جمهوری اسلامی ایران

ریاست جمهوری

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی

راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

نشریه شماره ۵۹۲

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

nezamfanni.ir

وزارت نیرو

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا

http://seso.moe.org.ir

۱۳۹۱

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی اجرایی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریـیس جمهـور، بـا اسـتفاده از نظـر کارشناسـان برجـسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فـراوان، ایـن اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

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

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

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

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

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

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

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه – مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی

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

بسمه تعالی

پیشگفتار

پیوند مستقیم رودخانه‌ها با مسایل اجتماعی، اقتصادی و معیشتی جوامع، عامل اصلی حساسیت نگاه بشری به تغییرات رودخانه‌هاست که معمولا این جابجایی‌ها، اثرهای نامطلوبی را در عوامل فوق ایجاد می‌کند. به همین جهت ریخت‌شناسی یا علم رفتارشناسی رودخانه، در پی شناخت قوانین حاکم بر تغییرات و علل و عوامل آن و همچنین پیش‌بینی رفتار رودخانه‌هاست. رفتار رودخانه از دو دسته عوامل طبیعی و عوامل انسانی تاثیر می‌پذیرد. عوامل طبیعی مانند وقوع سیل، فرسایش خاک، لغزش زمین و عوامل انسانی مانند ساخت و ساز تاسیسات، تغییر کاربری اراضی و برداشت شن و ماسه از بستر، نقش اساسی در رفتار و تشدید تغییرات رودخانه دارد. خوشبختانه در سال‌های اخیر موضوع مطالعات ریخت‌شناسی به عنوان بخشی از مطالعات رودخانه‌ها با اهداف متفاوت، جایگاه خویش را یافته و ضرورتا هرگونه اقدامی در بستر رودخانه نیازمند بررسی اثرهای آن اقدامات بر ریخت‌شناسی و تاثیرات متقابل آن می‌باشد.

با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه نشریه «راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها» را با هماهنگی امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور در دستور کار قرارداد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی اجرایی کشور به این معاونت ارسال نمود که پس از بررسی، براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی اجرایی کشور (مصوب ۴۲۳۳۹/ت ۳۳۴۹۷ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید.

بدین وسیله معاونت نظارت راهبردی از تلاش و جدیت رییس امور نظام فنی جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان محترم امور نظام فنی و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای مهندس محمد ابراهیم نیا و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران را آرزومند می‌باشد.

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

معاون نظارت راهبردی

۱۳۹۱

تهیه و کنترل

مجری: شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران

مولف اصلی: جمشید مصباحی	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق‌لیسانس مهندسی هیدرولیک

اعضای گروه تهیه‌کننده:

حسن احمدی	دانشگاه تهران	دکترای هیدرولیک
محمود افسوس	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
فیروز بهادری خسرو شاهی	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	دکترای عمران – آب
محمد رستمی	پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری	دکترای عمران – آب
اکبر صفرزاده	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق لیسانس مهندسی عمران – آب
هوشنگ غلامی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	فوق لیسانس مهندسی عمران – آب
کاظم مرادی	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	دکترای زمین شناسی
جمشید مصباحی	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
سیدجواد هاشمی اونجی	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق لیسانس مهندسی سازه های هیدرولیکی

اعضای گروه نظارت:

محمدحسن چیتی	شرکت مهندسین مشاور ساز آب‌پردازان	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های آبی
رضا سبزیوند	شرکت مهندسین مشاور سبز آب اروند	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های آبی
کیاندخت کباری	کارشناس آزاد	لیسانس مهندسی راه و ساختمان
محمدرضا مجدزاده طباطبایی	دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور	دکترای مهندسی رودخانه

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

محمود افسوس	شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق‌لیسانس مهندسی هیدرولیک
محمدابراهیم بنی‌حبیب	دانشگاه تهران	دکترای مهندسی عمران- آب
محمدحسن چیتی	شرکت مهندسین مشاور ساز آب‌پردازان	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های آبی
فریدون خزاعی	انجمن شرکت‌های ساختمانی	فوق‌لیسانس مهندسی راه و ساختمان
نرگس دشتی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور- وزارت نیرو	لیسانس مهندسی آبیاری
شکور سلطانی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	دکترای مهندسی آب
حسن سید سراجی	دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور	دکترای مکانیک سیالات
حسام فولادفر	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس مهندسی هیدرولیک
سید کمال‌الدین نوری	وزارت کشور	لیسانس مهندسی کشاورزی
جبار وطن‌فدا	وزارت نیرو	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های هیدرولیکی

اعضای گروه هدایت و راهبردی پروژه:

خشایار اسفندیاری	رییس گروه امور نظام فنی
فرزانه آقارمضانعلی	رییس گروه امور نظام فنی
ساناز سرافراز	کارشناس منابع آب امور نظام فنی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	**۱**
فصل اول- طبقه‌بندی رودخانه‌ها	**۵**
۱-۱- کلیات	۷
۱-۲- طبقه‌بندی به لحاظ شکل مسطحه رودخانه	۷
۱-۲-۱- رودخانه مستقیم	۷
۱-۲-۲- رودخانه پیچانرودی	۸
۱-۲-۳- رودخانه شریانی	۱۰
۱-۳- طبقه‌بندی به لحاظ فرآیند انتقال رسوب	۱۱
۱-۳-۱- رودخانه رسوب‌گذار	۱۱
۱-۳-۲- رودخانه فرسایشی	۱۲
۱-۳-۳- رودخانه متعادل	۱۲
۱-۴- طبقه‌بندی به لحاظ سن رودخانه	۱۲
۱-۴-۱- رودخانه جوان	۱۲
۱-۴-۲- رودخانه بالغ	۱۳
۱-۴-۳- رودخانه پیر	۱۳
۱-۵- طبقه‌بندی به لحاظ جریان رودخانه	۱۳
۱-۵-۱- رودخانه دایمی	۱۴
۱-۵-۲- رودخانه غیر دایمی (خشکه رود)	۱۴
۱-۵-۳- رودخانه فصلی	۱۴
۱-۵-۴- رودخانه جزر و مدی	۱۵
۱-۵-۵- رودخانه میرا	۱۵
۱-۶- طبقه‌بندی به لحاظ جنس بستر	۱۶
۱-۶-۱- رودخانه سنگی	۱۶
۱-۶-۲- رودخانه آبرفتی	۱۶
فصل دوم- پدیده‌های ریخت‌شناسی رودخانه	**۱۷**
۲-۱- کلیات	۱۹
۲-۲- خم	۱۹

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۳- چم	۲۰
۲-۴- میانبر	۲۱
۲-۵- دریاچه نعل اسبی (شاخ گاوی)	۲۲
۲-۶- تلاقی‌گاه یا بهمرود	۲۳
۲-۷- دوشاخگی و بخش‌گاه	۲۳
۲-۸- شکل بستر	۲۴
۲-۹- دلتا	۲۵
۲-۱۰- جابجایی مسیر رودخانه	۲۵
۲-۱۰-۱- پیش‌روی رودخانه به سمت پایین‌دست	۲۶
۲-۱۰-۲- پیش‌روی رودخانه به سمت پایین‌دست همراه با وقوع پدیده میانبر در رودخانه	۲۶
۲-۱۱- آبشار	۲۶
۲-۱۲- نیمرخ طولی رودخانه	۲۷
فصل سوم- عوامل موثر بر ریخت‌شناسی رودخانه‌ها	**۲۹**
۳-۱- کلیات	۳۱
۳-۲- عوامل تاثیرگذار بر رفتار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها	۳۱
۳-۲-۱- بده جریان	۳۱
۳-۲-۲- مواد کف و کناره رودخانه	۳۲
۳-۲-۳- شیب طولی رودخانه	۳۳
۳-۲-۴- بار رسوب رودخانه	۳۴
۳-۲-۵- پوشش گیاهی	۳۴
۳-۲-۶- زبری بستر	۳۵
۳-۲-۷- زمین‌شناسی منطقه	۳۶
۳-۲-۸- اقدامات انسانی	۳۶
فصل چهارم- روند مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها	**۳۹**
۴-۱- آمار و اطلاعات مورد نیاز	۴۱
۴-۱-۱- آمار آبدهی و مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی	۴۱
۴-۱-۲- آمار رسوب‌دهی و مشخصات ایستگاه‌های رسوب‌سنجی	۴۱

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۴-۱-۳- آمار و اطلاعات مواد رسوبی	۴۲
۴-۱-۴- نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای	۴۳
۴-۱-۵- اطلاعات زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی	۴۳
۴-۱-۶- اطلاعات فیزیوگرافی رودخانه و مشخصات هندسی مسیر	۴۴
۴-۱-۷- اطلاعات حاصل از بازدیدها و مطالعات صحرایی	۴۴
۴-۲- مطالعات مورد نیاز	۴۵
۴-۲-۱- مطالعات هیدرولوژی	۴۵
۴-۲-۲- مطالعات هیدرولیک جریان	۵۰
۴-۲-۳- مطالعات فرسایش و رسوب	۶۸
۴-۲-۴- زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی	۸۸
۴-۳- الگوهای انجام مطالعات ریخت‌شناسی	۹۴
۴-۳-۱- روش‌های تحلیلی بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها	۹۴
۴-۳-۲- استفاده از روش‌های تجربی در مطالعات ریخت‌شناسی	۱۰۵
۴-۳-۳- بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های رایانه‌ای	۱۱۷
۴-۴- تعیین ابعاد و مشخصات رفتاری رودخانه‌ها و نقش عوامل موثر بر آن	۱۱۸
۴-۴-۱- بررسی پدیده‌ها و تغییرات عرضی و طولی رودخانه نظیر دو شاخگی، بهمرود، آبشار و جابجایی‌های عرضی و عوامل موثر بر آنها	۱۱۸
۴-۴-۲- بررسی پدیده تعریض و کف‌کنی و شکل‌گیری پدیده‌های خم‌ها، چم‌ها در مسیر و عوامل موثر بر آنها	۱۲۰
۴-۴-۳- بررسی پدیده وقوع میانبرها و عوامل موثر بر آنها	۱۲۵
۴-۴-۴- تاثیر پدیده‌های زمین‌لغزه و کوه ریزش بر رفتار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها	۱۲۷
۴-۵- بررسی آثار اقدامات مهندسی رودخانه و سازه‌های موجود در مسیر رودخانه بر رفتار رودخانه	۱۲۸
۴-۵-۱- نقش اقدامات مهندسی رودخانه در تغییر رفتار رودخانه‌ها	۱۲۸
۴-۵-۲- تاثیر برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه	۱۳۲
۴-۵-۳- تاثیر تجاوز به حریم رودخانه و توسعه زمین‌های کشاورزی	۱۳۲
۴-۶- پیش‌بینی روند تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه در آینده	۱۳۳
۴-۶-۱- پیش‌بینی محدوده جابجایی عرضی (کمربند جابجایی)	۱۳۳
۴-۶-۲- پیش‌بینی تغییرات نیمرخ طولی و میزان کاهش یا افزایش تراز بستر	۱۳۴
۴-۶-۳- پیش‌بینی روند تغییر شکل چم‌ها	۱۳۷

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۴-۷- تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها	۱۴۰
۴-۷-۱- تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی در زمان گذشته و حال	۱۴۰
۴-۷-۲- تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی در زمان آینده	۱۴۲
۴-۷-۳- نقشه بازه بندی رودخانه از نظر نوع رودخانه	۱۴۴
۴-۷-۴- نقشه بازه بندی رودخانه از نظر فرسایش و رسوب‌گذاری	۱۴۵
پیوست - واژه‌نامه	**۱۴۷**
منابع و مراجع	**۱۶۳**

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱- ۱- رودخانه مستقیم، خیزاب، گوداب و مسیر خط‌القعر	۸
شکل ۱- ۲- مشخصه‌های هندسی یک چم و ویژگی‌های جریان در مقاطع مختلف آن	۹
شکل ۱-۳- انواع پیچانرودها بر اساس مشخصات زمین‌شناسی دره	۹
شکل ۱- ۴- نمایی از یک رودخانه شریانی	۱۰
شکل ۱-۵- تغییر وضعیت رودخانه ناشی از ورود رسوب از شاخه فرعی و ته نشست مواد رسوبی در آن	۱۱
شکل ۱-۶- مراحل تغییرات سنی یک رودخانه در طول مسیر	۱۳
شکل ۱-۷- آبنگار جریان سالانه برای رودخانه دایمی	۱۴
شکل ۱-۸- آبنگار جریان سالانه برای رودخانه غیر دایمی	۱۴
شکل ۱-۹- آبنگار جریان سالانه برای رودخانه فصلی	۱۵
شکل ۱-۱۰- نمای طبقه‌بندی رودخانه‌ها براساس الگوهای مختلف	۱۶
شکل ۲-۱- نمای شماتیک جریان در یک خم و تاثیر جریان حلزونی بر بستر رودخانه در محل خم	۲۰
شکل ۲-۲- نمای شماتیک یک چم رودخانه	۲۱
شکل ۲-۳- نمونه‌ای از میانبرهای طبیعی و مصنوعی	۲۱
شکل۲-۴- مراحل تشکیل یک دریاچه نعل اسبی	۲۲
شکل ۲-۵- نمایش ساده‌ای از یک بهمرود	۲۳
شکل ۲-۶- نمایش ساده‌ای از یک دوشاخگی	۲۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۲-۷- انواع شکل بستر و تغییرات ضریب زبری و شکل سطح آب در رژیم‌های مختلف جریان رودخانه‌های ماسه‌ای	۲۴
شکل ۲-۸- نمایش دلتای یک رودخانه	۲۵
شکل۲-۹- جابجایی عرضی خم و پیش‌روی به سمت پایین‌دست	۲۶
شکل۲-۱۰- جابجایی مسیر رودخانه توسط میانبر	۲۶
شکل ۲-۱۱- مراحل شکل‌گیری آبشار و تاثیر آن بر تغییر نیمرخ طولی رودخانه	۲۷
شکل ۲-۱۲- نیمرخ طولی و بازه بندی مسیر رودخانه	۲۸
شکل ۳-۱- نحوه تغییرات نیمرخ طولی و شکل مسطحه رودخانه در طول مسیر آن	۳۳
شکل ۳-۲- چگونگی تغییرات رودخانه در بالادست و پایین‌دست محل سد	۳۶
شکل ۳-۳- چگونگی بروز آثار برداشت مصالح رودخانه‌ای در بازه‌های بالادست و پایین‌دست	۳۷
شکل۳-۴- انواع گسیختگی توده‌ای در کنار رودخانه	۳۸
شکل ۴-۱- مواردی از آبنمود جریان سالانه (رژیم جریان) برای چند رودخانه متفاوت	۴۶
شکل ۴-۲- مقایسه منحنی‌های دوام جریان (رژیم جریان) برای دو رودخانه متفاوت	۴۷
شکل ۴-۳-نمونه‌ای از منحنی توزیع فراوانی سیلاب حداکثر سالیانه به روش گامبل	۴۸
شکل ۴-۴-نمایش آبنمود سیلاب‌های ثبت شده در یک ایستگاه آب‌سنجی	۴۹
شکل ۴-۵- نمونه‌ای از سری منحنی‌های دوره پر آبی با تداوم ۱ تا ۹۰ روزه	۴۹
شکل ۴-۶- نمونه‌ای از منحنی‌های فراوانی نظیر جریان های کم آبی ۱ تا ۳۶۵ روزه	۵۰
شکل ۴-۷ - نمای کلی مجرای جریان و پارامترهای معادله انرژی	۵۵
شکل ۴-۸- منحنی انرژی ویژه بر حسب عمق	۶۴
شکل ۴-۹- نمونه‌ای از مناسب‌ترین مقطع جهت برآورد بده مقطع پر	۶۸
شکل ۴-۱۰- تاثیر نوع رسوب حمل شده در مشخصه‌های مقطع رودخانه، شوم	۷۰
شکل ۴-۱۱- ارتباط بین شکل پلان مسیر رودخانه و نوع مصالح رسوبی حمل شده	۷۰
شکل ۴-۱۲- نمونه‌ای از منحنی‌های دانه‌بندی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها،راسگن	۷۳
شکل ۴-۱۳- منحنی‌های دانه‌بندی لایه جوشنی، لایه زیرین و بار بستر رودخانه ریچ در آمریکا	۷۳
شکل ۴-۱۴- نمونه‌ای از منحنی سنجه رسوب و رابطه بده رسوبی معلق مربوط	۸۱
شکل ۴-۱۵- نمونه‌ای از منحنی دوام جریان برای دوره آماری مشخص (رودخانه شاهرود)	۸۲
شکل ۴-۱۶- جابجایی مسیر رودخانه در اثر فرسایش در خم‌ها	۸۶
شکل ۴-۱۷- وقوع کف‌کنی عمومی در پایین‌دست سد مخزنی	۸۷
شکل ۴-۱۸- نمونه‌ای از رسوب‌گذاری ممتد در مسیر رودخانه و فرسایش در بازه‌ها و اراضی بالادست	۸۷

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۴-۱۹- مواردی از تشکیل انباشته‌های رسوبی در بستر رودخانه‌ها	۸۸
شکل ۴-۲۰- اثرهای برجای مانده ازتغییرات مسیر رودخانه در عکس هوایی	۹۰
شکل ۴-۲۱ - تغییرات رودخانه در اثر پایین افتادگی سطح آب مخزن	۱۰۲
شکل ۴-۲۲- مراحل تغییرات تراز کف و سطح آب بر اثر احداث کانال میانبر	۱۰۳
شکل ۴-۲۳- سطوح مختلف ارزیابی ریخت‌شناسی رودخانه بر اساس روش راسگن	۱۰۹
شکل ۴-۲۴- نمایی از شکل پلان، نیمرخ طولی مقاطع عرضی الگوهای رودخانه	۱۱۰
شکل ۴-۲۵- محدوده ارتباط شکل کف با شیب بستر برای انواع رودخانه‌ها	۱۱۱
شکل ۴-۲۶- موقعیت انواع رودخانه‌ها در سطح حوضه	۱۱۱
شکل ۴-۲۷- تقسیم‌بندی اولیه رودخانه‌ها	۱۱۴
شکل ۴-۲۸-کلید تقسیم‌بندی رودخانه‌ها (روش راسگن)	۱۱۵
شکل ۴-۲۹- مراحل تعیین نوع رودخانه در سطح دو راسگن	۱۱۶
شکل ۴-۳۰- نحوه فرسایش در قوس رودخانه	۱۲۱
شکل ۴-۳۱- نحوه ایجاد جریان ثانویه و توزیع تنش برشی با توجه به موقعیت مقطع و بده جریان	۱۲۲
شکل ۴-۳۲- تغییرات نسبت حداکثر تنش برشی به تنش متوسط در قوس بر اساس تغییرات انحنای قوس	۱۲۲
شکل ۴-۳۳- گسترش یک‌سویی خم رودخانه	۱۲۳
شکل ۴-۳۴- انتقال یک‌سویی خم رودخانه	۱۲۴
شکل ۴-۳۵- ترکیب گسترش و انتقال که منجر به چرخش و توسعه پیچاب شده است	۱۲۴
شکل ۴-۳۶- انتقال و چرخش خم در حالی‌که کناره‌ها صلب هستند	۱۲۴
شکل ۴-۳۷- نحوه ایجاد و توسعه میانبر گلوگاهی	۱۲۶
شکل ۴-۳۸- نحوه ایجاد و توسعه میانبر شوت	۱۲۷
شکل ۴-۳۹ - چگونگی تغییرات در ریخت‌شناسی رودخانه در بالادست و پایین دست محل سد	۱۳۰
شکل ۴-۴۰- اثرهای پایین افتادگی سطح آب (تراز پایه) رودخانه اصلی بر رودخانه فرعی	۱۳۱
شکل ۴-۴۱- اثرهای افزایش تراز پایه در رودخانه اصلی بر روی رودخانه‌های فرعی	۱۳۱
شکل ۴-۴۲ - الگوی فرسایش عمومی در تنگ شدگی ممتد ناشی از احداث سازه‌های طولی	۱۳۲
شکل ۴-۴۳- جابجایی عرضی و موقعیت مسیر رودخانه میسوری در دوره‌های زمانی مختلف	۱۳۴
شکل ۴-۴۴- موقعیت کمربند پیچشی در یک رودخانه پیچانرودی	۱۳۴
شکل ۴- ۴۵- موقعیت کمربند فرسایشی در رودخانه‌های شریانی و مستقیم	۱۳۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۴-۴۶- روند تغییرات شیب طولی بستر در قسمتی از رودخانه دز	۱۳۵
شکل ۴-۴۷- شکل شماتیک رابطه کیفی لین بین متغیرهای اصلی جریان و رسوب در رودخانه	۱۳۶
شکل ۴-۴۸- رابطه تغییرشکل مسطحه رودخانه برحسب بده متوسط سالانه و شیب بستر	۱۳۷
شکل ۴-۴۹- نواحی با تنش برشی بالا در خم رودخانه با شعاع انحناهای مختلف	۱۳۹
شکل ۴-۵۰- الگوهای مختلف تغییر پلان مسطحه خم رودخانه	۱۳۹
شکل ۴-۵۱- نمونه‌ای از نحوه تهیه نقشه ریخت‌شناسی رودخانه از عکس‌های هوایی	۱۴۱
شکل ۴-۵۲- تهیه نقشه مسیر رودخانه از زمان گذشته تا حال	۱۴۱
شکل ۴-۵۴- نمونه‌ای از مقایسه صورت گرفته توسط عکس‌های هوایی سال‌های مختلف یک رودخانه و تحلیل جابجایی خم‌ها	۱۴۳
شکل ۴-۵۵- نمونه‌ای از پیش بینی تغییرات ریخت‌شناسی در سال‌های آتی و تهیه نقشه مربوط به آن	۱۴۳
شکل ۴-۵۶- مقایسه بین مسیر واقعی رودخانه در سال ۱۹۹۶ و مسیر پیش‌بینی شده در همان سال	۱۴۴
شکل ۴-۵۷- تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر اساس ضریب خمیدگی	۱۴۴
شکل ۴-۵۸- نمونه‌ای از تقسیم‌بندی رودخانه از نظر شکل ظاهری برروی نقشه	۱۴۵

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۴-۱ – روابط تجربی جهت برآورد ضریب زبری مانینگ بر اساس دانه‌بندی	۵۳
جدول ۴-۲- مشخصات کلی مدل‌های متداول موجود جهت شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها	۶۲
جدول ۴-۳- خلاصه نتایج تحقیقات چاو در مورد انواع مختلف پرش هیدرولیکی	۶۵
جدول ۴-۴- جنس مواد بستر و تاثیر آن در مقدار شیب و اصطکاک مجرا	۶۹
جدول ۴-۵- کلاس های دانه‌بندی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها	۷۲
جدول ۴-۶- مشخصه‌های مدل‌های کامپیوتری مورد استفاده در مطالعات رودخانه‌ها	۷۹
جدول ۴-۷- تعیین متوسط رسوب‌دهی سالانه (بار معلق) به روش منحنی دوام جریان برای دوره آماری ۴۳ ساله	۸۳
جدول ۴-۸- رتبه بندی معادلات رسوب بر اساس بررسی‌های یانگ	۸۶
جدول ۴-۹- تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب ضریب خمیدگی	۹۶
جدول ۴-۱۰- نوع رودخانه بر مبنای شعاع نسبی	۹۷
جدول ۴-۱۱- میزان توسعه چم رودخانه بر مبنای زاویه مرکزی	۹۷

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۴-۱۲- ضرایب و توان‌های معادلات به نقل از سایمون و آلبرتسون (۱۹۶۳)	۱۰۷
جدول ۴-۱۳- خلاصه معیارهای ترسیمی برای طبقه‌بندی در سطح وسیع	۱۱۲
جدول ۴-۱۴- حدود تغییرات عوامل موثر در فرسایش کناره و شاخص‌های آنها	۱۱۹
جدول ۴-۱۵- مواردی از تغییرات در هندسه رودخانه ناشی از اقدامات ساماندهی و عوامل طبیعی	۱۲۸
جدول ۴-۱۶- اثرهای رسوب‌گذاری و افزایش سطح آب در رودخانه اصلی و شاخه فرعی	۱۳۱

مقدمه

رودخانه‌ها دایما در حال تغییر و تحول می‌باشند. مفهوم این جمله را کسانی که سالیان متمادی در حاشیه رودخانه‌ها سکنی داشته و یا به فعالیت‌های کشاورزی مشغولند به خوبی درک نموده‌اند و معمولا خاطرات آنان، بیانگر حرکت‌های موضعی و تغییر ابعاد رودخانه‌ها به طور تدریجی (تحت رژیم عادی جریان) و یا ناگهانی، تحت شرایط سیلاب‌هاست. تغییر و دگرگونی مستمر، از اصول حاکم بر هر رودخانه‌ای است که همگام با حرکت و جاری شدن آب و رسوب در بستر آن، تغییر و جابجایی در سایر مشخصات هندسی رودخانه به وقوع می پیوندد.

- هدف

برای مطالعه و بررسی رودخانه از دیدگاه ریخت‌شناسی[1]، لازم است روش‌شناسی مطالعات مشخص گردد. با توجه به ابعاد گسترده مطالعات ریخت‌شناسی و عوامل بسیار متنوع تاثیرگذار بر رفتار آبراهه‌های طبیعی و از طرف دیگر گستردگی دیدگاه‌های محققین رودخانه‌ای در این زمینه، وجود یک دستورالعمل به عنوان راهنمای روش‌شناسی مطالعات که دیدگاه‌های مختلف را مد نظر قرار داده باشد در اثرپذیری نتایج به دست آمده از مطالعات، نقش اساسی خواهد داشت. اگر روش مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها از یک روند مطلوب برخوردار نباشد، نتایج آن مانند بسیاری از مطالعات انجام شده قبلی فقط به شناسایی وضع موجود رودخانه و رفتار کوتاه مدت آن محدود گشته و روند کلی حرکت و تغییرات در بازه‌های زمانی طولانی که تاثیر اساسی بر طرح‌ها و اقدامات مورد نظر در رودخانه می‌گذارد، مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد. بنابراین یکی از اهداف اصلی تهیه راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، ارائه الگو و روش جامع به منظور افزایش اثر پذیری نتایج مطالعات می‌باشد.

- دامنه کاربرد

کاربرد این راهنما، محدود به مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌های آبرفتی[2] است. رودخانه‌های آبرفتی دارای بستر فرسایش‌پذیرند و عامل فرسایش و رسوب رودخانه در تعامل با جریان آب، مبنای رفتار ریخت‌شناسی می‌باشد. معمولا قوانین و تئوری‌های موجود مربوط به رفتار رودخانه‌ها، در ارتباط با رودخانه‌های آبرفتی بیان شده و این‌گونه مباحث برای رودخانه‌های با بستر سنگی و پر شیب کوهستانی[3] سازگار نمی‌باشد.

- تعاریف و مفاهیم ریخت‌شناسی

ریخت‌شناسی رودخانه، علم شناخت سامانه رودخانه از نظر شکل و شکل مسطحه، مشخصه‌های هیدرولیکی، راستا و نیمرخ طولی بستر و نیز روند و ساز و کار تغییرات این مشخصات می‌باشد. از طریق بررسی ریخت‌شناسی رودخانه می‌توان شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی آن را در آینده بهتر درک نمود [۳].

---

1 - Morphology
2 - Alluvial Rivers
3 - Mountain Rivers

خصوصیات ریخت‌شناسی با زمان تغییر کرده و تحت تاثیر عواملی همچون بده و سرعت جریان، نرخ انتقال و خصوصیات رسوب، جنس مواد تشکیل دهنده بستر و کناره‌ها، شرایط زمین‌شناسی و عوامل دیگر می‌باشد [۲۰و۶۳].

علم مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه، در واقع کوششی است برای آن‌که رودخانه‌ها را به صورت نمود و پدیده‌های یکنواخت و تیپ توصیف نماید (قانونمند نمودن رفتار رودخانه). پدیده‌های حاکم بر رودخانه از طریق حرکت سه‌بعدی بر روی بستر متحرک[1] (فرسایش‌پذیر) شکل می‌گیرد. به دلیل آن‌که حرکت سه‌بعدی آب بر روی بستر فرسایش‌پذیر با روابط بسیار پیچیده‌ای مواجه است، خصوصیات رفتاری آن معمولا به صورت توصیفی و کیفی بیان می‌گردد [۴۶].

بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، معمولا توسط متخصصین زمین‌شناسی، مهندسین رودخانه و یا هر دو انجام می‌گیرد که هر کدام با دیدگاه خود با رفتارشناسی رودخانه برخورد می‌کند.

در یک بیان کلی می‌توان گفت که زمین شناسان، تغییرات دراز مدت[2] رودخانه‌ها را به صورت کیفی پیش‌بینی می‌کند در حالی‌که مهندسین رودخانه، مباحث ریخت‌شناسی را به گونه تغییرات میان مدت[3] (مثلا در مقیاس۱۰ یا۲۰ ساله) و با پیش‌بینی‌های کمی و عددی ارائه می‌دهند [۴۶].

- اهمیت، نقش و کاربرد مطالعات ریخت‌شناسی در مهندسی رودخانه

کلیه اقدامات مهندسی رودخانه در بستر رودخانه‌ها که به منظور بهره‌برداری بیش‌تر و کاهش خطرات انجام می‌گیرد، مستقیما موجب دگرگونی شرایط طبیعی رودخانه و تحمیل وضعیتی جدید می‌شود.

دگرگون شدن شرایط پایدار رودخانه، فعل و انفعالات جدید و تغییرات متوالی را در مشخصه‌های فیزیکی رودخانه در پی خواهد داشت. مهم‌ترین نقش مطالعات ریخت‌شناسی درچنین رودخانه‌هایی، تعیین کمی و کیفی عکس‌العمل رودخانه و پیش‌بینی روند تغییرات آینده آن می‌باشد. خطرات جدی و جبران ناپذیری که جابجایی‌ها و تغییرات رودخانه‌ها ممکن است به دنبال داشته باشد، ضرورت بررسی ریخت‌شناسی آن را در مرحله مطالعات، قبل از هرگونه اقدامی نمایان می سازد. امروزه برخی از اقدامات رایج مهندسی رودخانه در بستر رودخانه‌ها را می‌توان شامل احداث سازه‌های متقاطع مانند پل، بند انحرافی، سد مخزنی، ساخت و ساز در بستر و کاهش عرض، برداشت مصالح از بستر، احداث سازه‌های جنبی مانند آب‌گیری، پمپاژ، اسکله و بارانداز، تاسیسات پرورش ماهی و تصفیه‌خانه و تغییر مسیر و محدودسازی بستر دانست. هر یک از این اقدامات بدون در نظر گرفتن اثرهای متقابل با رودخانه، منجر به حوادث بحران ساز پیش‌بینی نشده خواهد شد که امروزه شاهد نمونه‌هایی از این‌گونه پروژه‌ها و خسارات و زیان‌های ایجاد شده می‌باشیم.

برخی از نمونه‌های تغییرات نامطلوب و پیش‌بینی نشده در رودخانه‌های کشور را که ناشی از دست‌اندازی بشر در بستر آنها بوده است، شامل آبشستگی شدید پایه‌های پل رودخانه تالار به علت برداشت شن و ماسه، انحراف جریان رودخانه تجن ناشی از برداشت مصالح و کف‌کنی پایه‌های پل خط انتقال گاز رودخانه سفیدرود، می‌باشد. در تمامی این موارد و بسیاری از تغییرات ایجاد شده در بستر رودخانه‌های کشور شاهد حوادث نامطلوب و تحمیل زیان‌های مالی فراوان هستیم. بررسی‌های ریخت‌شناسی و پیش‌بینی‌های

1 - Mobile Bed
2 - Long - Term
3 - Mid - Term

احتمالی رفتار رودخانه در مقابل هر کدام از این اقدامات، می‌توانست از بسیاری از خسارات جلوگیری نموده و یا با برنامه‌ریزی صحیح، بهره‌برداری از رودخانه به گونه‌ای انجام یابد که تغییرات متعاقب آن به میزان حداقل خود واقع گردد.

فصل ۱

طبقه‌بندی رودخانه‌ها

۱-۱- کلیات

رودخانه‌ها تحت تاثیر عوامل و متغیرهای مختلف از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در تغییر هستند. عواملی همچون بده جریان، بده رسوب، دانه‌بندی مواد بستر و کناره‌ها بر تغییرات مزبور اثرگذار بوده و بر اساس تاثیر این عوامل می‌توان رودخانه‌ها را تقسیم‌بندی کرد. این بخش به بررسی انواع رودخانه‌ها بر اساس عوامل مذکور می‌پردازد.

