین افتادگی[3] (جدول پ. ۳-۶)

1- Energy dissipators
2- Degradation
3- Drop

C_s = ضریب تصحیح شیب (جدول پ. ۳-۷)

توزیع اندازه ذرات مواد بستر با انجام آزمایش الک تعیین می شود. مقادیر D_{84} و D_{16} از توزیع اندازه ذرات به‌دست می‌آید. اگر $\sigma < 1.5$، مصالح یکنواخت فرض می شوند و اگر $\sigma > 1.5$، مصالح با «دانه‌بندی خوب» طبقه‌بندی می شوند. مقدار معمول σ برای شن 2.10 و برای ماسه 1.87 است [۱۳۵].

پ.۳-۲-۱-۱- هندسه‌ی حفره آبشستگی

محققان Bohan (1970) و Fletcher and Grace (1972) نشان دادند که هندسه حفره آبشستگی مطابق با شرایط پایاب تغییر می‌کند، به طوری که حداکثر هندسه آبشستگی در شرایطی که عمق پایاب کم‌تر از نصف ارتفاع کالورت باشد، رخ می‌دهد [۱۰۵] و حداکثر عمق آبشستگی (h_s) در جایی که تقریبا به اندازه $0.4L_s$ در پایین‌دست خروجی آبگذر واقع شده، رخ می‌دهد که L_s طول آبشستگی می‌باشد [۱۴۴]. ضرایب α، β و θ برای تعیین هندسه آبشستگی در جدول (پ.۳-۵) آورده شده‌اند.

جدول پ. ۳-۵- ضرایب مربوط به آبشستگی خروجی آبگذر در خاک‌های غیرچسبنده

	α	β	θ
عمق، h_s	۲/۲۷	۰/۳۹	۰/۰۶
عرض، W_s	۶/۹۴	۰/۵۳	۰/۰۸
طول، L_s	۱۷/۱۰	۰/۴۷	۰/۱۰
حجم، V_s	۱۲۷/۰۸	۱/۲۴	۰/۱۸

پ.۳-۲-۱-۲- زمان آبشستگی

زمان آبشستگی بر مبنای اطلاعات مربوط به تداوم جریان اوج برآورد می شود. در صورت نبود این اطلاعات، توصیه می‌شود یک زمان ۳۰ دقیقه‌ای در معادله (پ. ۳-۳۳) استفاده شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که $\frac{2}{3}$ تا $\frac{3}{4}$ حداکثر عمق آبشستگی در ۳۰ دقیقه نخست تداوم جریان رخ می‌دهد. نماهای مربوط به پارامتر زمان در جدول (پ. ۳-۵) بخش نسبتا سخت از رابطه آبشستگی- زمان ($t > 30\,\text{min}$) را منعکس می‌کنند و برای ۳۰ دقیقه‌ی نخست فرآیند آبشستگی قابل استفاده نیستند [۱۳۵].

پ.۳-۲-۱-۳- دیوار پیشانی[1]

نصب دیوار پیشانی عمودی در خروجی آبگذر موجب می شود تا حفره آبشستگی به طرف پایین‌دست جابجا شود [۲۰۹]. اندازه هندسه آبشستگی در شرایط نبود دیوار پیشانی نیز تقریبا مشابه خواهد بود. چنانچه آبگذر، دیوار پیشانی داشته باشد باید تا عمقی معادل با حداکثر عمق آبشستگی در زمین امتداد داشته باشد [۱۳۵].

1- Headwall

پ.۳-۲-۱-۴- ارتفاع پایین افتادگی

ابعاد حفره آبشستگی براساس ارتفاع کف آبگذر[1] تا بستر آبراهه تغییر می‌کند. با افزایش ارتفاع کف، شکل حفره آبشستگی عمیق‌تر، عریض‌تر و کوتاه‌تر می‌شود [۱۲۸]. ضرایب C_h از آزمایش‌هایی که در آن‌ها کف لوله منطبق بر بستر است، به‌دست آمده‌اند. برای شرایطی که کف آبگذر بالاتر از بستر است، معادله (پ. ۳-۳۳) باید به‌گونه‌ای اصلاح شود تا C_h که بر مبنای قطر لوله بیان می شود، هند سه حفره آبشستگی ترکیبی را بیان کند. مقادیر C_h در جدول (پ. ۳-۶) ارائه شده‌اند [۱۳۵].

جدول پ. ۳-۶- ضریب C_h برای خروجی‌های بالاتر از بستر

H_d	عمق	عرض	طول	حجم
۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱	۱/۲۲	۱/۵۱	۰/۷۳	۱/۲۸
۲	۱/۲۶	۱/۵۴	۰/۷۳	۱/۴۷
۴	۱/۳۴	۱/۶۶	۰/۷۳	۱/۵۵
H_d ارتفاع در بالای بستر بر حسب قطر لوله است.				

پ.۳-۲-۱-۵- شیب

ابعاد حفره آبشستگی بر اساس شیب آبگذر نیز تغییر می‌کند. با افزایش شیب آبگذر، حفره آبشستگی عمیق‌تر، عریض‌تر و طولانی‌تر می‌شود [۹۱] و [۹۲]. ضرایب ارائه شده از آزمایش‌هایی که در آن‌ها کف لوله منطبق بر بستر است به‌دست آمده‌اند. به منظور لحاظ نمودن شیب آبگذر، معادله (پ. ۳-۳۳) با ضریب C_s تعدیل می‌شود. مقادیر C_s در جدول (پ. ۳-۷) ارائه شده‌اند [۱۳۵].

جدول پ. ۳-۷- ضریب C_s برای شیب آبگذر

شیب ٪	عمق	عرض	طول	حجم
۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۲	۱/۰۳	۱/۲۸	۱/۱۷	۱/۳۰
۵	۱/۰۸	۱/۲۸	۱/۱۷	۱/۳۰
> ۷	۱/۱۲	۱/۲۸	۱/۱۷	۱/۳۰

پ.۳-۲-۱-۶- فرآیند طراحی

گام ۱. مقدار و تداوم بده اوج را تعیین کنید. بده جریان را بر حسب m^3/s و تداوم را بر حسب دقیقه بیان کنید.

گام ۲. شعاع هیدرولیکی (R_c) را برای جریان با مقطع پر حساب کنید.

گام ۳. برای شیب‌های > ۰ ٪ (شیب بیش‌تر از صفر درصد) نسبت ارتفاع کف آبگذر در بالای بستر (H_d) را حساب کنید.

1- Culvert invert

$$H_d = \frac{\text{ارتفاع پایین افتادگی}}{\text{قطر}}$$

گام ۴. ضـرایب آبشـسـتگی را از جدول (پ. ۳-۵)، ضـریب ارتفاع پایین‌افتادگی آبگذر (C_h) را از جدول (پ. ۳-۶) و ضریب مربوط به شیب آبگذر (C_s) را از جدول (پ. ۳-۷) تعیین کنید.

گام ۵. انحراف از معیار مصـــالح رســـوبی ($\sigma = (D_{84} / D_{16})^{0.5}$) را از آزمایش الک برای نمونه خاکی که از محل پیشنهادی احداث آبگذر تهیه شده است، حساب کنید.

گام ۶. ابعاد حفره آبشستگی را با معادله (پ. ۳-۳۳) حساب کنید.

گام ۷. محل آبشستگی حداکثر ($L_m = 0.4\, L_s$) را حساب کنید.

مثال طراحی: محاسبه ابعاد حفره آبشستگی در خاک‌های غیرچسبنده

حداکثر عمق، عرض، طول و حجم حفره آبشستگی را برای داده‌های زیر تعیین کنید.

(نوع کالورت: لوله فلزی موجدار[1]، CMP) $D = 457\,\text{mm}$

$S = 2\%$

(به دلیل پایین افتادگی بستر آبراهه) ارتفاع پایین افتادگی $= 0.914\ \text{m}$

$Q = 0.764\,\text{m}^3/\text{s}$

$\sigma = 1.87$ (برای کانال پایین‌دست که از ماسه با دانه‌بندی خوب تشکیل شده است)

حل:

گام ۱. مقدار و تداوم بده اوج را تعیین کنید: $Q = 0.764\,\text{m}^3/\text{s}$ و تداوم جریان اوج هم حدود ۳۰ دقیقه برآورد می‌شود.

گام ۲. محاسبه شعاع هیدرولیکی (R_c) برای جریان با مقطع پر:

$$R_c = \frac{D}{4} = \frac{0.457\,\text{m}}{4} = 0.114\,\text{m}$$

گام ۳. محاسبه نسبت ارتفاع کف آبگذر در بالای بستر، H_d (برای شیب‌های > ۰ ٪):

$$H_d = \frac{\text{ارتفاع پایین افتادگی}}{\text{قطر}} = \frac{0.914\,\text{m}}{0.457\,\text{m}} = 2$$

گام ۴. ضرایب آبشستگی از جداول (پ. ۳-۵)، (پ. ۳-۶) و (پ. ۳-۷) تعیین می‌شوند:

	α	β	θ	C_h	C_s
عمق آبشستگی	۲/۲۷	۰/۳۹	۰/۰۶	۱/۲۶	۱/۰۳
عرض آبشستگی	۶/۹۴	۰/۵۳	۰/۰۸	۱/۵۴	۱/۲۸

1- Corrugated Metal Pipe (CMP)

طول آبشستگی	۱۷/۱۰	۰/۴۷	۰/۱۰	۰/۷۳	۱/۱۷
حجم آبشستگی	۱۲۷/۰۸	۱/۲۴	۰/۱۸	۱/۴۷	۱/۳۰

گام ۵. انحراف از معیار مصالح رسوبی: $\sigma = 1.87$

گام ۶. محاسبه ابعاد حفره آبشستگی (شامل: عمق، عرض، طول و حجم):

$$\left[\frac{h_s}{R_c},\frac{W_s}{R_c},\frac{L_s}{R_c},\frac{V_s}{R_c^3}\right] = C_s C_h \left(\frac{\alpha}{\sigma^{\frac{1}{3}}}\right)\left(\frac{Q}{\sqrt{g}\left(R_c^{2.5}\right)}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta}$$

$$h_s = C_s C_h \left(\frac{\alpha}{\sigma^{\frac{1}{3}}}\right)\left(\frac{Q}{\sqrt{g}\left(R_c^{2.5}\right)}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta} R_c$$

$$h_s = (1.03)(1.26)\left(\frac{2.27}{(1.87)^{\frac{1}{3}}}\right)\left(\frac{0.764}{\sqrt{9.81}\left((0.114)^{2.5}\right)}\right)^{0.39}\left(\frac{30}{316}\right)^{0.06}(0.114) = 1.14\,\text{m}$$

و به همین ترتیب:

$$W_s = (1.28)(1.54)\left(\frac{6.95}{(1.87)^{\frac{1}{3}}}\right)\left(\frac{0.764}{\sqrt{9.81}\left((0.114)^{2.5}\right)}\right)^{0.53}\left(\frac{30}{316}\right)^{0.08}(0.114) = 8.82\,\text{m}$$

$$L_s = (1.17)(0.73)\left(\frac{17.10}{(1.87)^{\frac{1}{3}}}\right)\left(\frac{0.764}{\sqrt{9.81}\left((0.114)^{2.5}\right)}\right)^{0.47}\left(\frac{30}{316}\right)^{0.10}(0.114) = 7.06\,\text{m}$$

$$V_s = (1.30)(1.47)\left(\frac{127.08}{(1.87)^{\frac{1}{3}}}\right)\left(\frac{0.764}{\sqrt{9.81}\left((0.114)^{2.5}\right)}\right)^{1.24}\left(\frac{30}{316}\right)^{0.18}(0.114)^3 = 27.8\,\text{m}^3$$

م ۷. محاسبه موقعیت حداکثر آبشستگی:

$$L_m = 0.4 L_s = 0.4(7.06) = 2.82\,\text{m}$$

پ.۳-۲-۲- خاک‌های چسبنده

چنانچه خاک چسبنده باشد باید از معادله (پ. ۳-۳۴) برای تعیین ابعاد حفره آبشستگی استفاده شود. عبارات عدد برشی[1] که آبشستگی را به تنش برشی بحرانی خاک ربط می‌دهد در خاک‌های چسبنده دامنه کاربرد وسیعی فراتر از نمونه رس ماسه‌ای که در آزمایش‌ها استفاده شده بود، دارد. نمونه استفاده شده در آزمایش‌ها، دارای ۵۸ درصد ماسه، ۲۷

1. Shear number

در صد رس، ۱۵ در صد لای (سیلت) و ۱ در صد مواد آلی بوده ا ست. اندازه میانه ذرات ۰/۱۵ mm و شاخص خمیری[1] (PI) آن ۱۵ بوده است. عبارات عدد برشی برای آبگذرهایی با مقطع دایره‌ای به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۳۵]:

$$\left[\frac{h_s}{D},\frac{W_s}{D},\frac{L_s}{D},\frac{V_s}{D^3}\right]=C_sC_h(\alpha)\left(\frac{\rho V^2}{\tau_c}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta} \qquad \text{(پ. ۳-۳۴)}$$

و برای آبگذرهایی با سایر شکل‌ها (مقطع غیر دایره):

$$\left[\frac{h_s}{y_e},\frac{W_s}{y_e},\frac{L_s}{y_e},\frac{V_s}{y_e^3}\right]=C_sC_h(\alpha_e)\left(\frac{\rho V^2}{\tau_c}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta} \qquad \text{(پ. ۳-۳۵)}$$

در دو رابطه بالا:

D = قطر کالورت (m)

y_e = عمق معادل، که به صورت $(A/2)^{0.5}$ تعریف می‌شود (m)

A = سطح مقطع جریان (m^2)

V = سرعت متوسط جریان در خروجی (m/s)

τ_c = تنش برشی (کشش) بحرانی (N/m^2)

ρ = چگالی آب ($1000\ kg/m^3$)

$\left(\rho V^2\right)/\tau_c$ = عدد برشی اصلاح شده

α_e = ($\alpha_e=\alpha/0.63$) برای h_s ، W_s و L_s، و ($\alpha_e=\alpha/(0.63)^3$) برای V_s

α ، β، θ، و α_e ضرایبی هستند که مقدار آن‌ها در جدول (پ. ۳-۸) ارائه شده است.

اگر در دو معادله (پ. ۳-۳۴) و (پ. ۳-۳۵) مقدار دقیق مدت زمان مشخص نباشد برای t از ۳۰ دقیقه استفاده شود.

تنش برشی (کشش) بحرانی با معادله زیر تعریف می‌شود [۱۳۱] و [۹۳]:

$$\tau_c=0.001(S_v+\alpha_u)\tan(30+1.73PI) \qquad \text{(پ. ۳-۳۶)}$$

که در آن:

τ_c = تنش برشی (کشش) بحرانی (N/m^2)

S_v = مقاومت برشی اشباع (N/m^2)

α_u = ثابت تبدیل واحد $8630\,N/m^2$ (SI)

PI = شاخص خمیری بر اساس حدود آتربرگ[2]

جدول پ.۳-۸- ضرایب مربوط به آبشستگی خروجی آبگذر در خاک‌های چسبنده

	α	β	θ	α_e

1- Plasticity Index (PI)
2- Atterberg limits

عمق، h_s	۰/۸۶	۰/۱۸	۰/۱۰	۱/۳۷
عرض، W_s	۳/۵۵	۰/۱۷	۰/۰۷	۵/۶۳
طول، L_s	۲/۸۲	۰/۳۳	۰/۰۹	۴/۴۸
حجم، V_s	۰/۶۲	۰/۹۳	۰/۲۳	۲/۴۸

فرآیند طراحی برای تخمین آبشستگی در خاک‌های چسبنده با PI بین ۵ تا ۱۶ را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- فرآیند طراحی:

گام ۱. مقدار و تداوم بده اوج Q را تعیین کنید. بده جریان را بر حسب m^3/s و تداوم را بر حسب دقیقه بیان کنید.

گام ۲. سرعت متوسط در خروجی آبگذر (V) را حساب کنید.

گام ۳. یک نمونه خاک در محل پیشنهاد شده برای ساخت آبگذر تهیه شود:

الف- آزمایش حدود آتربرگ را انجام دهید تا شاخص خمیری خاک (PI) تعیین شود.

ب- یک نمونه را اشباع کنید و آزمایش فشار ساده[1] (غیر محصور) را انجام دهید تا تنش برشی اشباع (S_v) تعیین شود.

گام ۴. تنش برشی (کشش) بحرانی را از معادله (پ. ۳-۳۶) محاسبه کنید.

گام ۵. برای شیب‌های $> ۰٪$ (شیب‌های بیش‌تر از صفر درصد) عدد برشی اصلاح شده (S_{nm}) را به ازای بده اوج و نسبت ارتفاع بالای بستر (H_d) حساب کنید.

$$H_d = \frac{\text{ارتفاع پایین افتادگی}}{\text{قطر}} \quad \text{و} \quad S_{nm} = \frac{\rho V^2}{\tau_c}$$

گام ۶. ضرایب آبشستگی را از جدول (پ. ۳-۸)، ضریب ارتفاع پایین‌افتادگی آبگذر (C_h) را از جدول (پ. ۳-۶) و ضریب شیب آبگذر (C_s) را از جدول (پ. ۳-۷) تعیین کنید.

گام ۷. ابعاد حفره آبشستگی را از معادله (پ. ۳-۳۴) برای آبگذرهایی با مقطع دایره‌ای و از معادله (پ. ۳-۳۵) برای آبگذرهایی با سایر مقاطع حساب کنید.

گام ۸. موقعیت آبشستگی حداکثر را با رابطه $L_m = 0.4L_s$ حساب کنید.