۱-۲- طبقه‌بندی به لحاظ شکل مسطحه رودخانه[1]

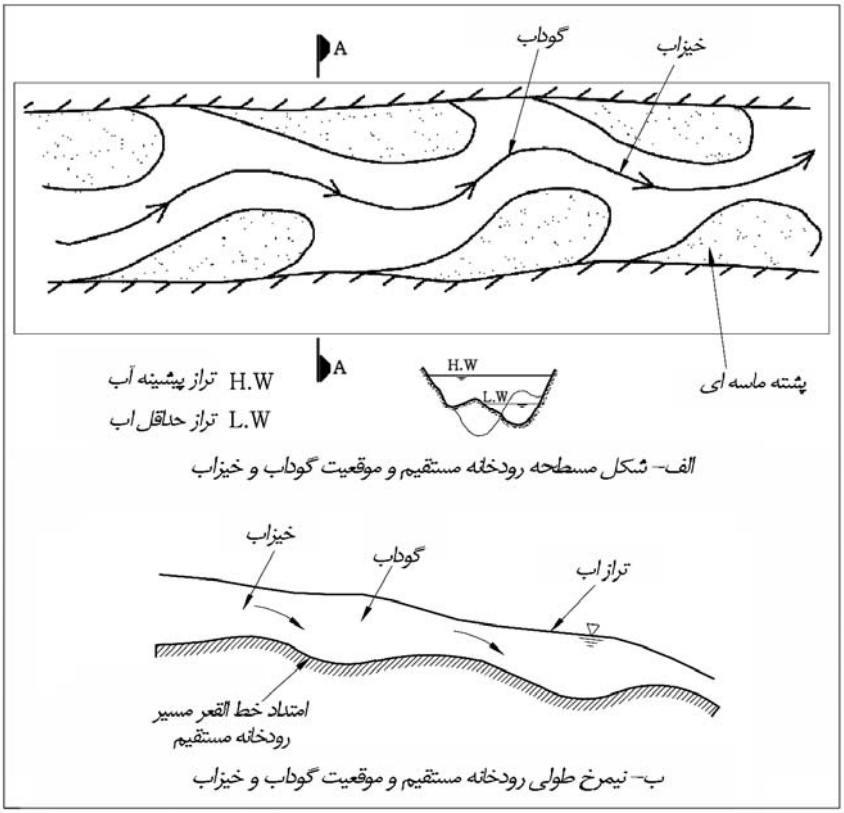
مشخصات ظاهری و ویژگی‌های یک رودخانه، ناشی از تنظیم مرزهای آن به واسطه جریان و رژیم رسوبی حاکم بر آن می‌باشد. در سال ۱۹۵۷ لئوپلد و ولمن بر اساس دو ضریب خمیدگی (M_c) و ضریب نسبت عرض به عمق (B/D) رودخانه‌ها را از لحاظ ظاهری به سه دسته مستقیم[2]، پیچانرودی[3] و شریانی[4] تقسیم‌بندی کردند. ضریب خمیدگی عبارت از نسبت طول خط‌القعر[5] رودخانه به طول محور آن در فاصله بین نقاط ابتدا و انتهای بازه است [۵۴].

۱-۲-۱- رودخانه مستقیم

رودخانه‌های مستقیم، بازه‌های نسبتا کوتاهی از رودخانه را تشکیل داده و این حالت اکثرا زودگذر می‌باشد، چرا که کوچک‌ترین بی‌نظمی در شکل و یا امتداد رودخانه و انسداد موقت می‌تواند موجب بروز آشفتگی موضعی شده و با تشکیل جریان‌های برگشتی، بازه مزبور را به بازه پیچانرودی تبدیل کند؛ به طوری‌که آبراهه‌های مستقیم به‌ندرت در طولی بیش‌تر از ۱۰ برابر عرضشان مسیری مستقیم دارند. این نوع رودخانه‌ها در حالت مقطع پر، خمیدگی چندانی نداشته و ضریب خمیدگی آنها عموما کم‌تر از ۱/۵ می‌باشد[۵,۵۴]. در ترازهای پایین‌تر، ترکیب جریان اصلی در جهت پایین‌دست و جریان ثانویه در جهت عرضی مقطع سبب می‌شود که پشته‌های ماسه‌ای[6] به طور متناوب در کناره‌ها تشکیل شده و خط‌القعر رودخانه، به صورت یک مسیر خمیده از بین این پشته‌ها عبورکند. مشخصه بارز بستر این نوع رودخانه‌ها تشکیل گوداب‌ها[7] و خیزاب‌ها[8] به طور متناوب می‌باشد. در زمان‌های کم آبی، خیزاب‌ها کم عمق بوده و سرعت جریان در این نواحی بالا می‌باشد و در مقابل، سرعت جریان در گوداب‌ها کم می‌باشد[۵۷]. شکل (۱-۱) نشان دهنده ویژگی‌های رودخانه مستقیم می‌باشد.

طبق نظر فردسو[9] در رودخانه‌های مستقیم برای حالت پایدار نسبت عرض به عمق، کوچک‌تر از ۸ می‌باشد [۵].

1- River Plan Form
2 -Straight River
3 - Meandering River
4 - Braided River
5 - Talwege
6 - Alternate Sand Bars
7 - Pool
8 - Riffle
9 - Fredsoe



شکل ۱- ۱- رودخانه مستقیم، خیزاب، گوداب و مسیر خط‌القعر [۵۶]

۱-۲-۲- رودخانه پیچانرودی

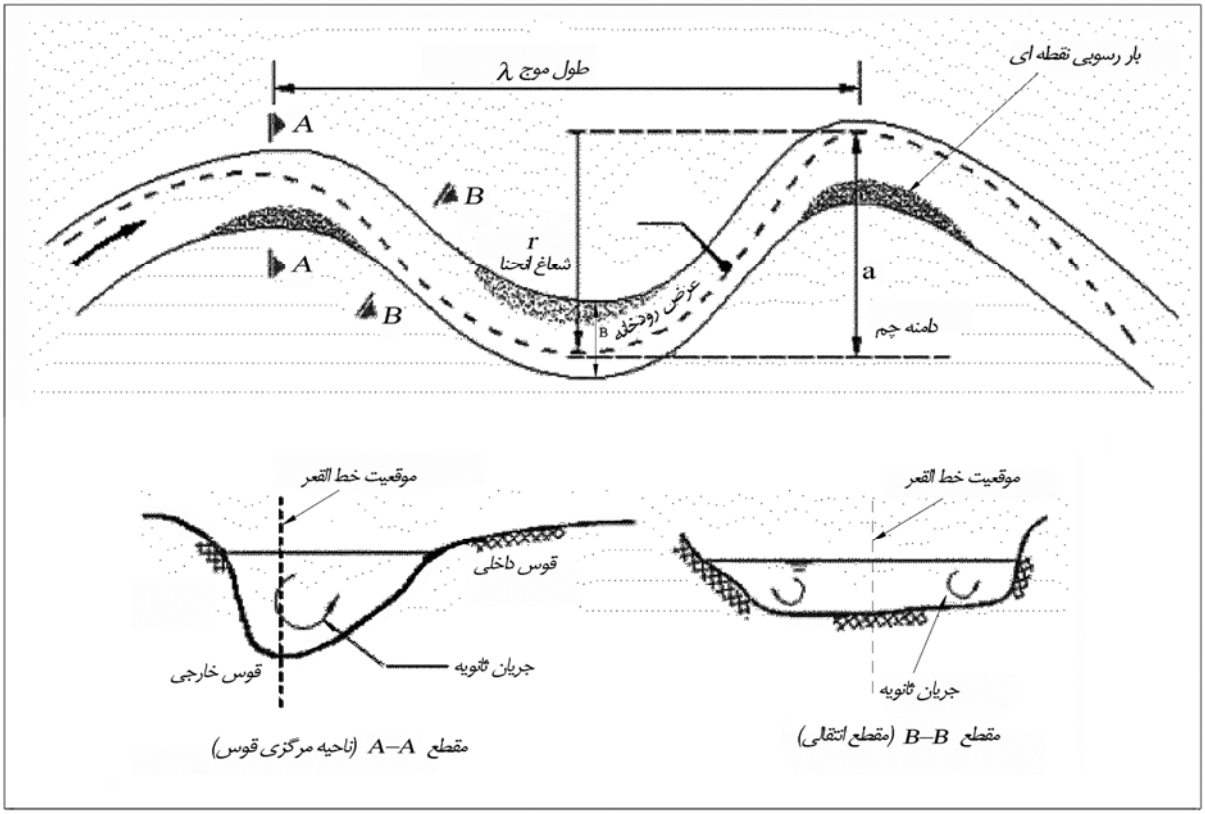
پیچانرودها در شکل مسطحه شامل یک سری پیچ و خم‌های متناوب می‌باشند که توسط بازه‌های مستقیم کوتاه به یکدیگر می‌پیوندند. این نوع رودخانه‌ها دارای شیب کم بوده و همچنین در سیلابدشت گسترش می‌یابند. بر اساس معیار لئوپلد و ولمن، رودخانه‌های با ضریب خمیدگی بزرگ‌تر از ۱/۵، پیچانرود به حساب می‌آیند. یافته این محققین نشان می‌دهد که در اغلب رودخانه‌های پیچانرودی، نسبت شعاع انحنا به عرض رودخانه (ضریب خمیدگی) در محدوده ۲ تا ۳ قرار دارد[۵۴]. طبق نظر فردسو، در رودخانه‌های پیچانرودی پایدار، نسبت عرض مقطع به عمق در محدوده ۵ تا ۱۵ قرار دارد ($5<\frac{B}{D}<15$)[۵].

در این نوع از رودخانه‌ها یک مقطع اصلی و یک بستر سیلابی عریض قابل تشخیص بوده و بار رسوبی به صورت بار نقطه‌ای در قسمت دیواره داخلی پیچ و نیز به صورت بارهای متناوب در طرفین دیواره‌ها و بارهای میانی در میانه مقطع و در قسمت مستقیم آن ته‌نشین می‌شوند. ویژگی‌های هر چم رودخانه به وسیله مشخصه‌های آن شامل طول موج (λ)، عرض(B)، شعاع انحنا (r) و دامنه چم (a) مشخص می‌گردد. شکل (۱-۲) مشخصه‌های یک چم با خصوصیات مقاطع عرضی و موقعیت مسیر خط‌القعر را نشان می‌دهد.

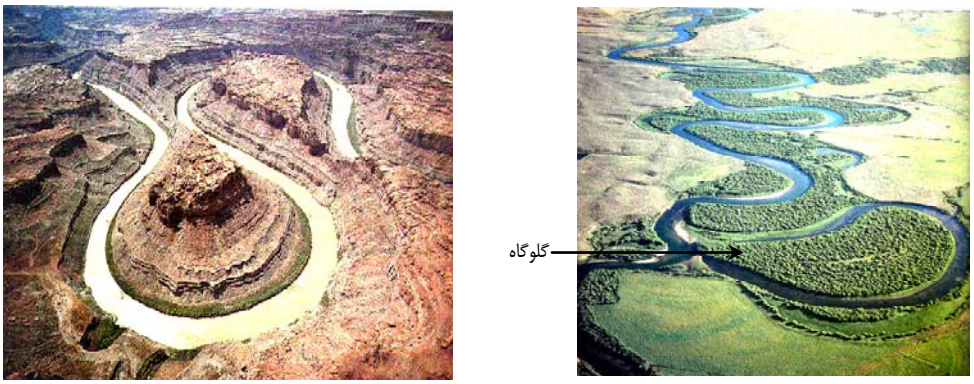
رودخانه‌های پیچانرودی بر اساس مشخصات زمین‌شناسی دره، به دو دسته پیچانرود آزاد (شکل ۱-۳-الف) و پیچانرود محدود (شکل ۱-۳-ب) تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول در بستر آبرفتی خود تشکیل شده و فرسایش جداره‌ها مشخصه بارز آنها می‌باشد. الگوی پیچانی در دسته دوم کاملا متاثر از توپوگرافی منطقه بوده و فرسایش بستر مهم‌تر از فرسایش کناره‌ها می‌باشد. مسیر پیچانی

رودخانه‌های پیچانرود دره‌ای از قبل تعیین شده می‌باشد در حالی‌که، رودخانه‌های پیچانی آزاد، به مرور زمان و در اثر شرایط محیطی حاکم، در میان ته نشست‌های مواد رسوبی که خود حمل کرده‌اند تشکیل می‌گردد[۵۷].

یکی از مشخصه‌های بارز پیچانرود آزاد شکل‌گیری پدیده گلوگاهی یا حالت حلقه‌ای می‌باشد. گلوگاه زمانی ایجاد می‌شود که فرسایش پیش‌رونده در یک قوس شدید بوده و شعاع انحنای قوس با ادامه فرسایش کاهش می‌یابد و درنهایت انحنای رودخانه مطابق آنچه که در شکل (۱-۳ –الف) نشان داده شده است زیادتر می‌شود [۵۷]. در خصوص جزییات مربوط به شکل‌گیری گلوگاه و تبعات ناشی از آن به مبحث ۴-۴-۳ (بررسی پدیده وقوع میانبرها و عوامل موثر بر آنها) مراجعه شود.



شکل ۱- ۲- مشخصه‌های هندسی یک چم و ویژگی‌های جریان در مقاطع مختلف آن [۵۶]



الف- پیچانرود آزاد ب- پیچانرود دره‌ای

شکل ۱-۳- انواع پیچانرودها بر اساس مشخصات زمین‌شناسی دره [۵۶]

۱-۲-۳- رودخانه شریانی

این رودخانه‌ها در مناطق کوهستانی و نیمه کوهستانی با شیب نسبتا زیاد، عمق کم و عرض زیاد حضور دارند. پتانسیل حمل رسوب رودخانه بالا بوده و برای اتلاف انرژی مازاد، جریان آب در آن تمایل به گستردگی دارد. از این رو ته نشست مواد رسوبی کف به میزان قابل ملاحظه‌ای صورت می‌گیرد. جنس آبرفت دیواره‌ها عموما درشت دانه و غیر چسبنده، ناپایدار و فرسایش‌پذیر است. راستای کلی رودخانه در مقطع سیلابی آن نسبتا مستقیم بوده و در مواقع سیلابی عموما به صورت تک‌رشته‌ای در می‌آید. در برخی موارد گسترش بارهای رسوبی و تثبیت گیاهی آنها باعث ایجاد جزایر مقاومی می‌گردد که حتی در مواقع سیلابی نیز جریان آب را به چند رشته تقسیم نموده و سبب انحراف و هدایت خطوط جریان به سمت کناره‌ها و تخریب دیواره و تعریض رودخانه خواهد شد [۵]. لئوپلد و ولمن، گرادیان طولی رودخانه و نرخ بالای رسوب بستر را عامل اصلی شریانی شدن رودخانه عنوان کرده‌اند[۵۴]. شکل (۱-۴) نمایی از یک رودخانه شریانی و جزایر رسوبی آن را نشان می‌دهد.

مواد تشکیل دهنده بستر و کناره‌ها در رودخانه‌های شریانی عمدتا دارای بافت درشت دانه و غیر چسبنده بوده و با تشکیل لایه محافظ سطحی (لایه جوشنی) تمایل به تخریب و فرسایش کناره‌ها افزایش می‌یابد. افزایش بار رسوبی ناشی از تخریب کناره‌ها موجب توسعه انباشته‌های رسوبی و شکل‌گیری جزایر می‌گردد. در دوره‌های کم آبی رشد و توسعه گیاهان منجر به تثبیت جزایر و رشد و گسترش جزایر رسوبی می‌گردد [۷۹، ۸۰]. بر اساس بررسی‌های انجام شده وقوع پدیده رسوب‌گذاری ممکن است رودخانه پیچانرودی را به یک رودخانه شریانی تبدیل نماید. چنانچه در اثر رسوب‌گذاری برای یک بده ثابت مقدار $SQ^{1/4}$ از حد ۰/۰۰۱۷ که معرف پیچانرودی بودن رودخانه است، به کمیت ۰/۰۱ یا بیش‌تر افزایش یابد تبدیل حالت پیچانرودی به شریانی تحقق می‌یابد[۶۹]. Q بده متوسط سالانه و S شیب بستر می‌باشد. رودخانه‌های شریانی عموما ناپایدار بوده و به‌همین دلیل تغییرات عرضی در آنها بسیار زیاد می‌باشد. این نوع رودخانه‌ها در یک محدوده وسیع موسوم به کمربند فرسایشی همواره در حال جابجایی می‌باشند. (در خصوص حد کمربند فرسایش به بند ۴-۶-۱ پیش‌بینی محدوده جابجایی عرضی یا کمربند جابجایی) مراجعه شود [۴۷].

شکل ۱- ۴- نمایی از یک رودخانه شریانی

۱-۳- طبقه‌بندی به لحاظ فرآیند انتقال رسوب

رودخانه‌ها براساس بیلان رسوبی آنها در یک بازه معین به رودخانه‌های رسوب‌گذار[۱]، فرسایشی[۲] و متعادل[۳] تقسیم می‌شوند.

۱-۳-۱- رودخانه رسوب‌گذار

در برخی موارد، رودخانه به دلیل بار رسوبی زیاد و ته نشست مواد رسوبی، مشخصه‌های هندسی خود را تغییر می‌دهد. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد[۵].

بار رسوبی زیادی از بالادست وارد رودخانه می‌گردد ولی به دلیل این‌که رودخانه وارد دشت شده و شیب آن کم می‌شود، رسوبات برجای می‌ماند و سبب تغییر شکل مقطع رودخانه می‌گردد.

گسترده شدن دلتای رودخانه در مصب آن

وارد شدن بار رسوبی زیاد از یک شاخه فرعی

این رودخانه‌ها تحت عنوان رودخانه‌های رسوب‌گذار شناخته می‌شوند. در شکل (۱-۵) نمونه‌ای از رودخانه رسوب‌گذار در اثر وارد شدن بار رسوبی زیاد از یک شاخه فرعی نشان داده شده است.

الف- وضعیت رسوبی رودخانه بالادست شاخه فرعی

ب- رسوب‌گذاری شدید در رودخانه بعد از ورود شاخه فرعی

شکل ۱-۵- تغییر وضعیت رودخانه ناشی از ورود رسوب از شاخه فرعی و ته نشست مواد رسوبی در آن [۵۴]

1- Aggrading River
2- Degrading River
3- Graded River

۱-۳-۲- رودخانه فرسایشی

در مواردی به دلیل تغییر بار رسوبی نسبت به بده جریان، رودخانه با پدیده فرسایش بستر مواجه می‌شود. این امر ناشی از کاهش ناگهانی بار رسوبی رودخانه به دلیل وجود موانعی مانند سدها و تله‌اندازی رسوب در مخزن سد در بازه‌های پایین‌دست می‌باشد[۵]. چنین رودخانه‌هایی تحت عنوان رودخانه‌های فرسایشی نام‌گذاری می‌شوند.

۱-۳-۳- رودخانه متعادل

از لحاظ پایداری، رودخانه متعادل را می‌توان در دو بخش پایدار استاتیکی و پایدار دینامیکی بررسی کرد. در حالت پایدار استاتیکی، رودخانه‌ها به مرحله‌ای رسیده‌اند که نیروی جریان در آنها قادر به شستن کف و فرسایش کناره‌ها و به عبارتی حمل رسوب به صورت بار بستر و یا بار معلق نمی‌باشد. کف و کناره‌های این رودخانه‌ها در بیش‌تر طول سال ثابت است و مانند آبراهه‌های با بستر صلب رفتار می‌کنند، هرچند ایجاد هرگونه اختلال در الگوی جریان ممکن است باعث تغییرات موضعی در هندسه آبراهه شود[۵].

رودخانه‌های پایدار دینامیکی، به طور مداوم فعال بوده، آبشستگی و رسوب‌گذاری در کف، فرسایش و رسوب‌گذاری در سواحل و حمل مقادیر زیادی رسوب درآنها انجام می‌شود. هر چند در یک دوره کوتاه ممکن است شکل آبراهه تغییر یابد، ولی این تغییرات پیش‌رونده نبوده و حول یک مقدار متوسط نوسان می‌کند. هرچند شکل رودخانه در شکل مسطحه جابجا می‌گردد، ولی تغییرات قابل توجهی ایجاد نمی‌شود، مگر این‌که جنس مصالح بستر در طول آبراهه دستخوش تغییرات قابل توجهی شود. هرگونه اختلال در الگوی جریان در چنین رودخانه‌هایی باعث تغییرات موضعی در هندسه آبراهه می‌شود که ممکن است تا فواصلی در پایین‌دست و بالادست ادامه یابد.

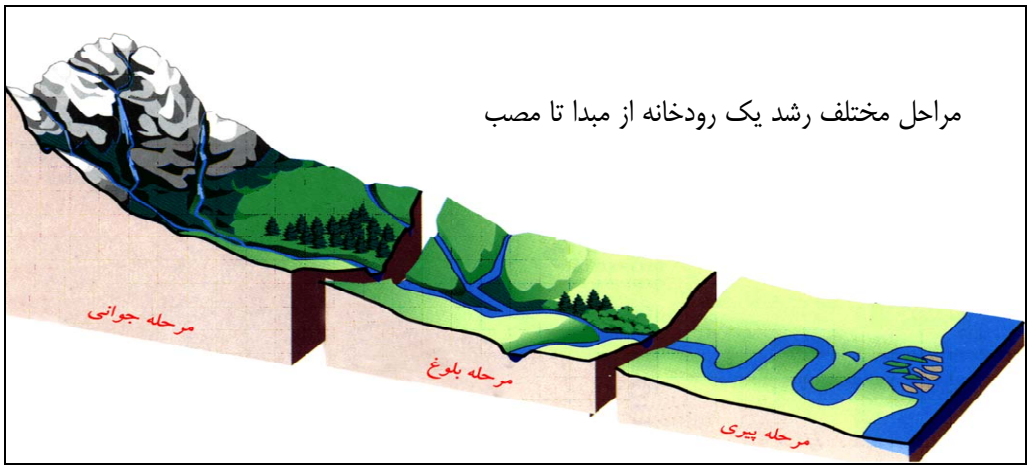
۱-۴- طبقه‌بندی به لحاظ سن رودخانه

دیویس[۱] رودخانه‌ها را از نظر زمین‌شناسی و برحسب سن و تکامل آنها به سه گروه تقسیم نموده است که عبارتند از: جوان[۲]، بالغ[۳] و پیر[۴] به طور کلی یک رودخانه در امتداد مسیر خود، ویژگی‌های جوان تا پیر را نشان می‌دهد [۶۳]. در شکل (۱-۶) طبقه‌بندی مزبور نشان داده شده است.

۱-۴-۱- رودخانه جوان

رودخانه‌های جوان از نظر زمین‌شناسی دسته‌ای از رودخانه‌ها می‌باشند که درمناطق کوهستانی و با شیب تند در دره‌های V شکل جریان دارند. شکل آنها بسیار نامنظم بوده و معمولا فرآیند فرسایش در آنها شدید است و از این رو، مقطع آنها دایما در حال تغییر می‌باشد. در طول مسیر آنها آبشار، گوداب و حالت پلکانی مکرر وجود دارد[۶۳]. بر اساس بررسی‌های انجام شده، شیب این رودخانه‌ها بیش از ۱۰٪ می‌باشد [۳۵].

1- Davis
2- Young River
3- Mature River
4- Old River



شکل ۱-۶- مراحل تغییرات سنی یک رودخانه در طول مسیر

۱-۴-۲- رودخانه بالغ

رودخانه‌های بالغ با شیب طولی نسبتا کم عمدتا در محدوده کوهپایه‌ها و در آستانه ورود به ناحیه جلگه‌ای با دره‌ای عریض جریان دارند، در این نوع رودخانه‌ها، عموما مواد حاصل از فرسایش کناره‌ها جایگزین مواد فرسایش یافته کف می‌شوند. رودخانه بالغ پایدار بوده و مقاطع عرضی در هر بازه آن قادر به حمل بار رسوبی ورودی به آن بازه می‌باشد[۶۳]. در شکل (۱-۶) موقعیت رودخانه بالغ (مرحله بلوغ) نشان داده شده که در مقایسه با رودخانه پیر (مرحله پیری) دارای شبکه رودخانه‌ای منشعب و چند شاخه‌ای است. شیب رودخانه‌های بالغ اغلب کم‌تر از ۲٪ است [۳۵].

۱-۴-۳- رودخانه پیر

رودخانه‌های پیر، رودخانه‌هایی با شیب کم، جریانی آرام و سیلابدشت عریض که معمولا دارای مسیرها و دریاچه‌های نعل اسبی[1] فراوانی هستند می‌باشند. این رودخانه‌ها شدیدا پیچ و خم‌دار بوده و در دوران سیلابی فرسایش یافته و در سایر زمان‌ها رسوب‌گذاری می‌کنند. این رودخانه‌ها معمولا در مرز بستر اصلی (مقطع اصلی) و بستر سیلابی دارای پشته‌های طبیعی بوده و محدوده بیرونی آن گاهی اوقات به صورت ماندابی در می‌آید. این نوع رودخانه‌ها در دره‌های عریض که عرض آنها در حدود ۱۵ تا ۲۰ برابر عرض کمربند پیچانرود باشد تشکیل می‌شوند[۶۳]. در رودخانه‌های پیر معمولا شیب مجرای اصلی به ۰/۰۱ درصد و یا کم‌تر تقلیل می‌یابد [۳۵].

۱-۵- طبقه‌بندی به لحاظ جریان رودخانه

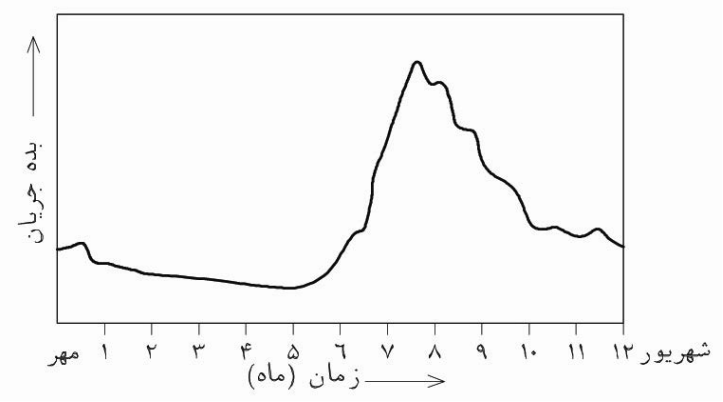
ویژگی‌های جریان از نظر میزان بده، تداوم و شدت تغییرات آن از عوامل مهم و تاثیرگذار بر سامانه رودخانه می‌باشند. در حالت کلی، رودخانه‌ها را بر اساس تداوم جریان به رودخانه‌های دایمی[2]، غیر دایمی[3] و فصلی[4] تقسیم‌بندی می‌کنند. همچنین بر اساس

1 - Oxbow Lake
2 - Perennial River
3 - Ephemeral River
4 - Seasonal River

شرایط حاکم بر پایین‌دست رودخانه، که بر روند جریان تاثیرگذار می‌باشند، می‌توان در تقسیم‌بندی فوق، رودخانه‌های جزر و مدی[1] و میرا[2] را نیز لحاظ کرد.

۱-۵-۱- رودخانه دایمی

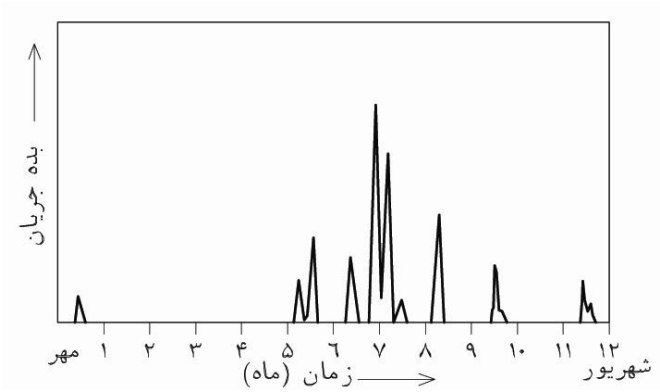
در اقلیم‌های مرطوب که مقدار بارندگی زیاد و تبخیر کم است، در سرتاسر سال، آب در رودخانه‌های منطقه روان بوده و در زمانی که بارندگی نیست جریان این رودخانه‌ها از ذوب برف و یخ نواحی مرتفع و یا از ورود آب‌های زیر زمینی به داخل آنها تامین می‌شود[۲۰]. رودخانه‌های موجود در این نواحی تحت عنوان رودخانه‌های دایمی شناخته می‌شوند. در شکل (۱-۷) آبنگار سالانه برای یک رودخانه دایمی نشان داده شده است. در این نوع رودخانه‌ها مطابق شکل، جریان پایه دارای سهم قابل توجهی می‌باشد [۹۹].



شکل ۱-۷- آبنگار جریان سالانه برای رودخانه دایمی[۹۹]

۱-۵-۲- رودخانه غیر دایمی (خشکه رود)

رودخانه‌های غیر دایمی در طی یک دوره زمانی طولانی خشک و فاقد جریان می‌باشند. معمولا مقطع معرف این رودخانه‌ها عریض، کم عمق و مستطیل شکل با نسبت عرض به عمق ۵۰ یا بیش‌تر می‌باشد[۳۵]. در شکل (۱-۸) نمونه‌ای از آبنگار رودخانه غیر دایمی نشان داده شده است. مطابق شکل، این نوع رودخانه‌ها فقط در هنگام وقوع بارندگی دارای جریان بوده و همچنین فاقد جریان پایه می‌باشند.



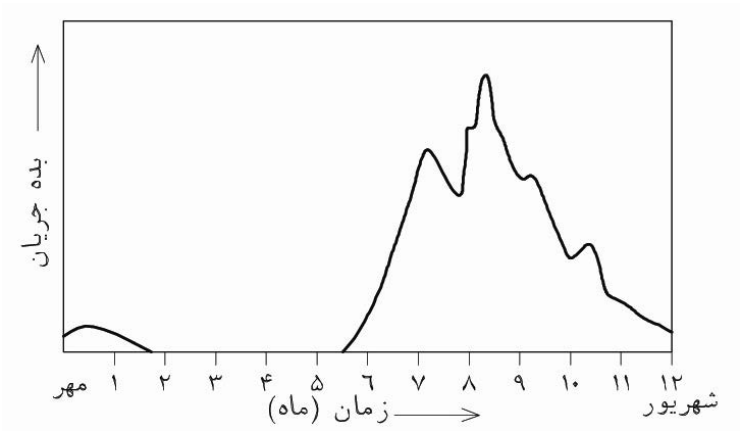
شکل ۱-۸- آبنگار جریان سالانه برای رودخانه غیر دایمی[۹۹]

1- Tidal River
2- Virgin River

۱-۵-۳- رودخانه فصلی

در مناطق خشک که مقدار بارندگی کم و تبخیر زیاد است، رودخانه‌ها بیش‌تر موقتی و فصلی‌اند. این رودخانه‌ها بنا به شرایط ممکن است فقط در خلال بارندگی و کمی بعد از آن یا فقط در طول فصول مرطوب سال آب داشته باشند.

رودخانه‌های فصلی در مناطق خشک با مقطع مستطیلی، عرض زیاد و عمق کم و با تغییرات شدید رژیم بده و رسوب، مشخصات ریخت‌شناسی متفاوت از رودخانه‌های مناطق مرطوب با رژیم جریان دایمی و یکنواخت دارند. در خصوص هندسه رودخانه‌های فصلی، این شکل‌گیری به دلیل افت انتقال آب در اثر تغذیه سفره آب زیر زمینی است. کاهش جریان در جهت پایین‌دست، پتانسیل حمل و انتقال رسوبات را کم کرده و سبب ته‌نشینی مواد رسوبی و بالا آمدن کف بستر می‌شود. در این صورت مقطع باریک و عمیق رودخانه، به مقطع عریض و کم عمق تبدیل می‌شود[۶۳]. در شکل (۱-۹) نمونه‌ای از آبنگار رودخانه فصلی نشان داده شده است. مطابق شکل رودخانه فصلی برای چند ماه متوالی فاقد جریان بوده و با آغاز دوره بارندگی جریان مستمر برای ماه‌های متوالی برقرار می‌گردد.



شکل ۱-۹- آبنگار جریان سالانه برای رودخانه فصلی[۹۹]

۱-۵-۴- رودخانه جزر و مدی

بازه‌ای از رودخانه که در آن جریان و شیب سطح آب ممکن است تحت تاثیر شرایط کشندی (جزر و مد) باشد و حتی ممکن است در بعضی اوقات، جهت جریان رودخانه نیز تغییر نماید. گاهی در شرایط مد (برکشند) امکان وقوع جریان دو لایه با غلظت متفاوت وجود دارد. در بعضی رودخانه‌ها احتمال دارد جریان جزر و مد تا بیش از صد کیلومتر از دهانه رودخانه ادامه یابد[۶۳].

۱-۵-۵- رودخانه میرا

این نوع رودخانه بیش‌تر در نواحی خشک وجود دارد و معمولا جریان در آن قبل از پیوستن به یک رودخانه دیگر یا دریا در اثر نفوذ و یا تبخیر ناپدید می‌شود[۶۳]. غیر از ناپدید شدن جریان، شکل هندسی مقاطع رودخانه نیز تغییر می یابند و رفته رفته کوچک شده و یا حتی ناپدید می شوند.

۱-۶- طبقه‌بندی به لحاظ جنس بستر

نوع تشکیلات و جنس سنگ بستر از نظر خصوصیات و میزان فرسایش‌پذیری روی درجه آزادی رودخانه (گسترش عرضی و عمقی) تاثیرگذار است. رودخانه‌ها را بر حسب توپوگرافی و نیز خصوصیات زمین‌شناسی آن به دو دسته سنگی و آبرفتی تقسیم‌بندی می‌کنند.

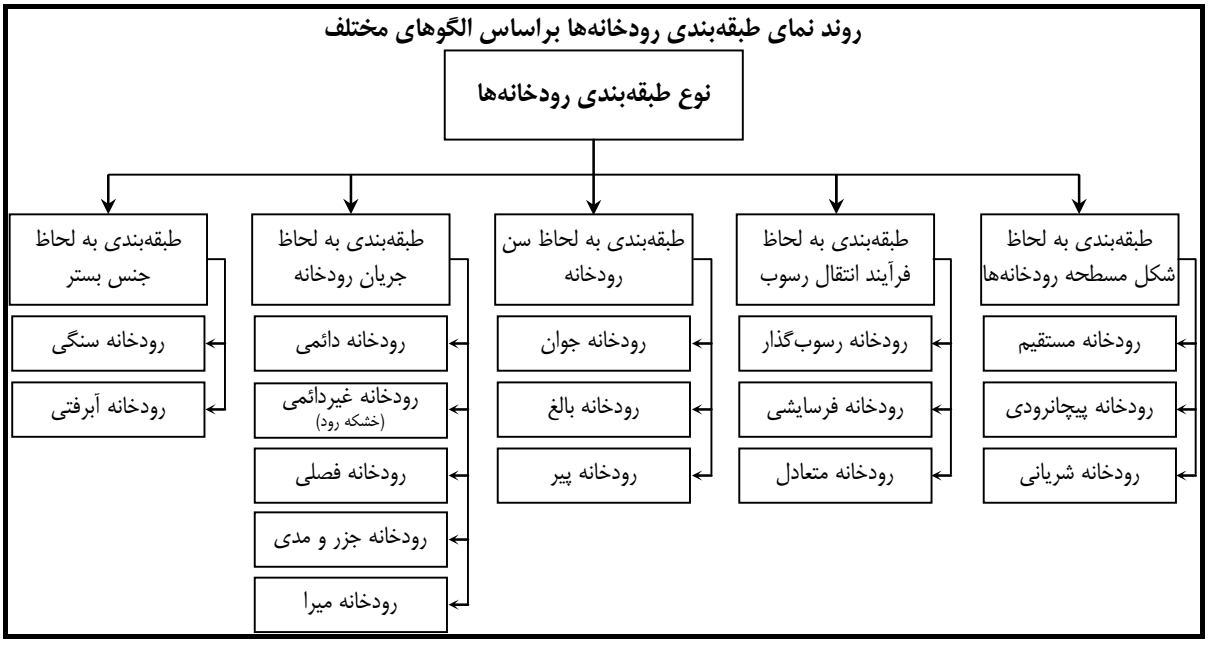
۱-۶-۱- رودخانه سنگی

بازه‌ای از رودخانه که از مناطق کوهستانی عبور کرده و معمولا دارای سطح مقطع کاملا مشخص می‌باشدکه کناره‌های آنها در زیر آب قرار نمی‌گیرد. این قسمت از رودخانه معمولا دارای شیبی تند و بستری متشکل از مخلوطی از مواد سنگی نظیر تخته سنگ، قلوه سنگ، شن و ماسه می‌باشد. این رودخانه‌ها از نظر شیب، راستا، شکل و ابعاد محدود هستند[۵].

۱-۶-۲- رودخانه آبرفتی

رودخانه‌هایی هستند که در میان آبرفت‌های خودشان جریان داشته و دایما با سرریز شدن جریان از آبراهه اصلی موجب شکل گیری سیلابدشت آن می گردد. رسوباتی که این رودخانه‌ها حمل می‌کند. (به جز بار معلق آن) به مواد بستر و دیواره رودخانه شباهت دارد. این نوع رودخانه‌ها در تعادل طبیعی با متغیرهای مستقل موثر بر ریخت‌شناسی رودخانه از قبیل زمان، متغیرهای زمین شناسی، ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی خاک منطقه و متغیرهای هیدرولوژیکی حوضه می‌باشند[۵].

به منظور ارائه ذهنیت جامع از طبقه‌بندی رودخانه‌ها بر اساس الگوهای مختلف در شکل (۱-۱۰) روند نمای طبقه‌بندی ترسیم گردیده است.



شکل ۱-۱۰- نمای طبقه‌بندی رودخانه‌ها براساس الگوهای مختلف

فصل ۲

پدیده‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

۲-۱- کلیات

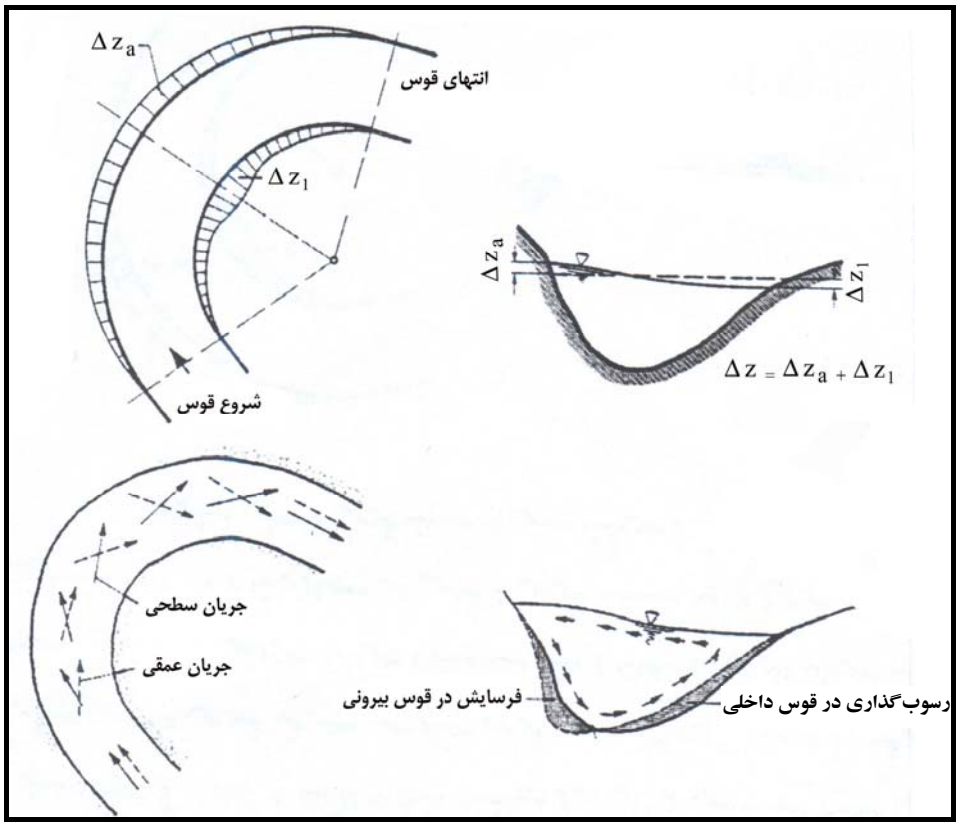
پدیده‌های ریخت‌شناسی یا مورفولوژیکی[1]، مجموعه خصوصیات شکلی و ظاهری حاکم بر رودخانه‌های آبرفتی است که هر رودخانه از تمام آن خصوصیات و یا برخی از آنها پیروی می‌کند. این پدیده‌ها و روابط حاکم بر آنها و تناوب و تراکم هر کدام، بیانگر چگونگی رفتار ریخت‌شناسی رودخانه مورد نظر و میزان تغییرات و پویایی آن در طول مکان و زمان می‌باشد. مهم‌ترین پدیده‌های ریختاری رودخانه‌ها شامل خم (قوس)، چم (پیچاب[2])، میانبر، دریاچه نعل اسبی، بهمرود یا اتصال دو یا چند رودخانه، دو شاخگی یا تقسیم رودخانه به دو شاخه جداگانه، دلتا، نیمرخ طولی و جابجایی‌های طولی و عرضی می‌باشد که در منابع گوناگونی، توصیف‌ها و روابط حاکم و معیارهای دسته‌بندی برای هر پدیده بررسی شده است. در مطالعات ریخت‌شناسی یک رودخانه، به عنوان قدم‌های اولیه، لازم است خصوصیات رفتاری و پدیده‌های ریخت‌شناسی آن شناخته شود و ضمن تجزیه و تحلیل آن، جایگاه رودخانه در حوزه فعالیت‌های ریخت‌شناسی مشخص گردد. بدیهی است هرگونه مطالعه و ارزیابی رفتاری و ریخت‌شناسی رودخانه‌ها بر مبنای شناسایی پدیده‌های موجود و سوابق تاریخی آن در بازه زمانی محدود و وضعیت کمی و کیفی آن در طول بازه مورد مطالعه خواهد بود. در این فصل به تعریف پدیده‌های رودخانه‌ای و بیان خصوصیات کلی هر یک از آنها و در فصل‌های بعدی به جزییات و روابط بین پدیده‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۲- خم[3]

به انحنا یا تغییر جهت مسیر رودخانه خم می گویند[۲۰]. ورود جریان به انحنای رودخانه و اعمال نیروی جانب مرکز[4] به جریان، موجب تغییر رقوم سطح آب می‌گردد. به طوری‌که سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۲-۱)، حداکثر اختلاف رقوم در نزدیکی‌های راس قوس به وقوع می پیوندد که میزان آن برابر با اختلاف ارتفاع سطح آب در قوس خارجی و قوس داخلی می‌باشد ($\Delta Z = \Delta Z_a - \Delta Z_i$). این اضافه ارتفاع[5] با تلفات انرژی در طول کف رودخانه ترکیب شده و یک سرعت عرضی[6] و در نهایت جریان چرخشی[7] (جریان حلزونی)[8] را ایجاد می‌نماید که از ناحیه بالایی قوس خارجی شروع و به سمت قوس داخلی حرکت می‌کند و موجب فرسایش در قوس بیرونی و حمل رسوبات بستر به سمت قوس داخلی و رسوب‌گذاری در این ناحیه می‌گردد [۶۳].

---

1 - Meander
2 - Morphology
3 - Bend
4 - Centrifugal
5 - Superelevation
6 - Transverse Velocity
7 - Spiral Flow
8 - Helicoidal Flow



شکل ۲-۱- نمای شماتیک جریان در یک خم و تاثیر جریان حلزونی بر بستر رودخانه در محل خم

۲-۳- چم[1]

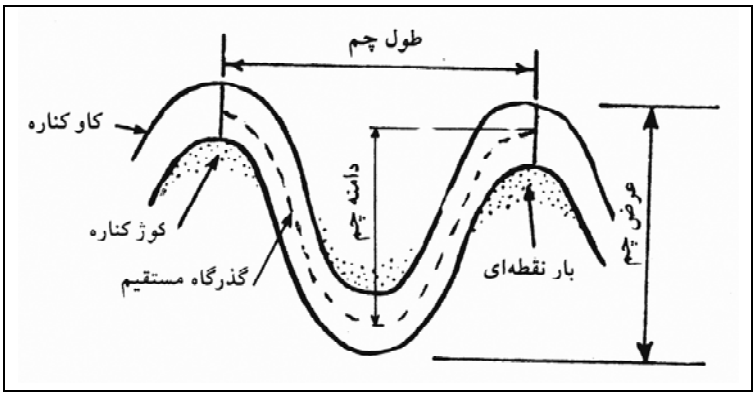
چم یا پیچاب قسمتی از یک رودخانه می‌باشد که از دو خم متوالی و معکوس که به وسیله یک گذرگاه[2] به‌هم متصل شده‌اند، تشکیل می‌گردد. مطابق شکل (۲-۲) یک چم همانند حرف لاتین S می‌باشد [۲۰] . عوامل مشخصه یک چم شامل دامنه چم[3]، عرض چم[4]، نسبت چم[5]، طول چم[6] و نسبت پیچشی (ضریب خمیدگی)[7] می‌باشد. تعریف هر یک از پارامترها به صورت خلاصه در ادامه بیان شده است [۲۰]:

- دامنه چم: فاصله عرضی رئوس محور رودخانه در دو خم متوالی یک چم را می گویند.
- عرض چم: فاصله عرضی دو راس خارجی خم‌های متوالی یک چم رودخانه را گویند.
- طول چم: فاصله طولی رئوس دو چم متوالی را گویند.
- نسبت چم: نسبت دامنه یک چم رودخانه به طول آن چم را گویند.

---

1 - Meander
2 - Crossing
3 - Meander Amplitude
4 - Meander Belt
5 - Meader Ratio
6 - Meander Length
7 - Sinuosity Ratio

- ضریب خمیدگی: نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول چم را گویند.

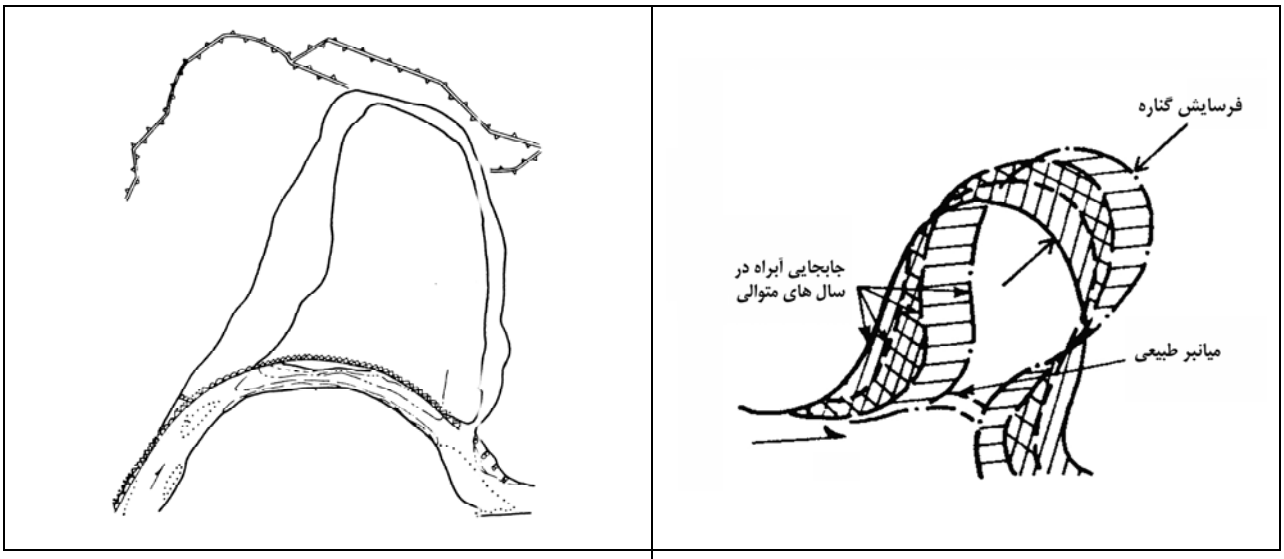


شکل ۲-۲- نمای شماتیک یک چم رودخانه [۲۰]

۲-۴- میانبر[1]

میانبر پدیده‌ای است که در اثر آن، رودخانه با حذف یک خم یا چم شدید در حال توسعه، مسیری نسبتا کوتاه و مستقیم را ایجاد نماید. در این حالت شیب رودخانه و درنتیجه سرعت جریان به طور موضعی افزایش یافته، به طوری‌که با گذشت زمان، کانال میانبر عریض‌تر و عمیق‌تر می‌گردد.

شکل (۲-۳-الف) نحوه تشکیل یک میانبر طبیعی را نشان می‌دهد. در مواردی نیز به منظور اصلاح مسیر رودخانه، مسیر میانبر به صورت مصنوعی ایجاد می‌گردد. شکل (۲-۳-ب) یک میانبر مصنوعی را نشان می‌دهد [۲۰].



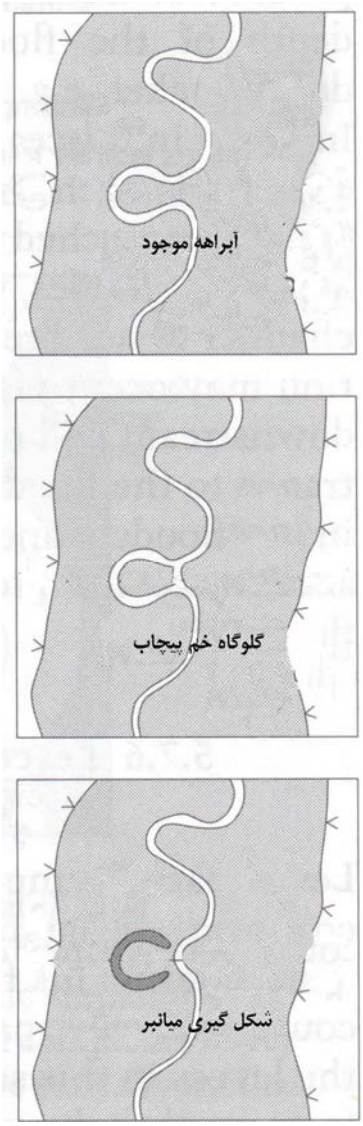
الف **ب**

شکل ۲-۳- نمونه‌ای از میانبرهای طبیعی و مصنوعی

1 - Cut-off

۲-۵- دریاچه نعل اسبی[1] (شاخ گاوی)

زمانی که پیچاب رودخانه مسیر خود را با برش خم کوتاه می‌نماید، در بخش جدا شده از مسیر اصلی که دو انتهای آن توسط رسوبات مسدود گردیده، دریاچه‌ای به شکل نعل اسب تشکیل می‌گردد[۲۰]. به عبارت دیگر حد نهایی انحنای خم یک چم رودخانه زمانی رخ می‌دهد که فقط یک قطعه زمین باریک بین دو قسمت ابتدا و انتهای چم باقی مانده باشد و در آن صورت مسیر رودخانه ممکن است با برش آن قطعه زمین باریک، خم را از مسیر جدا نموده و منجر به تشکیل دریاچه‌ای به شکل نعل اسب یا شاخ گاو در آن گردد. شکل (۲-۴) روند ایجاد یک دریاچه نعل اسبی در چم‌ها را نشان می‌دهد [۴۰].



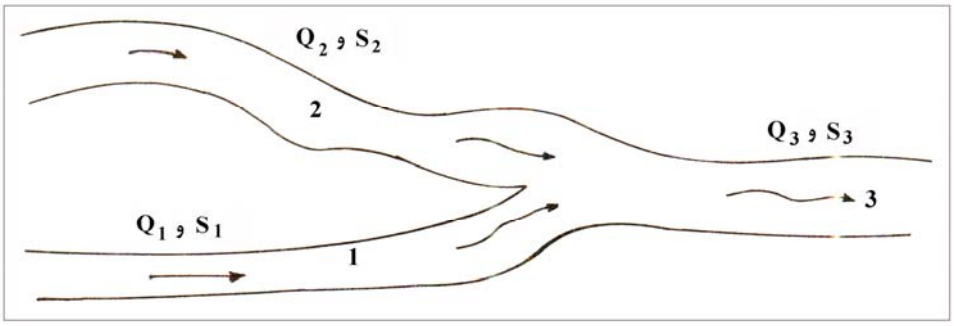
شکل۲-۴- مراحل تشکیل یک دریاچه نعل اسبی [۴۰]

1 - Oxbow Lake

۲-۶- تلاقی‌گاه یا بهمرود [1]

پدیده اتصال یا تلاقی دو یا چند شاخه رودخانه به یکدیگر را بهمرود و به محل پیوستن شاخه‌ها تلاقی‌گاه می گویند[۲۰]. شکل (۲-۵) نمایش ساده‌ای از یک بهمرود را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، ملاحظات زیر را می‌توان بیان نمود [۴۶]:

- در بهمرود، تفاوت بین بده Q_1 و Q_2 یک عامل غالب در تعیین وضعیت جریان در محل تلاقی‌گاه می‌باشد. در صورتی‌که Q_2 بیش‌تر از Q_1 باشد، موجب ایجاد برگشت آب[2] در رودخانه شماره ۱ می‌گردد. از این رو، تغذیه رسوبات از رودخانه شماره ۱ به رودخانه اصلی شماره۳ نسبتا نامنظم می‌باشد. به عبارت دیگر در رودخانه شماره ۱، رابطه مستقیمی بین بده جریان Q_1 و شیب S_1 در نزدیکی‌های اتصال وجود ندارد.
- در بهمرود، توزیع اندازه ذرات [3] در رودخانه اصلی شماره ۳ ممکن است نسبت به زمان بسیار متفاوت باشد. این پدیده ناشی از تغییر اندازه ذرات ورودی از شاخه‌های ۱و۲ و یا تفاوت بده جریان ورودی از شاخه‌های مزبور است.



شکل ۲-۵- نمایش ساده‌ای از یک بهمرود

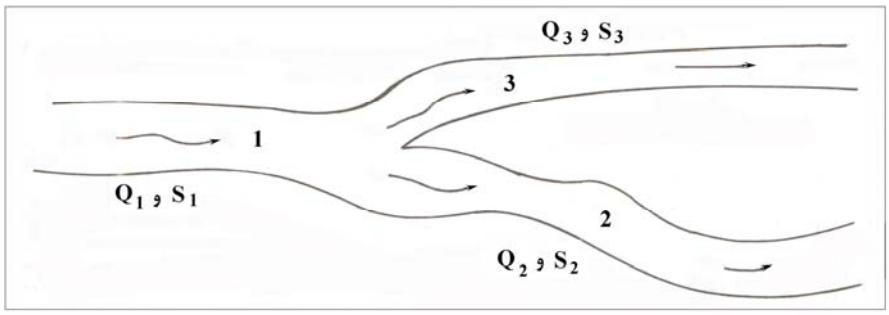
۲-۷- دوشاخگی[4] و بخش‌گاه

تقسیم آبراهه اصلی به دو شاخه مجزا را دو شاخگی و به محل جدایی آبراهه‌ها بخش‌گاه می گویند. این پدیده برعکس پدیده بهمرود می‌باشد [۲۰]. شکل (۲-۶) نمایش ساده‌ای از یک دو شاخگی را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، در این پدیده نیز ملاحظات زیر را می‌توان بیان نمود [۴۶]:

- توزیع جریان در دوشاخگی (تقسیم Q_1 به دو شاخه Q_2 و Q_3) براساس ظرفیت انتقال و تفاوت موجود در انرژی کل دو شاخه فرعی پایین‌دست صورت می‌گیرد. همچنین تقسیم S_1 (آورد رسوبی رودخانه) به S_2 و S_3 نیز توسط الگوی جریان موضعی در محل دو شاخگی تعیین می‌شود.
- در پدیده دوشاخگی، توزیع اندازه ذرات بستر رودخانه فرعی پایین‌دست تا اندازه زیادی تحت تاثیر جورشدگی هیدرولیکی[5] (ته‌نشینی ذرات با اندازه‌های متفاوت در بازه‌های متفاوت) می‌باشد.

---

1 - Confluence
2 - Back Water
3 - Grading
4 - Bifurcation
5 - Hydraulic Sorting

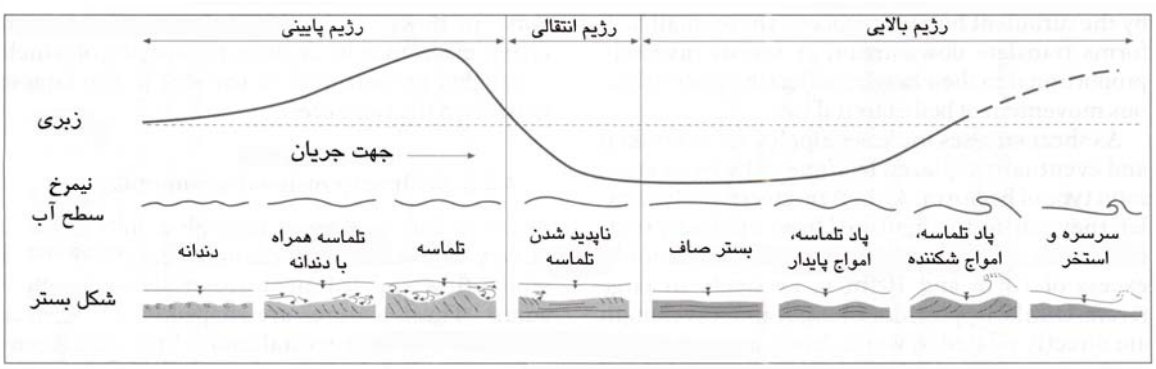


شکل ۲-۶- نمایش ساده‌ای از یک دوشاخگی

۲-۸- شکل بستر[1]

شکل و نوع پستی و بلندی‌های کف آبراهه را که اندازه آن از اندازه بزرگ‌ترین دانه تشکیل دهنده بستر بزرگ‌تر می‌باشد، شکل بستر می‌گویند. این شکل‌ها که در بستر آبراهه به‌وجود می‌آیند، ناشی از تاثیر متقابل بین جریان آب و مواد بستر می‌باشند[۲۰]. شکل بسترموجب تعدیل ضریب زبری و مشخصات هیدرولیکی همچون سرعت و عمق جریان و درنتیجه میزان انتقال رسوبات می‌گردد. هندسه آبراهه و بده جریان تاثیر معنی داری در این رابطه دارند. از این رو، اگر هندسه آبراهه و مشخصات و الگوهای ساختاری مسیر رودخانه[2] تغییر نمایند، تغییرات مربوط به عمق جریان و توزیع انرژی جریان موجب تغییر الگوی بستر و آرایش مواد بستر می‌گردند [۴۰].

برحسب نوع رسوبات و خصوصیات فیزیکی آب جاری در رودخانه، سطوح تماس بستر و جریان رودخانه شکل‌های مختلفی را به خود می‌گیرند که این شکل‌های مختلف ایجاد شده تابعی از رژیم جریان[3] می‌باشد [۵]. رژیم‌های جریان در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای عبارتند از رژیم جریان پایینی[4] (زیر بحرانی)، رژیم جریان انتقالی[5] و رژیم جریان بالایی[6] (فوق بحرانی) که مطابق شکل (۲-۷) تغییرات ضریب زبری و شکل سطح آب و انواع شکل بستر در هر یک از رژیم‌های مذکور نشان داده شده است [۴۰].

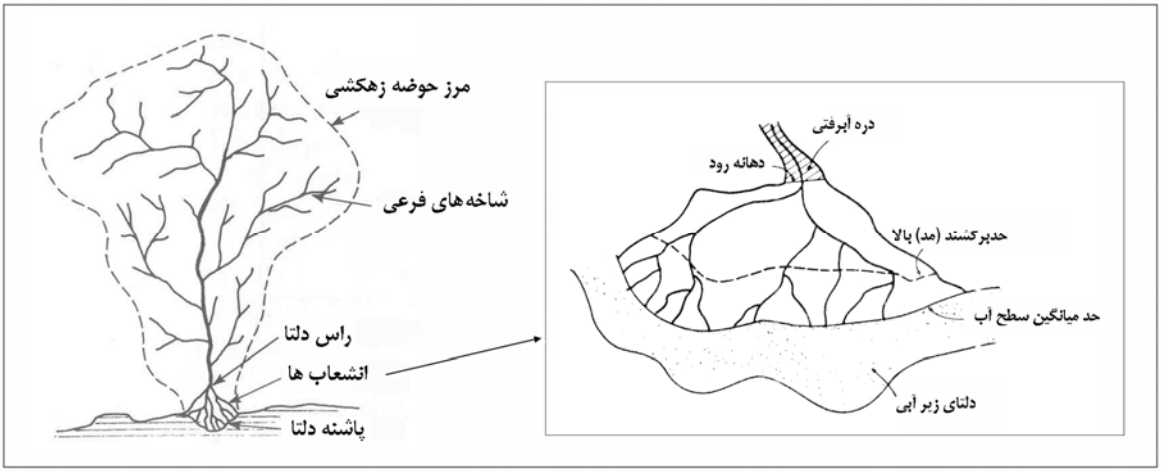


شکل ۲-۷- انواع شکل بستر و تغییرات ضریب زبری و شکل سطح آب در رژیم‌های مختلف جریان رودخانه‌های ماسه‌ای [۴۰]

1 - Bed Form
2 - Pattern of Geomorphic Units
3 - Flow Regime
4 - Lower Regime
5 - Transition Regime
6 - Upper Regime

۲-۹- دلتا[1]

زمانی که آبراهه بارکف و رسوبات معلق را درنتیجه کاهش سرعت جریان در محل ورودی به دریاچه، دریا، اقیانوس و مخزن سد ته‌نشین می‌نماید، ناحیه‌ای به نام دلتا تشکیل می‌شود. شکل عمومی دلتاها به صورت سه گوش بوده و جریان اصلی رودخانه از طریق مجموعه‌ای از آبراهه‌های کوچک و بزرگ موجود در این ناحیه عبور می‌نماید [۶۳]. شکل (۲-۸) دلتای یک رودخانه را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸- نمایش دلتای یک رودخانه [۶۳]

به منظور شناسایی عوامل موثر در ترسیب رسوبات و تشکیل دلتاها، مطالعات زیادی براساس مشخصات رودخانه، جریان ورودی و اقلیم حوضه رودخانه و منطقه دلتایی انجام گرفته است. نتایج این مطالعات حاکی از این است که عوامل مهمی همچون دما، بده جریان، بار رسوبات، درجه شوری و شیب رودخانه از عوامل موثر در تشکیل دلتاها می‌باشند[۶۳].

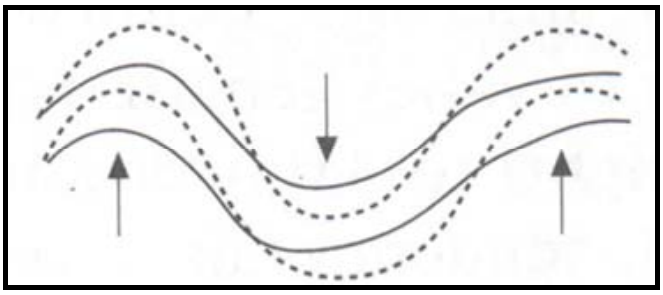
۲-۱۰- جابجایی مسیر رودخانه[2]

رودخانه طبیعی تحت تاثیر عوامل و متغیرهای مختلف همواره از نظر ابعاد، شکل راستا[3] و الگو[4] یا شکل مسطحه در تغییر و تحول است. تغییر پذیری رودخانه ممکن است تدریجی و پیوسته یا تحت شرایط خاص به صورت ناپیوسته یا ناگهانی باشد. انواع تغییراتی که معمولا در رودخانه‌ها قابل تشخیص می‌باشند، در زیر اشاره شده است [۵].

1 - Delta
2 - River Alignment Change
3 - Alignment
4 - Pattern

۲-۱۰-۱- پیش‌روی رودخانه به سمت پایین‌دست

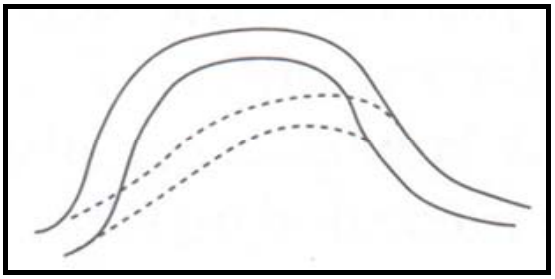
در این نوع تغییرات خم رودخانه و الگوی پیچابی آن از طریق فرسایش دیواره قوس خارجی به تدریج مطابق شکل (۲-۹) در جهت پایین‌دست حرکت می‌کند. این تغییرات عموما در رودخانه‌هایی با بار بستر مواد ریزدانه و شنی و یا در رودخانه‌های با بستر شنی و شیب زیاد صورت می‌گیرد. به این نوع تغییرات جابجایی حلقه‌های پیچانرودی نیز می‌گویند.