مثال طراحی: محاسبه ابعاد حفره آبشستگی در خاک‌های چسبنده

هندسه آبشستگی را تعیین کنید: حداکثر مقدار عمق، عرض، طول و حجم آبشستگی. داده‌ها به صورت زیر هستند:

$D = 610\,mm$ (نوع کالورت: لوله فلزی موجدار[2]، CMP)

$S = 0\%$

ارتفاع پایین افتادگی = 0 m

$Q = 1.133 m^3/s$

1- Unconfined compressive test
2- Corrugated Metal Pipe (CMP)

(برای کانال پایین‌دست) $S_v = 23970\,N/m^2$ و $PI = 12$

حل:

گام ۱. مقدار و تداوم بده اوج را تعیین کنید: $Q = 1.133 m^3/s$ و تداوم جریان اوج هم حدود ۳۰ دقیقه برآورد می‌شود.

گام ۲. محاسبه سرعت متوسط جریان در خروجی آبگذر:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1.133 m^3/3}{\pi(0.61)^2/4} = 3.88 m/s$$

گام ۳. یک نمونه خاک در محل پیشنهاد شده برای آبگذر تهیه شود. در این مثال خاک رسی- ماسه‌ای است و دارای مشخصات زیر است:

الف- شاخص خمیری: $PI = 12$

ب- تنش برشی اشباع: $S_v = 23970\,N/m^2$

گام ۴. تنش برشی (کشش) بحرانی از معادله (پ. ۳-۳۶) حساب شود:

$$\tau_c = 0.001(S_v + \alpha_u)\tan(30 + 1.73PI)$$

$$\tau_c = 0.001(23970 + 8630)\tan[30 + 1.73(12)]$$

$$\tau_c = 0.001(32600)\tan[50.76] = 39.9\,N/m^2$$

گام ۵. برای شیب‌های > ۰٪ (شیب‌های بیش‌تر از صفر درصد) عدد برشی اصلاح شده (S_{nm}) را به ازای بده اوج و نسبت ارتفاع بالای بستر (H_d) حساب کنید.

$$S_{nm} = \frac{\rho V^2}{\tau_c} = \frac{(1000)(3.88)^2}{39.9} = 377.3$$

$$H_d = \frac{\text{ارتفاع پایین افتادگی}}{\text{قطر}} = \frac{0}{0.61} = 0$$

گام ۶. ضرایب آبشستگی از جدول (پ. ۳-۸) تعیین می‌شود. ضریب ارتفاع پایین‌افتادگی آبگذر (C_h) از جدول (پ. ۳-۶) برابر با ۱ و ضریب شیب آبگذر (C_s) نیز از جدول (پ. ۳-۷) برابر با ۱ خواهد بود.

	α	β	θ
عمق آبشستگی	۰/۸۶	۰/۱۸	۰/۱۰
عرض آبشستگی	۳/۵۵	۰/۱۷	۰/۰۷
طول آبشستگی	۲/۸۲	۰/۳۳	۰/۰۹
حجم آبشستگی	۰/۶۲	۰/۹۳	۰/۲۳

گام ۷. ابعاد حفره آبشستگی با استفاده از معادله (پ. ۳-۳۴) برای آبگذر با مقطع دایره‌ای حساب می‌شود:

$$\left[\frac{h_s}{D}, \frac{W_s}{D}, \frac{L_s}{D}, \frac{V_s}{D^3}\right] = C_s C_h(\alpha)\left(\frac{\rho V^2}{\tau_c}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta}$$

$$h_s = C_s C_h(\alpha)\left(\frac{\rho V^2}{\tau_c}\right)^{\beta}\left(\frac{t}{316}\right)^{\theta} D$$

$$h_s = (1.0)(1.0)(0.86)\left(\frac{1000(3.88)^2}{39.9}\right)^{0.18}\left(\frac{30}{316}\right)^{0.10}(0.61) = 1.21\,\text{m}$$

و به طور مشابه:

$$W_s = (1.0)(1.0)(3.55)(377.3)^{0.17}(0.09)^{0.07}(0.61) = 5.02\,\text{m}$$

$$L_s = (1.0)(1.0)(2.82)(377.3)^{0.33}(0.09)^{0.09}(0.61) = 9.81\,\text{m}$$

$$V_s = (1.0)(1.0)(0.62)(377.3)^{0.93}(0.09)^{0.23}(0.61)^3 = 20.15\,\text{m}^3$$

گام ۸. موقعیت حداکثر عمق آبشستگی نیز به صورت زیر حساب می‌شود:

$$L_m = 0.4 L_s = 0.4(9.81) = 3.92\,\text{m}$$

یعنی محل حداکثر عمق آبشستگی در فاصله ۳/۹۲ متر در پایین‌دست خروجی آبگذر واقع می‌شود.

پیوست ۴

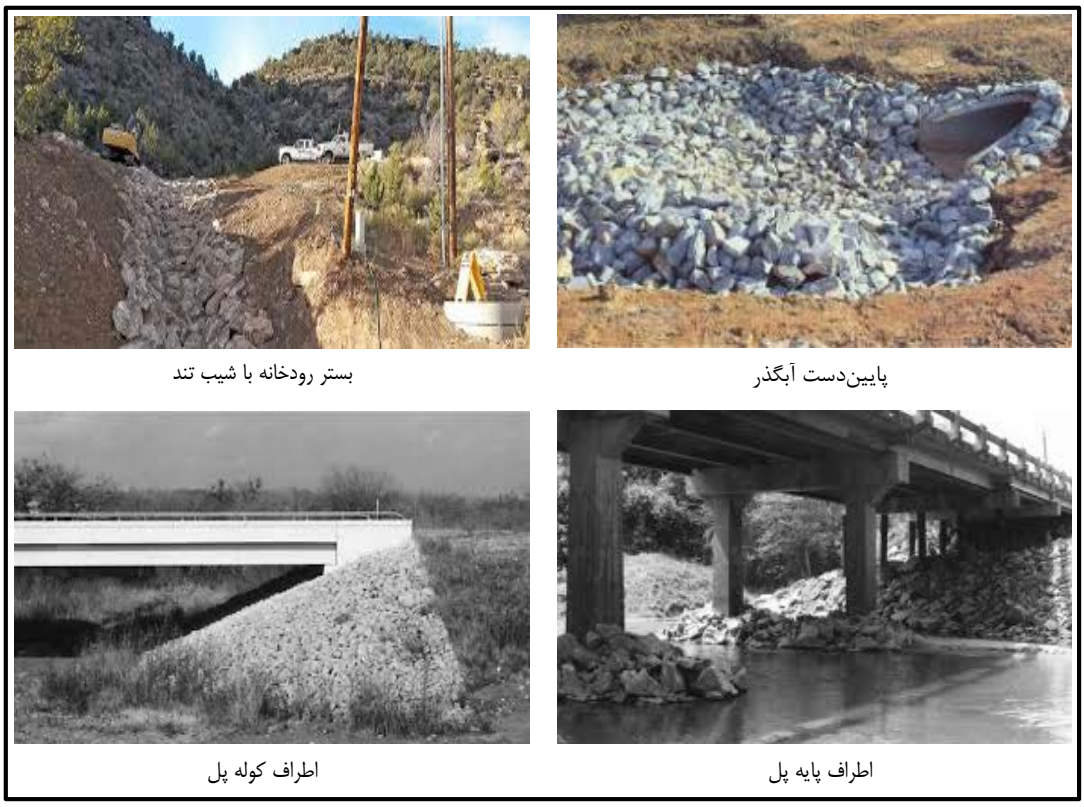
معرفی انواع روش‌های حفاظت و تثبیت بستر و کنترل فرسایش کناره رودخانه

پ.۴-۱- روش‌های حفاظت و تثبیت بستر رودخانه

پ.۴-۱-۱- روکش سنگریزه‌ای

ذرات سنگ‌های شکسته یکی از رایج‌ترین و کم‌هزینه‌ترین و در بیش‌تر مواقع در دسترس‌ترین مصالحی است که برای پوشش و تثبیت بستر از گذشته‌های دور استفاده شده است. اجرای آن نیازمند تکنولوژی خاصی نبوده و به‌راحتی قابل اجرا است. پوشش با سنگ‌دانه‌ها را معمولا خشکه‌چین یا سنگریزه[1] هم می‌گویند. مهم‌ترین اقدام برای طراحی، تعیین اندازه یا وزن هر قطعه سنگ است. معمولا اندازه آن‌ها بایستی متوسط مخلوط یا D_{50} تعیین گردد. در حقیقت فرض می‌شود که درصورتی‌که اندازه متوسط فوق حرکت نکند، لایه پوششی پایدار خواهد بود. البته با توجه به این‌که در طبیعت یافتن قطعات کاملا یک اندازه مشکل است و ضمنا در صورت استفاده از قطعات کاملا یکسان منجر به ایجاد خلل و فرج فراخی بین قطعات سنگ‌دانه‌ها می‌شود که در این‌صورت جریان آب از این منافذ به لایه رسوبی زیرین نفوذ کرده و با انتقال مصالح رسوبی، حفره‌هایی در زیر لایه پوششی ایجاد می‌کند که در نهایت موجب شکست لایه پوششی می‌شود، از این رو باید از دانه‌بندی نسبتا یکنواختی برای پوشش استفاده گردد. شکل (پ.۴-۱) مخلوط پوشش سنگریز باید شامل ذرات ریز تا درشت باشد که اندازه متوسط آن همان D_{50} است که محاسبه شده است. بدین ترتیب سنگ‌دانه‌های ریزتر موجب پرکردن منافذ می‌شوند و میزان فرسایش زیر لایه را به‌شدت کاهش می‌دهد. به طور کلی برای طراحی روکش سنگریز مناسب، عوامل موثر مطابق با ضوابط و معیارهای استانداردهای معتبر که عبارتند از انتخاب بده سیل طرح، تعیین شرایط جریان (عمق، سرعت، تنش برشی) در آبراهه، برآورد آبشستگی، اندازه متوسط سنگ‌دانه‌ها، وزن متوسط سنگ‌دانه‌ها، شکل سنگ‌دانه‌ها، دوام سنگ‌ها، دانه‌بندی مخلوط سنگ، ضخامت لایه پوششی، تعیین محدوده مورد نظر برای پوشش، انتخاب فیلتر مناسب زیر لایه سنگ، روش‌های حمل سنگ مناسب، آماده کردن بستر برای پوشش، تهیه دستورالعمل اجرایی برای پوشش، و نظارت بر کیفیت اجرا، باید تعیین شوند.

۱- Riprap



شکل پ.۴-۱- نمونه کارگذاری پوشش سنگ‌چین برای تثبیت بستر

از عوامل مهم تخریب لایه سنگریزه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- جابجا شدن سنگ‌دانه‌ها در اثر طراحی نامناسب یا عبور جریان بیش از بده سیل طرح. اندازه سنگ‌دانه‌ها را باید طوری تعیین کرد تا در بده سیل طرح حرکت نکنند. برای این منظور روابط تجربی متعددی وجود دارد که طراح باید رابطه مناسب پروژه مورد نظر (تثبیت بستر، پایین‌دست آبگذر، اطراف تکیه‌گاه و اطراف پایه پل) را از بین روابط متعدد مطابق راهنماها و استانداردهای معتبر انتخاب و استفاده کند.

ب- جابجایی سنگ‌دانه‌ها از کناره‌های سطح پوشش به‌دلیل فرسایش بستر حفاظت نشده. طراح باید سطح پوشش کافی برای سنگ‌دانه‌ها در نظر بگیرد. ضمن این‌که به دلیل فرسایش تدریجی بستر، معمولا در درازمدت بستر رودخانه گود شده و سنگ‌دانه‌ها ناپایدار می‌شوند. با مراقبت و نگهداری و تامین سنگ‌دانه‌های حرکت کرده در سال‌های بعد می‌توان عمر لایه حفاظت شده را طولانی‌تر کرد.

ج- جابجایی سنگ‌دانه‌ها از محدوده پوشش شده به‌دلیل فرسایش بستر زیر لایه پوشش شده در اثر انتخاب نامناسب دانه‌بندی یا اجرای بد سنگریزه

پ.۴-۱-۲- روکش تورسنگی

چنانچه دسترسی به اندازه سنگ‌دانه‌های مورد نیاز امکان‌پذیر نباشد می‌توان از روکش تورسنگی استفاده کرد. در این روش اندازه سنگ‌دانه‌های کوچک‌تر را می‌توان در داخل توری با چشمه‌های شش ضلعی که از مفتول گالوانیزه به قطر ۲ تا ۴ میلی‌متر ساخته شده است، قرار داد. حاصل کار به شکل مکعب مستطیل خواهد بود که با اندازه‌های مختلف می‌توان اجرا کرد. برای پوشش بستر معمولا از روکش تورسنگی استفاده می‌شود که ضخامت آن حدود ۳۰ سانتی‌متر خواهد بود. کوچک‌ترین اندازه سنگ‌دانه‌های مورد استفاده باید بیش‌تر از ابعاد چشمه‌های توری باشد تا در اثر حرکت آب نتواند از توری خارج شود. سنگ‌دانه‌ها نیز بهتر است دانه‌بندی یکنواختی داشته باشند و تیزگوشه نباشند تا باعث پارگی مفتول توری نشوند. از نظر شکل بهتر است از سنگ‌دانه‌های خیلی کروی نیز استفاده نشود، چون در این‌صورت فضای خالی بین سنگ‌دانه‌های زیاد شده و در اثر تلاطم آب، سنگ‌دانه‌ها به‌راحتی جابجا می‌شوند و به یک سمت حرکت می‌کنند. در این شرایط بخشی از توری خالی شده و بستر بدون حفاظ باقی می‌ماند. فرسایش موضعی بستر از همین محل، منجر به ایجاد حفره و در نهایت تخریب لایه تورسنگی می‌شود. اجرای تورسنگی نیز بدین صورت است که ابتدا محیط کار را خشک کرده، فیلتر مناسب پهن شده و توری مناسب را روی آن می‌اندازند. سپس سنگ‌دانه‌ها به ضخامت مورد نظر روی توری قرار داده می شود و با دوختن توری از اطراف، آن‌را به شکل جعبه مکعب مستطیل در می‌آورند. لبه‌های توری توسط مفتول از جنس گالوانیزه و به وسیله انبردست بهم متصل می‌شوند. نظارت بر اجرای تورسنگی باید دقیق باشد تا سنگ‌دانه‌ها خوب چیده شوند و در زمان اتصال دو لبه توری نیز، مفتول رها شده‌ی اضافی باقی نماند، چون در اثر عبور جریان، درختان به آن‌ها گیر کرده و باعث پارگی توری می‌شوند. نمونه کارهای انجام شده تورسنگی در شکل (پ.۴-۲) نشان داده شده است.

توری گابیونی | بلوک گابیونی

کاربرد برای کوله پل | حفاظت کوله

شکل پ.۴-۲- نمونه کارهای انجام شده تورسنگی

پ.۴-۱-۳- روکش با بلوک‌های بتنی

از بلوک‌های بتنی نیز برای پوشش بستر استفاده می‌شود. ساده‌ترین نوع آن بلوک بتنی مکعبی یا مکعب مستطیلی است. وزن هر بلوک باید طوری باشد که در مقابل جریان آب در بده سیل حرکت نکند. معمولا از روابط تجربی، اندازه یا وزن سنگ‌دانه محاسبه می‌شود سپس ابعاد بلوک بتنی طوری انتخاب می‌شود که برابر وزن سنگ‌دانه محاسبه شده باشد. درصورتی‌که اندازه متوسط سنگ‌دانه محاسبه شده باشد، فرض می‌شود که سنگ‌دانه کروی با همین قطر باشد و با در نظرگرفتن چگالی سنگ‌دانه (معمولا ۲/۶۵)، وزن سنگ‌دانه محاسبه می‌شود. در سالیان گذشته تعداد زیادی بلوک‌های بتنی در شکل‌های مختلف به منظور سهولت اجرا (بلوک‌های متصل به روکش ارتجاعی شکل (پ.۴-۳)، قفل شدن در همدیگر و تشکیل توده یکپارچه برای مقاومت بیش‌تر در مقابل فرسایش (بلوک‌های شش پایه شکل پ.۴-۴) و روزنه‌دار به منظور رعایت حفاظت محیط‌زیست (شکل‌های پ.۴-۵ و پ.۴-۶) برای پوشش بستر به‌وجود آمده‌اند. برای طراحی هر یک از آن‌ها می‌توان به راهنماهای معتبر مراجعه نمود.

شکل پ.۴-۳- بلوک‌های متصل به روکش ارتجاعی

شکل پ.۴-۴- بلوک‌های شش پایه

شکل پ.۴-۵- بلوک بتنی روزنه‌دار

شکل پ.۴-۶- بلوک بتنی حجمی روزنه‌دار

پ.۴-۱-۴- کیسه‌های حاوی مصالح

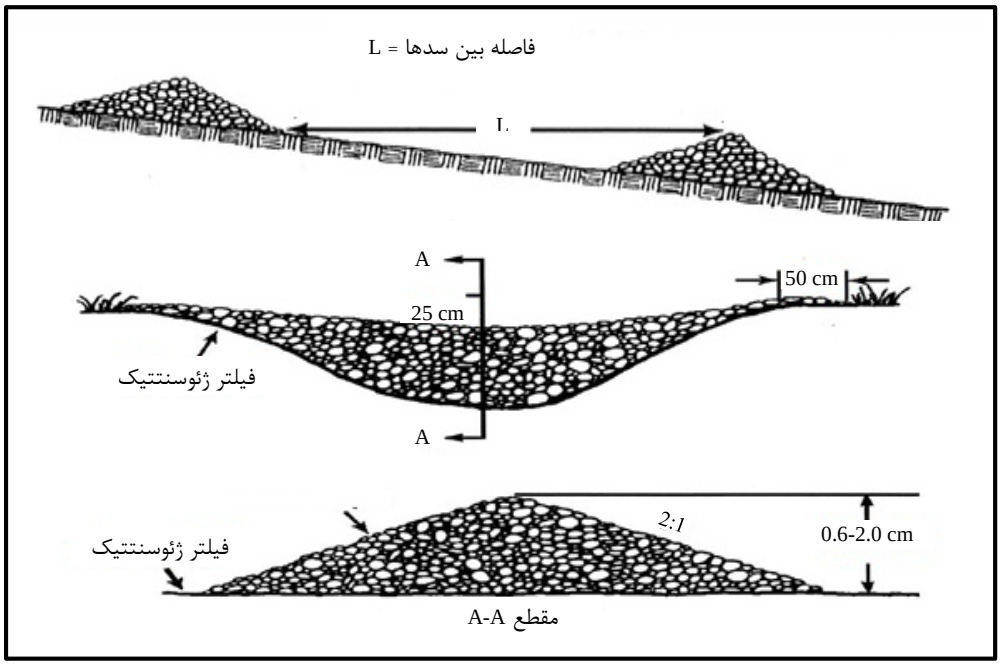
از سایر انواع پوشش‌ها می‌توان به کیسه‌های حاوی مصالح رسوبی یا بتنی نام برد. کیسه‌ها ممکن است به صورت یکپارچه باشند که با تزریق بتن درون آن‌ها، بلوک‌های بتنی متصل به‌هم شکل می‌گیرد که به آن لحاف بتنی می‌گویند (شکل پ.۴-۷). از نظر محیط‌زیستی این نوع پوشش توصیه نمی‌شود چرا که جلوی رشد پوشش گیاهی را می‌گیرند و برای آبزیان نیز فضای مناسبی را ایجاد نمی‌کنند. کیسه را می‌توان با مصالح رسوبی رودخانه نیز پر کرد. البته جنس این کیسه‌ها باید طوری باشد تا در معرض آب و آفتاب و سرما و گرما زود تخریب نشوند. ابعاد هر کیسه باید طوری انتخاب شود که پس از پرکردن با مصالح مورد نظر (مثلا رسوبات شن و ماسه بستر رودخانه)، وزنی معادل سنگ‌دانه محاسبه شده برای پوشش سنگریز داشته باشند.