شکل۲-۹- جابجایی عرضی خم و پیش‌روی به سمت پایین‌دست [۴۰]

۲-۱۰-۲- پیش‌روی رودخانه به سمت پایین‌دست همراه با وقوع پدیده میانبر در رودخانه

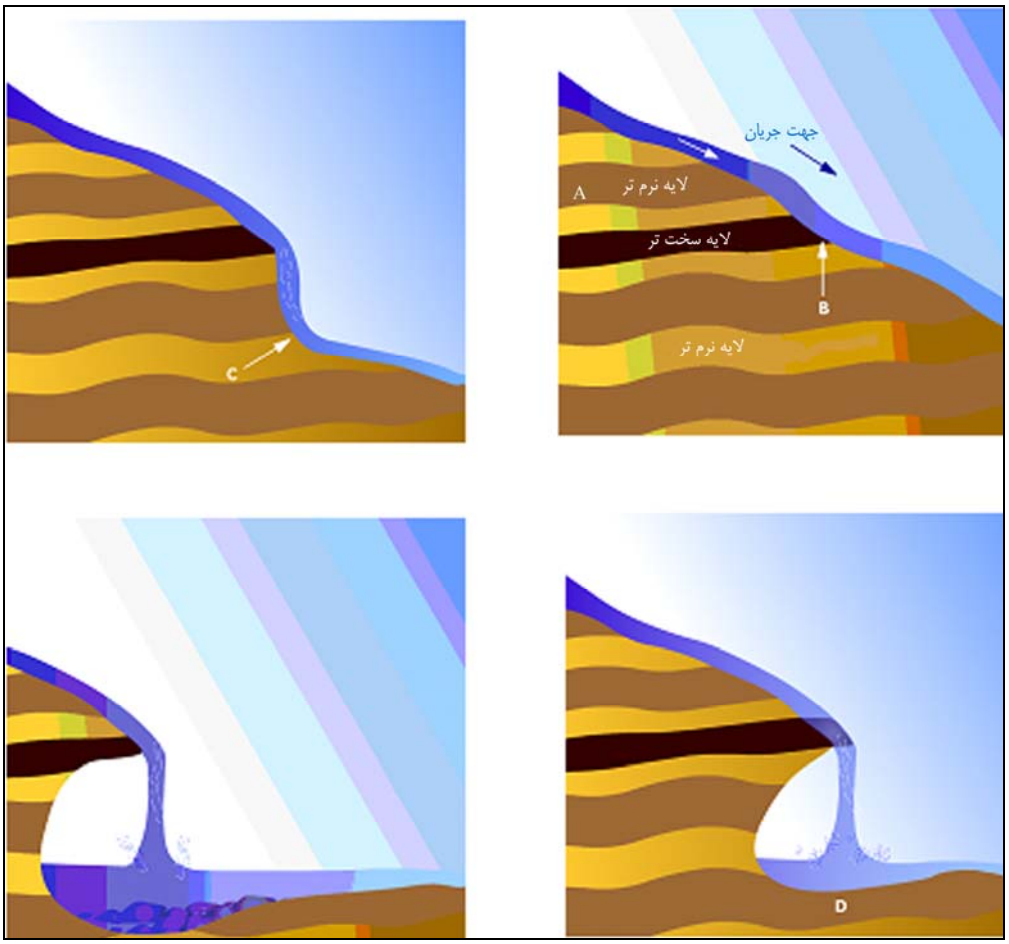
در رودخانه‌های پیچانرودی با کاهش تدریجی انحنای نسبی خم‌ها (نسبت شعاع به عرض) به طور ناگهانی حلقه رودخانه مطابق شکل (۲-۱۰) بریده می‌شود. در این صورت ضریب خمیدگی کم و شیب رودخانه به طور موضعی زیاد می‌شود.



شکل۲-۱۰- جابجایی مسیر رودخانه توسط میانبر [۴۰]

۲-۱۱- آبشار

به جریان آب در سراشیبی تند رودخانه آبشار می گویند. پدیده آبشار نوعی از تغییرات سطحی است که درنتیجه فرسایش رودخانه‌ای به‌وجود می‌آید. به عبارت دیگر آبشارها و یا تنداب‌ها در مکان‌هایی به‌وجود می‌آیند که بستر رودخانه در بالادست آنها برون‌زدگی‌هایی از جنس سنگ‌های مقاوم را تجربه نموده باشد (مطابق شکل ۲-۱۱). در این مکان‌ها جریان رودخانه نسبتا کم عمق و با سرعت زیاد است، لذا در پایین‌دست مکان‌های سنگی (نقطه B) شیب رودخانه درنتیجه فرسایش با گذشت زمان افزایش می‌یابد. همین امر موجب تشدید فرسایش بستر پایین‌دست گردیده و درنتیجه شکل‌گیری اولیه آبشار آغاز می‌گردد. با ریزش جریان از روی لایه سنگی بر روی بستر پایین‌دست، فرسایش در نقطه C تشدید گردیده و حوضچه گودالی در نقطه D به‌وجود می‌آید. تداوم جریان بر روی لایه سنگی موجب تخریب آن و درنتیجه ریزش آن در داخل حوضچه آبشار می‌گردد. با گذشت زمان و درنتیجه رخداد جریان‌های سیلابی، روند تخریب لایه سنگی به گونه‌ای می‌گردد که موجب عقب نشینی رودخانه و گسترش حوضچه گودالی آبشار می‌شود. به عبارت دیگر درنتیجه ایجاد آبشار و یا تنداب به طور طبیعی و تداوم جریان بر روی آنها، ریخت‌شناسی رودخانه دستخوش تغییر می‌باشد.



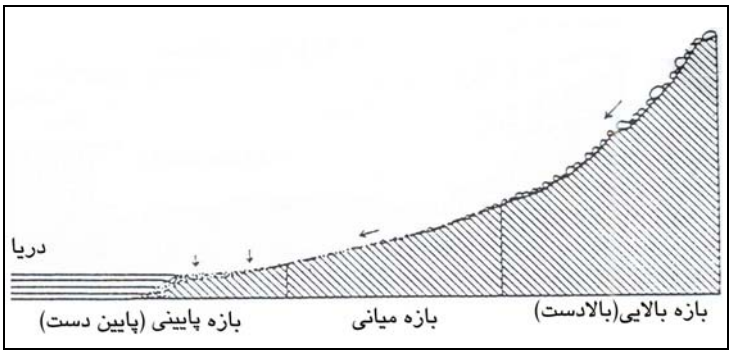
شکل ۲-۱۱- مراحل شکل‌گیری آبشار و تاثیر آن بر تغییر نیمرخ طولی رودخانه

۲-۱۲- نیمرخ طولی رودخانه[1]

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های ریخت‌شناسی رودخانه به منظور بررسی تغییرات راستای رودخانه، نیمرخ طولی می‌باشد که بیانگر شیب بستر در هر نقطه از رودخانه درنتیجه واکنش عوامل زمین ریخت‌شناسی[2]، سنگ شناسی[3] و آب و هوا می‌باشد. در بازدید صحرایی از مسیر رودخانه، نیمرخ طولی کم‌تر از مقطع عرضی قابل مشاهده است اما همچنان به عنوان عامل اصلی شکل رودخانه شناخته شده است. شکل عمومی نیمرخ طولی رودخانه از یک الگوی ثابتی پیروی می‌کند، به طوری‌که در بالادست رودخانه شیب بستر تند بوده و تدریجا به سمت پایین‌دست و بخش دلتایی کاهش یافته و در سطح دریا به سمت صفر میل می‌کند. بر این اساس و مطابق شکل (۲-۱۲) مسیر رودخانه به بازه‌هایی همچون بازه بالایی[4] یا بالادست، بازه میانی[5] و بازه پایینی[6] یا پایین‌دست، تقسیم می‌گردد. رودخانه در بازه بالایی پدیده فرسایش، در بازه میانی پدیده انتقال و در بازه پایینی، پدیده ترسیب رسوبات را تجربه می‌کند [۵۸].

---

1 - Longitudinal Profile
2 - Geomorphology
3 - Lithology
4 - Upper Reach
5 - Middle Reach
6 - Lower Reach



شکل ۲-۱۲- نیمرخ طولی و بازه بندی مسیر رودخانه [۵۸]

فصل ۳

عوامل موثر بر ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

۳-۱- کلیات

رودخانه‌های مختلف و بازه‌های مختلف آنها دارای مشخصات متفاوتی از نظر مسیر حرکت، سطح مقطع، مصالح بستر و کناره، شیب و نوع دره هستند.

طبق نظر لین[1] عوامل گوناگونی در رفتار یک رودخانه موثر هستند. برخی از این عوامل مستقیما در ریخت‌شناسی موثر بوده و برخی دیگر نیز از طریق ارتباط با عوامل دیگر تاثیرگذار می‌باشند. مهم‌ترین این عوامل عبارتند از:

- بده جریان
- مواد بستر و کناره
- شیب طولی
- بار رسوب رودخانه
- پوشش گیاهی
- زبری بستر
- شرایط زمین‌شناسی منطقه
- اقدامات انسانی

لین اظهار داشته که تمامی عوامل فوق مستقل نبوده، بلکه برخی از آنها، کم یا زیاد، به عوامل دیگر وابسته هستند. به عنوان مثال ارتباط مابین شیب طولی و بار رسوب با مقاومت بستر و کناره رودخانه در برابر جریان، بسیار قوی و پیچیده است[۶۳]. با شناخت و بررسی عوامل موثر بر ریخت‌شناسی رودخانه در ابتدای مطالعات ریخت‌شناسی چشم اندازی کلی از وضعیت ریخت‌شناسی رودخانه به دست آمده و بسته به اهداف سایر بخش‌های مطالعات در دستور کار قرار خواهد گرفت. در ادامه عوامل موثر در شکل‌گیری ریخت‌شناسی رودخانه‌ها توضیح داده می‌شود.

۳-۲- عوامل تاثیرگذار بر رفتار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

۳-۲-۱- بده جریان

ویژگی‌های جریان مانند میزان بده، تداوم، شدت و تغییرات آن از عوامل مهم تاثیرگذار بر ریخت‌شناسی در رودخانه‌هاست. رژیم‌های سیلابی با تغییرات زیاد شرایط کاملا متفاوتی را نسبت به رژیم‌های یکنواخت، حتی در شرایط مساوی بودن حجم جریان سالانه، ایجاد می‌کند.

رودخانه‌های فصلی و سیلابی در مقایسه با رودخانه‌های دایمی و غیر سیلابی حساسیت بیش‌تری نسبت به تغییرات دارند[۸۵]. وقوع سیلاب‌های شدید و استثنایی معمولا باعث عریض‌تر شدن بستر می‌گردد. ولی بروز سیلاب‌های متوالی و کوچک‌تر به تدریج در اثر رسوب‌گذاری متناوب، عرض بستر رودخانه را محدود می‌کند و به همین علت است که بیش‌تر محققان سعی در برقراری روابطی

1 - Lane

بین نسبت بده جریان‌های سیلابی متوالی به بده جریان متوسط سالانه داشته‌اند. هر چه این نسبت بیش‌تر باشد، بیان کننده تغییر پذیری شدیدتر مقطع رودخانه است [۵].

شاخص‌های دیگری از جریان برای بیان وضعیت تغییر پذیری و فرسایش رودخانه مطرح شده که از آن جمله بده مقطع پر[۱] و بده غالب[۲] را می‌توان نام برد.

طبق تعریف لئوپولد واسکی بیت[۳] (۱۹۷۷) بده مقطع پر عبارتست از بده جریانی که تراز سطح آب را به حد پوشش گیاهی نسبتا دایمی روی دیواره‌های مقطع اصلی رودخانه می رساند [۵]. هندرسون[۴] (۱۹۶۶) این بده را معادل جریانی می‌داند که در بلند مدت شکل و فرم مقطع اصلی رودخانه را می سازد [۴۲]. بده غالب نیز عموما جریانی با دوره بازگشت حدود ۲ تا ۵ سال تعریف می‌شود ولی این نوع تعاریف به هرحال قطعیت ندارند. لازم به ذکر است که فقط بده‌های زیاد عامل تغییر نمی‌باشند بلکه بده‌های خیلی کم نیز ممکن است عوامل ریخت شناسی نظیر پدیده های خیزآب – گرداب را تشدید نماید چرا که در بده‌های کم، بده دیگر متغیر مستقل نیست و آن را باید به‌عنوان حجم در واحد زمان تلقی نمود و با توجه به این‌که رودخانه سعی در افزایش و تطویل زمان جهت کاهش قدرت جریان خود دارد، پدیده‌های فوق ممکن است ایجاد شوند.

۳-۲-۲- مواد کف و کناره رودخانه

مواد کف وکناره رودخانه نقش موثری در تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه ایفا می‌کند. رودخانه‌های با مواد بستری ریزدانه نسبت به تغییرات بده و بار رسوبی حساسیت بیش‌تری از خود نشان می‌دهند [۶۳]. در مناطق نیمه کوهستانی و حوضه‌هایی که دارای بارکف زیاد و درشت دانه هستند، مواد آبرفتی شنی و درشت دانه در بعضی رودخانه‌ها به صورت یک لایه تحت الارضی عمیق و در بعضی دیگر به صورت یک لایه محدود سطحی روی سنگ کف یا لایه تحت الارضی ماسه‌ای و ریزدانه قرار دارند که در مواقع پر آبی به صورت یک لایه مقاوم در برابر آبشستگی عمل کرده و میزان بار کف را نیز محدود می‌کند. از این لایه به عنوان قشر حفاظتی یا لایه محافظ (آرمور) نیز یاد می‌شود. در حالی‌که وضعیت کف در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای[۵] شدیدا تحت تاثیر شرایط جریان می‌باشد. به همین دلیل نهشته‌های رسوبی در رودخانه‌های بستر ماسه‌ای ناپایدارند، ولی در رودخانه‌های بستر شنی[۶] نسبتا پایدار هستند [۴۳].

نوع مواد دیواره‌ها نیز روی هندسه هیدرولیکی رودخانه موثر است. سیمون[۷] (۱۹۷۱) و شوم[۸] (۱۹۸۴) اثر جنس و فرسایش‌پذیری مواد دیواره‌ها را مورد بحث قرار داده اند[۷۹ و۸۰]. دیواره‌های دارای بافت درشت دانه و غیرچسبنده تحت لایه محافظ سطحی بستر سبب می‌گردد تا مقاومت دیواره‌ها نسبت به کف بستر بسیار کم‌تر باشد. علاوه بر آن افزایش بار رسوبی ناشی از تخریب دیواره‌ها نیز بر توسعه نهشته‌ها و جزایر رسوبی کمک کرده و باعث گستردگی جریان آب و هدایت آن به سمت کناره‌ها می‌گردد. درنتیجه این

1 - Bank Full Discharge
2 - Dominant Discharge
3 - Leopold and Skibitzke
4 - Handerson
5 - Sand Bed Rivers
6 - Gravel Bed River
7 - Simon
8 - Schumm

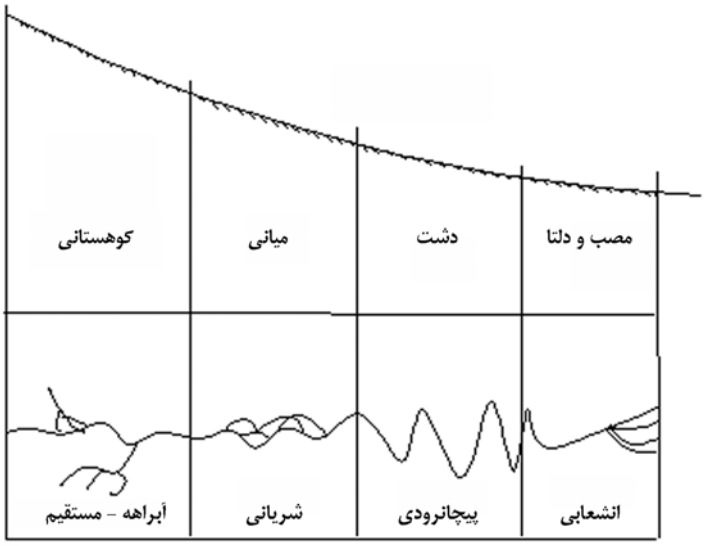
فرآیند نسبت عرض به عمق رودخانه افزایش یافته و تخریب کناره‌ها جایگزین آبشستگی کف بستر می‌گردد. درحالی‌که در رودخانه‌ها با مواد ریزدانه و چسبنده کناره‌ها در مقابل فرسایش مقاوم‌تر بوده و تحت تاثیر عوامل هیدرولیکی، عمق جریان بیش‌تر شده و درنتیجه نسبت عرض به عمق آن کم‌تر می‌باشد [۷۹و۸۰].

در مطالعات ریخت‌شناسی، شناسایی وضعیت مواد کف و کناره‌ها در طول مسیر رودخانه نقش قابل توجهی در توجیه و شناسایی وضعیت موجود ریخت‌شناسی رودخانه و یا پیش‌بینی‌های احتمالی از وضعیت آتی آن ناشی از اثر پذیری مواد بستر و کناره خواهد داشت.

۳-۲-۳- شیب طولی رودخانه

شوم (۱۹۸۴) اثر تغییر شیب را روی متغیرهای دیگر مورد بحث قرارداده است. به نظر وی اگر تاثیرات سنگ کف یا تغییرات موضعی ناچیز باشد، شیب رودخانه در جهت پایین‌دست کاهش می‌یابد.

کاهش شیب با کاهش سرعت و نیز کاهش اندازه رسوبات و مواد بستر در پایین‌دست همراه است. برای رودخانه‌هایی که درصد مواد ریزدانه آنها کم است، شیب رودخانه و شیب دره تقریبا یکسان است، ولی برای رودخانه‌های با مواد بستر ریزدانه شیب دره تا سه برابر شیب رودخانه نیز می‌باشد. این نکته نشان می‌دهد که گرچه شیب دره می‌تواند یک عامل موثر در شیب رودخانه باشد، ولی شدت اختلاف آن درنتیجه تفاوت در نوع اندازه رسوبات حمل شده می‌باشد و به همین دلیل در سیلابدشت‌ها، رودخانه‌ها شکل مارپیچی (پیچانرودی) به خود می‌گیرد. افزایش ضریب خمیدگی که با افزایش طول رودخانه همراه است، پدیده اتلاف انرژی را تشدید کرده و از میزان بارکف می‌کاهد و چم را گسترش می‌دهد. البته استثناهایی نیز وجود دارد، برای مثال رودخانه‌های کوهستانی با پوشش گیاهی خوب ویا با تشکیلات زمین‌شناسی مقاوم ممکن است بستر پیچانرودی داشته باشد، در حالی‌که مواد بستری آن قلوه سنگ است. در مصب رودخانه‌ها و محدوده دلتا به علت این‌که شیب بستر خیلی کم و میزان مواد ریزدانه زیاد است، پدیده تغییر مسیر شدت می‌یابد [۷۹]. شکل (۳-۱) نحوه تغییرات شیب، نیمرخ کف و شکل مسطحه رودخانه را در طول مسیر آن نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- نحوه تغییرات نیمرخ طولی و شکل مسطحه رودخانه در طول مسیر آن [۲۵]

۳-۲-۴- بار رسوب رودخانه

کل بار رسوبی رودخانه شامل بار کف و بار معلق می‌باشد. بخش قابل توجه بار کف از مواد بستر تشکیل شده و شامل ذرات ماسه و درشت‌تر می‌باشد. اهمیت فیزیکی تفکیک میان بار کف و بار معلق در این است که رس و سیلت دارای چسبندگی بوده و در مقابل فرسایش مقاوم هستند هر چند این مواد رسوبی نیز تحت شرایط حاکم دچار فرسایش می‌شوند، در حالی‌که ذرات ماسه و درشت‌تر فاقد چسبندگی بوده و بسته به اندازه و شکل آنها قابلیت فرسایش و جابجایی دارند. از نقطه نظر ریخت‌شناسی، سهم بار کف از کل بار رسوبی و نیز اندازه و دانه‌بندی آن عوامل مهمی در تکوین مواد آبرفتی بستر و دیواره‌های رودخانه و درنتیجه شکل و ابعاد آن می‌باشد [۷۸]. در رودخانه‌های فصلی با رژیم سیلابی و نیز در محدوده بالادست حوضه آبریز سهم بار کف بیش‌تر و نوع مواد رسوبی آن نیز درشت دانه و غیر چسبنده است و به همین دلیل رودخانه‌های با مواد بستری شنی و درشت دانه عموما دارای الگوی شریانی هستند. در جهت پایین‌دست، به تدریج، اندازه مواد رسوبی کف کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از سایش و تخریب مکانیکی و جداسازی هیدرولیکی ذرات در اثر ته‌نشینی می‌باشد. از طرف دیگر مواد رسوبی رودخانه از دو منبع تغذیه می‌گردد، منشای خارجی آن از طریق جریان سطحی حوضه آبریز و منشا داخلی آن از فرسایش مواد بستر و دیواره رودخانه تامین می‌گردد. بیلان بار رسوب در یک بازه طولانی می‌تواند اثر مواردی نظیر شاخه‌های فرعی، تخریب‌پذیری دیواره‌ها، پدیده کف‌کنی و یا رسوب‌گذاری را روی ریخت‌شناسی و تغییرات رودخانه نشان دهد [۷۹]. بدیهی است که شناخت اهمیت و تاثیر رسوب در بازه‌های مختلف رودخانه در طول مسیر، کمک وافری در درک شرایط موجود ریخت‌شناسی رودخانه و تغییرات احتمالی آن در طول مسیر خواهد نمود.

یکی دیگر از آثار بار رسوبات مصالح بستر (بار آبرفتی) در تغییر مسیر رودخانه، در مصب و دلتا ظاهر می‌شود. معمولا در مناطق دلتایی به دلیل رسوب‌گذاری، بستر رودخانه به تدریج بالا می‌آید، به گونه‌ای که سطح جریان سیلابی از سطح زمین طبیعی اطراف بیش‌تر می‌گردد. طبعا حفاظت بستر و اراضی رودخانه با سیل بندهای خاکی (گوره‌ها) صورت می‌گیرد که به تدریج مرتفع‌تر ساخته می‌شوند یا ترفیع می‌گردند. بالاخره در یک سیلاب بزرگ گوره‌ها شکافته شده و آب خطاالقعر جدیدی را به عنوان مسیر جدید انتخاب می‌کند. و فرآیند بالا آمدن تدریجی بستر این مجرای جدید مجددا آغاز می‌گردد. مگر آن‌که با وسایل و پروژه‌های مهندسی امروزی مجددا رودخانه به مجرای اصلی برگردانده شود. عمر یک مجرا یا مسیر رودخانه از زمان شروع تا تغییر آن در مناطق دلتایی بین ۵۰ تا ۲۰۰ سال مشاهده شده است.

۳-۲-۵- پوشش گیاهی

وجود پوشش گیاهی، با توجه به نقشی که در حفاظت و تثبیت دیواره و سواحل رودخانه می‌تواند ایفا کند، عامل موثری در بروز تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه می‌باشد، کلینگمن و برادلی[1] (۱۹۷۶)، اداره مهندسی ارتش آمریکا (۱۹۸۱)، گری ولیسر[2] (۱۹۸۲) وپترسن[3] (۱۹۸۶) تاثیرات مهم پوشش گیاهی را در حفاظت دیواره و سواحل رودخانه‌ها به ترتیب زیر گزارش نموده‌اند [۶۳ و ۴۱ و ۹۰ و ۵۰]:

1 - Klingeman and Bradely
2 - Gray and Leiser
3 - Petersen

- از نظر مکانیکی: مکانیزم عمل ریشه‌ها باعث تحکیم خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان خاک و افزایش مقاومت دیواره‌ها می‌گردد. ریشه‌ها باعث مسلح شدن بیولوژیکی خاک شده و تنش برشی خاک را از طریق مقاومت کششی ریشه‌ها تحمل کرده و مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهد. همچنین گیاهان، محافظ توده خاک روی شیب دیواره بوده و از ایجاد ترک و شکاف در دیواره‌های چسبنده ممانعت می‌کند. اندام بیرونی گیاه نقش مهمی در حفاظت دیواره در مقابل برخورد مواد جامد و شناور، یخ و اثر موج به عهده دارند.
- از نظر هیدرولیکی: اندام بیرونی گیاه باعث افزایش زبری دیواره‌ها و کاهش سرعت و تنش برشی جریان می‌گردد. در واقع انرژی آب در محل دیواره‌ها با انعطاف پذیری پوشش گیاهی مستهلک می‌شود. مقاومت هیدرولیکی فوق سبب جذب و ته نشست مواد رسوبی معلق در کناره‌های رودخانه شده و باعث کنترل عرض و افزایش پایداری دیواره‌ها خواهد بود.
- از نظر اجتماعی و زیست محیطی: ترکیبی از پوشش گیاهی علفی در حاشیه و حریم رودخانه، علاوه بر تاثیرات فوق حریم رودخانه را از تجاوزات زارعین و عملیات زراعی مصون داشته و از فرسایش سطحی ناشی از تردد دام می کاهد. ضمن آن‌که دارای مزیت‌های زیست محیطی متعددی نیز می‌باشد.

۳-۲-۶- زبری بستر

مقاومت در مقابل جریان یا همان زبری بستر در رودخانه‌ها به شکل‌های مختلف و اندازه مواد بستر بستگی دارد. این شکل‌ها عموما شکنج‌ها[1]، تلماسه‌ها[2]، پادتلماسه‌ها[3]، انواع نهشته‌های رسوبی[4] و همچنین پوشش‌های کف و کناره در رودخانه می‌باشد[۴۲]. در رودخانه‌های ماسه‌ای، مقاومت در مقابل جریان تابعی از شکل مسطحه رودخانه، بده جریان و احتمال وقوع آن، شکل بستر و اندازه دانه‌بندی مواد بستر می‌باشد. البته باید در نظر داشت که نهشته های رسوبی و شکل هندسی و محل تشکیل آنها نیز نقش موثری را در مقابل جریان در رودخانه‌های ماسه‌ای ایفا می‌نماید. در رودخانه‌هایی که مواد تشکیل دهنده بستر آنها درشت دانه باشد مقاومت در مقابل جریان بستگی زیادی به اندازه دانه‌بندی مواد تشکیل دهنده بستر و همچنین به فضای خالی بین مواد درشت دانه که با مواد ریزدانه پر شده‌اند، دارد. البته در این نوع رودخانه‌ها بده جریان و احتمال وقوع آن نیز موثر است. تغییرات زبری مانینگ در رودخانه‌های ماسه‌ای معمولا بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ می‌باشد، مگر آن‌که رودخانه دارای ضریب خمیدگی بالا و یا پوشش گیاهی پایداری در کف و کناره رودخانه موجود باشد [۱۵]. در مورد رودخانه‌های شنی، سنگلاخی و قلوه سنگی لازم به یادآوری است که سیلاب‌های بزرگ ممکن است مواد ریزدانه را از سطح حوضه آبریز به داخل رودخانه حمل و این مواد در بستر رودخانه بر روی مواد درشت دانه بستر نشست کنند، لذا پوششی از مواد ریزدانه (ماسه، رس و سیلت) بستر رودخانه را در بر می‌گیرد و باعث کاهش زبری بستر رودخانه می‌شود. دراین حالت رودخانه به طور موقت به لحاظ مقاومت در مقابل تشکیل و ایجاد شکل‌های مختلف بستر مانند رودخانه‌های ماسه‌ای رفتار می‌کند تا زمانی که سیلاب بعدی و بستر رودخانه را از رسوبات ریزدانه فوق بشوید.

---

1 - Ripples
2 - Dunes
3 - Antidunes
4 - Bar Deposition

۳-۲-۷- زمین‌شناسی منطقه

نوع تشکیلات و جنس بستر رودخانه از نظر خصوصیت و میزان فرسایش‌پذیری، روی درجه آزادی رودخانه در گسترش عرضی و عمقی آن اثر می‌گذارد. وجود گسل در امتداد طولی یا عرضی رودخانه، می‌تواند راستای رودخانه را تحت کنترل در آورد. عوامل تکتونیکی و تغییراتی که در داخل پوسته زمین رخ می‌دهد و اثر آن به صورت کوه‌زایی یا دره زایی در سطح ظاهر می‌گردد، گرچه سرعت آن بسیار کم است ولی در دوره زمانی طولانی روی شیب رودخانه موثر است.

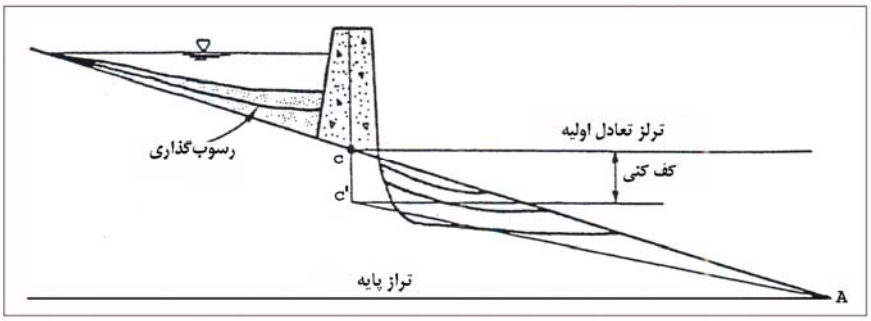
شرایط زمین‌شناسی حوضه نیز از نظر فرسایش‌پذیری و نفوذپذیری تشکیلات روی عامل بده و رسوب اثر خواهد داشت. حرکات تکتونیکی و زمین‌لرزه‌ها موجب جابجایی لایه‌های بستر رودخانه گردیده و درنتیجه ممکن است در بخش هایی از مسیر رودخانه، تراز بستر بالاتر از تراز عمومی منطقه قرار گیرد. در حالتی که تراز بستر بالاتر از تراز عمومی منطقه قرار گیرد، در بازه‌های بالادست رسوب‌گذاری رخ می‌دهد و در حالتی که پایین تر از آن قرار گیرد، فرسایش و کف‌کنی به وقوع می پیوندد.

نوع دره‌های محیط بر رودخانه در تعیین قدرت تطبیق ناشی از تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه نقش مهمی دارد. رودخانه‌هایی که در دره‌های وسیع و پهن یا در دشت جریان دارند، جابجایی جانبی بستر آنها زیاد می‌باشد، در حالی‌که رودخانه‌های جاری در دره‌های باریک تنها قدرت جابجایی در محدوده بستر خود را دارند.

۳-۲-۸- اقدامات انسانی

بسیاری از فعالیت‌های بشری باعث ایجاد تغییرات در رفتار رودخانه می‌شود. به طور مثال در اثر احداث سد توان حمل رسوب رودخانه در پایین‌دست سد افزایش یافته و موجب تشدید فرسایش در بستر رودخانه می‌گردد که به نوبه خود فرسایش‌های سطحی و توده‌ای کناره‌ها را نیز به همراه خواهد داشت. (شکل ۳-۲)

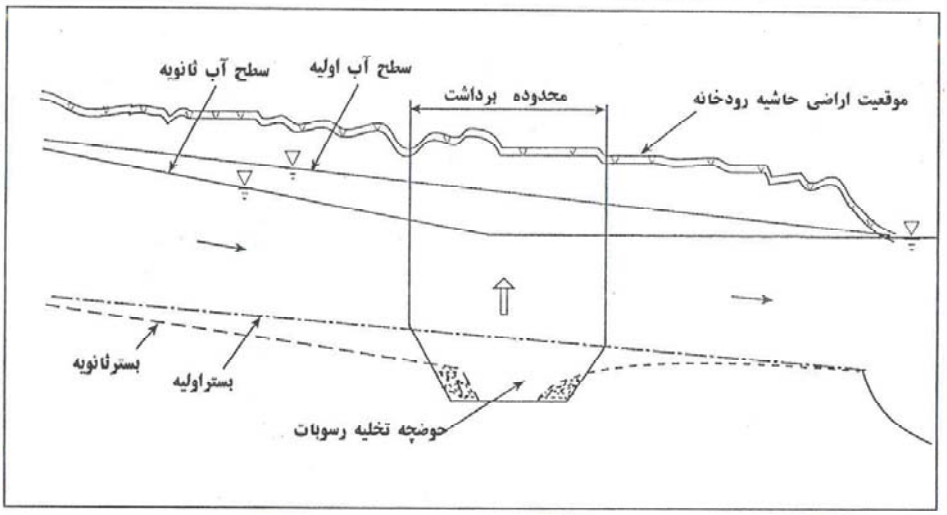
یکی از محل‌هایی که به طور جدی در معرض فرسایش بستر قرار می‌گیرد، پایین‌دست سدهای مخزنی می‌باشد، زیرا سدهای مخزنی مقدار قابل توجهی از رسوبات حمل شده توسط رودخانه را در مخزن خود تله‌اندازی می‌کند و درنتیجه آب تقریبا بدون رسوب از سد خارج خواهد شد. جریان آب خروجی از سد به دلیل قدرت حمل رسوب بالا، رسوبات خود را از بستر رودخانه (پایین سد) تامین و با حمل این رسوبات به پایین‌دست به تدریج بستر رودخانه گود خواهد شد.



شکل ۳-۲- چگونگی تغییرات رودخانه در بالادست و پایین‌دست محل سد [۹]

به طور مثال اندازه‌گیری‌های انجام شده در پایین‌دست سد هور در آمریکا نشان می‌دهد که بین سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۵۱ تا فاصله ۱۴۷ کیلومتر پایین‌دست سد بستر رودخانه ۴/۳۰ متر پایین‌تر افتاده است [۱۵].