شکل پ.۴-۷- نمونه‌ای از لحاف بتنی کار شده

پ.۴-۲- روش‌های کنترل ترازکاهی بستر یا فرسایش عمومی بستر

پ.۴-۲-۱- سدهای اصلاحی

سدهای اصلاحی، سازه‌های کم ارتفاعی (۰/۶ تا ۲ متر) هستند که به صورت متوالی در بستر رودخانه احداث می‌شوند و از مصالح طبیعی (سنگ یا تنه درخت) در ساخت آن‌ها استفاده می‌شود (شکل پ.۴-۸).



شکل پ.۴-۸- سدهای اصلاحی

برای طراحی سدهای اصلاحی با ارتفاع کم‌تر از ۲ متر، بده سیل طرح با دوره بازگشت ۵ تا ۱۰ سال و برای سدهایی با ارتفاع بیش‌تر از ۲ متر، دوره بازگشت ۲۵ ساله انتخاب می‌گردد. شیب اصلاحی رودخانه، شیبی است که در آن نرخ فرسایش بستر نسبت به شرایط طبیعی کاهش داشته باشد. در صورتی‌که میزان فرسایش خیلی ناچیز باشد، شیب را می‌توان بر اساس رابطه شیلدز تعیین کرد. همچنین می‌توان از رابطه اصلاح شده مانینگ نیز این شیب را محاسبه کرد:

$$S_e = \frac{(KV)^{\frac{10}{3}} (B)^{\frac{4}{3}} n^2}{Q^{\frac{4}{3}}}$$

در رابطه بالا، S_e: شیب اصلاحی، V: سرعت متوسط جریان (m/s)، B: محیط خیس شده (m)، Q: بده سیلاب طرح، و مقدار K بین ۱/۳-۱/۵ می‌باشد.

با تعیین شیب اصلاحی و اختیار کردن ارتفاع سدهای اصلاحی، فاصله بین سدها محاسبه می شود و بدین ترتیب تعداد (N) سدهای مورد نیاز برای بازه مورد نظر محاسبه خواهد شد.

$$N = L\frac{S_0 - S_e}{H_e}$$

به جای شیب اصلاحی می‌توان فاصله بین سدهای اصلاحی را از یکی از روابط تجربی زیر نیز محاسبه کرد:

رابطه هیدرومافیچ (۱۹۷۳) $L = \frac{H_e}{K S_0 \cos\theta}$

رابطه لنزی (۲۰۰۲) $\frac{\frac{H}{L}}{S_0} = 1.4$

در این روابط: H_e و H ارتفاع سد، S_0 شیب بستر طبیعی، S_e شیب اصلاحی و K ضریبی است که برای رودخانه‌های با شیب ۲۰ یا کم‌تر برابر ۰/۳ و برای شیب‌های بیش‌تر، برابر ۰/۵ می‌باشد.

پ.۴-۲-۲- کف‌بندها و آبشارک‌ها

برای کاهش شیب بستر آبراهه، از سازه‌های مختلف اصلاح شیب (مانند کف‌بند، سرریز کوتاه، شیب‌شکن‌ها و آبشارک‌ها) استفاده می‌شود. ضوابط طراحی تثبیت‌کننده‌های بستر برای کف‌بندها در نشریه شماره ۷۰۱ سازمان برنامه و بودجه کشور [۳۰]، و برای شیب شکن‌ها، در ضابطه شماره ۴۸۲ سازمان برنامه و بودجه کشور [۳۲] ارائه شده است. شکل (پ.۴-۹) و (پ.۴-۱۰) نمونه‌هایی از سازه‌های اصلاح شیب برای حفاظت بستر فرسایشی را نشان می‌دهند.

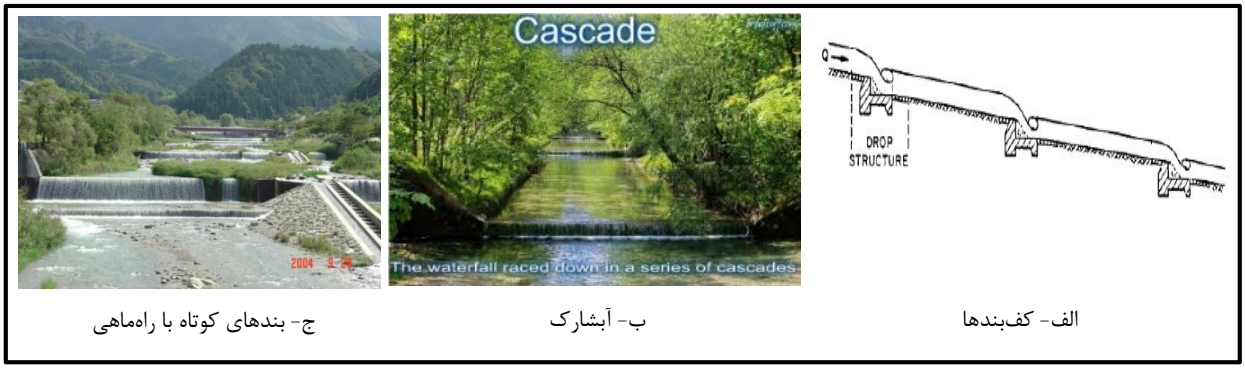
سدهای اصلاحی برای کنترل فرسایش بستر — شیب‌شکن پلکانی

شکل پ.۴-۹- انواع سازه‌های اصلاح شیب

شیب‌شکن پلکانی گابیونی حفاظت پل از فرسایش

شیب‌شکن قائم بتنی

ادامه شکل پ.۴-۹- انواع سازه‌های اصلاح شیب



الف- کف‌بندها

ب- آبشارک

ج- بندهای کوتاه با راه‌ماهی

شکل پ.۴-۱۰- نمونه‌هایی از سدهای اصلاحی برای حفاظت بستر فرسایشی

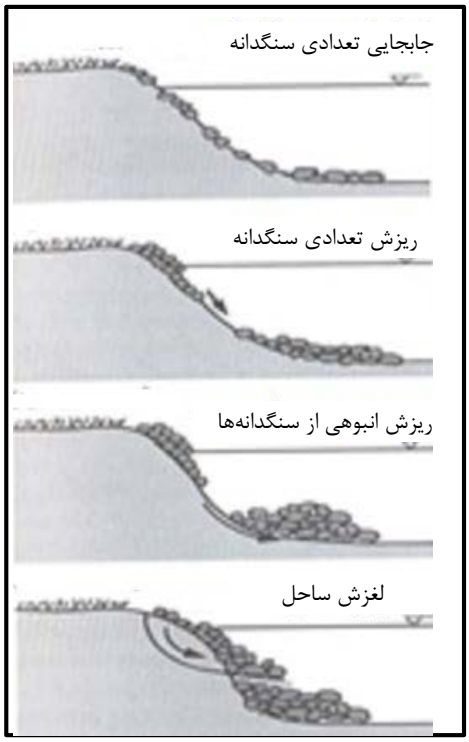
پ.۴-۳- روش‌های کنترل و تثبیت ساحل

پ.۴-۳-۱- روکش‌ها یا پوشش‌ها

از جمله روش‌های مرسوم برای تثبیت و حفاظت از سواحل، استفاده از مصالحی است که بر روی ساحل قرار می‌گیرند تا از برخورد مستقیم جریان رودخانه با مصالح ساحل جلوگیری شود. از جمله مصالحی که بسیار کاربرد دارد، سنگ می‌باشد. بدین ترتیب که سنگ‌دانه‌ها با مشخصات طراحی شده بر روی ساحل که شیب آن اصلاح شده است قرار می‌گیرند. اقدامات مورد نیاز و تعیین خصوصیات مصالح سنگی در بند ۱ اشاره شده است. برای تعیین اندازه متوسط سنگ، روابط متعددی وجود دارد که طراح باید از منابع معتبر استفاده کند. شکل (پ.۴-۱۱) نمونه اجرا شده پوشش ساحل رودخانه را با سنگ نشان می‌دهد. علاوه بر سنگ، از مصالح دیگر نظیر تورسنگ و انواع بلوک‌های بتنی دوست‌دار محیط‌زیست که در بند ۳-۲ اشاره شده است هم می‌توان استفاده کرد.

شکل پ.۴-۱۱- حفاظت ساحل با پوشش سنگ

هر چند روش روکش با سنگ به‌دلیل عدم نیاز به تکنولوژی پیچیده برای اجرا، دوست‌دار محیط‌زیست بودن و در دسترس بودن مصالح سنگی بسیارکاربرد دارد و روش موثری هم می‌باشد، ولی مراقبت و نگهداری از آن در طول عمر پروژه بسیار ضروری است. زیرا سنگ‌دانه‌ها به‌دلایل متعدد (عدم اجرای مناسب به‌خصوص حفاظت پاشنه ساحل با طول مناسب، عبور جریان بیش از بده سیل طرح، زلزله، ایجاد حفره توسط حیوانات وحشی، نشت آب از ساحل به‌دلیل وجود حوضچه پرورش ماهی، کشت‌هایی نظیر برنج و نیشکر نزدیک ساحل و همچنین عوامل انسانی) می‌تواند تخریب شود. شکل (پ.۴-۱۲) دلایل تخریب روکش‌های سنگریزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل پ.۴-۱۲- تخریب پوشش سنگریزه‌ای

پ.۴-۳-۲- دیواره‌های حائل

از دیگر روش‌های پوششی می‌توان دیواره‌های حائل را نام برد که با مصالح مختلفی اجرا می‌شوند. وجه سمت رودخانه دیواره‌ها ممکن است عمودی یا شیب‌دار و یا پلکانی باشد. استفاده از سنگ به‌دلیل فراوانی، در دسترس بودن و عدم نیاز به تکنولوژی‌های خاص بیش‌تر استفاده می‌شود. البته سنگ به همراه ملات سیمان یا استفاده از تورسنگی کاربرد بیش‌تری دارد. استفاده از شمع به همراه پانل بتنی نیز در تعدادی از پروژهای رودخانه‌های ایران نظیر کارون در اهواز استفاده شده است. در ادامه این بخش انواع دیواره‌های قابل کاربرد در رودخانه‌ها ابتدا معرفی و با توجه به کاربرد بیش‌تر دیواره‌های تور سنگی، به‌دلیل دوستدار محیط‌زیست بودن، در پروژه‌های رودخانه‌های این نوع دیوار با توضیح بیش‌تری ارائه شده است.

انواع دیواره‌های حائل قابل استفاده در حفاظت سواحل اطراف پل‌ها عبارتند از:

- دیوار وزنی بتنی

دیوار سیل‌بند وزنی بتنی به‌علت وزن زیاد در زمین‌های با مقاومت کافی ساخته می‌شود. در این دیوارها به دلیل وزن زیاد بتن، نیاز به آرماتور نمی‌باشد و با عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم در مترمکعب، بتن بسیار مقاوم و پایدار می‌گردد. ارتفاع این دیوارها تا ۳/۵ متر برای رودخانه‌های عمیق و کم‌عرض امکان‌پذیر می‌باشد.

- دیوار بتنی پایه‌دار

نوع دیگری از دیوارهای سیل‌بند، دیوار بتنی پایه‌دار (بتنی مسلح پشت بنددار) است که در مواردی که ارتفاع دیوار بلند باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیوارهای بتنی پایه‌دار ضمن دوام و استحکام، یکی از گران‌ترین سازه‌ها جهت جلوگیری از فرسایش کناره‌ای (حتی فرسایش کف مسیل) محسوب می‌شوند.

- دیوار T شکل پایه‌دار (معکوس)

از جمله دیوارهای سیل‌بند، دیوار T شکل طره‌ای یا پایه‌دار معکوس می‌باشند. دیوارهای T شکل پایه‌دار شامل پایه و دیوار هستند. درصورتی‌که این دیوار بر روی سنگ احداث شود، نیاز به زبانه برشگیر (Shear key) نخواهد داشت. اگر این دیوارها روی خاک احداث شوند، برای جلوگیری از لغزش نیاز به زبانه برشگیر دارند. درصورتی‌که دیوارهای T شکل پایه‌دار در زمین‌های نامناسب احداث شوند، وجود فونداسیون شمعی لازم خواهد بود.

- دیوار I شکل پایه‌دار

دیوار سیل‌بند غیر وزنی I شکل پایه‌دار (دیوارهای طره‌ای I) شامل سپر یا شمع می‌باشند که در بالای آن‌ها دیواری احداث می‌شود. دیوارهای I شکل اغلب در ارتباط با خاکریز (گوره) و اتصالات دیوارهای T شکل و یا برای حفاظت در مناطق محصور و باریک و در جایی‌که ارتفاع دیوار بیش از ۲/۵ تا ۳ متر نباشد با توجه به ویژگی‌های خاک احداث

می‌شـــوند. از این دیوارها در زمین‌های نرم و کم‌مقاومت که ظرفیت باربری آن‌ها اندک اســـت و احتمال فرســـایش و آبشستگی ناشی از جریان آب زیاد می‌باشد، استفاده می‌شود.

- دیوارهای سنگی

دیوارهای سنگی که با ملات‌های مختلف ساخته می‌شوند از انواع دیوارهای حفاظتی وزنی می‌باشند که دیوار سیل‌بند بنایی نیز نامیده می شوند. چنانچه مصالح مورد نیاز (سنگ، ماسه، سیمان و غیره) در محل به اندازه کافی موجود باشد، ساخت این دیوارها اقتصادی بوده و در برابر سیلاب‌ها و طغیان‌ها بسیار مستحکم و بادوام هستند. ارتفاع دیوارهای سنگی بنایی در رودخانه‌هایی که عرض کافی دارند، تا ۵ متر و بیش‌تر نیز توصیه شده است. در برخی موارد، ساخت سیل‌بندهای ســنگی با انباشــت مقدار زیادی ســنگ در مســیر طولی رودخانه انجام می‌گردد، که به تدریج خلل و فرج آن‌ها با رســوب رودخانه‌های پر می شوند و سبب استحکام دیوار سنگی می شود. ساخت این نوع سیل‌بندها نیز در مناطقی که سنگ مناسب در دسترس باشد، اقتصادی است. معمولا ارتفاع این سیل‌بندهای سنگی (خشکه‌چین) زیاد نیست.

- دیوارهای تورسنگی

دیوارهای تورســـنگی (گابیونی) از نوع دیوارهای نفوذ پذیر هســـتند که آب در هنگام طغیان و ســـیلاب از این دیوارها عبور می‌کند و در پشت آن قرار می‌گیرد و پس از فروکش کردن سیلاب دوباره به رودخانه بر می‌گردد. شایان ذکر است در رودخانه‌های آبرفتی که در آن‌ها قلوه‌سنگ به وفور وجود دارد، می‌توان از این دیوارها استفاده کرد.

- دیوارهای سیل‌بند شمع‌کوبی

در مناطقی که سواحل رودخانه‌ها از خاک ضعیف و سست (مارن، سیلت و غیره) تشکیل شده باشد، برای حفاظت از فرسایش و لغزش این سواحل ساخت دیوارهای سیل‌بند به صورت شمع ایستاده گزینه مناسبی می‌باشد. در این روش شمع‌ها در مجاورت یکدیگر به صورت چسبیده یا پهلو به پهلو اجرا شده و سپس کلافی جهت نگهداری شمع‌ها در بالای آن‌ها ساخته می‌شود. این کلاف سبب یکپارچگی شمع‌ها به یکدیگر می‌شود.

- دیوارهای عمیق (سپرهای بتنی)

این دیوارها متشکل از سپرهای بتنی می‌باشند که در مجاورت یکدیگر کوبیده می شوند و در بالای آن‌ها کلاف بتنی به صورت درجا ریخته می‌شود که باعث یکپارچگی آن‌ها می‌گردد. کلاف به کمک اتصالات برشگیر با سپرهای پیش‌ساخته یکپارچه می‌شود. این دیوارها به عنوان دیوارهای ساحلی استفاده فراوان دارد. استفاده از این دیوارها در مواردی که سطح آب زیرزمینی بالا است ایده‌آل می‌باشد.

- دیواره‌های صندوقه‌ای

دیواره‌های صندوقه‌ای از انواع دیگر دیوارهای ساحلی می‌با شند که در آن‌ها به منظور کاهش وزن، حفره‌های توخالی در دیواره‌های بتنی ایجاد شده است.

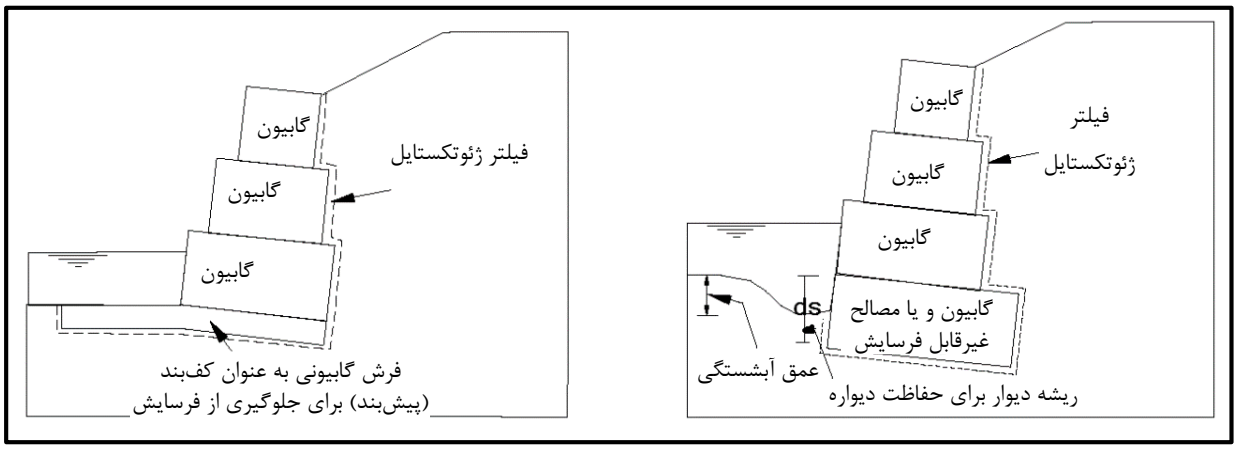
- دیوارهای انعطاف‌پذیر

سپرهای فولادی از انواع دیگر دیواره‌های سیل‌بند هستند. به طور کلی کاربرد سپرهای فلزی به عنوان دیوارهای عمودی به لحاظ اجرایی ساده و سریع و لیکن از لحاظ هزینه گران می‌باشد.

- دیوارهای حفاظتی تورسنگی جعبه‌ای (Gabion retaining wall)

این‌گونه سازه برای حفاظت و جلوگیری از فر سایش ساحل رودخانه به‌کار می‌روند. در صورتی‌که ارتفاع ساحل زیاد باشد بهتر است به صورت پلکانی اجرا شوند و پلکان‌ها در سمت رودخانه قرار داشته و از شیب قائم در سمت آب اجتناب گردد. برای پایداری وزنی، پلکان‌ها در سمت خاکریز نیز قرار می‌گیرند. ساختار کامل دیواره تورسنگ عموما عمود بر سطح افق ساخته می‌شود ولی مطابق شکل (۳-۱۲۷) برای پایداری بیش‌تر و دسترسی آسان‌تر به رودخانه توصیه شده است تا دیواره کمی مایل (با زاویه ۶ و یا بیشینه ده درجه نسبت به محور قائم) ساخته شود. معمولا مفتول استفاده شده در دیواره باید گالوانیزه با رویه پی وی سی و قطر ۴-۵ میلی‌متر برای توری های جلویی و ۳ تا ۳/۵ میلی‌متر برای توری‌های میانی باشد. دیواره تورسنگی از جعبه‌های پر شده توسط سنگ که در جا پر می‌شوند، ساخته می‌شوند. ابعاد جعبه‌های تورسنگی به عرض یک تا یک و نیم متر و ارتفاع نیم متر می‌باشند. توصیه شده است تا در خاک‌هایی با اصطکاک زیاد (روی پی بتنی و یا سنگ و سیمان) نسبت عرض کف دیواره به ارتفاع در محدوده ۰/۵ باشد. این نسبت درصورتی‌که دیواره بر روی مصالح رودخانه‌های مخلوط ساخته می‌شود در حدود ۰/۷ و چنانچه بر روی مصالح چسبنده احداث می‌گردد در حدود یک اختیار شود تا سازه در مقابل لغزش پایدار باشد. البته این نسبت با توجه به اطلاعات دقیق محلی ممکن است تغییر کند.

دیوارهای تورسنگی باید در مقابل فرسایش بستر و یا آبشستگی در محل پنجه ساحل حفاظت شوند. در پیچ خارجی پیچانرودها و در رودخانه‌های شریانی عمق آبشستگی بسیار زیاد است و ضروری است تا دیواره به اندازه کافی ریشه داشته باشد و یا تمهیدات دیگری برای تقویت پی و جلوگیری از آبشستگی (مانند پیش‌بند و یا کف‌بند تورسنگ) پیش‌بینی شود. در برخی طرح‌های کشور که دیواره‌های حفاظتی بدون سیستم کف‌بند و یا عدم ریشه کافی اجرا شده‌اند، پس از مدتی به‌علت آبشستگی و خالی شدن کف و زیر پی دچار تخریب شده‌اند. شکل (پ.۴-۱۳) دو نوع روش برای حفاظت دیواره در مقابل آبشستگی پنجه دیوار تورسنگی را نشان می‌دهد.

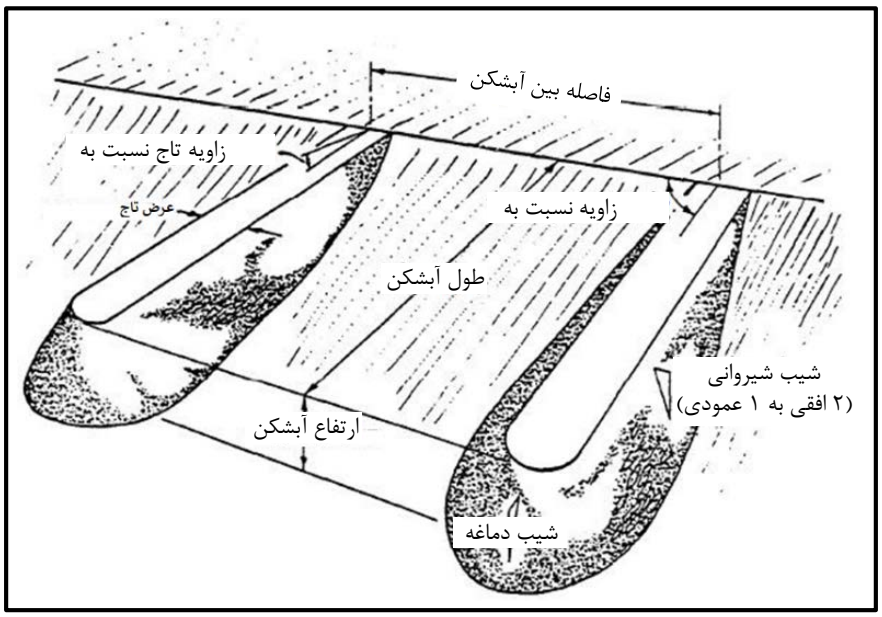


شکل پ.۴-۱۳- دیواره تورسنگ با دو روش کنترل آبشستگی پنجه‌وش عمقی (چپ) وکف‌بند (راست)

پ.۴-۴- روش‌های اصلاح الگوی جریان

پ.۴-۴-۱- آبشکن

آبشکن عبارت است از ساخت یک دیواره از ساحل به‌طرف رودخانه با زاویه و طول مشخص. مصالحی که برای ساخت آبشکن استفاده می‌شوند عبارتند از مصالح رودخانه‌های با پوشش سنگریز، تورسنگ، کیسه‌های حاوی مصالح رسوبی و بلوک‌های بتنی. آبشکن‌ها به صورت متوالی برای حفاظت ساحل رودخانه احداث می‌شوند. شکل (پ.۴-۱۴) نمونه آبشکن و برخی مشخصات طراحی را نشان می‌دهد.



شکل پ.۴-۱۴- مشخصات آبشکن

طول آبشکن معمولا بین ۱۰ تا ۲۰ در صد (و حداکثر ۳۰ در صد) عرض رودخانه در بده سیل طرح می‌باشد. فاصله آبشکن‌ها بسته به این‌که در بازه مستقیم یا پیچ رودخانه باشند و نیز نوع رودخانه (شریانی یا پیچانرود) بین ۲ تا ۶ برابر

طول آبشکن اختیار می شود. زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به جریان معمولا ۹۰ درجه یا عمود بر ساحل است ولی این زوایه می‌تواند بین ۷۰ (آبشکن جاذب) تا ۱۱۰ (آبشکن دافع) درجه تغییر کند. معمولا ارتفاع آبشکن برابر ارتفاع ساحل رودخانه است. گاهی آبشکن‌ها را از مصالحی نظیر سنگ، کیسه حاوی مخلوط شن و ماسه و درصدی سیمان یا تورسنگی می‌سازند و در این شرایط ممکن است ارتفاع آن‌ها کم‌تر از ارتفاع ساحل باشد که به آبشکن‌های مستغرق معروف هستند. شیب شیروانی‌های آبشکن با مصالح رودخانه‌های معمولا ۲ به ۱ می‌باشد. در آبشکن‌هایی که با مصالح رودخانه‌های (قلوه سنگ و شن و ماسه) اجرا شده‌اند، ضروری است تا بدنه و دماغه آبشکن در مقابل فرسایش به کمک روش‌های پوششی حفاظت شود. آبشکن‌ها حتما باید دارای ریشه در بستر و ساحل باشند. ریشه در ساحل در حدود یک متر باید لحاظ شود در غیر این صورت به‌دلیل اختلاف سطح آب بین بالادست و پایین‌دست آبشکن، جریان از درون ساحل به وجود می‌آید (پای‌پینگ) که منجر به ایجاد شکاف و سرانجام نهر و فاصله گرفتن بدنه آبشکن از ساحل می‌گردد. ریشه در بستر نیز باید به اندازه کافی باشد تا در مقابل آبشستگی احتمالی تخریب نشود. از آن‌جا که آبشکن‌ها بر روی بستر رودخانه احداث می‌شوند و به صورت مانعی در مقابل جریان قرار می‌گیرند، در معرض آبشستگی اطراف دماغه قرار دارند و یکی از عوامل مهم تخریب آبشکن‌ها نیز همین آبشستگی اطراف دماغه می‌باشد. از این رو ضروری است تا بستر رودخانه اطراف دماغه در فاصله مناسب محافظت گردد.

با اجرای سری آبشکن، جریان از ساحل دور شده و همچنین الگوی گردابه‌های افقی بین آبشکن‌ها شکل می‌گیرد که موجب رسوب‌گذاری بین آبشکن‌ها می‌شود. از این رو آبشکن‌ها برای ساماندهی سواحل تخریب شده روش بسیار موثری هستند چرا که با رسوب‌گذاری تدریجی بین آبشکن‌ها، ساحل تخریب شده دوباره باز سازی می شود. شکل (پ.۴-۱۵) نمونه‌ای از آبشکن‌های اجرا شده را نشان می‌دهد.

شکل پ.۴-۱۵- نمونه‌هایی از آبشکن‌های اجرا شده در رودخانه‌های مختلف

از آبشکن‌ها برای انحراف جریان نیز استفاده می شود. بدین ترتیب که برای انحراف جریان به یک سوی رودخانه می‌توان آبشکنی را در ساحل مقابل اجرا تا اهداف مورد نیاز تامین شود. چنانچه انحراف موقتی است (مثلا برای دوره ساخت سازه پل) حتما ضروری است تا در پایان آبشکن مذکور حذف و مسیر رودخانه به شکل قبلی برگردد. علاوه براین در رودخانه‌هایی که ناوبری متداول می‌باشد، در هر دو ساحل رودخانه آبشکن احداث می‌کنند تا از قرارگیری خط القعر رودخانه (عمیق‌ترین مسیر جریان رودخانه مناسب برای مسیر عبور و مرور کشتی‌ها) در میانه رودخانه، اطمینان حاصل شود.

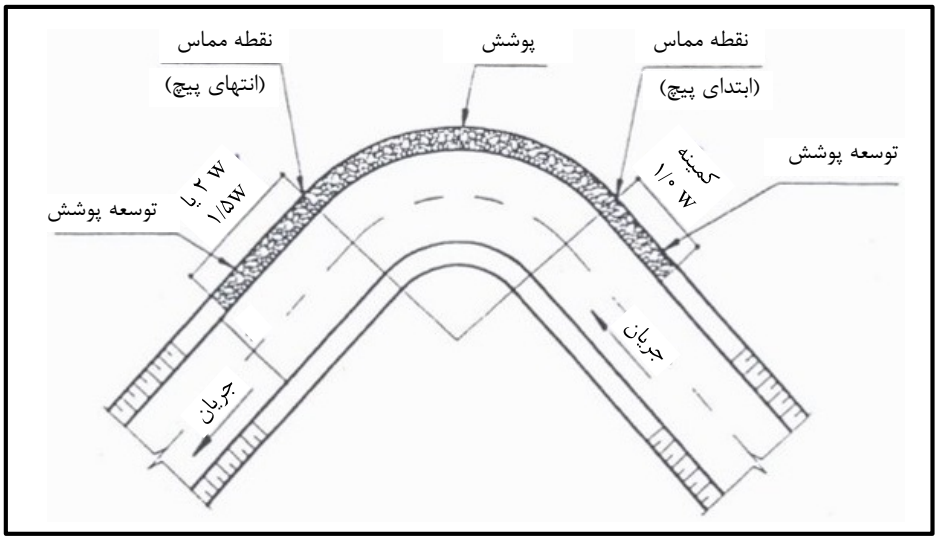
پ.۴-۴-۲- صفحات مستغرق

در این روش، میزان قابلیت یا پتانسیل فرسایشی رودخانه کاهش می‌یابد. به طور مثال صفحات مستغرق می‌توانند با تغییر الگوی جریان و ایجاد جریان گردابی باعث کاهش تنش برشی بستر گردند. معمولا این روش تاثیر کمی روی مورفولوژی رودخانه دارد. میزان قابلیت انتقال رسوب رودخانه در نزدیکی این سازه‌ها کاهش می‌یابد و همچنین ممکن است تراز سطح آب رودخانه در بالادست سازه کمی افزایش یابد. این صفحات سازه‌هایی هستند که در درون رودخانه و نزدیک ساحل یا پاشنه و محلی که باید حفاظت شود، نصب می‌شوند. این صفحات معمولا با زاویه ۱۵ تا ۲۰ درجه نسبت به جریان و به ارتفاع ۰/۲ تا ۰/۴ عمق آب در شرایط بده طراحی نصب می‌شوند. این صفحات ممکن است در یک، دو، یا سه ردیف موازی با هم نصب شوند. این صفحات جریان ثانویه موضعی ایجاد می‌کنند که جریان ثانویه اصلی را تحت‌تاثیر

قرار داده، همچنین باعث تغییر در مقدار و جهت تنش بر شی بستر و تغییر در توزیع سرعت، عمق و رسوب در محدوده صفحات می‌گردد.

پ.۴-۴-۳- آبشکن‌های کوتاه و مستغرق در پیچ (Bendway Weirs)

یکی از سازه‌هایی که اخیرا در آمریکا و در رودخانه‌های متعدد از جمله می‌سی‌سی‌پی استفاده شده است، آبشکن‌های کوتاه و مستغرق در پیچ‌ها می‌باشد. این نوع سازه که از مصالح سنگ، کیسه سیمان، بلوک بتنی و غیره به منظور کاهش فرسایش یا آبشستگی پیچ خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با ساخت این سازه، سرعت جریان در نزدیک ساحل کاهش یافته، همچنین منطقه تراکم خطوط جریان از محل پیچ خارجی به سمت مرکز جریان هدایت می شود که در هر حال شرایط توزیع خطوط جریان در پیچ ملایم‌تر و بهتر می‌شود. در نهایت این سازه باعث می‌شود تا خط‌القعر رودخانه از محل پاشنه ساحل دور شود. آبشکن‌های کوتاه و مستغرق در پیچ از نقطه‌نظر محیط زیستی نیز منطبق بر شرایط محیط زیستی می‌باشند. مطالعات انجام شده در رودخانه می سی سی‌پی حاکی از افزایش ماهیان در اطراف این سازه به مقدار سیزده برابر بیش از سایر انواع سازه‌های حفاظتی ساحل می‌باشد. ضمن این‌که در زمان کم‌آبی، امکان رشد درختان در میدان اثر این سازه وجود دارد که پس از مدتی به تثبیت بیش‌تر ساحل کمک نموده و شرایط محیط زیستی مناسبی را فراهم می‌کند. در شکل‌های زیر نمونه‌هایی از طرح‌های مختلف اجرا شده حفاظت سواحل نشان داده شده است.