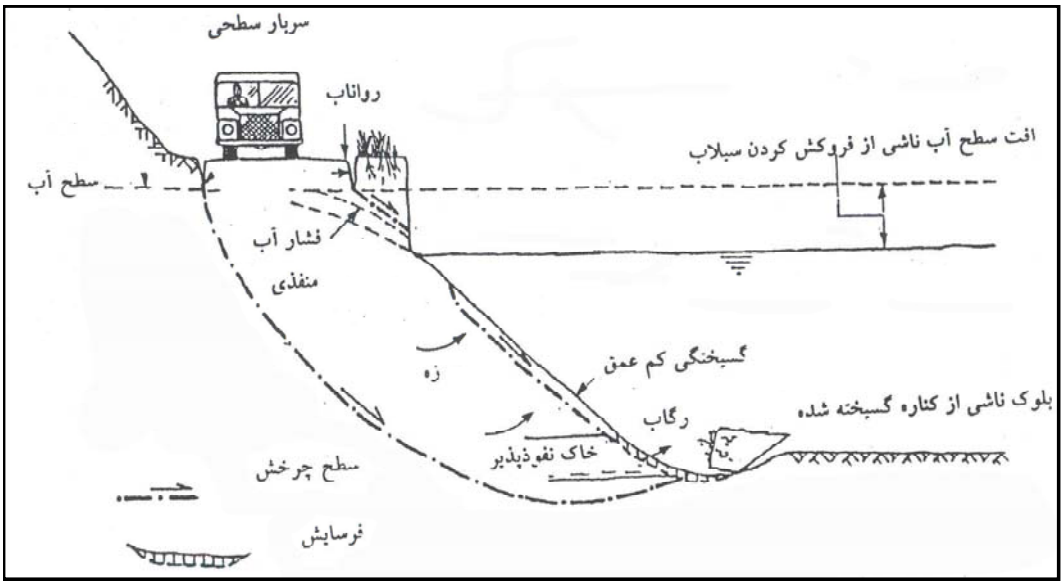
عمل گود شدن بستر در محل‌های دیگر نیز ممکن است اتفاق افتد. ایجاد معادن شن و ماسه نیز معمولا باعث تشدید فرسایش‌های سطحی در بستر خواهد شد. ایجاد استخرهای پرورش میگو و ماهی در اطراف رودخانه باعث اشباع شدن خاک و ایجاد تراوش جریان آب از استخر به طرف رودخانه و افزایش فشار منفذی شده و درنهایت فرسایش‌های توده‌ای کناره‌ها را به همراه دارد (شکل۳-۳)[۴].



شکل ۳-۳- چگونگی بروز آثار برداشت مصالح رودخانه‌ای در بازه‌های بالادست و پایین‌دست [۴]

به طورکلی هرگونه دخل و تصرف در بستر رودخانه اعم از اجرای طرح‌های حفاظتی موضعی کناره‌ها، احداث سازه‌هایی مانند پل در محل تقاطع با آن، عملیات عمرانی، توسعه شهری و روستایی و حتی گسترش اراضی کشاورزی در حاشیه رودخانه و به خصوص اجرای برنامه ها و طرح‌های توسعه منابع آب که منجر به احداث سد، بند، سر ریز و مانند آن می‌گردد، تغییراتی در رژیم جریان و رسوب و روند فرسایش و رسوب‌گذاری در طول رودخانه به همراه خواهد داشت. مجموعه این وقایع سبب تغییر در شیب، مقطع و گاهی تغییر الگو و شکل مسطحه رودخانه می‌شود. برای نمونه شکل (۳-۴) نشان می‌دهد که احداث جاده در حاشیه رودخانه موجب ریزش دیواره رودخانه گردیده است[۹].

اصلاح مسیر رودخانه در امتدادی مستقیم بدون توجه به عملیات حفاظتی موجب کف‌کنی و فرسایش کناره‌های رودخانه می‌گردد. به همین ترتیب اگر لایروبی موجب آسیب زدن به پاشنه دیواره رودخانه شود، می‌تواند موجب تخریب توده‌ای آن گردد. تغییر شیب در بازه لایروبی شده نیز در بسیاری از شرایط فرسایش بستر و یا رسوب‌گذاری و توسعه پیچانرودی را فراهم می سازد. بدیهی است در تمامی این موارد تغییرات قابل توجه ریخت‌شناسی در محل عارضه و در بالادست و پایین‌دست آن پیش‌بینی می‌شود.



شکل۳-۴- انواع گسیختگی توده‌ای در کنار رودخانه [۹]

فصل ۴

روند مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

۴-۱- آمار و اطلاعات مورد نیاز

استفاده از آمار و اطلاعات دقیق و کامل در انجام اموری که به برنامه‌ریزی و طراحی نیازمند است، از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در طرح‌های مهندسی، به خصوص در مطالعات طرح‌هایی که در ارتباط با پدیده‌های طبیعی بوده و طراحی آنها بر روش‌های تحلیلی و یا تجربی استوار می‌باشد، وجود آمار و اطلاعات کافی از جمله ضروریات اساسی تلقی می‌شود، به گونه‌ای که فقدان و یا حتی کمبود آمار و اطلاعات لازم، مطالعه، اجرا یا بهره‌برداری از این گونه طرح‌ها را با مشکلات و مخاطرات جدی مواجه می سازد.

در مطالعات و بررسی‌های ریخت‌شناسی که با یکی از عناصر پیچیده طبیعت به نام رودخانه سروکار دارد و عوامل و متغیرهای متعددی در رخدادها و پدیده‌های مرتبط با آن دخیل می‌باشند، دستیابی به آمار و اطلاعات ثبت شده اهمیت زیادی دارد. بدیهی است در ابتدای مطالعات، باید این عوامل تاثیرگذار را شناسایی و با توجه به میزان تاثیر هر یک در وقوع پدیده‌های طبیعی مرتبط، آنها را اولویت بندی و بر حسب مورد، حد و مرز اطلاعات مورد نیاز هر عامل را تعیین کرد.

آمار و اطلاعات مورد نیاز انجام مطالعات ریخت‌شناسی در ادامه آورده شده است.

۴-۱-۱- آمار آبدهی و مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی

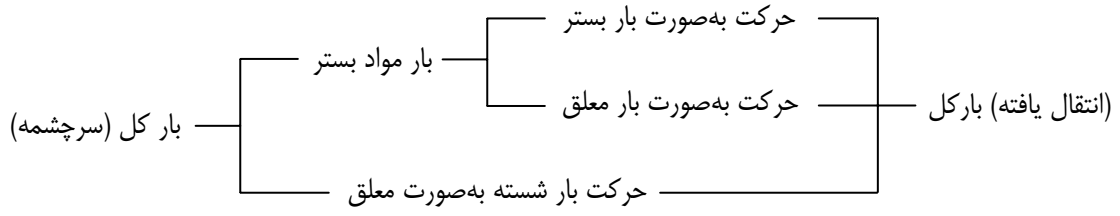
در اقدامات اولیه مطالعات ریخت‌شناسی لازمست ایستگاه‌های آب‌سنجی واقع در محدوده مورد مطالعه وسرشاخه‌های آن شناسایی و روی پلان و نقشه‌های موجود از مسیر رودخانه پیاده شود. در این مطالعات لازمست دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان رودخانه در ایستگاه‌های واقع در محدوده مورد مطالعه بررسی و در صورت لزوم این ایستگاه‌ها تجهیز و تکمیل شوند. علاوه بر آن پیشنهاد تاسیس ایستگاه‌های جدید آب‌سنجی بر روی رودخانه اصلی و سرشاخه‌های آن همراه با تعیین محل استقرار آنها و ارائه دستورالعمل نحوه برداشت نمونه‌ها و آزمایش‌های لازم در صورت لزوم ارائه شود.

همچنین پیگیری در خصوص تهیه آمار و اطلاعات زیر نیز ضروری می‌باشد.

- گزارش‌های هیدرولوژی موجود و مرتبط با منطقه طرح
- آمار و اطلاعات مربوط به بارش در طول فصول سال
- آمار و اندازه‌گیری‌های انجام شده روزانه، ماهانه و متوسط سالانه آنها در زمینه بده جریان در دوره‌های زمانی طولانی‌تر و تغییرات سطح آب رودخانه در سال‌های گذشته و به ویژه در مواقع سیلابی در محدوده طرح

۴-۱-۲- آمار رسوب‌دهی و مشخصات ایستگاه‌های رسوب‌سنجی

آگاهی از شرایط انتقال رسوب برای بررسی وضعیت ریخت‌شناسی رودخانه ضروری است. در این راستا با طبقه‌بندی انواع رسوبات به شرح زیر، وضعیت رسوبی رودخانه به طور منظم و به روش‌های مختلف بسته به سطح اطلاعات مورد نیاز و امکانات در دسترس اندازه‌گیری می‌شود[۱۳].



- بار مواد بستر[1]:

آن قسمت از بده کل رسوب که تشکیل دهنده ذرات بستر رودخانه است.

- بار معلق [2]:

مواد ریزدانه‌ای که به صورت معلق به وسیله جریان آب در آبراه حمل می‌گردد. اندازه رسوبات معلق با توجه به مشخصات هیدرولیک جریان متفاوت بوده و از موادی مانند رس، سیلت، ماسه و حتی شن نیز تشکیل می‌گردد.

- بار بستر[3]:

به رسوباتی که در سطح بستر رودخانه یا آبراهه به صورت پرش، غلتیدن و یا لغزش در حرکت هستند گفته می‌شود.

- بار شسته [4]:

آن قسمت از بار معلق که اندازه آن کوچک‌تر از ذراتی است که در مواد بستر یافت و حالت تعلیق آن دایمی‌تر می‌باشد. بده بار شسته در طول یک بازه تنها به ذرات قابل دسترس در سطح بستگی دارد و به ظرفیت انتقالی جریان وابسته نمی‌باشد.

- بده کل رسوب[5]:

به مجموع کل بار معلق و بار بستر، بده (بار) کل رسوب گفته می‌شود.

این ایستگاه‌ها نیز همانند ایستگاه‌های آب‌سنجی لازمست در محدوده مورد مطالعه و سرشاخه‌های آن شناسایی و روی پلان و نقشه‌های موجود از مسیر رودخانه پیاده شوند، همچنین باید دستگاه‌های نمونه‌برداری رسوب در محدوده مورد مطالعه بررسی و در صورت لزوم تجهیز و تکمیل شوند. علاوه بر آن پیشنهاد تاسیس ایستگاه‌های جدید رسوب سنجی بر روی شاخه اصلی و سرشاخه‌های آن همراه با تعیین محل استقرار آنها و ارائه دستورالعمل نحوه برداشت نمونه‌ها و آزمایش‌های لازم ارائه شود.

۴-۱-۳- آمار و اطلاعات مواد رسوبی

تعیین دانه‌بندی مواد رسوبی در بازه‌های مختلف رودخانه از ملزومات برقراری رابطه تعادل رودخانه با سایر پارامترهای تعادلی نظیر بده جریان، شیب و بده رسوبی بوده و در شناسایی وضعیت موجود ریخت‌شناسی و پیش‌بینی شرایط آتی آن کمک شایانی می‌کند. در این راستا برنامه جمع‌آوری داده‌های پایه رسوب و دانه‌بندی آنها شامل موارد زیر می‌باشد[۶۳].

نمونه‌های رسوب معلق باید به تعدادکافی ودر دوره اندازه‌گیری مشخص تهیه و تحلیل شوند تا غلظت رسوبات به صورت تابعی از بده جریان و ترکیب اندازه ذرات برآورد گردند. همچنین نحوه انتخاب موقعیت نمونه‌ها نیز باید شاخص تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه در اثر تغییرات مواد رسوبی معلق را نشان دهد.

---

1 - Bed Material Load
2 - Suspended Load
3 - Bed Load
4 - Wash Load
5 - Total Sediment Discharge

- نمونه‌های بار بستر نیز باید در تعداد و دوره اندازه‌گیری تهیه و تحلیل شوند تا غلظت آنها به صورت تابعی از بده جریان و نوع و اندازه ذرات جابجا شده برآورد گردند. در این بخش نیز موقعیت برداشت نمونه‌ها باید شاخص تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه در اثر تغییرات مواد رسوبی باشد.
- نمونه‌های مواد سطحی بستر (کف و کناره) برای تعیین دانه‌بندی و ترکیب مصالح بستر تهیه شوند.
- حفاری گمانه‌های دستی نیز در بستر و کناره‌ها تا عمقی که مشخص کننده ضخامت مصالح آبرفتی و فاصله تا سنگ بستر و توزیع اندازه ذرات رسوبات لازم باشد، ضروری است.

۴-۱-۴- نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای

استفاده از نقشه‌ها و عکس‌های هوایی کاربرد وسیعی در مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه و بررسی وضعیت تاریخی تغییرات و جابجایی آن، الگوی کلی و ابعاد رودخانه، عوامل محدود کننده توپوگرافی و زمین‌شناسی، وضعیت دیواره‌های رودخانه، تشخیص بازه‌های فرسایشی، نوع اراضی ساحلی و نحوه بهره‌برداری از آنها و موقعیت تاسیسات واقع در رودخانه دارد [۸۲ و۶۳]. در این راستا نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس نظیر نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ یا ۱:۵۰۰۰۰ برای شناسایی منطقه طرح و شرایط کلی رودخانه و نقشه‌های کوچک مقیاس۱:۱۰۰۰ یا ۱:۲۰۰۰ برای مطالعه خاص و جزییات بازه‌های رودخانه مورد استفاده قرار می گیرند[۴۹و۸۲].

با استفاده از عکس‌های هوایی تغییرات زمینی به طور مناسب‌تری در مقایسه با نقشه‌های زمینی قابل تشخیص می‌باشد، چرا که اگر امکان تهیه ۲ سری نقشه زمینی در هر ۵۰ سال باشد، می‌توان عکس‌های هوایی را با هزینه و زمان کم‌تر و تناوب بیش‌تری (مثلا هر ۵ سال یکبار) تهیه نمود که از این طریق می‌توان تاثیر عوامل مختلف را بر رفتار رودخانه بررسی کرد. [۸۲].

حداکثر مقیاس عکس‌های هوایی جهت انجام مطالعات ریخت‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ می‌باشد[۷۵]، همچنین به منظور بررسی تغییرات تاریخی رودخانه نقشه‌ها و عکس‌های هوایی سنوات گذشته به یک مقیاس (ترجیحا ۱:۱۰۰۰۰) برای مقایسه تبدیل می‌شوند[۲۹].

در سال‌های اخیر تصاویر ماهواره‌ای با مقیاس‌های ۱:۱,۰۰۰,۰۰۰، ۱:۵۰۰,۰۰۰، ۱:۲۵۰,۰۰۰و ۱:۱۰۰,۰۰۰ که در زمان‌های مختلف قابل تهیه می‌باشند در مطالعات ریخت‌شناسی کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند.

در برخی مناطق به واسطه محدودیت دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای یا عکس‌های هوایی، می‌توان از تطبیق و مقایسه تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی با فاصله زمانی مختلف، تغییرات عرضی و طولی رودخانه را بررسی کرد.

۴-۱-۵- اطلاعات زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی

اطلاعات زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی از مطالعات پایه ضروری برای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه می‌باشد. در این خصوص اطلاعات زیر باید برای تجزیه و تحلیل‌های مربوط به تاثیر عوامل زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی بر وضعیت موجود و آتی ریخت‌شناسی رودخانه به شرح زیر جمع‌آوری گردد[۹].

- اطلاعات مربوط به تشکیلات سطحی زمین‌شناسی منطقه و به خصوص بستر و کناره‌های رودخانه در محدوده مورد مطالعه از نقطه نظر میزان حساسیت آنها به فرسایش، لغزش و ریزش

- اطلاعات مربوط به خصوصیات درزها و شکاف‌ها، گسل‌ها و دیگر عوارض زمین‌شناسی، همچنین در مورد گسل‌ها باید وضعیت آنها از نظر فعال یا غیر فعال بودن مشخص گردد.
- اطلاعات مربوط به خصوصیات زمین‌شناسی آبخوان‌های زیرزمینی محدوده طرح نظیر تشکیلات آهکی، کارستی و یا آبرفتی و نیز موقعیت، عمق و دامنه گسترش هر یک از این تشکیلات. این سازندها علاوه بر آن‌که ممکن است به دلیل سستی بر پایداری کناره‌های رودخانه تاثیرگذار باشند، به دلیل قدرت ذخیره آب‌های زیرزمینی در خود، ممکن است پایداری سازه‌ها را با مشکلاتی مواجه نمایند.
- اطلاعات مربوط به نوع و شکل عوارض سطحی زمین و موقعیت این عوارض از نقطه نظر آثار آنها بر ریخت‌شناسی رودخانه در محدوده مورد مطالعه
- نقشه‌های زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی منطقه طرح در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و در صورت عدم وجود در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰

۴-۱-۶- اطلاعات فیزیوگرافی رودخانه و مشخصات هندسی مسیر

اطلاعات حاصل از مطالعات فیزیوگرافی و مشخصات هندسی مسیر در بخش‌هایی مانند مطالعات هیدرولوژی و هیدرولیک نیز در مطالعات ریخت‌شناسی به منظور تحلیل پدیده‌های ریخت‌شناسی و برقراری ارتباط بین عوامل مختلف کاربرد دارد. به طور مثال میزان شیب در بازه‌های مختلف رودخانه به برقراری ارتباط آن با عواملی مانند بده، دانه‌بندی و بده رسوب و در ادامه تحلیل وضعیت ریخت‌شناسی موثر است. به همین شکل مشخصات هندسی مانند عرض رودخانه در مقاطع مختلف و مشخصات هندسی خم‌ها و پیچاب‌ها و استخراج زاویه مرکزی و میزان ضریب پیچشی (نسبت پیچشی) آن در تحلیل پایداری و پیش‌بینی شرایط آتی رودخانه در بازه‌های مورد نظر کمک شایانی می‌کند. در این راستا اطلاعات زیر در این بخش از مطالعات ضروری می‌باشد.

- کسب اطلاع از محدوده حوضه آبریز رودخانه، سرچشمه‌های آن و سرشاخه‌های فرعی و اصلی آن
- بررسی راه‌های دسترسی به مناطق مختلف مسیر رودخانه و همچنین سایر مناطق مرتبط با طرح
- محاسبه و مشخص کردن پارامترهای فیزیوگرافی (نظیر وسعت، شیب و ارتفاع حوضه آبریز)
- محاسبه مشخصات هندسی مسیر رودخانه نظیر عرض رودخانه در مقاطع مختلف، شعاع خم‌ها و در ادامه محاسبه شعاع نسبی (نسبت شعاع به عرض)، تعیین زاویه مرکزی خم و ضریب پیچشی پیچاب‌ها

۴-۱-۷- اطلاعات حاصل از بازدیدها و مطالعات صحرایی

انجام بازدیدهای صحرایی از بازه‌های مختلف رودخانه در محدوده مورد نظر برای مطالعات ریخت‌شناسی، اطلاعات فیزیکی و پایه‌ای مفیدی را فراهم می‌کند. بازدیدها و مشاهدات صحرایی، ضعف مطالعات ناشی از انجام کار صرفا دفتری را جبران می‌کند و یک نگرش معقول، منطقی و واقعی به طراح می‌دهد. اطلاعات به دست آمده از بازدیدهای صحرایی شامل پیکربندی مسیر رودخانه (شکل پلان)، مشخصات مقاطع عرضی و شیب رودخانه، مواد و مصالح بستر و کناره‌ها، بده جریان، خصوصیات رسوب، کیفیت آب، نحوه بهره‌برداری از منابع رودخانه‌ای، کاربری اراضی حاشیه رودخانه‌ها، وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری در مسیر رودخانه، سازه‌های موجود در مسیر رودخانه و وضعیت زمین‌شناسی عمومی مسیر رودخانه می‌باشد.

به طور کلی در مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه بازدیدهای صحرایی با اهداف عمده زیر انجام می‌گیرد:[۹]

- پیمایش و بررسی بازه‌ها و یا نقاط فرسایش‌پذیر و تهیه کروکی از وضعیت موجود رودخانه
- پیمایش و بررسی سازه‌ها و تاسیسات اطراف و داخل رودخانه و تاثیر آنها بر ریخت‌شناسی رودخانه نظیر پل‌ها، دیواره‌های سیل بند، خاکریزها، آبشکن‌ها، سدها و بندهای انحراف آب
- شناسایی مناطق مختلف برداشت مصالح رودخانه‌ای
- پیمایش و تعیین ویژگی‌های زمین‌شناسی عمومی مسیر رودخانه

نتایج و اطلاعات به دست آمده از بازدیدهای صحرایی می‌تواند به عنوان اطلاعات اولیه در مطالعات مربوط به ریخت‌شناسی رودخانه استفاده شود.

۴-۲- مطالعات مورد نیاز

۴-۲-۱- مطالعات هیدرولوژی

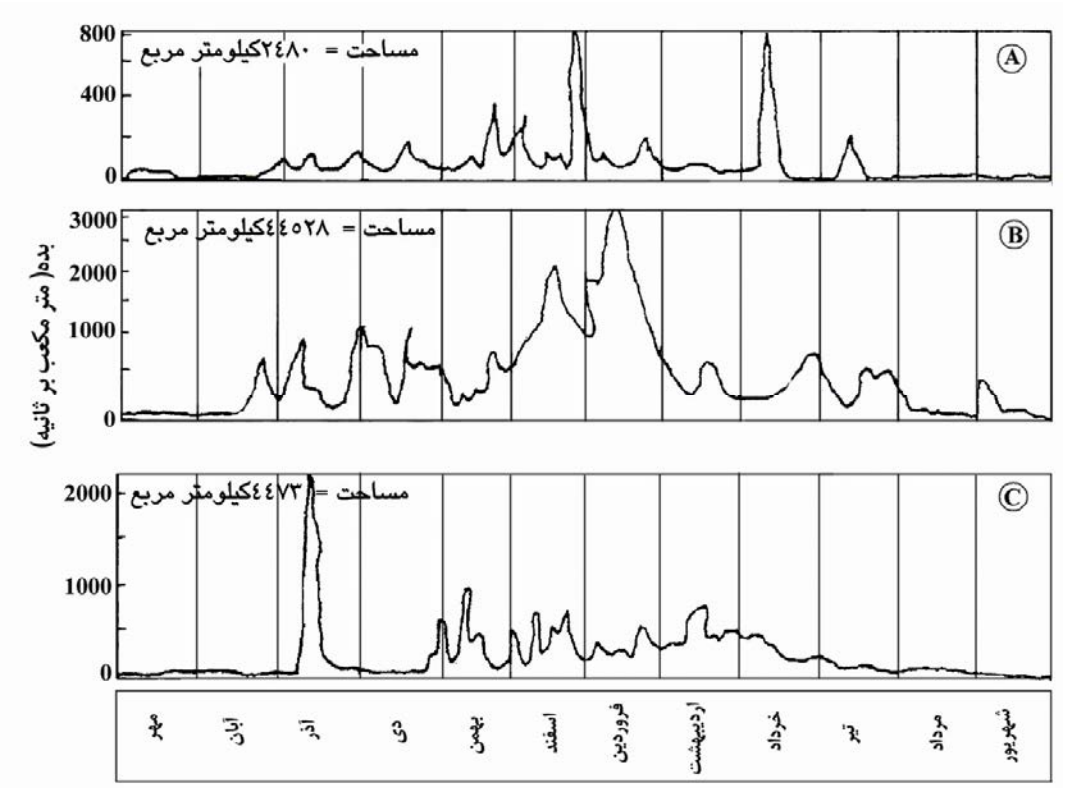
برای شناخت خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه آگاهی از ویژگی‌های هیدرولوژی حوضه آبریز مربوط به آن ضروری است. وقوع سیلاب‌ها، تداوم دوره‌های ترسالی و خشکسالی، تغییرات فصلی و روزانه بده جریان از جمله عوامل تاثیرگذار در شکل‌گیری مشخصه‌های هندسی مسیر، جابجایی‌های عرضی و طولی، تشکیل میانبرها و سایر پدیده‌های ریخت‌شناسی در رودخانه‌ها تلقی می‌شود [۸۱،۸۳]. در مواردی تغییر روند آبدهی رودخانه ناشی از احداث سازه‌های کنترل جریان نظیر سدها، بندها و تاسیسات برداشت آب، خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. در این خصوص وقوع کف‌کنی در پایین‌دست سدهای مخزنی و رسوب‌گذاری در بازه‌های بالادست که حاصل مهار جریان‌های عادی و سیلابی در مخزن سد و برقراری جریان تنظیمی می‌باشد، از نمونه‌های بارز تاثیرگذار در رفتار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌باشد. در زیر جزییات بیش‌تری از تعامل هیدرولوژی و ریخت‌شناسی ارائه شده است.

۴-۲-۱-۱- تعیین رژیم جریان

رژیم جریان یا رژیم هیدرولوژیک[1] معرف تغییرات بده جریان در یک دوره زمانی معین می‌باشد. تغییرات جریان سالانه از جمله شاخص‌های متداول برای تعیین رژیم جریان رودخانه بوده و اصطلاحا آبنمود جریان سالانه[2] نامیده می‌شود [۵۵]. در شکل (۴-۱) سه نمونه از رژیم جریان سالانه متفاوت برای رودخانه‌های مختلف نشان داده شده است. بررسی شکل (۴-۱) تفاوت آشکار رودخانه‌ها را از نظر رژیم آبدهی و توزیع زمانی جریان به خوبی آشکار می سازد. به عنوان مثال در رودخانه A تداوم جریان‌های سیلابی در مقایسه با رودخانه B بسیار کوتاه بوده و این رودخانه در بعضی ماه‌های سال عملا دوره خشکی را تجربه می‌کند. از طرفی رودخانه C را می‌توان حالت میانه دو رودخانه A وB تلقی نمود. بدیهی است هر یک از آبنمودهای مزبور تاثیر خود را بر خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه اعمال می‌نماید. از دیدگاه ریخت‌شناسی در رودخانه A فرآیندهای ریخت‌شناسی عملا به زمان وقوع سیلاب‌ها محدود می‌گردد. به

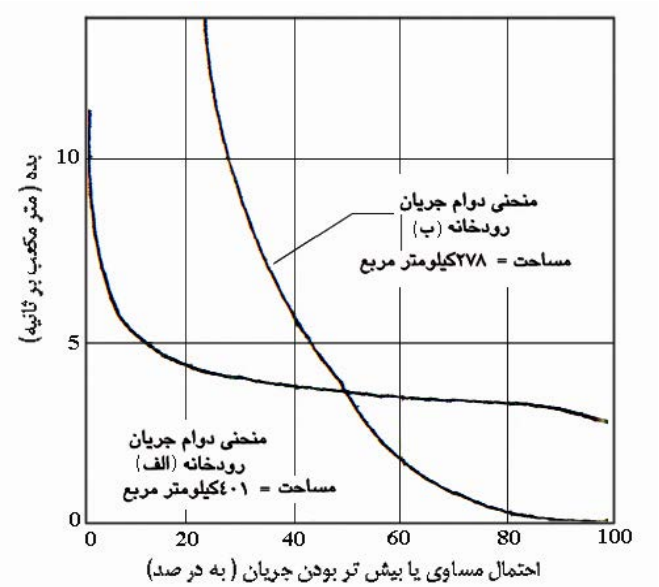
1- Hydrologic Regime
2- Annual Hydrograph

علاوه در این نوع رودخانه‌ها وقوع سیلاب‌های ناگهانی می‌تواند منجر به تغییرات سریع در مشخصه‌های هندسی رودخانه شود. بدیهی است پس از فروکش سیلاب‌ها با توجه به کاهش محسوس آبدهی و تقلیل پتانسیل انتقال رسوب، ساز و کارهای ریخت‌شناسی نیز عملا تقلیل یافته و تا وقوع سیلاب بعدی تغییر محسوسی در رودخانه قابل انتظار نمی‌باشد. در خصوص رودخانه B با توجه به تداوم جریان‌های سیلابی و برقراری رژیم آبدهی دایمی دوره فعالیت برای پدیده‌های ریخت‌شناسی نیز در مقایسه با رودخانه A به طور محسوسی بیش‌تر بوده و چنین رودخانه‌ای عملا در بخش اعظمی از سال عرصه تغییر و تحولات مستمر ریخت‌شناسی می‌باشد. در مواردی نیز وقوع سیلاب‌های بزرگ می‌تواند منجر به تغییرات عمده‌ای در مشخصه‌های ریخت‌شناسی رودخانه شود. برای رودخانه C نوسان آبدهی و دامنه سیلاب‌ها در مقایسه با رودخانه‌های A و B کم‌تر بوده و دارای رژیم جریان متعادلی است. به پیروی از رژیم آبدهی فعل و انفعالات ریخت‌شناسی نیز از آهنگ منظمی برخوردار بوده و تحولات سریع و ناگهانی به گونه‌ای که برای رودخانه‌های A و B قابل انتظار است در رودخانه C پیش‌بینی نمی‌شود. استفاده از منحنی دوام جریان[1] روش متداول دیگری برای معرفی رژیم جریان رودخانه می‌باشد. شکل (۴-۲) دو نمونه از منحنی دوام جریان را برای دو رودخانه متفاوت نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴-۲) رودخانه (الف) دارای رژیم جریان یکنواخت و منظم‌تری در مقایسه با رژیم آبدهی غیریکنواخت رودخانه (ب) می‌باشد. همانطوری که در فوق، نیز اشاره شد برای رودخانه (الف) تغییرات ریخت‌شناسی دارای آهنگ منظمی بوده و برای رودخانه (ب) امکان وقوع پدیده‌های ریخت‌شناسی غیر منظم با توجه به رژیم آبدهی غیر یکنواخت آن وجود دارد.



شکل ۴-۱- مواردی از آبنمود جریان سالانه (رژیم جریان) برای چند رودخانه متفاوت[۵۵ و ۲۲]

1 - Flow Duration Curve



شکل ۴-۲- مقایسه منحنی‌های دوام جریان (رژیم جریان) برای دو رودخانه متفاوت [۵۵ و ۲۲]

۴-۲-۱-۲- بررسی خصوصیات سیلاب‌ها با دوره برگشت های مختلف

نقش سیلاب در تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در خور توجه است. سیلاب‌ها دارای انرژی جنبشی زیادی بوده و با جابجایی حجم قابل توجهی از آب و رسوب تاثیر خود را بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه اعمال می نمایند[۴۲]. وقوع سیلاب اغلب منجر به بروز کف‌کنی‌ها و یا رسوب‌گذاری‌های ممتد و متناوب در بازه‌های مختلف از مسیر رودخانه می‌شود. از این رو در مطالعات ریخت‌شناسی لازم است کمیت و تداوم سیلاب‌ها مورد بررسی قرار گیرد. مقدار سیلاب به پیروی از دوره بازگشت[1] تغییر می‌کند و بنابراین در فرآیند مطالعات ریخت‌شناسی لازم است با توجه به اهداف مورد نظر دوره بازگشت سیلاب مشخص شود. در تحلیل سیلاب‌ها معمولا سری آماری موجود از ایستگاه‌های آب‌سنجی حاصل و با استفاده از روش احتمالاتی متداول بررسی می‌شود. از جمله روش‌های مناسب برای تعیین دوره بازگشت سیلاب‌ها روش گامبل[2] و روش پیرسون[3] III را می‌توان نام برد. جزییات بیش‌تر در خصوص مبانی تئوری و معادلات مختلف توزیع‌های آماری را می‌توان در منابعی نظیر [۵۵] و[۹۳] جستجو نمود. چاو[4] برای تعیین مقدار سیلاب استفاده از رابطه زیر را پیشنهاد نموده است[۹۳]. این رابطه مبنای تعیین مقادیر سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف تلقی می‌شود:

$$Q_{max} = \overline{Q}_{max} + KS \qquad (۱-۴)$$

که در این رابطه:

Q_{max}: بده سیلاب حداکثر نظیر دوره بازگشت مورد نظر (متر مکعب بر ثانیه)

$\overline{Q}_{max}$: بده میانگین سیلاب‌های حداکثر لحظه‌ای سالانه مشاهده شده (متر مکعب بر ثانیه)

---

1 - Recurrence Interval
2 - Gumbel
3 - Pearson Type III
4 - Ven Ti Chow

K: فاکتور فرکانس که معرف دوره بازگشت سیلاب می‌باشد و از جداول استاندارد تعیین می‌شود.