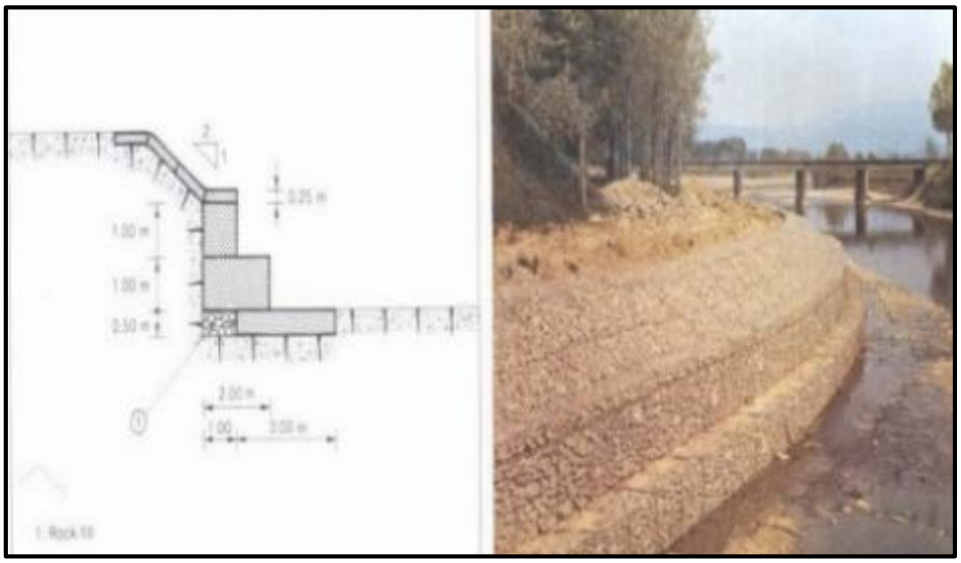


شکل پ.۴-۱۶- طول بازه حفاظتی در پیچ رودخانه و نزدیک به پل

شکل پ.۴-۱۷- دیواره تورسنگ در حفاظت دیواره پایین پیچ

شکل پ.۴-۱۸- حفاظت طبیعی- سازه‌ای دیواره‌ی رودخانه در بالادست پل

شکل پ.۴-۱۹- حفاظت طبیعی دیواره‌ی رودخانه در محل پل



شکل پ.۴-۲۰- دیواره تورسنگ در حفاظت پیچ رودخانه در بالادست پل

شکل پ.۴-۲۱- دیواره تورسنگ در حفاظت پیچ رودخانه در بالادست پل

شکل پ.۴-۲۲- صفحات مستغرق بتنی در حفاظت پیچ رودخانه در بازه‌ی پل

شکل پ.۴-۲۳-آبشکن‌های کوتاه در حفاظت دیواره‌ی رودخانه در بالادست پل

شکل پ.۴-۲۴- آبشکن‌ها در تثبیت راه ساحلی رودخانه تنگی، کانادا

شکل پ.۴-۲۵-آبشکن‌ها در تثبیت راه ساحلی رودخانه قزل‌اوزن، ایران

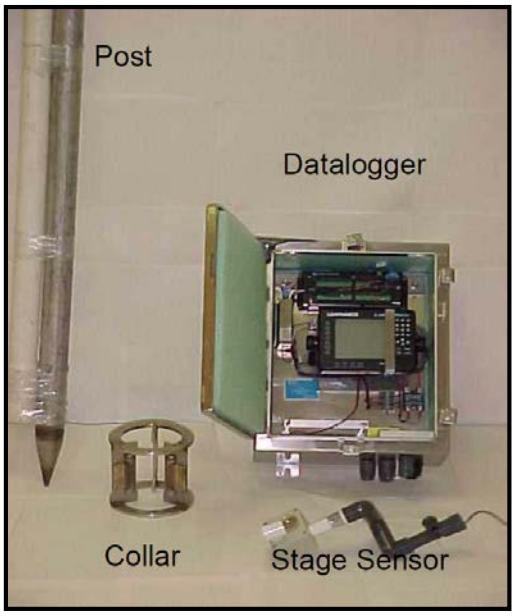
پیوست ۵

روش‌های برخط برای پایش آبشستگی پل

پ.۵-۱- روش‌های برخط برای پایش آبشستگی پل

- طوقه لغزشی مغناطیسی [۱] (MSC)

طوقه‌های لغزشی مغناطیسی، طوقه‌هایی هستند که روی میله‌ای که در کف رودخانه نصب شده به طرف پایین می‌لغزد. طوقه روی کف رودخانه می‌نشیند و به تدریج که بستر موضعی فرسایش می‌یابد، طوقه نیز به طرف پایین حرکت می‌کند. این روش پایش، فقط بیشینه عمق آبشستگی را اندازه می‌گیرد. بنابراین این سامانه توسط عواملی نظیر واریزه‌ها و یا افزایش تراز بستر که از حرکت آزادانه‌ی طوقه به‌طرف بالا یا پایین میله ممانعت می‌کند، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. سامانه ممکن است به طور خودکار و یا دستی قرائت شود. در حالت خودکار، سوئیچ‌های مغناطیسی داخل میله‌ی نصب شده در کف رودخانه، موقعیت قرارگیری طوقه را تعیین و یک دیتالاگر موقعیت طوقه را ثبت می‌کند. در حالت دستی، یک سوئیچ مغناطیسی پایین برده می شود تا این‌که توسط طوقه فعال شود. با وجودی که از این وسیله در زمان وقوع سیل می‌توان استفاده کرد، از آن نمی‌توان برای پایش پیوسته آبشستگی، به‌ویژه در شرایط بستر متحرک استفاده کرد [۲۰۶]. نمونه‌ای از سامانه‌ی پایش طوقه لغزشی مغناطیسی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل پ. ۵-۱- اجزای مختلف یک سامانه طوقه لغزشی مغناطیسی [۱۰۲]

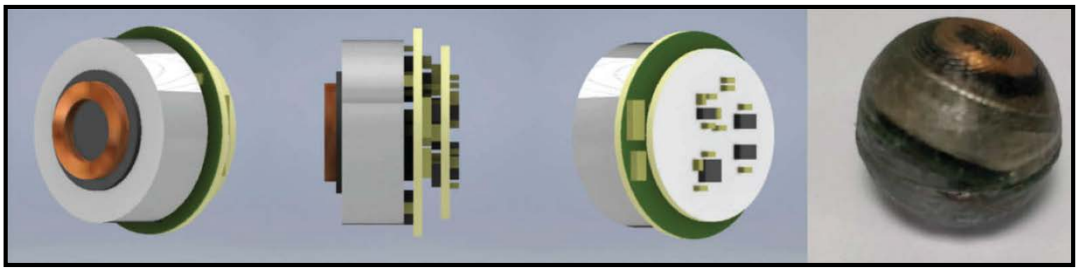
- سنگ‌های هوشمند [۲]

تکنیک سنگ‌های هوشمند نیز با اصولی مشابه با چیزی که در طوقه‌ی لغزشی مغناطیسی استفاده می شود، برای پایش و اندازه‌گیری آبشستگی توسط محققان ارائه و توسعه داده شده است [۱۰۷]. در شکل (پ. ۵-۲) اجزای داخلی و

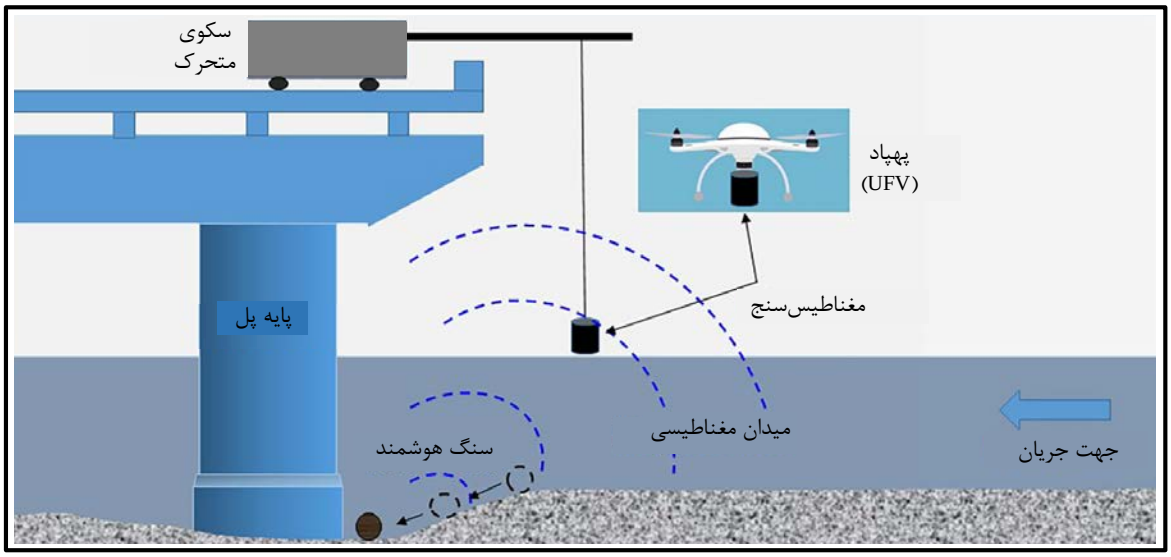
۱- Magnetic Sliding Collar (MSC)

۲- Smart rocks

فرم نهایی یکی از مدل‌های این نوع حسگر که کره‌ای به قطر ۲۰mm است و رویه آن با لاستیک پوشانده شده است را نشان می‌دهد، در شکل (پ. ۵-۳) نیز به طور شماتیک استفاده از این تکنیک نشان داده شده است.



شکل پ. ۵-۲- اجزای داخلی یک سنگ هوشمند



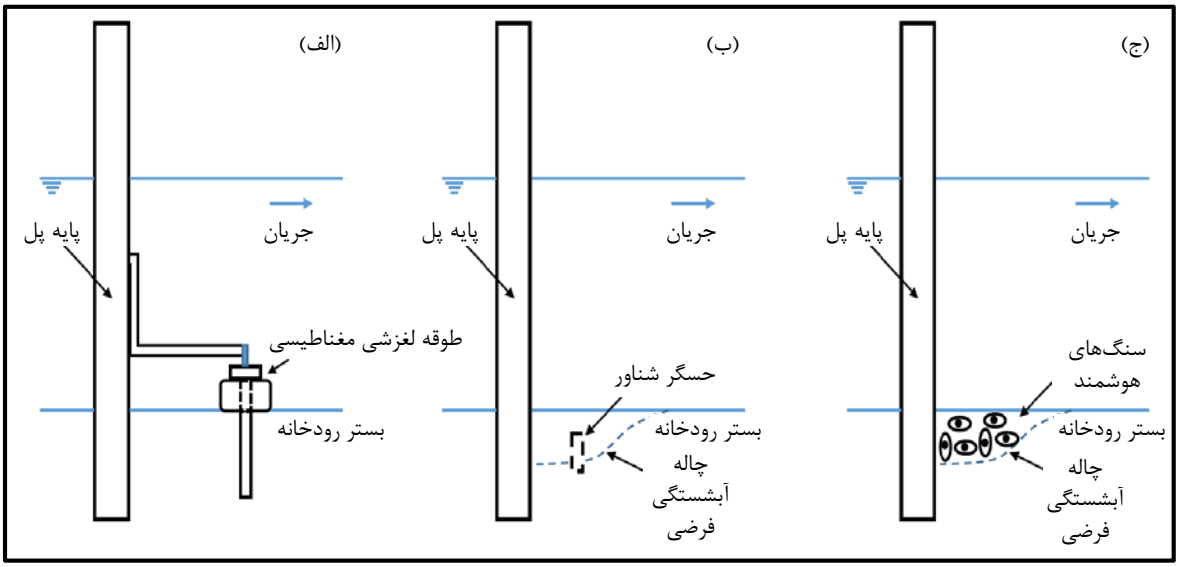
شکل پ. ۵-۳- ساز و کار استفاده از تکنیک سنگ هوشمند

- پایش آبشستگی با دستگاه‌های شناور[۱]

دستگاه‌های شناور در نقاط مناسب در نزدیکی پل مدفون می شوند و هنگامی که آبشستگی حسگر را نمایان کرد، فعال می شوند. حسگر شناور شده و به سطح آب می‌آید سپس یک فرستنده مستقر روی پل فعال می شود و شماره شناسایی دیجیتالی حسگر را به دیتالاگر ارسال می‌کند. یکی از معایب سامانه‌های شناور این است که فقط درصورتی‌که آبشستگی تا تراز معینی پیشروی کرده باشد اندازه‌گیری را انجام می‌دهند. این سامانه به انرژی نیز نیاز دارد ولی مقدار آن اندک است. سامانه انرژی باید برای دوره‌های طولانی تامین باشد. واسط کاربر برای دیتالاگر به صورت بی‌سیم است. توضیح این‌که سه روش طوقه‌ی لغزشی مغناطیسی، سنگ هوشمند و دستگاه‌های شناور جزو تکنیک‌های پایش با اهداف مرجع[۲] طبقه‌بندی می‌شوند [۲۰۶] (پ. ۵-۴).

۱- Float-out devices

۲- Monitoring with reference targets



شکل پ. ۵-۴- تکنیک‌های پایش آبشستگی با اهداف مرجع

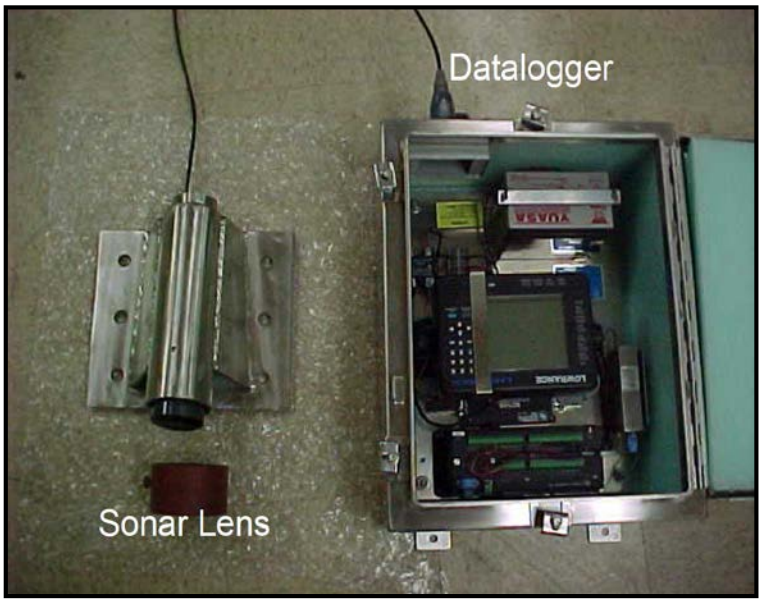
- پایش آبشستگی با سونار[۱] (ردیاب صوتی)

پایش آبشستگی با سونار سامانه‌ای است که در آن از یک دستگاه سونار (ردیاب صوتی) متصل به دیتالاگر[۲] برای ثبت پیوسته عمق آبشستگی که از طریق اندازه‌گیری فاصله برمبنای زمان سیر[۳] یک موج صوتی در آب انجام می‌شود، استفاده می‌گردد.

به منظور پایش سوناری در پل‌ها، از ژرفا سنج‌های صوتی[۴] تجاری که در دسترس و کم‌هزینه نیز هستند، استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها در محل‌های پیش‌بینی شده‌ی وقوع آبشستگی و یا جاهایی که احتمال شکست بالاست، نصب می‌شوند [۹۱].

این سامانه می‌تواند هر دو فرایند آبشستگی و پر شدن دوباره چاله آبشستگی را روندیابی کند. مزیت سامانه این است که در ارتفاع‌های مختلف و به دور از تاثیر واریزه‌ها و مواد شناور و نیز در زاویه شیب‌های[۵] مختلف قابل نصب است، بدون این‌که بر عملکرد آن تاثیر بگذارد. البته در این سامانه، اندازه‌گیری‌ها تحت تاثیر جریان هوادهی شده و بار بستر قرار می‌گیرد [۹۱]. نمونه‌ای از سامانه‌های پایش سوناری آبشستگی در شکل (پ. ۵-۵) نشان داده شده است.

۱- Sonar
۲- Data logger
۳- Travel time
۴- Sonic fathometer
۵- Angles of inclination



شکل پ. ۵-۵- اجزای یک پایشگر سوناری آبشستگی [۱۲۲]

- شبکه فیبری براگ[۱] (FBG)

در این روش از حسگرهای پیزوالکتریکی استفاده می شود که در معرض نیروهای هیدرودینامیکی جریان آب نزدیک شونده قرار می‌گیرند و در اثر گشتاور خمشی وارده تغییر شکل می‌دهند. این حسگرها به میله‌هایی که در بستر رودخانه نصب شده‌اند بسته می‌شوند و عمق آبشستگی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده تعیین می‌گردد [۲۰۶].

- بازتاب‌سنجی میدان زمان[۲] (TDR)

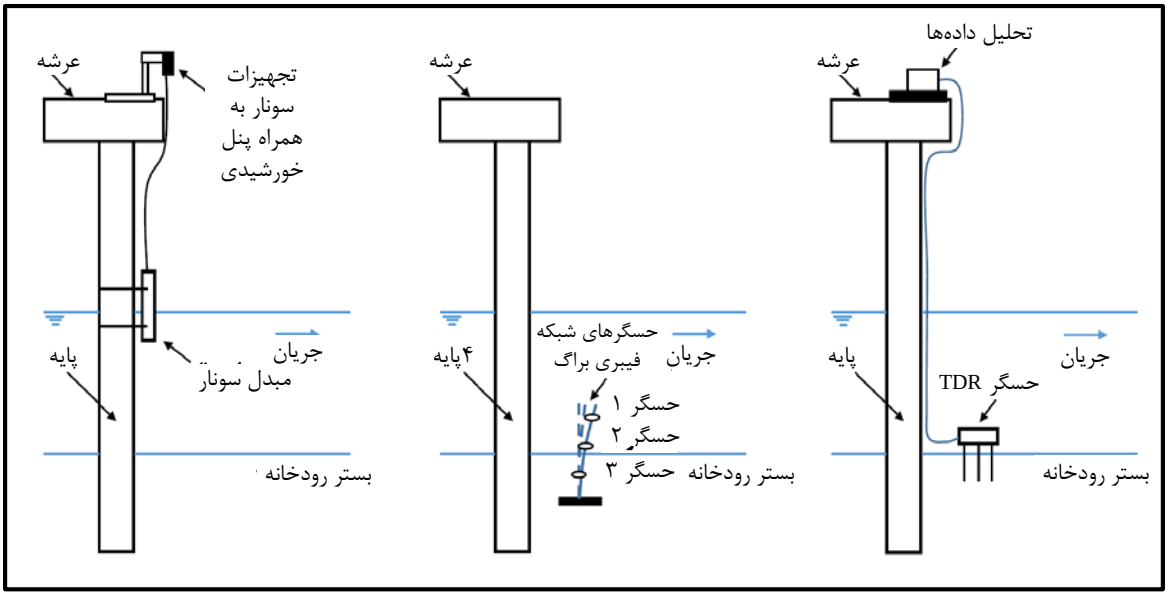
TDR به‌این صورت است که با ارسال پالس الکترومغناطیس به طرف پایین میله‌ای که در بستر رودخانه دفن شده است، کار می‌کند. هنگامی که پالس با تغییری در شرایط مرزی (نظیر فصل مشترک آب - خاک) مواجهه می‌شود، بخشی از انرژی پالس از مرز به طرف منبع پالس منعکس می‌شود. باقی‌مانده انرژی پالس از میان مرز عبور می‌کند تا این‌که شرایط مرزی دیگری (یا پایان اندازه‌گیری) موجب می شود تا بخشی از انرژی یا تمام آن به سمت منبع منعکس شود. با پایش و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت پالس در زمان واقعی، فاصله تا مرزها را می‌توان محاسبه کرد. به این ترتیب اطلاعات مربوط به تغییرات تراز بستر رودخانه به‌دست می‌آید. در شکل (پ. ۵-۶) به طور شماتیک سه تکنیک سونار، شبکه فیبری براگ (FBG) و بازتاب‌سنجی میدان زمان (TDR) برای پایش و اندازه‌گیری آبشستگی مقایسه شده‌اند. سه روش مذکور بر مبنای پایش مرز (فصل مشترک) آب و رسوب[۳] کار می‌کنند. این سه روش برخی محدودیت‌های کلی نیز دارند که عبارتند از الف- حسگر باید در زیر آب در کف رودخانه نصب شود، ب- ناحیه‌ی تحت پایش هر حسگر محدود

۱- Fiber Bragg Grating (FBG)

۲- Time Domain Reflectometry (TDR)

۳- Monitoring sediment-water interface

اســت، ج- برای تحلیل داده‌های به‌دســت آمده، آموزش‌های ویژه‌ای مورد نیاز اســت و تفســیر و نتیجه‌گیری از اطلاعات حاصل نیز برای کاربران کم‌تجربه مشکل است [۲۰۶].



شکل پ. ۵-۶- تکنیک‌های بازرسی و اندازه‌گیری آبشستگی [۲۰۶]

- میله‌های صوتی[۱]

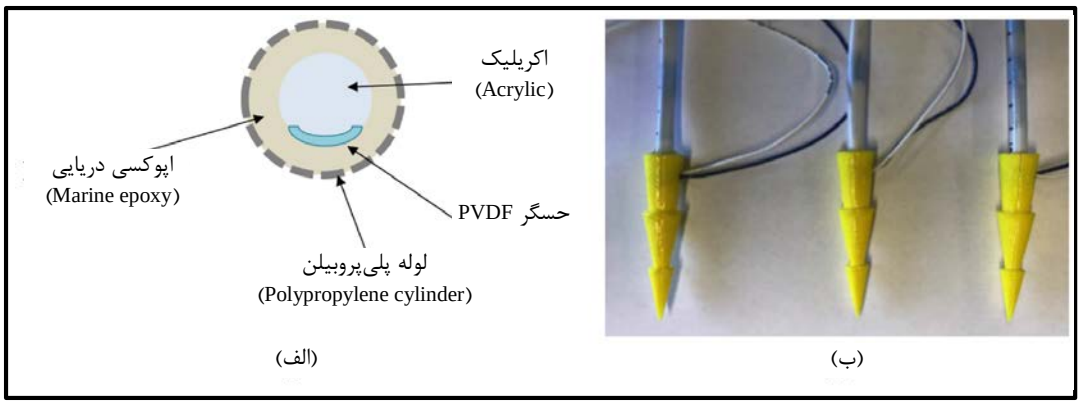
میله‌های صــوتی یا دســتگاه‌های میله افتان[۲]، حســگرهای فیزیکی مبتنی بر گرانش[۳] هســتند که می‌توانند دســتی یا خودکار باشند. با وقوع آبشستگی در بستر رودخانه، میله که پای آن روی بستر فرود می‌آید، مسیر بستر را دنبال می‌کند و موجب می‌شود تا شمارشگر سامانه، تغییرات را ثبت کند. پای میله باید اندازه‌ی مناسبی داشته باشد تا از نفوذ به داخل بستر رودخانه (در اثر گرانش) و یا ارتعاش میله به واسطه‌ی جریان آب جلوگیری شود. این مسئله محدودیتی جدی در رودخانه‌هایی با بستر ماسه‌ای است.

- میله‌های پیزوالکتریک[۴]

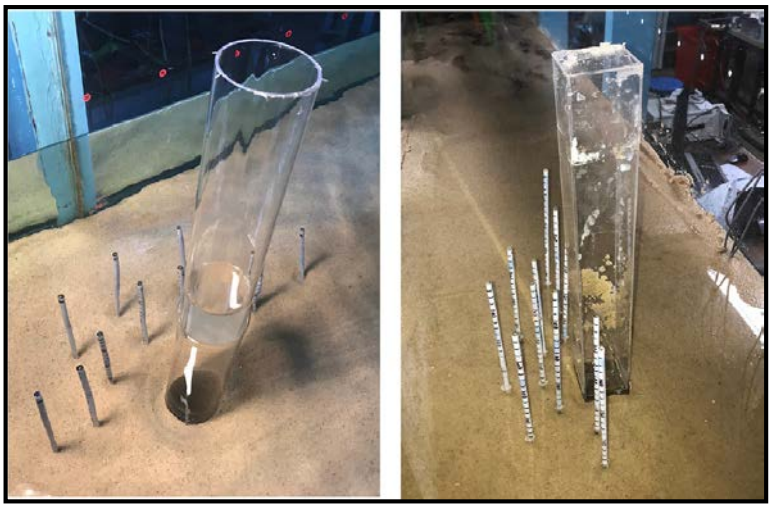
این نوع سامانه‌ی پایش آبشستگی از یک میله باریک پلیمری با یک نوار نازک از پلی‌وینیلیدن فلوراید[۵] (PVDF) که از وسط آن عبور می‌کند تشکیل شده است. استخراج فرکانس اصلی[۶] امکان محاسبه‌ی طول در معرض دید (= عمق آبشستگی) میله باریک را فراهم می‌سازد [۱۲۹]. در شکل (پ. ۵-۷) اجزای میله‌های پیزوالکتریک، در شکل (پ. ۵-۸)

۱- Sounding rods
۲- Falling-rod instruments
۳- Gravity-based
۴- Piezoelectric rods
۵- Polyvinylidene Fluoride (PVDF)
۶- Fundamental frequency

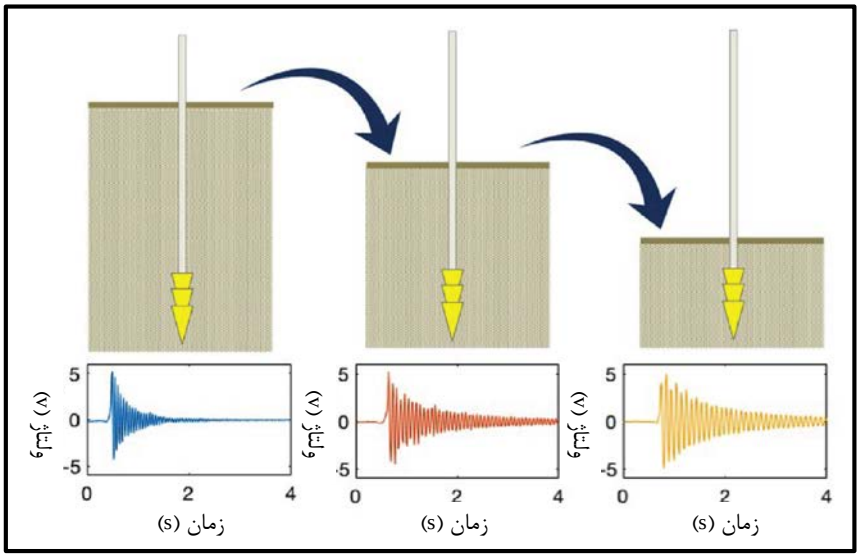
نصب گروهی میله‌ها در اطراف پایه‌های استوانه‌ای و مستطیلی در شرایط آزمایشگاهی و در شکل (پ. ۵-۹) به طور شماتیک طرز کار میله‌های پیزوالکتریک نشان داده شده است.



شکل پ. ۵-۷- (الف) مقطع میله پیزوالکتریک (ب) پایه‌های مخروطی شکل



شکل پ. ۵-۸- نصب میله‌های پیزوالکتریک [۱۲۹]



شکل پ. ۵-۹- تاثیر آبشستگی بر طول بیرون آمده‌ی میله از بستر رسوبی [۱۲۹]

- رادار نفوذ کننده در زمین[۱] (GPR)

در این روش از پالس‌های رادار برای تعیین مرز بین آب و رسوب و در نتیجه عمق آبشستگی استفاده می شود. این روش نیز از اصول مشابهی با روش TDR در استفاده از امواج الکترومغناطیس با فرکانس بالا بهره می‌برد، با این تفاوت که در این روش از یک فرستنده شناور استفاده می شود، برخلاف روش TDR که حسگر در بستر رودخانه نصب می شد. فرستنده GPR شناور، در سطح آب کشیده می شود تا یک *پروفیل ژئوفیزیکی*[۲] از بستر رودخانه در طول مسیر حرکت فرستنده به‌دست آید. استفاده از این روش آسان است و در عین حال می‌تواند اطلاعات دقیقی از شرایط زمین در زیر سطح آب فراهم نماید. البته چون استفاده از این روش به صورت دستی انجام می شود، در زمان وقوع سیل و نیز برای پایش‌های پیوسته نمی‌توان آن را به‌کار برد [۹۱].

- آرایه‌های انحراف‌سنج[۳]

آرایه‌های انحراف سنج برای اندازه‌گیری حرکت و چرخش سازه استفاده می شوند. انحراف سنج‌ها روی پایه‌هایی که شرایط بحرانی دارند و نیز روسازه‌ی پل نصب می‌شوند و به این ترتیب این دستگاه موقعیت و وضعیت پل را پایش می‌کند. به منظور پایش تمام جابجایی‌های محتمل، بهترین حالت نصب به این‌صورت است که حسگرها روی سطح پایه‌ها به صورت موازی و عمود بر جهت حرکت ترافیک و در روسازه نیز دقیقا بالای پایه‌ها نصب شوند. سامانه‌ای با این ویژگی، امکان پایش پایداری سازه را نه تنها تحت تاثیر آبشستگی بلکه در اثر عوامل دیگری مانند زلزله، نشست سازه در طولانی مدت، ضربه، ساخت و ساز در نزدیکی سازه‌ی تحت پایش و نیز اثرات یاتاقان قفل شده را فراهم می‌سازد.

استفاده از انحراف‌سنج‌ها مبنای روش دیگری برای پایش آبشستگی است که پایش معکوس یا پایش بر مبنای تحلیل وارونگی نامیده می‌شود [۲۰۶]. از جمله‌ی روش‌های دیگری که به منظور پایش آبشستگی ارائه شده می‌توان به روش پایش با استفاده از سامانه‌ی مبتنی بر ارتعاش اشاره کرد که از تکنیک‌های اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی سازه استفاده می‌کند. در این روش شتاب‌سنج‌های بر روی سازه نصب می شود و میزان تغییر در سختی شالوده سازه که در نتیجه‌ی آبشستگی ایجاد شده اندازه‌گیری می‌شود [۱۸۰].

۱- Ground-penetrating Radar (GPR)

۲- Geophysical profile

۳- Tiltmeter arrays

منابع و مراجع

۱- «راهنمای پهنه‌بندی سیل و تعیین حد بستر و حریم رودخانه»، ضابطه شماره ۳۰۷ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۴.

۲- «راهنمای تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب»، ضابطه شماره ۸۲۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۹.

۳- «آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها»، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۷۹.

۴- «آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله»، ضابطه شماره ۴۶۳ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۷.

۵- «آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران»، ضابطه شماره ۴۱۵ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۱.

۶- «آیین‌نامه راه‌های ایران (آرا)- طراحی هندسی راه‌های برون شهری»، ضابطه شماره ۱-۸۰۰ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۴۰۳.

۷- «تعمیر و مقاوم سازی زیرسازه پل‌ها»، دفتر مطالعات فناوری و ایمنی وزارت راه و ترابری، ۱۳۹۱.

۸- «خلاصه یافته‌ها، درس‌آموخته‌ها و پیشنهادهای گزارش ملی سیلاب‌ها»، مرکز امور اجتماعی منابع آب و انرژی، وزارت نیرو، ۱۳۹۹.

۹- «دستورالعمل تعیین حریم کمی رودخانه‌ها»، انتشارات دفتر مهندسی رودخانه و سواحل شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ۱۳۸۹.

۱۰- «دستورالعمل تعیین حریم کیفی رودخانه‌ها و آب‌های سطحی» انتشارات دفتر مهندسی رودخانه و سواحل شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ۱۳۸۴.

۱۱- «دستورالعمل ناحیه بندی استقرار کاربری در حریم کیفی منابع آب سطحی» ضابطه شماره ۷۸۲ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۴۰۳.

۱۲- «دستورالعمل کنترل آب‌های سطحی (سیل)»، ابلاغیه سازمان مدیریت بحران کشور، ۱۴۰۲.

۱۳- «دستورالعمل مطالعات هیدرولیکی و آبشستگی پل»، ضابطه شماره ۳۰۲ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۴.

۱۴- «راهنمای برداشت مصالح رودخانه‌ای»، ضابطه شماره ۳۳۶ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۴۰۳.

۱۵- «راهنمای بهسازی لرزه‌ای پل‌ها»، ضابطه شماره ۵۱۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۰.

۱۶- «راهنمای پیشگیری و تعمیر خرابی‌های ناشی از آبشستگی در پل‌ها»، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهر سازی، وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۶.

۱۷- «راهنمای تعیین حد بستر و حریم، ساماندهی و زیبا سازی رودخانه‌ها و مسیل‌های شهری»، نشریه شماره ۲۰۲ طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، ۱۴۰۰.

۱۸- «راهنمای تعیین دوره بازگشت سیلاب طراحی برای کارهای مهندسی رودخانه»، ضابطه شماره ۳۱۶ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۹.

۱۹- «راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل»، ضابطه شماره ۲۶۰ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۱.
۲۰- «راهنمای طراحی، اجرا و نگهداری دیوار هدایت آب پل‌ها»، گزارش تحقیقاتی شماره (گ-۷۳۶)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۵.
۲۱- «راهنمای تعیین کاربری‌های مجاز در بستر و حریم رودخانه‌ها»، نشریه شماره ۲۰۳ طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، ۱۴۰۰.
۲۲- «راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای»، ضابطه شماره ۵۶۰ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۸.
۲۳- «راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی»، ضابطه شماره ۵۴۹ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۰.
۲۴- «راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه»، ضابطه شماره ۵۸۴ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۱.
۲۵- «راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها» ضابطه شماره ۵۹۲ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۱.
۲۶- «راهنمای مطالعات هیدرولیکی پل‌ها»، ضابطه شماره ۳۸۷ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۴.
۲۷- «شرح خدمات همسان مطالعات طرح‌های احداث راه»، ضابطه شماره ۴۱۳ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۹.
۲۸- «شرح خدمات همسان مطالعات طرح‌های بهسازی راه»، ضابطه شماره ۴۱۲ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۹.
۲۹- «شناسنامه فنی پل‌ها»، ضابطه شماره ۳۶۷ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۶.
۳۰- «ضوابط طراحی کف‌بندها و تثبیت‌کننده‌های بستر»، ضابطه شماره ۷۰۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۵.
۳۱- «ضوابط طراحی هیدرولیکی سیفون‌ها و آبگذر زیر جاده»، ضابطه شماره ۳۲۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۴.
۳۲- « ضوابط طراحی هیدرولیکی شیب شکن‌ها، تندآب‌ها و تا سی سات پایانی ا ستهلاک انرژی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی»، ضابطه شماره ۴۸۲ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۸.
۳۳- «فهر ست مطالب مطالعات پل‌ها»، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری شورای عالی فنی امور زیربنایی حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۸۸.
۳۴- «قانون توزیع عادلانه آب» مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۶۱.
۳۵- «قانون مدیریت بحران کشور»، مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۳۹۸.
۳۶- «گزارش بازنگری دوره بازگشت مبنای تعیین حد بستر و حریم رودخانه‌ها»، دفتر مهندسی رودخانه و سواحل شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ۱۴۰۱.
۳۷- «گزارش هیات ویژه سیلاب»، نهاد ریاست جمهوری و دانشگاه تهران، ۱۳۹۸.
۳۸- «گزارش هیدرولیکی رودخانه ولیان»، مهندسین مشاور آب آرا سازه، ۱۳۸۴.
۳۹- «مدیریت پل»، معاونت آموزش تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۸۵.