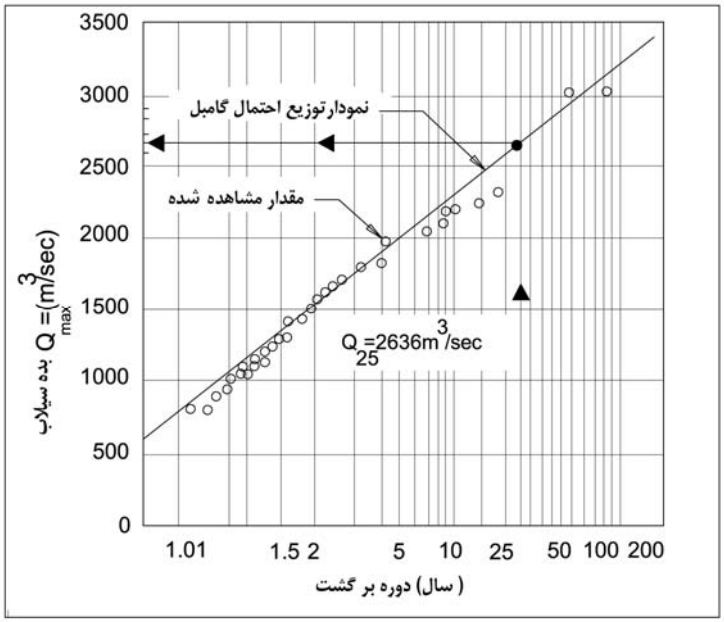
S: انحراف معیار نظیر سری آماری سالانه سیلاب‌ها

در شکل (۴-۳) نمونه‌ای از توزیع فراوانی سیلاب حداکثر لحظه‌ای سالانه از روش گامبل نشان داده شده است. مطابق نمودار مزبور، سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال برای یک رودخانه مفروض برابر با ۲۶۵۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

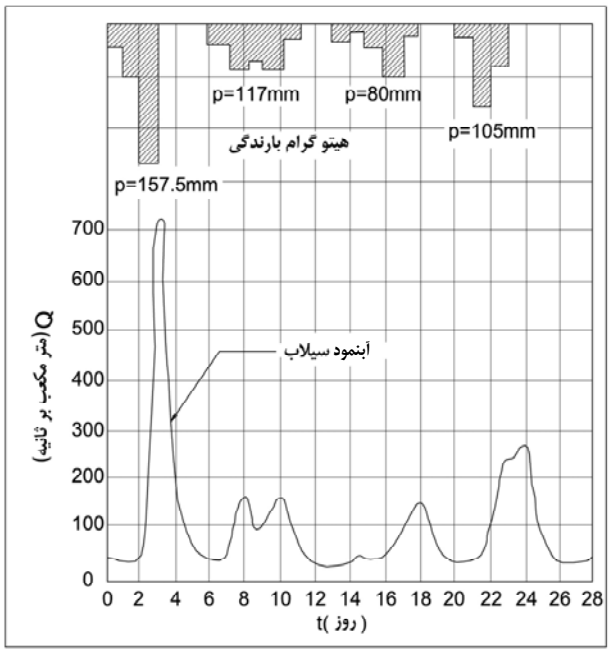
در مطالعات ریخت‌شناسی لازم است علاوه بر مقدار سیلاب، به شکل آبنمود جریان و مدت دوام سیل نیز توجه شود. روش‌های مختلفی برای تعیین شکل آبنمود سیلاب وجود دارد. مناسب‌ترین و مطمئن ترین روش، ثبت تغییرات آبدهی رودخانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی می‌باشد، شکل (۴-۴) نمونه‌ای از ثبت سیلاب را در یک ایستگاه آب‌سنجی به نمایش می‌گذارد. در این شکل همچنین نمودار بارندگی هم‌زمان نیز نشان داده شده است.

۴-۲-۱-۳- بررسی دوره‌های خشکسالی و ترسالی

نظام آبدهی در رودخانه‌ها ثابت نبوده و در سال‌های مختلف مقدار بده جریان تغییر می‌کند. بدیهی است چنین تغییرات متوالی بر خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه تاثیر مستقیم دارد. با تغییر بده جریان در سال‌های مختلف، آورد رسوب رودخانه نیز دچار نوسان گردیده و این امر به نوبه خود روند تغییرات ریخت‌شناسی را دستخوش دگرگونی می‌کند. تغییرات آبدهی سالانه معمولا حول یک کمیت متوسط در نوسان است. از این رو به پیروی از شرایط آب و هوایی، دوره‌های خشکسالی و ترسالی در رودخانه‌ها مشاهده می‌شود. در دوره ترسالی بده جریان به تدریج افزایش یافته و مقدار حداکثر خود را در پر آب‌ترین سال تجربه می‌کند. در دوره خشکسالی برعکس بده جریان رودخانه رو به کاهش گذاشته و طی چند سال متوالی سرانجام حداقل بده جریان اتفاق می افتد [۳۳].

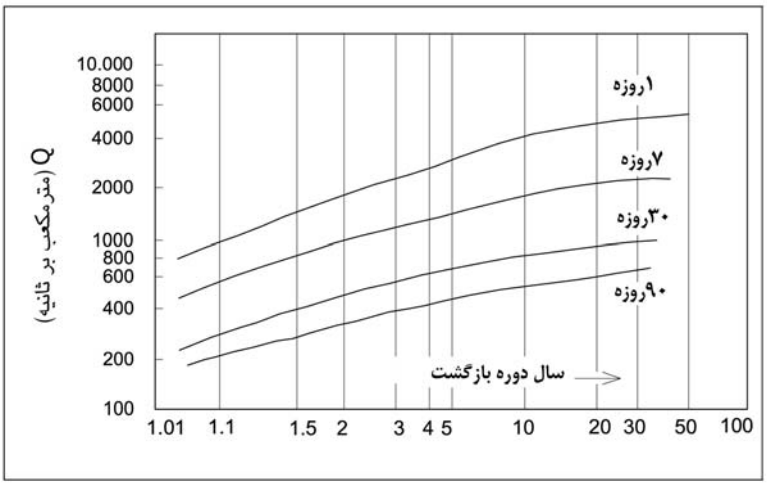


شکل ۴-۳-نمونه‌ای از منحنی توزیع فراوانی سیلاب حداکثر سالیانه به روش گامبل [۹۳].

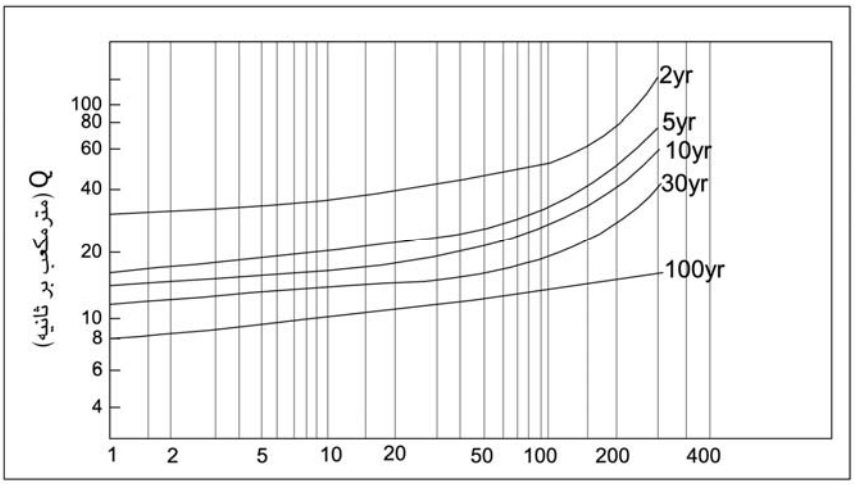


شکل ۴-۴-نمایش آبنمود سیلاب‌های ثبت شده در یک ایستگاه آب‌سنجی [۵۶].

برای تعیین کمیت جریان در دوره‌های خشکسالی و ترسالی منحنی فراوانی آنها با استفاده از توزیع های آماری ترسیم می‌گردد. در شکل‌های (۴-۵) و (۴-۶) نمونه‌ای از سری منحنی‌های فراوانی برای دوره‌های آماری پرآبی و کم آبی نشان داده شده است. مطابق نمودارهای مزبور با افزایش دوره بازگشت مقدار آبدهی در دوره ترسالی افزایش یافته و در دوره خشکسالی بر عکس به طور محسوسی رو به کاهش می‌گذارد.



شکل ۴-۵- نمونه‌ای از سری منحنی‌های دوره پر آبی با تداوم ۱ تا ۹۰ روزه [۹۳]



شکل ۴-۶- نمونه‌ای از منحنی‌های فراوانی نظیر جریان های کم آبی ۱ تا ۳۶۵ روزه [۹۳]

۴-۲-۱-۴- تعیین بده غالب[1]

بده غالب از جمله شاخص‌های هیدرولوژی در مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌باشد. طبق تعریف بـده غالـب مقـدار آبـدهی ثابت فرضی است که تغییرات بلند مدت رفتار رودخانه را می‌توان براساس آن پیش‌بینی نمود [۴۷]. در فرهنگ مهندسی رودخانه نیـز بده غالب به صورت زیر تعریف شده است[۲۰].

در بعضی از منابع مقدار بده غالب را معادل با بده متوسط سالانه، سیلاب بـا دوره بازگـشت ۲ سـال و گـاهی بـده لبریـز توصـیه کرده‌اند. [۷۰]، با تحلیل سیلاب‌ها و تعیین دوره بازگشت آنها می‌توان مقدار بده غالب را مشخص نمود. در جریـان‌هـای تنظیمـی در پایین‌دست سدها بده غالب عموما به آبدهی متوسط سالانه نزدیک‌تر است. دلیل این امر استهلاک سیلاب‌هـای بـا دوره بازگـشت ۲ سال و کم‌تر توسط مخزن سد و رها سازی آب کنترل شده با آبدهی نسبتا ثابت است[۷۰]. بـدیهی اسـت چنـین تغییراتـی در رژیـم آبدهی رودخانه تاثیر زیادی بر خصوصیات ریخت‌شناسی داشته و نقش بده غالب را در فرآیندهای ریخت‌شناسی آشکار می‌نماید.

۴-۲-۲- مطالعات هیدرولیک جریان

در مطالعات هیدرولیک جریان رودخانه، شرایط عمومی جریان و مشخصات آن نظیر سرعت، عمق، تراز سـطح آب، شـیب سـطح آب (نیمرخ طولی) و تنش برشی جریان تعیین می‌گردد.

از مهم‌ترین جنبه‌های مطالعاتی تمامی پروژه‌های رودخانه‌ای، مطالعات هیدرولیک جریـان رودخانـه اسـت. جهـت تبیـین کـاربرد مطالعات هیدرولیک جریان و نقش اساسی آن در مطالعات ریخت‌شناسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- نسبت عرض به عمق، از مهم‌ترین عوامل ریخت‌شناسی است که برای تعیین آن باید از نتایج هیدرولیک (محاسبه عمق) بهره جست.
- جهت تقسیم‌بندی رودخانه‌ها، طبقه‌بندی و پیش‌بینی رونـد تغییـرات آنهـا در برخـی روش‌هـا از مشخـصات هیـدرولیکی استفاده می‌شود. در هر یک از این روش‌ها مشخصه‌هایی از جریان، مانند عمق و عرض سطح آزاد جریان به کار مـی‌رود.

1 - Dominant Discharge

برای نمونه می‌توان به تقسیم‌بندی ارائه شده توسط راسگن[1] اشاره کرد که یکی از مهم‌ترین معیارهای طبقه‌بندی در این روش، شاخص گود افتادگی بستر[2] است که عبارتست از نسبت عرض ناحیه سیلاب‌گیر (عرض رودخانه در ارتفاعی معادل دو برابر حداکثر عمق جریان در بده لبریز) به عرض سطح آزاد آب در بده لبریز رودخانه[3] [۷۱].

- جهت تخمین فرسایش‌پذیری یا رسوب‌گذاری بازه‌ها و تعیین بازه‌های پایدار و ناپایدار، عامل تنش برشی که از مطالعات هیدرولیک به دست می‌آید، نقشی بسیار مهم دارد.

۴-۲-۲-۱- نقشه برداری و تعیین خصوصیات هندسی مسیر

از جمله اطلاعات مقدماتی و ضروری در مطالعات هیدرولیک، ساخت مدل و محاسبات هیدرولیکی لازم، هندسه رودخانه است که این امر با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و یا برداشت‌های صحرایی انجام می پذیرد. مقیاس این نقشه‌ها با توجه به دو عامل دقت لازم و مقدار جزییات مورد نیاز تعیین می‌گردد. معمولا طبق استانداردهای نقشه برداری و نقشه کشی، میزان خطا روی نقشه‌ها به ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر محدود می‌شود (به طور متوسط ۰/۳۳ میلی‌متر). بر این اساس اگر تهیه نقشه‌ای با حداکثر ۵ متر خطا در طبیعت مورد نظر باشد، مقیاس نقشه‌ها باید حداقل برابر ۱/۱۵۰۰۰ ($\frac{۰/۳۳}{۵۰۰۰}$) باشد. از سوی دیگر زمانی که اطلاعات خیلی جزیی روی نقشه‌ها قرار داده شود، نقشه بسیار شلوغ شده و خواندن اطلاعات از روی آن مشکل می‌شود لذا استفاده از مقیاس بزرگ‌تر، مناسب‌تر خواهد بود (در این‌جا ۱/۱۰۰۰۰) [۴۶].

در حالت کلی می‌توان مقیاس مورد نیاز نقشه‌ها را به سه دسته تقسیم کرد.

- بازه‌هایی به طول ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر (یا بیش‌تر): مقیاس ۱/۵۰۰۰۰
- ویژگی‌های کلی مجرای رودخانه و تاثیر طرح‌های ساماندهی بر آن: مقیاس ۱/۲۰۰۰ تا ۱/۱۰۰۰۰
- شبیه‌سازی کامل جریان و مدل کردن سازه‌های طولی و عرضی نظیر پل‌ها، موقعیت‌های برداشت آب از رودخانه و به طور کلی پیش‌بینی تاثیر طرح‌های ساماندهی و سازه‌های احداث شده در مسیر رودخانه به ویژه در نواحی شهری: مقیاس ۱/۵۰۰ تا ۱/۱۰۰۰[۶۵].

خصوصیات هندسی مسیر شامل پلان، مقاطع عرضی و طولی رودخانه، موقعیت و مشخصات سازه‌های هیدرولیکی است. تعداد مقاطع عرضی بستگی به تغییرات شکل مقطع در طول رودخانه و دقت مورد نیاز در مطالعات دارد. در هر صورت تعداد مقاطع باید به اندازه‌ای باشد که تغییرات شدید در شکل مقطع را در نظر بگیرد. برای کارهای رودخانه‌ای، فاصله مقاطع عرضی از ۵۰ متر تا بیش از یک کیلومتر متناسب با هدف طرح ودقت مورد نیاز و میزان تغییرات رودخانه در نظر گرفته می‌شود. در هنگام برداشت مقاطع عرضی علاوه بر مقطع اصلی، سیلابدشت موجود در طرفین رودخانه نیز به اندازه کافی برداشت شود.

برای مدل‌سازی هیدرولیک رودخانه ابتدا کلیه اطلاعات هیدرولوژیکی و هندسی رودخانه جمع‌آوری می‌گردد و در صورت عدم وجود اطلاعات هندسی مناسب از رودخانه، دستور العمل نحوه برداشت مقاطع عرضی و موقعیت آنها تهیه می‌گردد. برای تهیه دستورالعمل نقشه‌برداری، ابتدا از بازه‌های مختلف رودخانه و سازه‌های تقاطعی آن بازدید به عمل آمده و براساس شرایط موجود،

---

1 - Rosgen
2 - Entrenchment Ratio
3 - Bankfull Discharge

موقعیت مقاطع عرضی مورد نیاز روی نقشه با مقیاس مناسب مشخص می‌گردد. در رابطه با سازه‌های تقاطعی نیز طبق دستورالعمل معمول در محاسبات هیدرولیک عمل می‌شود [۱۳].

۴-۲-۲-۲- تعیین ضریب زبری بستر رودخانه در طول بازه‌های مختلف

مقاومت در مقابل جریان در ضریب زبری‌های مختلف نظیر زبری مانینگ[1]، شزی[2] و دارسی – وایسباخ[3] بیان می‌گردد. ضریب زبری مانینگ بیش‌تر در ارتباط با رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب تعریفی از مقاومت ناشی از زبری، هندسه جداره‌های رودخانه و مصالح آن را در مقابل مشخصات جریان ارائه می‌دهد. ضریب زبری از مهم‌ترین عوامل موثر برای تعیین بده، سرعت و عمق جریان و همچنین واسنجی[4] مدل‌های ریاضی است. این عامل بستگی مستقیم به شرایط هیدرولیک، دانه‌بندی مواد بستر، شکل مسیر، وضعیت پوشش گیاهی و سایر عوامل مصنوعی و طبیعی موجود در مسیر رودخانه و سیلابدشت دارد. برای یک رودخانه ممکن است محدوده وسیعی از تغییرات درضریب زبری وجود داشته باشد. محدوده‌ها باید با استفاده از بازدید و قضاوت مهندسی تیپ‌بندی شوند و بر اساس شرایط تقریبا یکسان بازه‌ها، ضریب زبری برآورد گردد. تعیین ضریب زبری معمولا بر اساس بازدیدهای محلی، اندازه‌گیری صحرایی، قضاوت مهندسی، استفاده از جداول راهنما و روابط تجربی امکان‌پذیر است. لازم به ذکر است که در ارتباط با استفاده از هر یک از این روش‌ها، نکات زیر باید به دقت مورد توجه قرار گیرد.

- اثر سیلابدشت در شرایط سیلابی بسیار تعیین کننده است و حتما باید در تعیین ضریب زبری مورد بررسی دقیق قرار گیرد و در محاسبات ملحوظ گردد. ضریب زبری برای بستر اصلی و سیلابدشت به تفکیک باید تعیین و منظور شود.
- دانه‌بندی مواد بستر رودخانه و سیلابدشت در اغلب روابط ارائه شده تاثیر مستقیم دارد و لذا لازم است تا در بررسی‌های صحرایی، مسیر مورد مطالعه به شکل مناسبی به بازه‌های مختلف تقسیم شود و با نمونه‌برداری از مواد بستر در بازه‌های مختلف، نسبت به تهیه منحنی دانه‌بندی آنها اقدام شود.
- اکثر روابط ارائه شده توسط محققان، مربوط به ضریب زبری مانینگ است ولی ضریب زبری شزی نیز در مطالعات هیدرولیک رودخانه کاربرد وسیعی دارد. برای تعیین ضریب شزی، علاوه بر روابط مستقیمی که در منابع مربوط ارائه شده است، می‌توان از رابطه زیر که ارتباط آن را با ضریب زبری مانینگ برقرار می سازد، استفاده نمود:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \qquad (۲-۴)$$

که در این رابطه C: ضریب شزی، n: ضریب مانینگ و R شعاع هیدرولیکی مقطع جریان است.

- در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای، شکل بستر به مقدار زیادی برضریب زبری n تاثیر می‌گذارد و بهتر است به جای ضریب زبری مانینگ، از روش انیشتن– باربارو‌سا برای تعیین ضریب زبری رودخانه استفاده شود [۱۳].

در ادامه کاربردی‌ترین روش‌های تخمین ضریب زبری بیان می‌گردد:

---

1 - Manning Coefficient
2 - Chezy Coefficient
3 - Darcy-Weisbach
4 - Calibration

الف- استفاده از روش‌های تجربی

- چاو[1] برای تخمین مقادیر n بر اساس مشاهدات و وضعیت های مختلف پوشش گیاهی و شکل مقطع رودخانه جدولی را ارائه داد. این جدول مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر n را که از مشاهدات و تجربیات ایشان به دست آمده است، نشان می‌دهد.
- روش دیگر، مقایسه وضعیت و شرایط رودخانه تحت مطالعه با رودخانه‌های دیگر می‌باشد که در مراجع مختلف با نمایش تصویری از رودخانه، مقدار ضریب زبری آن ارائه شده است.

یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها، روش کاون[2] است که در آن مبنای محاسبه ضریب زبری، رابطه زیر است:

$$n=(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4)\,k$$

که در این رابطه n_0 یک ضریب پایه است که بر اساس اندازه ذرات بستر مشخص می‌شود.ضرایب n_1، n_2، n_3، n_4 و k به ترتیب دربرگیرنده اثرهای نامنظمی و چگونگی تغییرات سطح مقطع، وجود موانع در مسیر جریان، پوشش گیاهی و درجه مارپیچی بودن مسیر است. این روش تکامل یافته روش چاو می‌باشد. لازم به ذکر است که این روش فقط برای برآورد ضریب زبری مربوط به مقطع اصلی جریان به کار می‌رود و جهت تخمین ضریب زبری سیلابدشت باید از روش‌های دیگر (نظیر جدول چاو) استفاده کرد [۳۴].

- روش‌های تجربی دیگر مربوط به انجام کارهای آزمایشگاهی است که در آنها رابطه n براساس دانه‌بندی رسوبات به دست آمده است. این روابط فقط به عنوان مقدار پایه برای n در رودخانه به کار می رود. جدول (۴-۱) نمونه‌هایی از این روابط را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در روش‌های آزمایشگاهی، پوشش گیاهی، نامنظمی آبراهه، عمق و راستای آبراهه در نظر گرفته نشده است.

ب- استفاده از روش تصویری

برای تعیین ضریب زبری با استفاده از مقادیر عوامل هندسی و هیدرولیکی مجرا و بده نظیر، روشی موسوم به روش تصویری توسط بارنز[3] ارائه شده است. در این روش، ضرایب مقاومت با استفاده از مقادیر بده جریان، نیمرخ طولی سطح آب و مشخصات بازه مورد نظر برآورد می‌شود. در هر بازه، مشخصات هندسی و هیدرولیکی بیش از ۲ مقطع باید اندازه‌گیری شود [۲۸].

جدول ۴-۱ - روابط تجربی جهت برآورد ضریب زبری مانینگ بر اساس دانه‌بندی[۳۸]

نام محقق	سال	رابطه پیشنهادی	واحد اندازه قطر ذرات	موارد کاربرد
استریکلر	۱۹۲۳	$n = 0.047d_{50}^{\frac{1}{6}}$	متر	محدودیت خاصی ذکر نشده است
میر – پیتر و مولر	۱۹۴۸	$n = 0.038d_{90}^{\frac{1}{6}}$	متر	رودخانه‌ها با مصالح درشت دانه
کارلسون و لین	۱۹۵۳	$n = 0.026d_{75}^{\frac{1}{6}}$	متر	رودخانه‌ها با مصالح درشت دانه
هندرسون	۱۹۶۶	$n = 0.034d_{50}^{\frac{1}{6}}$	فوت	رودخانه‌ها با مصالح درشت دانه

1 - Chow
2 - Cowan
3- Barens

ادامه جدول ۴-۱ - روابط تجربی جهت برآورد ضریب زبری مانینگ بر اساس دانه‌بندی[۳۸]

نام محقق	سال	رابطه پیشنهادی	واحد اندازه قطر ذرات	موارد کاربرد
رودکیوی	۱۹۷۶	$n = 0.013d_{65}^{\frac{1}{6}}$	میلی‌متر	بستر غیر قابل متحرک
گاردی و راجو	۱۹۷۸	$n = 0.039d_{50}^{\frac{1}{6}}$	فوت	رودخانه‌ها با مصالح درشت دانه
سوبرامانیا	۱۹۸۲	$n = 0.047d_{50}^{\frac{1}{6}}$	متر	محدودیت خاصی ذکر نشده است

ج- استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت

از لحاظ تئوریک، با توجه به آن‌که سرعت مقطع به زبری محیط بستگی دارد، ضریب مقاومت جریان را می‌توان از طریق اندازه‌گیری‌های سرعت تخمین زد. در مورد مجاری عریض با بستر کاملا زبر که دارای توزیع لگاریتمی سرعت در امتداد قائم باشند، ضریب زبری مانینگ با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌شود [۳۸].

$$n = \frac{(X-1)D^{1/6}}{5.56(X+0.95)} \qquad (۴-۴)$$

که در این رابطه D میانگین عمق جریان و X نسبت سرعت جریان در عمق ۰/۲ به سرعت جریان در عمق ۰/۸ از سطح آب می‌باشد.

در مطالعات هیدرولیک، معمولا داده‌های اندازه‌گیری شده نظیر سرعت جریان وجود ندارد و یا در مورد بعضی داده‌ها نظیر بده جریان، در نقاط محدودی وجود دارد لذا می‌توان گفت بهترین روش جهت تخمین ضریب زبری، استفاده از روش‌های تجربی است. در بین روش‌های تجربی، روش‌هایی مانند روش کاون با توجه به ملحوظ نمودن عوامل فراوان موثر بر ضریب زبری، دارای دقت بهتری هستند [۲۸].

۴-۲-۲-۳- کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب جهت تحلیل رفتار هیدرولیک جریان

نرم افزارهای کامپیوتری ابزار مناسب، دقیق و سریع برای انجام محاسبات هیدرولیک رودخانه با به کارگیری روابط و معادلات و محدودیت‌های آن می‌باشند. با توجه به پیشرفت روزافزون تکنولوژی کامپیوتر و نظر به قابلیت‌های بالا و سرعت زیاد آن، در چند ساله اخیر استفاده از کامپیوتر برای تجزیه و تحلیل مسایل مختلف، توسعه فراوانی یافته است. علم هیدرولیک نیز از این امر مستثنی نبوده و طی سال‌های اخیر نرم‌افزارهای زیادی جهت تجزیه و تحلیل، شبیه‌سازی، طراحی، مدیریت و کنترل سیلاب در رودخانه‌ها تهیه و تنظیم گردیده‌اند. برخی از این نرم‌افزارها قادرند مسایل مختلفی از جمله عواملی مربوط به حوضه آبریز، سازه‌های قرار گرفته در مسیر جریان، مسایل مربوط به ریخت‌شناسی و... را شبیه‌سازی نمایند. نکته قابل تامل در این نرم‌افزارهای کامپیوتری این است که هر کدام از آنها بر فرضیات خاصی استوار بوده و تحت شرایط خاصی، جواب‌های آنها صحیح می‌باشد. لذا مهم‌ترین مساله در به‌کارگیری این نرم‌افزارها شناخت محدودیت‌ها، نحوه عملکرد، اصول اساسی و معادلات حاکم استفاده شده در نرم‌افزار می‌باشد.

تاکنون سه نوع عمده از مدل‌های ریاضی که مدل‌های یک بعدی، دو بعدی و سه‌بعدی می‌باشند، جهت شبیه‌سازی جریان به کار رفته است.برای مثال جریان در لوله‌ها، فلوم‌ها و رودخانه‌ها دارای یک راستای مشخص می‌باشد و به عبارتی یک بعدی می‌باشد. در مصب رودخانه جریان محدود به ۲ بعد بوده و در مجاورت سازه‌ها، جریان ۳ بعدی است.گاهی اوقات جهت ساده‌سازی، توزیع فشار هیدرواستاتیک و یکنواخت فرض می‌شود.این امر استفاده از مدل را محدود می‌کند، زیرا با وجود این فرض، مدل قادر به محاسبه

مشخصات جریان در راستای عمق نیست. به عبارت دیگر در مواقعی که میدان جریان تغییرات قابل توجهی در راستای عمق را نشان می‌دهد، شبیه‌سازی ۳ بعدی جریان باید مورد توجه قرار گیرد [۶۸].آسان‌ترین مدل‌ها، مدل‌های یک بعدی هستند که مبنای محاسبات در این مدل‌ها، معادلات زیر می‌باشند. شکل (۴-۷) عوامل به کار رفته در معادلات زیر را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial H}{\partial s} = -S_f \qquad (۵-۴)$$

$$H = Z_0 + d\cos\theta + \alpha\frac{V^2}{2g} \qquad (۶-۴)$$

$$S_f = n^2 \frac{V^2}{(\frac{D_H}{4})^{\frac{4}{3}}} \qquad (۷-۴)$$

که دراین روابط:

H: ارتفاع نظیر کل انرژی (متر)

s: فاصله در امتداد بستر مجرا (متر)

S_f: شیب خط انرژی (-)

Z_0: ارتفاع بستر از تراز مبنا (متر)

d: عمق جریان در امتداد عمود بر بستر (متر)

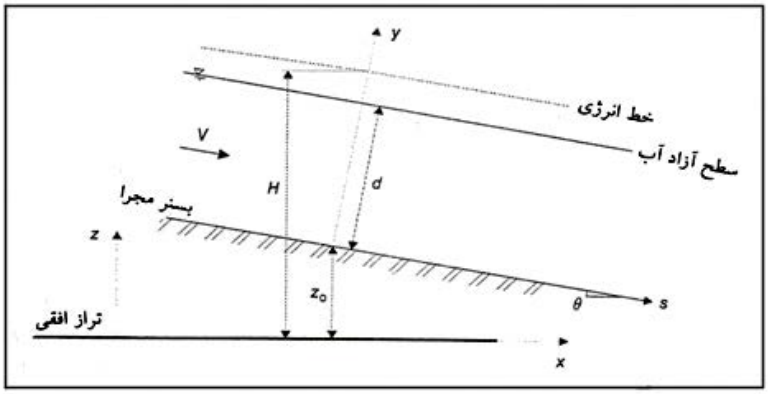
Θ: زاویه امتداد بستر با افق (درجه)

α:ضریب تصحیح سرعت (-)

V: سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)

D_H: شعاع هیدرولیکی (متر)

n: ضریب زبری مانینگ



شکل ۴-۷ - نمای کلی مجرای جریان و پارامترهای معادله انرژی

در اغلب مدل‌های یک بعدی، محاسبات جریان‌های دایمی بر اساس روش گام به گام استاندارد انجام می‌شود. اساس این روش بر معادله انرژی استوار بوده و عمق جریان بر اساس فاصله محاسبه می‌شود و در مواردی نیز ازمعادلات سنت ونان استفاده می‌گردد. مدل‌های پیچیده‌تر دو بعدی و سه‌بعدی هستند که در آنها محاسبات بر اساس معادلات ناویراستوکس صورت می پذیرد [۳۱].

جریان واقعی رودخانه‌ها، سه‌بعدی وابسته به زمان است. حل جریان به صورت سه‌بعدی نیازمند اطلاعات بسیار دقیقی است که استفاده از مدل سه‌بعدی جریان را محدود می‌کند. به عبارت دیگر، مدل‌های سه‌بعدی حساسیت زیادی داشته، هزینه‌بر بوده و همیشه موفق نیستند و درنتیجه می‌توان گفت که این مدل‌ها اغلب غیر اقتصادی هستند و نسبت هزینه به سود استفاده از این مدل‌ها بسیار بالاست. به همین علت، استفاده از مدل‌های یک بعدی و دو بعدی بیش‌تر متداول است [۶۸].

قالب کلی این مدل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- مدل دو بعدی در عمق

در این مدل در راستای عرضی جریان (عمود بر جهت جریان) متوسط‌گیری می‌شود و تغییرات تمامی عوامل در راستاهای طولی و قائم در نظر گرفته می‌شوند.

- مدل دو بعدی در عرض

در این مدل، متوسط‌گیری در راستای قائم (عمق جریان) صورت می‌گیرد و تغییرات عوامل در راستاهای طولی و عرضی در نظر گرفته می‌شوند.

- مدل یک بعدی

در این مدل، متوسط‌گیری در راستاهای عرضی و قائم (در مقطع) انجام می‌شود و شبیه‌سازی جریان فقط در راستای طولی انجام می‌گیرد.

با توجه به محدودیت‌های شناختی از پدیده‌های جریان نظیر اغتشاش جریان، تمامی این مدل‌ها شامل فرضیات و عوامل تجربی می‌باشند. درنتیجه تمامی این مدل‌ها باید واسنجی و صحت‌سنجی[1] شده و نتایج با داده‌های تجربی کنترل شوند [۶۵].

استفاده از مدل‌های ریاضی، نیازمند درک جامع و کامل از معادلات پایه و اطلاع دقیق از محدودیت‌های مدل است. در عمل، مهندسین هیدرولیک باید هم مدل ریاضی و هم مدل فیزیکی را مد نظر قرار دهند. مدل‌سازی فیزیکی با بصری کردن الگوهای جریان در فهم و تشخیص فرآیندهای جریان کمک شایانی می‌کند. علاوه بر این مدل فیزیکی می‌تواند جهت صحت‌سنجی و تعیین صحت و سقم نتایج مدل ریاضی به کار رود [۳۱].

انتخاب یک مدل برای شبیه‌سازی جریان باید با توجه به نیازها و محدودیت‌ها انجام شود. در هرحال نباید مدل انتخابی از حد مورد نظر پیچیده‌تر انتخاب شود.

پس از تعریف مساله و انتخاب مدل ریاضی مناسب، اولین قدم جمع‌آوری داده شامل شرایط هندسی، ویژگی مصالح و شرایط خاص حاکم بر طراحی است. پس از اجرای مدل اجرا و تولید نتایج اولیه، مدل باید وا سنجی شود. زیرا با وجود داده‌های تجربی نظیر ضریب زبری کف در شبیه‌سازی جریان، این ضرایب باید تا حدی تغییر داده شوند تا نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده با یکدیگر اختلاف جزیی داشته باشند[۶۵].

در ادامه در مورد هر یک از نرم افزارهای مدل‌سازی هیدرولیک جریان رودخانه‌ها توضیحات مختصری ارائه شده است.

---

1 - Verification

- نرم افزار MIKE-11

این نرم افزار توسط موسسه تحقیقات آب دانمارک[1] تهیه شده است. این نرم افزار علاوه بر شبیه‌سازی و حل معادلات جریان دایم و غیردایم و هیدرودینامیک شبکه آبراهه، قادر به شبیه‌سازی حمل رسوب و کیفیت آب رودخانه نیز می‌باشد. نرم افزار مورد نظر دارای قفل سخت افزاری و به تازگی مجهز به سامانه اطلاعات جغرافیایی گردیده است. این نرم افزار تحت ویندوز و خروجی‌های آن قابل ارائه درگزارش‌ها به صورت جداول و منحنی‌های مدون می‌باشد. مدل MIKE-11 تاثیر سازه‌های هیدرولیکی را درنظر می‌گیرد اما قادر به شبیه‌سازی هندسه پل نمی‌باشد.