۴۰- «نقشه‌های همسان آبروهای راه تا دهانه ۱۰متر»، ضابطه شماره ۲۹۲ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۴.
۴۱- «نقشه‌های همسان آبروهای راه‌آهن تا دهانه ۱۰متر»، ضابطه شماره ۲۹۳ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۴.
۴۲- «نقشه‌های همسان پل‌ها و عرشه پل‌های راه‌آهن دهانه ۱۰ تا ۲۵ متر»، ضابطه شماره ۲۹۵ سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۶.
۴۳- آرش، ا. م، «ارزیابی و اصلاح مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) با توان تفکیک پایین برای مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب رودخانه‌ها»، پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه‌های آبی. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، ۱۳۹۹.
۴۴- ابهری رشت‌آبادی، م، ترابی، ا، تجریشی، م، «شبیه‌سازی هیدرولیکی اثرات اجرای سازه‌ها بر مورفولوژی رودخانه‌های درون شهری توسط نرم‌افزار HEC-RAS (مطالعه موردی رودخانه کن)»، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران تبریز، ۱۳۹۴.
۴۵- احتشامی، م، «پل‌های ایران»، دفتر پژوهش‌های فرهنگی، ۱۳۸۶.
۴۶- اسکندری، س، «بررسی و ارزیابی عرشه، دکل و الگوی کابلی پل‌هایی با سازه کابلی»، فصلنامه علمی جاده، سال بیستم، شماره ۱۱۲، ۱۴۰۱.
۴۷- اسماعیلی، ر، «کاربرد بازیافت ژئومورفیک رود در مدیریت رودخانه (مطالعه موردی: البرز شمالی- حوضه‌ی آبریز لاویج رود)»، فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۴، ۱۳۹۰.
۴۸- آشناور، م، یاسی، م، «اثربخشی پل‌ها بر هیدرولیک جریان در رودخانه کارون، بازه شهری اهواز»، نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۹.
۴۹- پیرنیا، م. ک، معماریان، غ. ح، «معماری ایرانی»، تهران، انتشارات سروش دانش. ۱۳۹۶.
۵۰- جاوید، م، ایرجی، ا، «ارائه یک طبقه‌بندی جدید برای پل‌ها بر اساس تحلیل سیستم سازه‌ای»، پنجمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، ۱۳۹۶.
۵۱- جهان‌تیغ، م، تاج‌بخش فخرآبادی، م، میراب شبستری، غ، معماریان خلیل‌آباد، ه، «بررسی نقش بارگذاری رسوبات معلق بر تغییرات مورفولوژی رودخانه هیرمند، مطالعه موردی: رودخانه سیستان»، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۱۱، شماره ۲، ۱۳۹۸.
۵۲- حسین‌زاده، م، اسماعیلی، ر، «ژئومورفولوژی رودخانه‌ای. مفاهیم، اشکال و فرایندها»، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۴.
۵۳- حسینی، س. م، «مباحث بنیادی پل‌های بتنی»، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۷۱.
۵۴- خیری، ا، حسین‌زاده، م. م، صدوق ونینی، ح، «اثر سازه‌های عرضی (پل) بر روی مورفولوژی رودخانه (مطالعه موردی: روستای جوربند، چمستان، مازندران)»، پژوهش‌های دانش زمین، سال ۱۳، شماره ۴۹، ۱۴۰۱.

۵۵- رستمی، م، اقبالی، س، «ارزیابی تاثیر سازه‌های احداث شده در مخروط افکنه رودخانه کردان بر تغییرات مورفولوژی و هیدرولیک جریان شاخه‌های منشعبه»، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، ۱۳۹۰.
۵۶- ر ستمی، م، تلوری، ع، شهابی، م، «ارزیابی هیدرولیک جریان و تغییرات مورفولوژی ب ستر رودخانه قره سو در واقعه سیلاب سال ۱۳۹۸ با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS»، بیستمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴۰۰.
۵۷- رنگزن، ک، صالحی، ب و سلحشوری، پ، «بررسی تغییرات منطقه پایین‌دست سد کرخه قبل و بعد از ساخت سد با استفاده از تصاویر چندزمانه Land Sat» اولین همایش ژئوماتیک ایران، ۱۳۸۷.
۵۸- زراتی، ا. ر، «نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل»، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ دوم، ۱۳۸۲
۵۹- ستایش، ع. م، «فرهنگ اصطلاحات مهندسی پل»، نسخه دیجیتال، انتشارات نوروزی، ویرایش اول، ۱۳۹۴.
۶۰- سیاوش‌نیا، م، «ارائه ضوابط طراحی پل‌های راه و راه‌آهن با توجه به اثرات روان آب‌ها، آبشستگی و دیگر مسائل هیدرولیکی و زمین‌شناسی»، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۸۱.
۶۱- شفاعی بجستان، م. «مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب»، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز،۱۳۹۰.
۶۲- شفاعی بجستان، م. «اصلاح رودخانه و مدیریت رسوب توسط صفحات مستغرق»، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۹۱.
۶۳- صمدی، ا، عزیزیان، ا، «بررسی تغییرپذیری‌های هیدرومورفولوژیکی رودخانه کرج بر اثر اجرای طرح‌های توسعه منابع آب و مهندسی رودخانه»، انجمن هیدرولیک ایران (نشریه هیدرولیک)، دوره ۱۶، شماره ۱، ۱۴۰۰.
۶۴- طاحونی، ش، «طراحی پل: پل‌های بتن مسلح، فولادی و پیش‌تنیده»، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.
۶۵- طالبی، ز، و همکاران، «تحلیل و ارزیابی مورفولوژی رودخانه مبتنی بر ویژگی‌های مورفولوژیک، سازه‌های انسان ساخت و تنظیمات آبراهه (مطالعه موردی: رودخانه تالار-از بالادست تا شیرگاه)»، مجله علوم محیطی، دوره ۲۲، شماره ۱، ۱۴۰۳.
۶۶- فرجی کلاریجانی، ا، معظمی گودرزی، ص، نجفی جیلانی، ع، «بررسی اثرات سازه‌ای بر هیدرولیک جریان سیلاب با استفاده از مدل نرم‌افزاری HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو)»، اولین کنفرانس بین‌المللی آب، محیط زیست و توسعه پایدار،گروه مهندسی عمران دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۳۹۵.
۶۷- فر شیدنیک، ف، افهمی، ر، «پل- سکونتگاه سیر تکامل پیو ستگی کاربرد عبور و سکونت در پل‌های ایران»، مجله هنرهای زیبا، دوره ۲، شماره ۴۱، ۱۳۸۹.
۶۸- کریم‌پور، س،«مطالعه تاثیر ان سداد کالورت بر هیدرولیک جریان و آب ش ستگی پایین د ست»، ر ساله دکتری ر شته سازه‌های آبی،گروه مهندسی آب دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۱۳۹۹.
۶۹- گلابچی، م، علاقه‌مندان، م، «پل‌های ایران و جهان تعامل معماری، تکنولوژی و زیبایی»، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۹.

۷۰- ماجدی اصـــل، م، یاســـی، م، «تاثیر پل و پایه‌های پل بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان رودخانه‌ها (مطالعه موردی رودخانه نازلوچای واقع در استان آذربایجان غربی)»، فصلنامه آنالیز سازه- زلزله، دوره ۳، شماره ۴، ۱۳۸۵.

۷۱- مخلصی، م. ع، «پل‌های قدیمی ایران»، تهران، سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۹.

۷۲- مروج تربتی، خ، پورنادری، ح ، «بررسی تداوم سنت‌های موثر در شکل‌گیری پل خواجو»، بر اساس مطالعه تطبیقی پل‌های تاریخی شهر اصفهان، مجله باغ نظر، شماره ۲۷، ۱۳۹۲.

۷۳- نجاتی، س، قدس، ا. ص، «بررســـی پل‌های تاریخی ایران از دیدگاه معماری و ســـازه»، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، سمنان، ۱۳۸۷.

۷۴- نوحه‌گر، ا، حســـین‌زاده، م، افشـــار، ط، «تغییرات ژئومورفولوژیک نیمرخ طولی و عرضـــی علیای رودخانه میناب»، فصلنامه علمی- پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، سال ۸، شماره ۲۴، ۱۳۸۹.

۷۵- وثوقی، غ، مستجیر، ب.، «ماهیان آب شیرین»، انتشارت دانشگاه تهران، چاپ چهارم، ۱۳۷۹.

۷۶- وکیلی، ش، مقدم‌نیا، ع ر، «بررســی تاثیر ســازه پل در مســیر رودخانه بر رفتار هیدرولیکی جریان (مطالعه موردی: رودخانه ولیان)»، مجله مهندسی اکوسیستم بیابان. سال ۱۱، شماره ۳۵، ۱۴۰۱.

۷۷- هاشمی، س. م، «پل از نظر معماری»، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۶.

۷۸- یاســی، م، «اصــلاح مســیر و حفاظت دیواره رودخانه‌های ســیلابی با روش‌های مناســب ســاختمانی- بیولوژیکی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۳۶۷.

۷۹- یاسی، م و همکاران، «فرهنگ مهندسی رودخانه»، انتشارات طرح ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، وزارت نیرو، ۱۴۰۱.

۸۰- یمانی، م، حســین‌زاده، م م، «روش‌های بررســی تغییرات بســتر و الگوی رودخانه بابل در محدوده جلگه ســاحلی»، نشریه علوم جغرافیایی، جلد ۲، شماره ۲، ۱۳۸۲.

81- www.transportation.gov/

82- www.webstatic.niwa.co.nz/

83- AASHTO (2012). AASHTO LRFD bridge design specification. 6th Ed., Washington, DC.

84- Abhari, M., “Numerical simulation of flow by SSIIM”, (2008) Fourth National Congress on River Engineering, Tehran University. pp 368-377.

85- Abt, S. R., Donnell, C. A., Ruff, J. F., and Doehring, F. K. (1985a). “Culvert slope and shape effects on outlet scour.” Transportation research record 1017, pp. 24-30.

86- Abt, S. R., Ruff, J. F., and Doehring, F. K. (1985b). “Culvert slope effects on outlet scour.” Transportation research record 1017, pp. 24-30. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(10), pp. 1363-1367, October.

87- Abt, S. R., P. L. Thompson, and T. M. Lewis, (1996). “Enhancement of the culvert outlet scour estimation equations.” Transportation Research record 1523.

88- Afzalimehr, H., Abdolhosseini, M., and Sing, V.P. (2010). “Hydraulic geometry relations for stable channel design.” J. Hydrol. Eng., 15(10): 859-864. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000260

89- Akay, H., Kocyigit, M.B., and Yanmaz, A.M. (2019). "Development of a safety-inspection method for river bridges in Turkey." Water, 11(9), 1902. https://doi.org/10.3390/w11091902
90- Atabay, S. (2004), "Afflux at bridges and culverts: review of current knowledge and practice: annex 6: bridge afflux experiments in compound channels", Bristol, Environment Agency.
91- Austroads Ltd. (2018). "Guide to bridge technology part 8: Hydraulic design of waterway structures." Sydney, NSW 2000, Australia.
92- Balasubramanian, A. (2017), Bridges and their types, University of Mysore, Mysore.
93- Balkham, M., Fosbeary, C., Kitchen, A., & Rickard, C. (2010). Culvert design and operation guide. Construction and industry research and information association, London, UK.
94- Barnard, R. J., J. et al., (2013), "Water Crossings Design Guidelines", Washington Department of Fish and Wildlife, Olympia, Washington.
95- Barry, W.M. 1990. "Fishways for Queensland coastal streams : an urgent review" in Proceedings of the International Symposium on Fishways '90, Gifu,
96- Bento, A. M. et al., (2020), "Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations", International Journal for Engineering Structures, Vol. 223, pp: 111–115.
97- Biezma, M.V., and Schanack, F. (2007). "Collapse of steel bridges." J. Perform. Constr. Facil., ASCE, 21(5): 398-405. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:5(398)
98- Bohan, J. P. (1970). "Erosion and riprap requirements at culvert and storm-drain outlets." Research Report H-70-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
99- Bondurant, D.C. (1975). "Sediment Control Methods- Stream channels" in Chapter 5 of Sedimentation Engineering, ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54, N.Y.
100- Bradley, J. B., et al., (2005), "Debris Control Structures-Evaluation and Countermeasures" Hydraulic Engineering Circular 9, United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.
101- Briaud, J.L., Chen, H.C., Chang, K.A., Oh, S.J., Chen, S., Wang, J., Li, Y., Kwak, K., Nartjaho, P., Gudaralli, R., Wei, W., Pergu, S., Cao, Y.W., and Ting, F. (2011). "The Sricos – EFA Method." Summary Report, Texas A&M University.
102- Brownlie, William R. (1981). "Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels." Report No. KH-R-43A, California institute of technology, W.M Keck laboratory of hydraulics and water resources, Report No. KH-R-43A, November 1981. Pasadena, CA.
103- Burke, C. B., & Burke, T. T. (2015). Stormwater Drainage Manual 2015.
104- Caner, A., Yanmaz, A.M., Yakut, A., Avsar, O., Yilmaz, T. (2008). "Service life assessment of existing highway bridges with no planned regular inspections." J. Perform. Constr. Fac. 22(2), 108-114. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:2(108)
105- Castro, J.M. and C.R. Thorne (2019). "The stream evolution triangle: Integrating geology, hydrology, and biology." River Research and Applications, 35(4), 315-326.
106- Chaudhry, M.H. (2007). "Open-channel flow." Second Edition. Springer.
107- Chen, G., Schafer, B.P., Lin, Z., and Huang, Y. (2015). "Maximum scour depth based on magnetic field change in smart rocks for foundation stability evaluation of bridges." Structural Health Monitoring, SHM. 14(1): 86-99. https://doi.org/10.1177/1475921714554141
108- Chiew, Y.M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge piers." J. Hydraul. Eng. 121(9): 635-643. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:9(635)
109- Clay, C.H. 1995. "Design of fishway and other fish facilities" (second edition), Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Publisher.

110- Copland, Ronald R. (1994). “Application of channel stability methods – case studies.” US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. TR-HL-94-11.
111- Crosato, A. and Mosselman, E. (2009). “Simple physics-based predictor for the number of river bars and the transition between meandering and braiding.” Water Resources Research, Vol. 45. https://doi.org/10.1029/2008WR007242
112- Day, S. (2014). “Fluvial hydrodynamics: Hydrodynamic and sediment transport phenomena.” Springer.
113- Deng, L., and Cai, C.S. (2010). “Bridge scour: prediction, modeling, monitoring, and countermeasures-review.” J. Pract. Period. Struct. Des. Constr., 15(2): 125-134. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000041
114- Deng, L., Wang, W., and Yu, Y. (2016). “State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse.” J. Perform. Constr. Facil. ASCE, 30(2), 04015005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000731
115- Di Silvio, G. (2015), “From hydraulics to hydro-morpho-biodynamics: Changes in fluvial studies in the last 50 years”, Advances in Water Resources, Vol.81, pp: 4-9.
116- Dorwart, B., et al., (2013), “Failing Culverts – Structural Problems & Economic Considerations”, Tenbusch, Inc.
117- Doehring, F. K. and S. R. Abt (1994). “Drop height influence on outlet scour.” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 120(12), December.
118- Dos, R., Inamdeen, F., and Larson, M. (2021). “Bridge scour: basic mechanism and predictive formulas.” (TVRL, No. 3255). Lund University, Lund, Sweden. https://lup.lub.lu.se/record/0c01ac44-d63b-4af1-9d7d-6e24abc1b254
119- Dunn, I. S. (1959). “Tractive resistance of cohesive channels.” Journal of the soil mechanics and foundations, Vol. 85, No. SM3, June.
120- Estes, A.C., and Frangopol, D.M. (2001). “Bridge lifetime system reliability under multiple limit states.” J. Bridge Eng., ASCE, 6(6): 523-528. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(523)
121- Fathi,A., Zarrati, A.R., Salamatian, S.A., (2011), “Scour depth at bridge abutments protected with a guide wall”, Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38(12): 1347-1354.
122- FHWA (2005). “Debris control structures - evaluation and countermeasures.” Third edition, Hydraulic Engineering Circular No. 9 (HEC-9), Publication No. FHWA HIF-04-016, Federal Highway Administration. Washington, DC.
123- FHWA (2006). “Hydraulic design of energy dissipators for culverts and channels.” Third edition, Hydraulic Engineering Circular No. 14 (HEC-14), Publication No. FHWA-NHI-06-086. Federal Highway Administration.
124- FHWA (2009). “Bridge scour and stream instability countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance.” Third edition, Hydraulic Engineering Circular No. 23 (HEC-23), Publication No. FHWA-NHI-09-112. Federal Highway Administration.
125- FHWA (2012). “Bridge maintenance: overview.” Course No. S02-012.
126- FHWA (2012). “Hydraulic design of safe bridges.” Second edition, Hydraulic Design Series No. 7 (HDS-7), Publication No. FHWA HIF-12-018, Federal Highway Administration.
127- FHWA (2012a). “Stream stability at highway structures.” Fourth edition, Hydraulic Engineering Circular No. 20 (HEC-20), Publication No. FHWA HIF-12-004, Federal Highway Administration. Springfield, VA.

128- FHWA (2012c). “Evaluating scour at bridges.” Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18), Publication No. FHWA HIF-12-003, Federal Highway Administration.
129- FHWA (2023). “Highways in the river environment: roads, rivers, and floodplains.” Second edition, Hydraulic Engineering Circular No. 16 (HEC-16), Report No. FHWA HIF-23-004, Federal Highway Administration.
130- Fletcher, B. P. and J. L. Grace (1972). “Practical guidance for estimating and controlling erosion at culvert outlets.” Misc. Paper H-72-5, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
131- Froehlich D. C. (1989). Local scour at bridge abutments. Proc. Natl. Conf. Hydraulic Engineering (New Orleans, LA: Am. Soc. Civil Eng.) pp 13–18.
132- Funderburk, M.L., Huang, S-K., Loh, C-H., Loh, K.J. (2019). “Densely distributed and real-time scour hole monitoring using piezoelectric rod sensors.” Advances in Structural Engineering. 22(16): 3395-3411. doi:10.1177/1369433219831124
133- Gaudio, R., Grimaldi, C., Tafarojnoruz, A., and Calomino, F. (2010). “Comparison of formulae for the prediction of scour depth at piers.” In Proceeding of the First European IAHR Congress, Edinburgh, UK, 4-6 May 2010.
134- Gaudio, R., Tafarojnoruz, A., and De Bartolo, S. (2013). “Sensitivity analysis of bridge pier scour depth predictive formulae.” J. Hydroinform. 15(3), 939-951. https://doi.org/10.2166/hydro.2013.036
135- Gerges, N. (2022), The Basic Types of Bridges, Course No: S02-031.
136- Ghaedi Haghighi, A., Zarrati, A.R., Karimaei Tabarestani, M., and Fattahi, S.M., (2025), “Scour Control through Bed Soil Stabilization Using Slag-Based Alkali-Activated Cement”, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1061/JHEND8/HYENG-14093.
137- Gimsing, N. J., & Georgakis, C. T. (2011), Cable supported bridges: Concept and design. John Wiley & Sons.
138- Grade, R. J., Kothyari, U. C., (1998), “Scour around Bridge Piers. PINSA”, Vol.64, No. 4, pp: 569-580.
139- Gregory, K. J., Brookes, A., (1983), “Hydrogeomorphology Downstream from Bridges”, Applied Geography, Vol. 3, p. 145-159.
140- Hadi, A. M., Ardiclioglu, M., (2018), “Investigation of bridge afflux on channels by experiments and HEC-RAS package”, International Journal of Engineering & Technology Vol. 2363, pp: 4829-4832.
141- Hadian, M.R., and Zarrati, A.R., (2007), “Prediction of Afflux at Bridge Constrictions Using a Depth Averaged Numerical Model”, 32nd congress of International Association of Hydraulic Engineering and Research, IAHR, Venice, Italy, 1-6th July.
142- Hamill, L. (1999). “Bridge hydraulics.” E & FN SPON.
143- Hassinger, R. 2002. Der Borstenfischpass – Fischaufstieg und Bootsabfahrt in einer Rinne. Wasserwirtschaft. 92(4), 38-42.
144- Hassinger, R. 2009. Borsten-Fischpässe und Fisch-Kanu-Pässe Beschreibung des Standes der Technik.
145- Heritage, S. N. (2015). Constructed tracks in the Scottish Uplands. Scottish Natural Heritage.
146- Hey, R.D. and Thorne, C.R. (1986). “Stable channels with mobile gravel beds.” J. Hydraul. Eng., ASCE, 112(8): 671-689. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:8(671)
147- Hicks, D. M., et al., (2021), “Morphodynamic research challenges for braided river environments: Lessons from the iconic case of New Zealand”, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 46, No. 1, pp. 188-204.