فرضیات حل معادلات عبارتند از:

- آب غیر قابل تراکم بوده وغلظت آن یکنواخت است.
- سرعت در هر مقطع عرضی، یکنواخت و جهت جریان طولی فرض شده است.
- شیب بستر رودخانه یا کانال کم است.

- نرم افزار WS – PRO

این نرم افزار توسط بخش اداره راه آمریکا[2] تهیه شده است. جریان متغیر تدریجی به صورت یک بعدی در نظر گرفته می‌شود و قادر است نیمرخ سطح آب در رودخانه‌ای متشکل از یک یا چند پل و یا کالورت را محاسبه نماید. در این مدل داده‌های توپوگرافی ورودی شامل مقاطع عرضی رودخانه و مقاطع کنترل نظیر پل‌ها، کالورت‌ها، سواحل و جاده‌ها می‌باشد.

- نرم افزار ISIS

این نرم افزار توسط موسسه تحقیقات هیدرولیک والینگفورد[3] با همکاری شرکت هال کرو[4] در سال ۱۹۹۸ تهیه شده است. این نرم افزار قادر به شبیه‌سازی جریان دایم و غیردایم در شبکه آبراهه‌ها و همچنین حمل رسوب و مدل‌سازی کیفیت آب و نیز قادر به شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی مهم از جمله پل‌ها، سرریزها، دریچه‌ها و ... می‌باشد. نرم افزار مزبور دارای قفل سخت افزاری می‌باشد. در مجموع، نرم افزار مورد نظر از سرعت خوبی در حل و همگرایی محاسبات برخوردار بوده و قسمت سازه‌های هیدرولیکی آن از قدرت بهتری نسبت به نرم افزار MIKE – 11 برخوردار است.

- نرم افزار HEC-RAS

مدل ریاضی HEC–RAS که نسخه تکمیل شده مدل HEC–2 می‌باشد، توسط رسته مهندسی ارتش ایالات متحده تهیه شده است و به دلیل سهولت استفاده از آن، به طور گسترده در طرح های مهندسی رودخانه و از جمله پهنه‌بندی سیل، بررسی وضعیت جریان و تعیین نیمرخ سطح آب در شرایط مختلف ساماندهی رودخانه مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم افزار قادر به حل جریان به صورت دایم و غیر دایم بوده و هندسه و مشخصات جریان درعبور از سازه‌های هیدرولیکی مختلف از جمله پل‌ها، سدهای با سرریز آزاد و دریچه دار، کالورت‌ها و سرریزهای

1 - Danish Hydraulic Institute (DHI)
2 - Federal Highway Administration (FHA)
3 - Wallingford Hydraulic Research (WHR)
4 - Hall Crow

جانبی را محاسبه می کند. از این نرم افزار در پروژه‌های بسیار زیادی در ایران استفاده شده است و به دلیل دسترسی و قابلیت‌های گرافیکی قوی آن، یک نرم افزار عمومی و مقبول در جامعه مهندسی آب کشور می‌باشد. این نرم‌افزار دارای قابلیت بسیار قوی در تحلیل جریان عبوری از پل‌ها و کالورت‌ها می‌باشد. دراین نرم افزار، قابلیت مخصوص اصلاح مسیر آبراهه و محاسبه عملیات خاکی وجود دارد.

- نرم‌افزار SEFLOW

این نرم افزار برای مطالعه جریان آب و ریخت‌شناسی در شبکه رودخانه‌ها، کانال‌های باز و خورها در مرکز هیدرولیک دلفت[1] تهیه شده است و قادر است محاسبات جریان و انتقال رسوب را در جریان‌های دایمی و غیردایمی در شبکه کانال و رودخانه به صورت یک بعدی مدل کند. از جمله مواردی که می‌تواند توسط این نرم‌افزار مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد، اثرهای ناشی از احداث سازه‌های مختلف و یا تغییرات دیگر و اثر آن در نیمرخ سطح آب و ریخت‌شناسی رودخانه می‌باشد. تغییرات شرایط جریان در یک رودخانه ممکن است به دلایل زیر صورت پذیرد:

- احداث سد و یابند انحرافی در مسیر رودخانه
- برداشت آب از رودخانه (به منظور آبیاری و....)
- برداشت رسوب (لایروبی به منظور افزایش ظرفیت رودخانه)
- ایجاد بریدگی در مسیر رودخانه
- کاهش عرض جریان به دلایل مختلف

به وسیله نرم‌افزار فوق می‌توان اثر هر کدام از تغییرات فوق را بر روی جریان آب و همچنین بر ریخت‌شناسی و تغییرات بستر مطالعه و بررسی نمود. این نرم‌افزار قادر است جریان‌های سیلابی و رودخانه‌های جزر و مدی را نیز مدل نماید. برای این منظور باید آبنگار ورودی و یا تغییرات سطح آب در نقاط جزر و مدی به صورت تابعی از زمان به مدل معرفی شوند. حرکت رسوب در برنامه به صورت بار رسوبی کل و بار رسوبی معلق پیش‌بینی شده است. در حالت بار رسوبی کل، حرکت رسوب به وسیله معادله‌های انتقال رسوب نظیر روابط ایکرز- وایت و انگلند-هانسن مدل می‌شود. معادلات استفاده شده در این نرم‌افزار، معادلات سنت ونان بوده و با روش‌های عددی ضمنی حل می‌گردند. با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم و روش حل، اجرای مدل و تفسیر نتایج حاصل نیز نسبتا مشکل است. این نرم‌افزار عمدتا در حل مسایل مربوط به شبکه کانال‌ها و رودخانه‌ها که مدل‌های ساده‌تر جوابگو نیستند، کاربرد بیش‌تری دارد.

- نرم‌افزار FESWMS-2DH

این مدل که توسط بخش نقشه‌برداری زمینی اداره راه آمریکا تولید شده است، قادر است جریان‌های ماندگار و غیرماندگار را در رودخانه‌های آبرفتی به خصوص در محدوده پل‌ها و همچنین جریان به سمت آب‌گیرها و جریان در قوس رودخانه‌ها را می‌تواند شبیه‌سازی و الگوی جریان را با دقت خوبی به دست آورد. در این مدل، سازه‌های کنترلی چون سرریزها، کالورت‌ها و پایه‌های پل شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل هم برای جریان‌های زیر بحرانی و هم برای جریان‌های فوق بحرانی قابل استفاده است.

---

1 - Delft Hydraulic Laboratory

- نرم‌افزار HIVEL2D

این مدل که توسط ایستگاه تحقیقاتی آبراهه وابسته به رسته مهندسی ارتش آمریکا تولید شده است، یک مدل دو بعدی هیدرودینامیک می‌باشد که می‌تواند هم جریان زیر بحرانی و هم فوق بحرانی را در سرعت‌های بالا شبیه‌سازی نماید. این مدل برای محاسبه، تجزیه و تحلیل امواج به وجود آمده نظیر پرش هیدرولیکی، امواج به وجود آمده در سرریزهای تند و محاسبه نیمرخ عرضی سطح آب در قوس‌های رودخانه‌ای به کار می‌رود. دقت این مدل به مقدار زیادی به دقت شرایط مرزی نظیر عمق جریان در ابتدا و انتهای محدوده مورد نظر بستگی دارد.

- نرم‌افزار RMA – 2 (TABS)

این مدل که توسط ایستگاه تحقیقاتی آبراهه وابسته به رسته مهندسی ارتش آمریکا تولید شده است، یک مدل دو بعدی (متوسط گیری شده در عمق)، برای جریان آب‌های سطحی با روش المان‌های محدود می‌باشد. در این مدل معادلات رینولدز، ناویر- استوکس برای جریان‌های آشفته با روش المان‌های محدود و به صورت دو بعدی حل می‌شود. اصطکاک با استفاده از معادله مانینگ یا شزی و ضرایب لزجت ادی- اولر برای محاسبه خصوصیات جریان‌های در هم به کار رفته‌اند. در این مدل تاثیر اصطکاک بستر، باد، تلاطم جریان و چرخش زمین را هم می‌توان منظور کرد. همچنین جریان‌های به وجود آمده در اثر هیدروگراف ورودی، جریان‌های جزر و مدی و امواج را می‌توان با این مدل شبیه‌سازی کرد.

- نرم‌افزار WALLRUS

روش والینگ فورد[1] برای طراحی و تجزیه سامانه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری و مدل توسعه یافته آن برای تجزیه شبکه آبراهه‌ها و لوله‌ها (Tree) در مرحله طراحی و یا مرحله شبیه‌سازی سامانه موجود به کار می‌رود. جریانات ورودی براساس روش والینگ فورد اعمال و تسکین براساس روش ماسکینگام[2] محاسبه می‌شوند. این مدل برای کار با کامپیوترهای شخصی موجود و مجهز به گرافیک روی مانیتور می‌باشد.

این مدل، یک مجموعه هیدرولوژی – هیدرولیک بوده و باید با یکی ازمدل‌های هیدرولوژیکی ارتباط داده شود.

- نرم‌افزارSPIDA

این مدل توسط موسسه بررسی‌های هیدرولیک در حال توسعه بوده و بیش‌تر نرم افزار آن از مدل WALLRUS گرفته شده است و نسبت به مدل اخیر، مزیت حل سامانه‌های حلقوی[3] از آبراهه‌ها و لوله‌ها به انضمام جریانات معکوس را دارد.در این مدل حل کامل معادلات سنت و نان پیگیری می‌گردد. مدل SPIDA با همان سخت افزار مدل WALLRUS قابل استفاده است.

1- Wallingford
2- Muskingum
3- Loop

- نرم‌افزار FLUCOMP

این مدل یک مدل تک بعدی است که توسط موسسه بررسی‌های هیدرولیک تهیه شده و برای شبیه‌سازی تغییرات در جریان و تراز آب در آبراهه اصلی به کار می‌رود. در این مدل جریان بستر سیلابی، ذخیره‌سازی خارج از مسیر آبراهه، ابنیه روی آبراهه (مانند سرریز، کانال کمربندی[1]، دریچه یک‌طرفه جزر و مد و غیره) منظور شده است. برای جریانات پایدار، امکانات کالیبراسیون اتوماتیک تعبیه شده است و ضریب مانینگ n به گونه‌ای تصحیح می‌شود که ترازهای آب ثبت شده با دقت قابل قبولی حاصل شود. برای جریانات ناپایدار، کالیبراسیون مدل باید با روش کلاسیک آزمون و خطا انجام شود. محاسبات تسکین براساس حل معادلات سنت و نان انجام می‌شود.

این مدل اساسا برای کار با کامپیوترهای بزرگ[2] تهیه شده است ولی امروزه برای کار با کامپیوترهای شخصی نیز نوع Micro FLUCOMP موجود می‌باشد. در این مدل امکان استفاده از گرافیک منتخب برای نمایش داده‌ها وجود دارد.

- نرم‌افزار MIDUSS

این مدل در دانشگاه مک ماستر[3] اونتاریو[4] به منظور تسهیل طراحی شبکه انتقال و ذخیره رواناب‌های سطحی ناشی از بارندگی تهیه شده است. برعکس مدل WALLRUS، در این مدل ضرایب طراحی از قبل تعیین نمی‌شوند بلکه استفاده کننده می‌تواند بسته به تجربه خود ضرایب را تعیین و اصلاح نموده و به صورت ورودی به مدل بدهد. در این مدل از یک روش هیدرولوژیکی که براساس آبنگار واحد USSCS بنا شده، استفاده می‌شود. در این روش، تاخیرات زمانی با معادله موج سینماتیک (معادل گزینه ۳ در مدل SCSPLUS) محاسبه می‌گردد. آبنگارهای به دست آمده سپس در تمام شبکه رواناب با روش ماسکینگام تسکین می‌شوند. نوع شبکه باید فقط شاخه‌ای بوده و نمی‌توان حلقه‌ها را تجزیه کرد. اگر چه انواع ساده حلقه را می‌توان به صورت غیر مستقیم و خاصی با این مدل حل کرد. همچنین اثرهای پس زدگی با این مدل قابل محاسبه نمی‌باشد.

این مدل اساسا برای کامپیوترهای بزرگ نوشته شده ولی برای کامپیوترهای شخصی نیز نوع خاص آن موجود است. دفترچه راهنمای آن بسیار کامل می‌باشد.

- نرم‌افزار FWAVE

این مدل برای مطالعه مهار سیل روستایی به نام NWNT توصیف شده است. این مدل برای تجزیه بسترهای سیلابی ابداع شده و در سطح جهانی هم مورد استفاده بوده است. مدل قادر به حل شبکه‌های شاخه‌ای آبراهه‌های روباز بوده و در آن جریانات بستر سیلابی با واحدهای (سلول‌های) سیلاب و ذخیره در یک سامانه شبه دو بعدی نشان داده می‌شود. سامانه حلقوی در سلول‌ها مجاز ولی در سامانه آبراهه‌ها مجاز نمی‌باشد. انواع مختلف سازه‌ها در مسیر آبراهه‌ها منظور شده و مدول‌های مختلفی برای این منظور و همچنین برای محاسبات کیفیت آب و انتقال رسوبات به مدل اضافه شده است.

1- Bypass
2 - Main frame
3 - McMaster
4 - Ontario

این مدل برای کامپیوتر بزرگ تنظیم شده ولی نوع قابل استفاده در کامپیوترهای شخصی آن نیز موجود است. انتقال داده‌ها به برنامه بیش‌تر دستی و براساس روش مدون دستورالعملی نمی‌باشد.

- نرم‌افزار KINEROS

شبکه‌های قابل حل با این مدل مبین حوضه‌هایی با سه المان زیر می‌باشند:

- صفحات مستطیلی که مبین المان حوضه شماتیک است. هر مستطیل جریان خود را به بعد بالایی حوضه مستطیلی مجاور و یا به المان آبراهه تخلیه می‌کند.
- المان آبراهه به مقطع ذوزنقه یا دایره‌ای (برای لوله‌ها).
- حوضچه‌ها که مبین واحدهای ذخیره آب در حوضه هستند.

بارندگی خالص ابتدا در طول المان حوضه‌ها و سپس در سامانه آبراهه – لوله‌ها تسکین می‌شود. روش محاسبه تسکین[1]، روش سینماتیکی است. اصطکاک، با معادله مانینگ و یا با معادله شزی[2] محاسبه می‌شود. اگر عدد رینولدز[3] کم‌تر از میزان معین از پیش تعیین شده‌ای باشد معادله جریان لامینار یا آرام[4] به کار می‌رود. به علاوه مدل توانایی محاسبه شبیه‌سازی فرسایش رسوبات از المان‌های حوضه و انتقال آن در حوضه و سامانه آبراهه‌ها را دارد. همانند مدل MIDUSS این مدل نمی‌تواند پس زدگی را محاسبه نماید.

- نرم‌افزار ILLUDAS

شبیه‌ساز رواناب منطقه ش هری ایلی نویز یا ILLUDAS[5] نوع توسعه یافته ای از روش TRRL می‌باشد که توسط تریس تریپ واستال[6] صورت گرفته است. این مدل یک ابزار طراحی است و نمی‌تواند برای ارزیابی سامانه های موجود به کار رود. این مدل، مجموعه کاملی بوده و از روش آبنگار واحد SCS استفاده می‌کند. محاسبات تسکین با استفاده از موج پخش شونده صورت گرفته و مدل محدود به شبکه شاخه‌ای است. اثرهای پس زدگی نمی‌تواند در مدل منظور شود.

- نرم‌افزار SWMM

مدل SWMM[7] توسط US EPA تهیه و برای بررسی کمی و کیفی مناطق شهری مناسب می‌باشد. برنامه این مدل بسیار بزرگ و متشکل از چهار بلوک اصلی است که توسط هال[8] به شرح زیر توصیف شده است:

- RUNOFF برای محاسبه آبنگارهای رواناب و بارهای آلوده متناظر
- TRANSPORT برای محاسبات تسکین آبنگارها و بارهای آلوده متغیر با زمان ضمن عبور از سامانه
- STORAGE شبیه‌سازی تصفیه‌خانه را انجام می‌دهد.
- RECEIV تجزیه عکس‌العمل جسم آبی که خروجی تصفیه‌خانه به آن می ریزد.

---

1 - Routing
2 - Chezy
3 - Reynolds
4 - Laminar
5 - Illinois Urban Drainage Area
6 - Terstiep&Stall
7 - Storm Water Manage Model
8 - Hall

کاربرد این مدل مشتمل بر تقسیم حوضه رواناب به شبکه‌ای از المان‌های ایده‌ال است. مشابه مدل KINEROS المان‌های شماتیک در شکل مستطیل با شیب یکسان و کاربری یکنواخت در نظر گرفته می‌شوند. آبنگارجریان رواناب روی سطح هر المان محاسبه و میزان نفوذ از سطح المان به داخل و ذخیره در المان‌های گود ملحوظ می‌شود. سپس آبنگارها از مسیر جوی‌های خیابان‌ها و سپس شبکه جمع‌اوری رواناب تسکین می‌شوند. اثرهای منحنی پس زدگی می‌تواند منظور شود.

- نرم‌افزار ISS

مدل ISS[1] جهت شبیه‌سازی جریان در سامانه‌های موجود جمع‌آوری رواناب یا طراحی سامانه ها ساخته شده است. این مدل صرفا برای شبکه رواناب- فاضلاب شهری بوده و جریان‌های ورودی به سامانه باید جداگانه حساب و به مدل داده شوند. افت در اتصالات و تقسیمات و آدم‌روها در فرمولاسیون مدل منظور می‌شوند.

مدل مشتمل بر حل کامل معادلات سنت و نان با روش مشخصه‌ها[2] می‌باشد. نوع اولیه مدل فقط برای شبکه های شاخه‌ای و شبکه فاضلاب لوله‌ای شکل مناسب بود. در حال حاضر حالت‌های دیگر نیز با این مدل قابل حل است.

- نرم‌افزار HYDRO

این مدل مجموعه‌ای از برنامه‌ها برای تدارک داده‌ها، تجزیه هیدرولیکی و تجزیه و تفسیر نتایج می‌باشد. هسته اصلی مدل، برنامه HYDRO محسوب می‌شودکه یک مدل هیدرولیک محاسباتی جهت تجزیه جریان ناپایدار و در سامانه پیچیده‌ای از آبراهه‌هاست. این مدل توسط مات مکدونالد[3] تهیه شده و براساس موج دینامیکی با توانایی محاسبه حلقه‌ها و جریان‌های معکوس آبراهه یا لوله‌ها می‌باشد. روش حل می‌تواند با گزینه موج سینماتیک یا موج پخش شونده، ساده‌تر شود. این مدل تا به حال در کشورهای مختلفی چون انگلستان، چین، سنگاپور، مصر، پاکستان و هونگ کونگ به کار رفته است.

این مدل مناسب برای کامپیوترهای شخصی و دارای دفترچه راهنما و نقشه‌های گرافیکی در مورد داده‌های ورودی و تجزیه نتایج راهنمایی بسیار خوبی برای کاربران می‌باشد. مدول‌های محاسبه کیفیت آب و انتقال رسوبات نیز در مدل منظور شده است.

در جدول (۴-۲) خلاصه مشخصات مدل‌های ذکر شده، ارائه شده است.

جدول ۴-۲- مشخصات کلی مدل‌های متداول موجود جهت شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها

نام مدل	مدل هیدرولوژیکی	روش محاسبه تسکین	امکان مدل سامانه حلقوی	تراز آب پایاب	امکان کار با کامپیوترهای شخصی	گرافیک مانیتور	کیفیت آب و رسوب
MIKE11	NAM	موج دینامیکی	✓	✓	✓	✓	✓
WS-PRO	دلخواه	-	✓	✓	✓	-	-
ISIS	دلخواه	موج دینامیکی	✓	✓	✓	✓	✓
HEC-RAS	دلخواه	موج دینامیکی	✓	✓	✓	✓	✓
SEFLOW	دلخواه	موج دینامیکی	✓	✓	✓	✓	✓
FESWMS_2DH	دلخواه	موج دینامیکی	-	✓	✓	✓	-
HIVEL2D	دلخواه	موج دینامیکی	-	✓	✓	✓	-

1 - Illinois Sewer System Simulation
2 - Characteristics
3 - Mott Mac Donald

ادامه جدول ۴-۲- مشخصات کلی مدل‌های متداول موجود جهت شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها

نام مدل	مدل هیدرولوژیکی	روش محاسبه تسکین	امکان مدل سامانه حلقوی	تراز آب پایاب	امکان کار با کامپیوترهای شخصی	گرافیک مانیتور	کیفیت آب و رسوب
RMA-2(TABS)	دلخواه	موج دینامیکی	–	✓	✓	✓	–
WALLRUS	Walling ford	موج پخش شونده	–	✓	✓	✓	–
SPIDA	Walling ford	موج دینامیکی	✓	✓	✓	✓	–
FLUCOMP	دلخواه	موج دینامیکی	✓	✓	✓	✓	–
MIDUSS	SCS	موج پخش شونده	–	–	✓	✓	–
FWAVE	دلخواه	موج دینامیکی	–	✓	✓	–	✓
KINEROS	Infiltration/ overland flow	موج دینامیکی	–	–	✓	✓	✓
ILLUDAS	SCS	موج پخش شونده	–	–	✓	✓	–
SWMM	Infiltration/ overland flow	موج پخش شونده	–	–	✓	✓	✓
ISS	دلخواه	موج دینامیکی	–		–	–	–
HYDRO	SCSPLUS	موج دینامیکی	✓	✓	✓	✓	✓

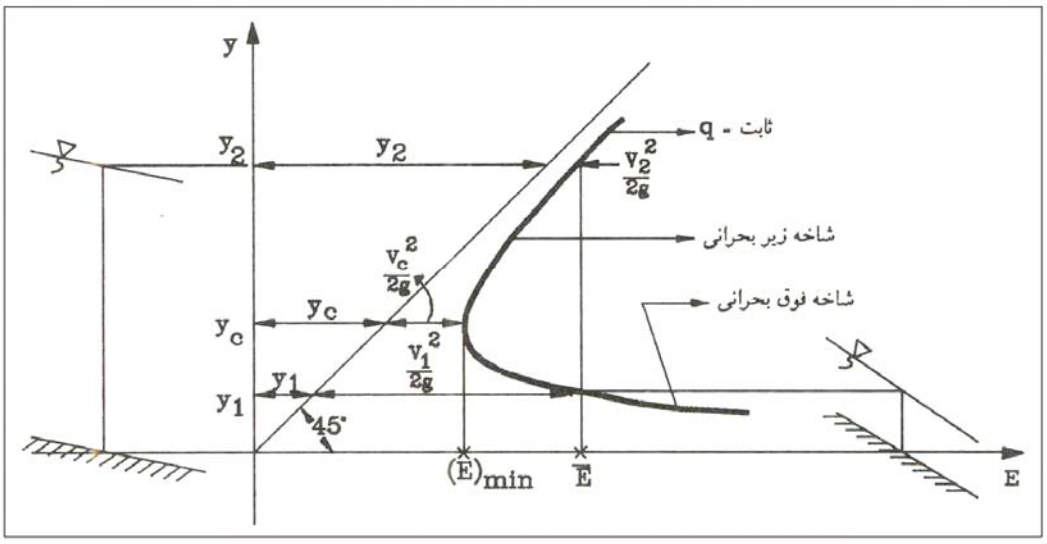
۴-۲-۲-۴- مشخص کردن رژیم هیدرولیک (جریان زیربحرانی، فوق بحرانی) در بازه‌های مسیر رودخانه

طبق تعریف، انرژی ویژه[1] عبارتست از انرژی در هر سطح مقطع برای واحد وزن، زمانی که نسبت به کف کانال (به عنوان سطح مبنا) درنظر گرفته شود. به عبارت دیگر، انرژی مخصوص بیانگر فاصله خط انرژی تا کف کانال می‌باشد. شکل (۴-۸) منحنی انرژی ویژه را برحسب عمق جریان نشان می‌دهد.

کم‌ترین مقدار انرژی ویژه به ازای یک بده ثابت در واحد عرض مجرا، در عمقی معادل عمق بحرانی[2] پیش می‌آید که در این عمق، عدد فرود جریان برابر واحد می‌باشد. با توجه به منحنی انرژی ویژه – عمق (E-Y) می‌توان گفت به ازای هر انرژی ویژه ثابت، امکان شکل‌گیری دو عمق جریان وجود دارد که یکی از آنها از عمق بحرانی بزرگ‌تر (عدد فرود کوچک‌تر از یک) و دیگری از عمق کوچک‌تر (عدد فرود بزرگ‌تر از یک) می‌باشد. با این تعبیر، یک شاخه منحنی E-y وضعیت جریان فوق بحرانی و شاخه دیگر وضعیت جریان زیر بحرانی به ازای بده عبوری ثابت در واحد عرض را نشان می‌دهد [۲].

محاسبات هیدرولیکی (نیمرخ طولی سطح آب و سایر عوامل جریان) در حالتی که وضعیت جریان فوق بحرانی است، باید از بالادست شروع شود و در حالت وضعیت زیر بحرانی از پایین‌دست شروع و به سمت بالادست ادامه می‌یابد. در محل تغییر شیب (از شیب تند به ملایم) معمولا عمق بحرانی تشکیل و وضعیت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می‌شود که در این حالت به صورت هم‌زمان، محاسبات جریان در بالادست محل تغییر شیب از بالادست شروع و به سمت محل تغییر شیب ادامه می‌یابد و در پایین‌دست محل تغییر شیب، از انتها شروع و به سمت بالادست ادامه می‌یابد [۴۶].

1 - Specific Energy
2 - Critical Depth



شکل ۴-۸- منحنی انرژی ویژه بر حسب عمق [۲]

در تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی، ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کاسته می‌گردد. این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در مجاری سطح آزاد بوده و از ابتدا تا انتهای آن یک تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد، به پرش هیدرولیکی موسوم است.پرش هیدرولیکی ویژگی‌های فراوانی دارد که می‌توان آنها را به شرح زیر خلاصه کرد:

کاهش انرژی آب در جریان عبوری از روی سدها، سرریزها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی و درنهایت محافظت قسمت‌های پایین دست

ترمیم و افزایش سطح آب به منظور پخش آب

کاهش فشار بالابرنده [1] در زیر سازه‌ها با افزایش عمق آب در پای سازه [۲].

چاو در سال ۱۹۷۳ با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی کانال‌های مستطیلی افقی، انواع پرش هیدرولیکی را بر اساس عدد فرود بالادست به ۵ دسته مطابق جدول (۴-۳) تقسیم‌بندی کرده است، که برای یک معیار اولیه، ابزار مناسبی است.

جریان‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی تفاوت‌های ویژه‌ای دارند. برای مثال در یک تنگ شدگی با جداره‌های صلب و غیر قابل فرسایش، عمق جریان در حالت زیر بحرانی کم‌تر و در جریان فوق بحرانی بیش‌تر از حالت قبل از تنگ شدگی می‌شود. اگر بستر فرسایش‌پذیر باشد، در جریان فوق بحرانی کف‌کنی و آبشستگی، در حالی‌که در جریان زیر بحرانی ممکن است رسوب‌گذاری اتفاق بیفتد. همچنین در جریان‌های زیر بحرانی، بستر دارای اشکال تلماسه و در جریان فوق بحرانی، بستر جریان حالتی مسطح دارد و یا شکل بستر به صورت پادتلماسه می‌باشد.

جریان‌های فوق بحرانی در مخروط افکنه ها و در مناطق کوهستانی و در جریانات حاصل از ذوب برف‌ها و یخچال‌ها مشاهده می‌شود. آبراهه‌های با جریان فوق بحرانی معمولا دارای مجرایی پهن و کم عمق و در شرایط رسوب‌گذاری بوده و تغییر مسیر ناگهانی رودخانه در این حالت زیاد مشاهده می‌شود [۶۳].

---

1 - Uplift Pressure

۴-۲-۲-۵- تعیین ظرفیت آبگذری در بازه‌ها

ظرفیت عبور جریان، یکی از مشخصه‌های هیدرولیکی رودخانه است که بر اساس ویژگی‌های آن و به خصوص اندازه مقطع مشخص می‌گردد. بده متناظر با تراز سطح آب در حد لبریز شدن جریان از کناره‌های رودخانه را بده مقطع پر یا بده مقطع لبریز گویند به طوری‌که جریان بیش از آن باعث می‌شود سواحل رودخانه در زیر آب قرار گیرد [۲۰].

مطابق تعریف عمومی و کاربردی دیون و لئوپولد [1] در سال ۱۹۷۸، تراز جریان در حالت مقطع پر مربوط به حالتی است که در آن، مجرای اصلی عبور جریان کاملا فعال عمل می‌کند. به عبارت دیگر، بدهی که در آن، حرکت رسوبات، تشکیل یا تخریب پشته‌های رسوبی[2]، تشکیل یا تغییر خم‌ها و چم‌ها و به طور کلی تمامی مراحلی که نتیجه آن شکل‌گیری ریخت‌شناسی عمومی رودخانه است را می‌توان بده مقطع پر نامید.

مشخصات مقطع در حالت بده لبریز بیانگر ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه است. با توجه به آن‌که رودخانه‌ها خودشان ساختار خود را تشکیل و تحت کنترل قرار می‌دهند، در حالت کلی ابعاد، الگوها و اشکال مختلف بستر که در ارتباط نزدیک با نیمرخ طولی بستر هستند، را می‌توان بر حسب تابعی از عرض رودخانه در حالت بده مقطع پر بیان کرد. به عبارت دیگر بین کمیت‌های اندازه‌گیری شده میدانی و بده مقطع پر رابطه‌ای با دقت قابل قبول وجود دارد.

جدول ۴-۳- خلاصه نتایج تحقیقات چاو در مورد انواع مختلف پرش هیدرولیکی[۲۴]

عدد فرود	نوع	توصیف ویژگی‌ها
۱ تا ۱/۷	پرش موجی[3]	در طول قابل ملاحظه‌ای، سطح آزاد جریان حالت موجی دارد. افت انرژی بسیار ناچیز است.
۱/۷ تا ۲/۵	پرش ضعیف[4]	در سطح آب یک سری موج‌های کوچک همراه با آشفتگی دیده می‌شود اما در پایین‌دست، سطح آب صاف و معمولی می‌باشد. جریان تقریبا یکنواخت و افت انرژی کم است.
۲/۵ تا ۴/۵	پرش نوسانی[5]	رشته‌های نوسانی از قسمت پایین‌دست به سطح و عقب جریان دیده می‌شود. این نوسانات موج‌های بلند و غیرمنظم ایجاد می‌کند. این موج‌ها، فرسایش کناره‌ها را به دنبال دارد.
۴/۵ تا ۹	پرش پایدار[6]	نسبت به شرایط پایین‌دست (نظیر عمق پایاب[7]) حساسیتی ندارد. میزان افت انرژی بین ۴۵ تا ۷۰ درصد است. از جهت اقتصادی، بهترین حالت در طراحی است.
بزرگ‌تر از ۹	پرش شدید [8]	در این حالت جت آب با سرعت زیاد وارد جریان پایین‌دست می‌گردد و باعث ایجاد موج‌های زیادی در آن ناحیه می‌شود. افت انرژی در این حالت تا ۸۵ درصد می‌رسد. احتمال فرسایش بستر در این حالت بسیار بالاست.

بده مقطع پر را می‌توان به دو صورت تعیین کرد:

- بده متناظر با دوره بازگشت تعیین شده برای مقطع پر
- مشخصات هندسی و فیزیکی مقاطع رودخانه

1 - Dunne & Leopold
2 - Bars
3 - Undular Jump
4 - Weak Jump
5 - Oscillating Jump
6 - Steady Jump
7 - Tail Water Depth
8 - Strong Jump

دیون و لئوپولد معتقدند که بده مقطع پر را می‌توان معادل سیلابی با دوره بازگشت ۱/۵ سال در نظر گرفت. آنابل[1] در سال ۱۹۹۴ با توجه به انجام مطالعات بر روی ۴۷ رودخانه در انتاریو[2] و کانادا به این نتیجه رسید که دوره بازگشت بده مقطع پر ۱/۶ سال است. ویلیام[3] (۱۹۷۸) و ناش[4] (۱۹۹۶) بده مقطع پر را سیلابی با دوره بازگشت ۱ تا ۲۵ سال ذکر کرده‌اند. راسگن در نواحی شهری و توسعه یافته دوره بازگشت بده مقطع پر را ۱/۲ سال و در نواحی غیرشهری، ۱/۵ سال به دست آورده است.