148- Ho, H. C. et al., (2013), “Sediment self-cleaning multi-box culverts”, Journal of hydraulic research, Vol. 51, No.1, pp: 92-101.
149- Ho, H. C., Muste, M. (2009), “Sedimentation of Multi-Barrel Culverts”. Mid-Continent Transportation Research Symposium Iowa Department of Transportation Iowa State University, Ames University of Northern Iowa, Cedar Falls National Center for Freight and Infrastructure Research and Education (CFIRE) Wisconsin Department of Transportation.
150- Jain, S,C. and Fischer, E.E. (1979). Scour around circular bridge piers at high Froude. Report No. FHWA-RD-79-104, FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, Offices of Research & Development Environmental Division, Washington, O.C.
151- Johnson, P.A. and Torrico, E.F. (1994). Scour Around Wide Piers in Shallow Water. TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1471.
152- Katopodis, C. 1992. Introduction to fishway design. Department of Fisheries and Oceans 501 University Crescent Winnipeg, Manitoba Canada
153- Kim, S., Frangopol, D.M., and Soliman, M. (2013). “Generalized probabilistic framework for optimum inspection and maintenance planning.” J. Struct. Eng., ASCE, 139(3): 435-447. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000676
154- Kong, J.S., and Frangopol, D.M. (2005). “Probabilistic optimization of aging structures considering maintenance and failure costs.” J. Struct. Eng., ASCE, 131(4): 600-616. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:4(600)
155- Kosicki, A. J., Davis, S. R. (2001), “Consideration of stream morphology in culvert and bridge design”, Transportation research record, Vol.1743, No.1, pp: 57-59.
156- Kothyari, U. C., Ranga-Raju, K. G., (2000), “Scour around spur dikes and bridge abutments”, Journal of Hydraulic research. Vol. 39, No. 4, pp: 367-374.
157- Kramer, G. (2015), “Climate and Change and Culvert Sizing in Norway Center for Transportation Studies”, Transportation Research Conference.
158- Lagasse, P.F. (1999). “1998 scanning review of European practice for bridge scour and stream instability countermeasures.” NCHRP research results digest, Number 241. Transportation Research Board of the National Academies, Washington DC.
159- Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Zevenbergen, L.W. (2007). “Countermeasures to protect bridge piers from scour.” National Cooperative Highway Research Program (NCHRP Report 593), Transportation Research Board, Washington DC.
160- Lagasse, P.F., Zevenbergen, L.W., Schall, J.D., and Clopper, P.E. (2001). “Bridge scour and stream instability countermeasures.” Hydraulic Engineering Circular No. 23 (HEC-23), Second Edition, FHWA NHI 01-003, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
161- Lauchlan, C.S., and Melville, B.M. (2001). “Riprap protection at bridge piers.” J. Hydraul. Eng. 127(5): 412-418. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(412)
162- Laursen, E.M. (1960). “Scour at bridge crossings.” Journal Hydraulic division, American Society of Civil Engineers, Vol. 86, No. HY 2.
163- Laursen, E.M. (1963). “An analysis of relief bridge scour.” Journal Hydraulic division, American Society of Civil Engineers, Vol. 89, No. HY 3.
164- Lim, F.H., Chiew, Y.M. (2001). “Parametric study of riprap failure around bridge piers.” J. Hydraul Res. 39(1): 61-72. https://doi.org/10.1080/00221680109499803

165- Lin, C., Han, J., Bennett, C., and Parsons, R.L. (2014). "Case history analysis of bridge failure due to scour." International symposium of climate effects on pavement and geotechnical infrastructure, August 4-7, 2013, Fairbanks, Alaska. https://doi.org/10.1061/9780784413326.021
166- Liu H. K, Chang F M, Skinner M M. (1961). Effect of bridge construction on scour and backwater. CER 60 HKL 22, Colorado State University, Civil Engineering Section, Fort Collins, Colorado.
167- Mashahir, M., Zarrati, A. R., & Tabarestani, M. K., (2024), "Evaluation of collar efficiency to prevent scouring around cylindrical bridge piers under live bed condition", Journal of Hydro-environment Research, 52, 17-25.
168- Melville B.W., and Coleman, S.E., (2000). "Bridge scour." Water Resources Publications, Highlands Ranch.
169- Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers." American Society of Civil Engineers, Journal Hydraulic Division, Vol. 114, No. 10.
170- Mitchell, C. 1995. "Fish Passage Problems in New Zealand", in Proceedings of the International Symposium on Fishways '95, Gifu, Japan.
171- Najafi, M., Osborn, L. (2008), "Trenchless renewal of culverts and storm sewers" Pipeline Asset Management: Maximizing Performance of our Pipeline Infrastructure, pp. 1-8.
172- Ngo, H. (2018), "Guide to bridge technology, part 8: hydraulic design of waterway structures", No. AGBT08-18.
173- Norman, J. M., et al., (2001), "Hydraulic design of highway culverts", United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.
174- O'Donnell, C.L. (1973). "Observations on the causes of bridge damage in Pennsylvania and New York due to Hurricane Agnes." Highway Research Record, No. 479.
175- Ogras, S., Onen, F., (2020), "Flood analysis with HEC-RAS: a case study of Tigris River", Advances in Civil Engineering.
176- Ontario, Ministry of Transportation (MTO), (2022). "Culvert inspection guide for culverts less than 3000 mm." standards and contracts branch, Highway Design Office.
177- Parker, G., Toro-Escobar, C., and Voigt, R.L. (1998). "Countermeasures to protect bridge piers from scour." NCHRP project 24-7. Transportation Research Board by St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, Minnesota.
178- Pisciculture, Vol 326-327:5-15
179- Porcher, J.P. & Travade, F. 1992. "Les dispositifs de franchissement : bases biologiques, limites et rappels réglementaires", in Bulletin Français de Pêche et
180- Prendergast, L.J., Gavin, K., and Reale, C. (2016). "Sensitivity studies on scour detection using vibration-based systems." Transportation Research Procedia 14, 3982-3989. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.495
181- Rail Baltica, (2022), "Design guidelines Railway substructure, Part 2 hydraulic, drainage and culverts".
182- Randall, J. C., Edward, R. H., (2003), "Backwater effect of bridge piers in sub-critical flow". Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, Project summary report 1505-S, 15p.
183- Rhoads, B.L. (2020). "River Dynamics: Geomorphology to Support Management." India: Cambridge University Press.
184- Richardson, E. V., Richardson, J. R. (1999), "Determining Contraction Scour. Stream Stability and Scour at Highway Bridges", American Society of Engineers, p. 483-490.

185- Richardson, E.V. and Abed, L. (1993). “Topwidth of pier scour holes in free and pressure flow.” ASCE Hydraulic Engineering, Proc. 1993 National Conference, San Fransisco, CA, August.
186- Richardson, E.V., et al. (1975). “River stabilization, bank protection and scour” in Highways in the River Environment: Hydraulic and environmental design considerations, training and design manual. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C.
187- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F. and Bussettini, M. (2013). “A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI).” Geomorphology 180-181, 96-108.
188- Robert, A. (2003), “River Processes”. Arnold, London.
189- Rosgen, D. L. (1997). “A geomorphological approach to restoration of incised rivers”, In Proceedings of the conference on management of landscapes disturbed by channel incision, Vol. 1, pp. 12-29.
190- Rowley, K. J., et al., (2014), “Sediment transport conditions near culverts”, In World Environmental and Water Resources Congress, pp. 1402-1411.
191- Roy, S., Sahu, A. S. (2017), “Potential interaction between transport and stream networks over the lowland rivers in Eastern India, Journal of Environmental Management, Vol. 197, p. 316-330.
192- Ruff, J. F., S. R. Abt, C. Mendoza, A. Shaikh, and R. Kloberdanz (1982). “Scour at culvert outlets in mixed bed materials.” FHWA-RD-82-011, Offices of Reseach and Development, Washingtn, D. C. 20590, September.
193- Saunders, S., and Oppenheimer, M.L. (1993). “A method of managing floating debris.” J. Hydraulic Engineering, ASCE, pp. 1373-1378.
194- Sing, S., (1983), “Flood Hazard and environmental degradation: a case study of the Gomti River”, Environmental Management, Allahabad Geographical Society, Department of Geography, Allahabad University, p.271-286.
195- Standards and Guidelines for Planning and Design DRAFT VOLUME Ⅰ: FLOOD CONTROL, (2002), Project for the Enhancement of Capabilities in Flood Control and Sabo Engineering of the DPWH, department of public works and highways Japan international cooperation agency Technical.
196- State of Queensland (Department of Transport and Main Roads). DTMR (2014). “Bridge/Culvert Servicing Manual.” Bridge/culvert servicing manual (Department of Transport and Main Roads) (tmr.qld.gov.au)
197- Sturm, T.W. (1999). “Abutment scour in compound channels.” ASCE Compendium, Stream Stability and Scour at Highway Bridges, Richardson and Lagasse (eds.), Reston, VA.
198- Sturm, T.W., Ettema, R., Melville, B.W. (2011). “Evaluation of bridge-scour research: abutment and contraction scour progress and prediction.” National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
199- Thrall, A. P., Adriaenssens, S., Paya-Zaforteza, I., & Zoli, T. P. (2012), Linkage-based movable bridges: Design methodology and three novel forms, Engineering Structures, 37, pp. 214-223.
200- Transportation Research Board, TRB (1989). “Abutment scour prediction.” Presentation, Transportation Research Board, Washington, D.C. (Froehlich, D.C.).
201- Transportation Research Board, TRB (1994). “Scour around wide piers in shallow water.” Transportation Research Board Record 1471, Transportation Research Board, Washington, D.C. (Johnson, P.A. and E.F. Torrico).
202- Trueheart, M. E., et al., (2020), “Simulating hydraulic interdependence between bridges along a river corridor under transient flood conditions”, Science of the Total Environment, Vol. 699, 134046.

203- Trueheart, M. et al., (2019), “Identifying Sensitive Structural and Hydraulic Parameters in a Bridge-Stream Network Under Flood Conditions”, Vermont, Agency of Transportation.
204- U.S. Army corps of Engineers, (1981). The Stream Bank Erosion Control Evaluation and Demonstration Act of 1974, Final Report to Congress. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
205- Wallerstein, N. and Thorne, C.R. (1996). “Debris at hydraulic structures management of woody debris in natural channels and at hydraulic structures.” U.S. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
206- Wang, C., Yu, X., and Liang, F. (2017). “A review of bridge scour: mechanism, estimation, monitoring and countermeasures.” Nat Hazards, Springer, 87, 1881-1906. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2842-2
207- Wang, J. et al., (2010), “Assessing Changes to In-Stream Turbidity Following Construction of a Forest Road in West Virginia”, TMDL 2010 Watershed Management to Improve Water Quality CD-ROM Proceedings, ASABE Publication Number 711P0710cd.
208- Weeks, W., et al., (2009), “Australian Rainfall and Runoff Revision Project 11: blockage of hydraulic structures”. Engineers Australia.
209- Wells, M. (2002), 30 bridges, Singapore: Laurence King Publishing Ltd.
210- WGWM (1991). "Guidelines for stabilizing waterways". Prepared by the Working Group on Waterway 28. Management (WGWM). Published for Standing Committee on Rivers and Catchments, Rural Water Commission of Victoria, Victoria, Australia, 301 p.
211- www.docs.nzfoa.org.nz/ forest-practice-guides/
212- www.fs.usda.gov/
213- www.gov.uk/
214- www.sepa.org.uk/

خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از پنجاه سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر نهصد عنوان ضابطه و نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین‌نامه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست و متن کامل ضوابط و نشریه‌های منتشر شده در سال‌های اخیر، ذیل نشانی **Nezamfanni.ir** برای عموم قابل دستیابی می‌باشد.

Guideline onThe Morphohydraulic Design of Bridges and Culverts in River Systems

[IR-Code 882]

Executive Body: Iranian Hydraulic Association
Project Manager: Mohsen Barahimi

Authors & Contributors Committee:

Rouhollah Ehsani	Islamic Azad University, Bojnourd Branch	Ph.D. in Civil Engineering – Hydraulic Structures
Mohsen Barahimi	Abgostaran Mihan Consulting Engineers Co.; Iranian Hydraulic Association	Ph.D. in Civil Engineering – Water Demand Management
Mahmoud Javan	Shiraz University	Ph.D. in Water Engineering
Mahmood Shafaei Bejestan	Shahid Chamran University of Ahvaz	Ph.D. in Civil Engineering – Hydraulics
Mohammad Aamel Sadeghi	Islamic Azad University, Takestan	Ph.D. in Hydraulic Structures
Reza Azizi	University of Zanjan	Ph.D. in Hydraulic Structures
Hesam Fouladfar	Iran Water & Power Resources Development Co.	Ph.D. in River Engineering
Mahshid Ghanbarian Alavijeh	Abgostaran Mihan Consulting Engineers Co.	M.Sc. in Water Engineering
Somayeh Karimpour	Iranian Hydraulic Association	Ph.D. in Hydraulic Structures
Mehdi Yasi	University of Tehran	Ph.D. in River Engineering

Supervisory Committee:

Mahmoud Afsous	Sazepardazi Iran Consulting Engineers Co.	M.Sc. in Hydraulic Eng.
Farshid Feizallahi	Iran Water Resources Management Co.	M.Sc. in Water Eng.

Confirmation Committee:

Mahmoud Afsous	Sazepardazi Consulting Engineers Co.	M.Sc. in Hydraulic Eng.
Narges Dashti	Iran Water Resources Management Co.	B.Sc. in Irrigation Eng.
Mohammad Rostami	Soil Conservation and Watershed Management Research Institute	Ph.D. in Water Resources Eng.

Mohammad Hossein Abedi	Plan and Budgest Organization	M.Sc. in Irrigation Structures Eng.
Hesam Fouladfar	Iran Water & Power Resources Development Company	Ph.D. in River Eng.
Farshid Feizallahi	Iran Water Resources Management Co.	M.Sc. in Water Eng.
Maryam Karami	Iran Water Resources Management Co.	M.Sc. in River Engineering
Mohammadreza Majdzadeh Tabatabai	Shahid Beheshti University	Ph.D. in River Engineering
Jabbar Vatan Fada	Ministry of Energy	M.Sc. in Hydrolic Structures
Mahdi Yasi	University of Tehran	Ph.D. in River Engineering

Steering Committee: (Plan and Budgest Organization)

Alireza Toutounchi	Deputy of Technical and Executive Affairs Department
Farzaneh Agharamezanali	Head of Water & Agriculture Group, Technical and Executive Affairs Department
Sajad Heidari Hasanaklou	Expert in Civil Engineering, Technical and Executive Affairs Department

Abstract:

Reliable bridge and culvert design is crucial for creating safe and cost-effective transportation networks. Yet, many existing manuals overlook key morphohydraulic processes that control the stability and service life of river crossings. Gaps remain in guidance on flood-frequency selection, river morphology, sediment transport, scour assessment, debris passage, and environmental continuity.

The Guideline on the Morphohydraulic Design of Bridges and Culverts in River Systems addresses these deficiencies by integrating hydraulic and geomorphic principles into all phases of the project—from site selection and geometric layout to construction, operation, and maintenance. Drawing on international standards, national experience, and insights from historic and modern crossings, it provides a systematic approach to flow capacity, floodplain interaction, scour countermeasures, and protection of upstream and downstream reaches, while incorporating ecological considerations and construction staging requirements.

By uniting scientific knowledge with practical engineering, the guideline enhances the technical reliability, resilience, and sustainability of bridge and culvert projects. It serves as a primary reference for consultants, engineers, and public agencies responsible for riverine transportation infrastructure, supporting risk-informed design and long-term performance under changing hydraulic and environmental conditions.

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

Guideline on The Morphohydraulic Design of Bridges and Culverts in River Systems

IR-Code 882

Edition 06-20-2026

Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs
Department of Technical & Executive Affairs

nezamfanni.ir

Ministry of Energy

Beurea of Technical & Operation Systems Development and Hydro-power Dispatching

waterstandard.wrm.ir

2026

این ضابطه

با عنوان «**راهنمای طراحی مورفوهیدرولیکی پل‌ها و آبگذرها در سامانه رودخانه**»، با هدف آموزش اصول و ضوابط دانش و فن مهندسی رودخانه در طراحی پل‌ها و آبگذرها، به بررسی انواع پل‌ها و آبگذرها، جانمایی، طراحی هیدرولیکی و معماری پل‌ها و آبگذرها، ساخت و اجرای پل‌ها و آبگذرها و همچنین بهره‌برداری، نگهداری، پایش و بازرسی، ترمیم و بازسازی پل‌ها و آبگذرها از دیدگاه مورفوهیدرولیکی رودخانه، می‌پردازد.