مهم‌ترین عامل در تعیین بده مقطع پر و برقراری ارتباط بین مشخصات مقطع و بده جریان، تراز جریان رودخانه در حالت مقطع پر (تراز مقطع پر) می‌باشد. تراز مقطع پر را می‌توان با استفاده از یک سری شاخص‌های میدانی که در امتداد مسیر جریان رودخانه قرار دارند، تعیین کرد. در زمینه تعیین تراز مقطع پر در بازدیدهای میدانی، توجه به نکات زیر ضروری است:

- جهت تمیز دادن بین شاخص‌های واقعی و غیر واقعی اطلاع کامل از سوابق سیلاب‌های رخداده و نیز دوره‌های کم آبی و خشکسالی ضروریست. برای مثال، پس از فروکش کردن سیلاب، خار و خاشاک باقی‌مانده ممکن است سبب تعیین نادرست تراز مقطع پر (بالاتر از حد واقعی) شود.
- در صورت امکان، تراز مقطع پر به دست آمده از بازدیدهای میدانی با بده‌های متناظر با دوره بازگشت‌های تعیین شده (۱/۵ سال) صحت‌سنجی شود.

زمانی که اطلاعات ثبت شده‌ای از مشخصات جریان وجود ندارد، شاخص‌های بصری و فیزیکی زیر کمک موثری به تعیین تراز مقطع پر می‌کند.

- محل تغییر شیب جانبی (عرضی) یا تغییر در توزیع اندازه ذرات رسوبی موقعیت تراز مقطع پر می‌باشد. در حین سیلاب، جریان مقطع اصلی رودخانه را فرا گرفته و به سیلابدشت سرریز می‌کند. پس از فروکش کردن سیلاب، با توجه به وجود اختلاف سرعت جریان در سیلابدشت و مقطع اصلی جریان، مصالح درشت دانه در مجرای اصلی و مصالح ریزدانه در کناره‌ها و سیلابدشت ته‌نشین می‌شوند.
- وجود شواهدی دال بر غرقاب شدن[5] عوارضی نظیر تراس‌های کوچک[6] دلالت بر این دارد که این محدوده، مقطع اصلی عبور جریان است.
- وجود آثار عبور جریان بر صخره‌ها و تخته سنگ‌ها (داغاب) می‌تواند گواه این باشد که مرز قابل مشاهده، تراز مقطع پر است.
- نمایان شدن ریشه‌های نازک درختان در زیر یک لایه خاک طبیعی (دست نخورده) دلالت بر وجود فرسایش در محدوده وجود ریشه‌ها داشته و درنتیجه تراز مقطع پر در موقعیت شروع لایه خاک بالایی قرار دارد.
- رویش پوشش گیاهی (عمدتا درختان و درختچه‌های بلند قد) در خارج از مقطع اصلی جریان اتفاق می افتد لذا تراز مقطع پر اغلب بسیار نزدیک به محل رویش گیاهان است.

---

1 - Annable
2 - Ontario
3 - William
4 - Nash
5 - Inundation
6 - Small Benches

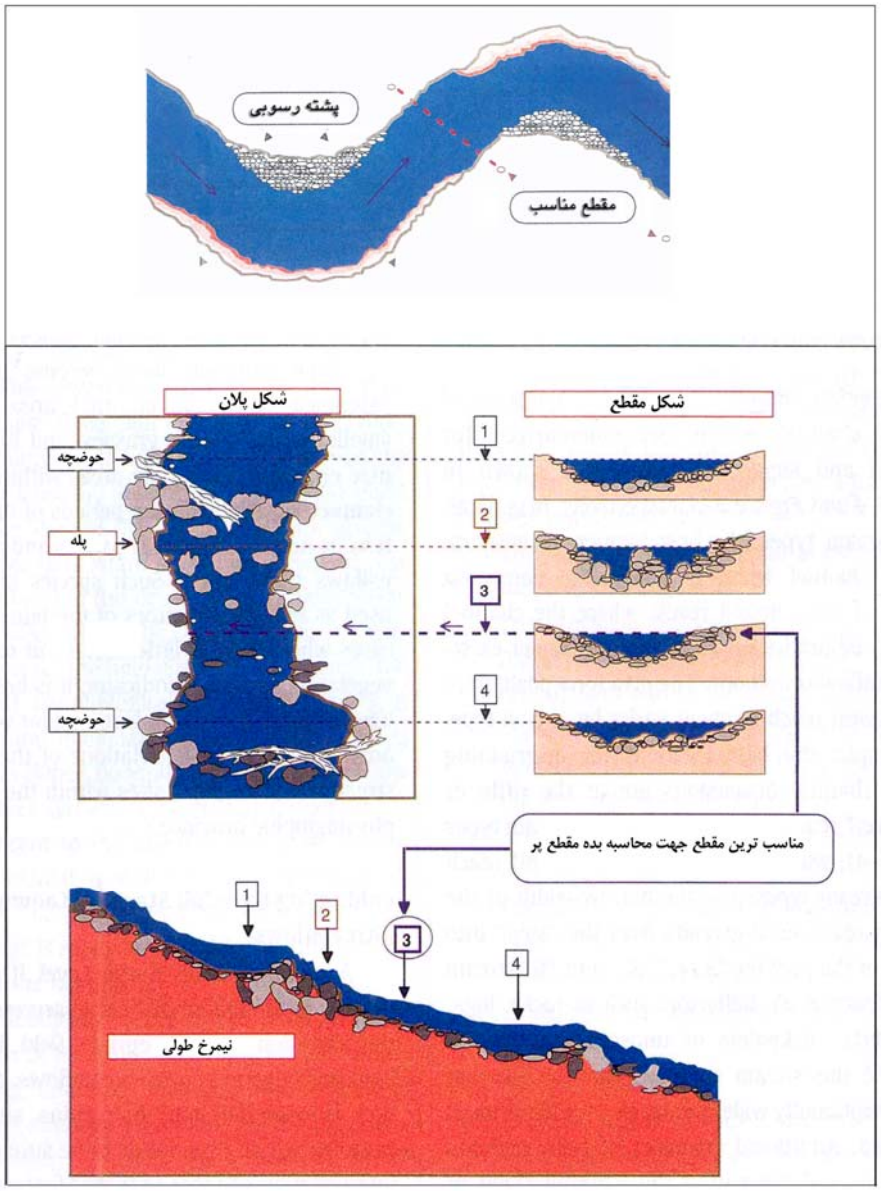
استفاده از پوشش گیاهی برای تشخیص تراز مقطع پر باید با احتیاط انجام شود. تعیین تراز مقطع پر، اگر صرفا بر اساس وضعیت پوشش گیاهی انجام شود، معمولا کم‌تر از مقدار واقعی و حقیقی آن به دست می‌آید. در شرایط خشکسالی و کم آبی، گونه‌هایی نظیر علف‌های هرز، درختچه‌های جنگلی کوتاه قد[1] و چمن‌ها در لایه‌های پایین‌تر رویش می‌کند و لذا اگر صرفا مرز پوشش گیاهی به عنوان تراز مقطع پر در نظر گرفته شود، نتیجه غیر واقعی خواهد بود. در صورتی‌که شاخص‌ها محدود باشند و امکان برآورد تراز مقطع پر صرفا با استفاده از وضعیت پوشش گیاهی میسر باشد، باید با یک متخصص علوم زیستی مشورت کرد.

قبل از انتخاب یک بازه مرجع در طول یک رودخانه جهت یافتن مشخصات مقطع و برآورد بده مقطع پر، بهتر است نیمرخ طولی رودخانه با استفاده از حداقل ۲۰ نقطه در سرتاسر رودخانه ترسیم شود.

یکی دیگر از ملزومات تعیین بده مقطع پر، مشخص کردن موقعیت‌های مناسب جهت انتخاب مقطع و برآورد بده جریان با استفاده از مشخصات هندسی آن مقطع می‌باشد. در حالت کلی، بهترین نقطه برای تعیین بده مقطع پر، باریک‌ترین نقطه مسیر رودخانه با توجه به شکل پلان می‌باشد. البته باید توجه داشت که عوارضی نظیر صخره‌ها [2]، کنده درختان[3]، خار و خاشاک و به طور کلی کلیه عوارض مصنوعی که سبب کاهش ظرفیت آبگذری و برآورد غیر واقعی بده مقطع پرمی‌شوند، در محدوده انتخاب شده وجود نداشته باشد.

شکل (۴-۹) نمونه‌هایی از انتخاب مقطع مناسب جهت برآورد بده مقطع پر را نشان می‌دهد [۷۱].

1 - Woody Plants
2 - Rocks
3 - Logs



شکل ۴-۹- نمونه‌ای از مناسب‌ترین مقطع جهت برآورد بده مقطع پر [۷۱]

۴-۲-۳- مطالعات فرسایش و رسوب

شناخت پدیده‌های ریخت‌شناسی آگاهی از فرآیند فرسایش و حمل مواد رسوبی را طلب می‌کند. در راهنمای حاضر با توجه به ضرورت امر، مطالعه فرسایش و رسوب از جنبه‌های مختلف و با عنایت به کاربردهای آن در مباحث ریخت‌شناسی مد نظر قرار گرفته است. تجربه لین[1] [۵۲] اهمیت و نقش انتقال رسوب و ویژگی‌های فیزیکی آن را در فرآیندهای ریخت‌شناسی به خوبی آشکار می‌نماید. لین تاثیر توام جریان رودخانه‌ای و حمل مواد رسوبی در تغییر شکل رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده و معادله زیر را برای تحلیل رفتار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها ارائه نموده است:

1 - Lane

$$Q_s D_{50} \alpha \ Qs \qquad (۸-۴)$$

که در این رابطه:

Q_s: بده رسوب، D_{50}: اندازه متوسط دانه‌های رسوب بستر، Q: بده جریان و S شیب رودخانه می‌باشد. معادله فوق مبین آن است که با تغییر مشخصه‌های رسوب (نرخ انتقال و اندازه دانه‌ها) و با فرض ثابت بودن بده جریان شیب رودخانه (S) در جهت نیل به تعادل جدید دچار تغییر می‌گردد. بدیهی است با تغییر شیب، مشخصه‌های هندسی و پلان مسیر و به طور کلی ساختار ریخت‌شناسی رودخانه نیز دستخوش تغییر خواهد شد. گری[1] [۴۰] در تقسیم‌بندی رودخانه‌ها انتقال رسوب و مشخصه‌های دانه‌بندی بستر را از عوامل عمده‌ای می داند که برای تحلیل رفتار رودخانه و تعیین عوامل ریخت‌شناسی ناگزیر از بررسی اثرهای آن می‌باشیم. در جدول (۵-۴) تاثیر دانه‌بندی بستر در شیب رودخانه و اصطکاک بستر نشان داده شده است. مطابق جدول (۴-۴) با تغییر جنس بستر شیب رودخانه‌ها نیز با دامنه تغییرات زیادی مواجه می‌گردد به گونه‌ای که برای بسترهای ماسه‌ای مقدار شیب کم‌تر یا مساوی ۰/۱ درصد و برای بسترهای با دانه‌بندی درشت نظیر قلوه سنگ شیب رودخانه تا ۰/۵ درصد می‌باشد. مقدار شیب در بسترهای سنگی به بیش از ۵٪ نیز افزایش می‌یابد. مواد رسوبی تشکیل دهنده بستر تاثیر عمده‌ای بر اصطکاک ایجاد شده در مقابل جریان آب دارد که به نوبه خود ساختار ریخت‌شناسی رودخانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مطابق جدول (۴-۴) ضریب مانینگ بسته به نوع بستر بین ۰/۰۱ تا ۵ متغیر است.

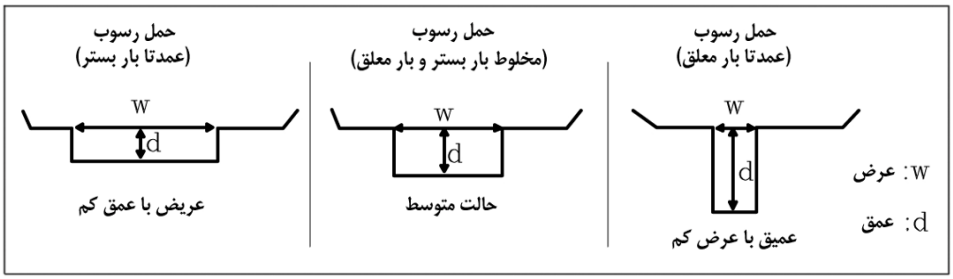
جدول ۴-۴- جنس مواد بستر و تاثیر آن در مقدار شیب و اصطکاک مجرا [۴۰]

جنس مواد بستر	شیب مجرا (٪)	ضریب مانینگ	قطر معرف D_{50} (mm)
ماسه [2]	≤ ۰/۱	۰/۰۱-۰/۰۴	≤ ۲
شن و قلوه سنگ [3]	۰/۰۵-۰/۵	۰/۰۲-۰/۰۷	۱۰-۱۰۰
قطعه سنگ [4]	۰/۵-۵	۰/۰۳-۰/۲	≥ ۱۰۰
بستر سنگی	≥ ۵	۰/۱-۵	متغیر

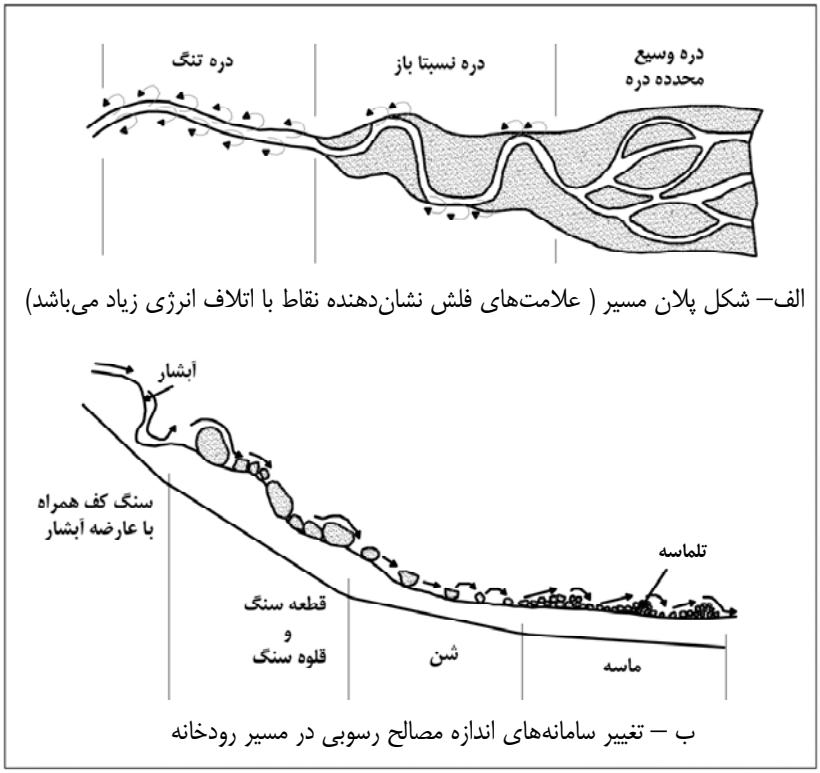
نوع مواد رسوبی حمل شده توسط رودخانه‌ها، شکل مسیر و مشخصه‌های هندسی مجرا را کنترل می‌نماید. در شکل (۴-۱۰) نمونه‌ای از تاثیر اشکال مختلف انتقال رسوب بر ابعاد هندسی مجرا نشان داده شده است.

مطابق شکل (۴-۱۰) رودخانه‌هایی که در آنها بار بستر حالت غالب دارد، دارای عرض بیش‌تر (W) و عمق (d) کم‌تر هستند. برای رودخانه‌های حامل بار معلق عمق افزایش یافته و پهنای رودخانه کاهش می‌یابد. برای حالتی که بار حمل شده مخلوطی از مواد بستر و معلق بوده باشد، مشخصه‌های هندسی مجرا بین دو حالت مذکور قرار دارد. شکل پلان مسیر رودخانه‌ها با نوع مصالح رسوبی حمل شده دارای ارتباط تنگاتنگی است. شکل (۴-۱۱) ارتباط بین پلان مسیر رودخانه و نوع مصالح رسوبی را به نمایش می‌گذارد.

1 - Gary
2 - Sand- Bed
3 - Gravel / Cobble- Bed
4 - Boulder-Bed



شکل ۴-۱۰- تاثیر نوع رسوب حمل شده در مشخصه‌های مقطع رودخانه، شوم [۷۷]



شکل ۴-۱۱- ارتباط بین شکل پلان مسیر رودخانه و نوع مصالح رسوبی حمل شده [۴۰]

مطابق شکل (۴-۱۱) جابجایی قطعه سنگ‌ها در ناحیه کوهستانی که رودخانه در دره تنگ جریان دارد امکان‌پذیر می‌باشد. با کاهش شیب مسیر، اندازه مواد رسوبی قابل حمل نیز کاهش یافته و در عوض پهنای دره افزایش می‌یابد. این افزایش پهنا جابجایی عرضی و شکل‌گیری حالت پیچانرودی و بستر شریانی را امکان‌پذیر می‌کند. پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری در ناحیه دره نسبتا باز و دره وسیع تغییر مشخصه‌های هندسی رودخانه را در پی دارد.

۴-۲-۳-۱- بررسی تغییرات دانه‌بندی و لایه‌بندی بستر رودخانه

دانه‌بندی از جمله مشخصه‌های مهم مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها می‌باشد. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها را از لحاظ دانه‌بندی به دو گروه رسوبات چسبنده (ریزدانه‌ها)[1] و رسوبات غیر چسبنده (درشت دانه‌ها)[2] متمایز کرد. ترکیب دانه‌بندی رسوبات چسبنده شامل سیلت و رس بوده و اندازه دانه‌ها کم‌تر از ۰/۰۶۲ میلی‌متر می‌باشد، شن[3] [۸۳]. بخش عمده‌ای از بستر رودخانه‌های پیچانرودی در مناطق جلگه‌ای کم شیب و مصب‌ها دارای ساختار سیلت و رس بوده و ریخت‌شناسی رودخانه با آن مرتبط می‌باشد. رسوبات غیر چسبنده از طیف وسیع تری برخوردار و از چهار رتبه مشخص شامل ماسه، شن، قلوه سنگ و قطعه سنگ تشکیل شده است، (سیمونس و سنتورک[4] [۸۱]. اندازه رسوبات غیر چسبنده بین ۰/۰۶۲ تا ۴۰۰۰ میلی‌متر متغیر است (به جدول (۴-۵) مراجعه شود).

در جدول (۴-۵) دامنه تغییرات دانه‌بندی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها ارائه شده است. مطابق این جدول ۸ رتبه دانه‌بندی برای خاک های چسبنده شامل رس خیلی ریز تا سیلت خیلی درشت و ۱۶ رتبه برای خاک های غیر چسبنده شامل ماسه خیلی ریز تا قطعه سنگ خیلی بزرگ ارائه شده است.

بستر رودخانه‌های کوهستانی از مواد رسوبی درشت دانه و قطعه سنگ تشکیل گردیده و مشخصه بارز رودخانه‌های شریانی نیز وجود انباشته‌های رسوبی از نوع غیر چسبنده با دانه‌بندی درشت می‌باشد. بسترهای ماسه‌ای در بازه‌های مستقیم و پیچانرودها عمومیت دارد. برای معرفی دامنه تغییرات دانه‌بندی استفاده از نمودار میله‌ای و تجمعی متداول می‌باشد. در شکل (۴-۱۲) منحنی تجمعی دانه‌بندی و نمودار میله‌ای مواد رسوبی بستر برای یک رودخانه مفروض نشان داده شده است [۷۳].

مواد رسوبی موجود در رودخانه‌ها معمولا دارای لایه‌بندی‌های متفاوتی است. از این رو علاوه بر دانه‌بندی، وجود لایه‌های رسوبی مختلف در بستر رودخانه‌ها رفتار ریخت‌شناسی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بر این اساس لایه‌ای از جنس ماسه ممکن است بر روی یک لایه شنی و یا رسی قرار گیرد. بدیهی است اندازه دانه‌ها بر نرخ انتقال رسوب و میزان فرسایش و رسوب‌گذاری و پیامدهای ریخت‌شناسی حاصله تاثیر مستقیم دارد. با افزایش قطر دانه‌ها نرخ انتقال رسوب رو به کاهش می‌گذارد. از این رو تغییرات لایه‌بندی می‌تواند روند فرسایش و یا رسوب‌گذاری را دستخوش تغییر نماید. وجود یک لایه ماسه‌ای در زیر لایه شنی پتانسیل تشدید فرسایش را افزایش می‌دهد. از دیدگاه ریخت‌شناسی و انتقال رسوب دو لایه مشخص همواره باید مد نظر قرار گیرد. لایه سطحی یا لایه جوشنی[5] و لایه زیرین[6]. وجود لایه جوشنی مانع ادامه فرسایش و کف‌کنی بستر شده و از این طریق مشخصه‌های ریخت‌شناسی رودخانه را تثبیت می‌نماید. در سیلاب‌های بزرگ با شکسته شدن لایه جوشنی لایه زیرین فرسایش یافته و رودخانه فرسایش عمومی[7] را تجربه می‌کند. در شکل (۴-۱۳) نمونه‌ای از منحنی‌های دانه‌بندی لایه جوشنی، لایه زیرین و بار بستر برای رودخانه ریچ[8] در آمریکا نشان داده شده است [۱].

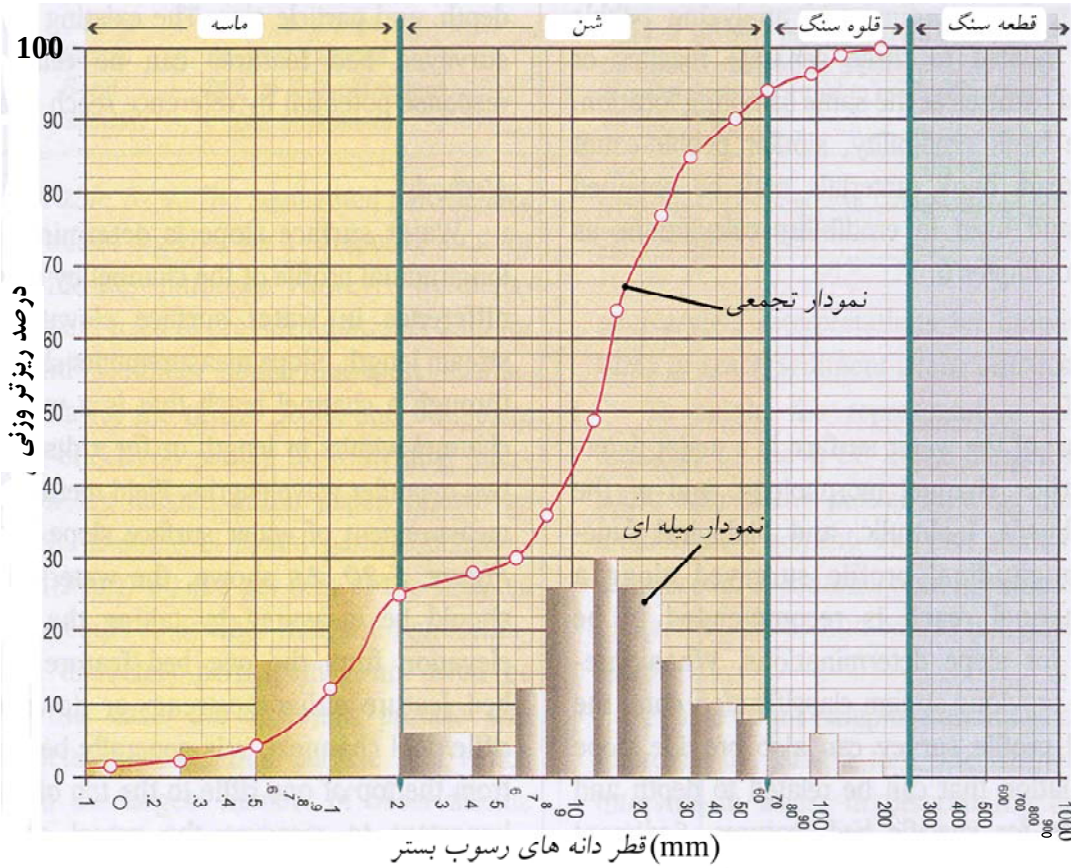
---

1 - Cohesive Sediment/ Fine Bed Material
2 - Noncohesive Sediment/ Coarse Bed Material
3 - Shen
4 - Simons & Senturk
5 - Armor Layer
6 - Under Layer
7 - General Scour
8 - Rich Creck

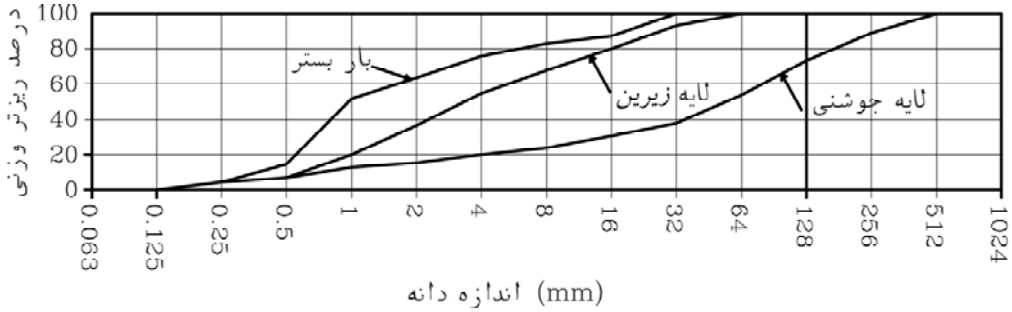
از بررسی منحنی‌های شکل (۴-۱۳) مشخص می‌گردد که دانه‌بندی بار بستر همواره ریزتر از مواد رسوبی بستر است. بـه عـلاوه دانه‌بندی لایه جوشنی به طور محسوسی درشت تر از لایه زیرین می‌باشد.

جدول ۴-۵- کلاس های دانه‌بندی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها [۸۱]

کلاس دانه‌بندی	اندازه دانه (میلی متر)	
قطعه سنگ خیلی بزرگ	–	۴۰۰۰-۲۰۰۰
قطعه سنگ بزرگ	–	۲۰۰۰-۱۰۰۰
قطعه سنگ متوسط	–	۱۰۰۰-۵۰۰
قطعه سنگ کوچک	–	۵۰۰-۲۵۰
سنگ ریزه بزرگ	–	۲۵۰-۱۳۰
سنگ ریزه کوچک	–	۱۳۰-۶۴
شن خیلی درشت	–	۶۴-۳۲
شن درشت	–	۳۲-۱۶
شن متوسط	–	۱۶-۸
شن ریز	–	۸-۴
شن خیلی ریز	–	۴-۲
ماسه خیلی درشت	۲/۰۰-۰۰/۱	۲-۱
ماسه درشت	۱/۰۰-۰/۵۰	۱-۱/۲
ماسه متوسط	۰/۵۰-۰/۲۵	۱/۲-۱/۴
ماسه ریز	۰/۲۵-۰/۱۲۵	۱/۴-۱/۸
ماسه خیلی ریز	۰/۱۲۵-۰/۰۶۲	۱/۸-۱/۱۶
سیلت درشت	۰/۰۶۲-۰/۰۳۱	۱/۱۶-۱/۳۲
سیلت متوسط	۰/۰۳۱-۰/۰۱۶	۱/۳۲-۱/۶۴
سیلت ریز	۰/۰۱۶-۰/۰۰۸	۱/۶۴-۱/۱۲۸
سیلت خیلی ریز	۰/۰۰۸-۰/۰۰۴	۱/۱۲۸-۱/۲۵۶
رس درشت	۰/۰۰۴-۰/۰۰۲۰	۱/۲۵۶-۱/۵۱۲
رس متوسط	۰/۰۰۲۰-۰/۰۰۱۰	۱/۵۱۲-۱/۱۰۲۷
رس ریز	۰/۰۰۱۰-۰/۰۰۰۵	۱/۱۰۲۴-۱/۲۰۲۸
رس خیلی ریز	۰/۰۰۰۵۰-۰/۰۰۰۲۴	۱/۲۰۴۸-۱/۴۰۹۶



شکل ۴-۱۲- نمونه‌ای از منحنی‌های دانه‌بندی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها،راسگن [۷۳]



شکل ۴-۱۳- منحنی‌های دانه‌بندی لایه جوشنی، لایه زیرین و بار بستر رودخانه ریچ در آمریکا [۷۳]

۴-۲-۳-۲- کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب جهت تحلیل فرآیند انتقال رسوب در رودخانه

به لحاظ پیچیدگی فرآیند انتقال رسوب و ضرورت استفاده توام از مشخصه‌های هیدرولیک جریان، داده‌های هندسی مسیر و خصوصیات فیزیکی مواد رسوبی تشکیل دهنده بستر رودخانه، کاربرد مدل‌های ریاضی در بررسی‌های ریخت‌شناسی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با استفاده از مدل ریاضی امکان بررسی دقیق‌تر پدیده انتقال رسوب و تاثیر آن بر رفتار ریخت‌شناسی رودخانه فراهم می‌گردد. تحلیل فرآیند انتقال رسوب با استفاده از مدل‌های ریاضی معمولا برای اهداف زیر انجام می‌گیرد [۶۵]:

- تعیین تناژ رسوب حمل شده در بازه‌های مختلف و مشخص کردن میزان رسوب ورودی و خروجی
- تعیین تغییرات تراز بستر ناشی از فرسایش و رسوب‌گذاری

- بررسی پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری در خم رودخانه‌ها به منظور تعیین جابجایی‌های عرضی
- بررسی توزیع غلظت رسوب در عمق، عرض و امتداد طولی رودخانه
- تعیین مشخصه‌های ریخت‌شناسی رودخانه در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف
- بررسی تغییرات ریخت‌شناسی در اثر برداشت شن و ماسه
- بررسی اثرهای سازه‌های هیدرولیکی بر انتقال رسوب و پیامدهای ریخت‌شناسی آن

تاکنون مدل‌های مختلفی برای بررسی فرآیند انتقال رسوب و تعامل آن با پدیده‌های ریخت‌شناسی ارائه شده است. در زیر به معرفی جزییات بیش‌تری از مدل‌ها پرداخته شده و در جدول (۴-۶) نیز خلاصه‌ای از مشخصه‌های مدل‌های رایانه‌ای مورد استفاده در مطالعات مهندسی رودخانه آورده شده است.

HEC-6 –

نرم افزار HEC-6 که توسط مرکز هیدرولوژی گروه مهندسی ارتش امریکا تهیه شده است، یکی از متداول‌ترین مدل‌های کامپیوتری بستر متحرک برای محاسبات یک بعدی در رودخانه‌ها می‌باشد. این مدل برای تحلیل فرسایش و رسوب‌گذاری از طریق اندرکنش مخلوط آب و رسوب، مصالح بستر و هیدرولیک جریان توسعه یافته است. این مدل قدرت رودخانه را برای حمل رسوب شبیه‌سازی می‌کند. حمل بار بستر، حمل سیلت و رس، رسوب‌گذاری، سپر شدگی و از بین رفتن لایه سپر در مدل قابل بررسی می‌باشد. مدل همچنین توانایی تعیین محل و حجم رسوب‌گذاری در مخزن سد را دارد. فرسایش در پایین‌دست سد، تغییرات دراز مدت فرسایش و رسوب‌گذاری ناشی از اصلاح آبراه و رسوب‌گذاری در کانال‌های کشتیرانی از جمله مواردی است که در مدل قابل بررسی می‌باشد. این مدل برای جریان ماندگار توسعه یافته و برای جریان غیر ماندگار کاربرد ندارد. با توجه به این‌که مدل یک بعدی می‌باشد، توانایی شبیه‌سازی پدیده پیچانرودی یا توزیع رسوب در عرض رودخانه را ندارد.

آخرین نسخه نرم افزار HEC-6 در سال ۲۰۰۴ به عنوان نسخه ۴/۲ توسط گروه هیدرولوژی مهندسین ارتش آمریکا ارائه شده است.

قابلیت‌ها و محدودیت‌های این نرم افزار و جنبه‌های مختلفی که در ارتباط با تعیین ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در این نرم افزار قابل بررسی است عبارتست از [۸۷]:

- تعیین بار کل رسوب برای هر مقطع در بازه مورد نظر
- تعیین تغییرات تراز کف، تراز سطح آب و تراز خط‌القعر
- رسوب‌گذاری در مخازن سدها و بررسی مسایل لایروبی (حجم و موقعیت رسوب‌گذاری)
- عدم امکان شبیه‌سازی جابجایی عرضی رودخانه
- عدم امکان تعیین توسعه پیچاب‌های رودخانه‌ای و توزیع جانبی بار رسوبی در عرض سطح مقطع
- عدم امکان شبیه‌سازی شکل (فرم) کف
- عدم امکان شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه و تراکم آن

GSTARS3 –

این مدل برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در بسترهای آبرفتی در کشور آمریکا توسعه یافته است و با توجه به این‌که از مفهوم لوله جریان در تعیین عوامل هیدرولیک جریان و انتقال رسوب استفاده شده، یک مدل شبه دو بعدی محسوب می‌شود که علاوه بر تغییرات طولی، توانایی تعیین تغییرات در عرض را هم دارد. با توجه به این‌که روش‌های مختلف انتقال رسوب (یازده روش) در مدل مورد استفاده قرار گرفته، امکان به‌کارگیری مدل در شرایط مختلف وجود دارد. قابلیت‌های عمده این مدل به شرح زیر می‌باشد [۱۳]:

- محاسبه نیمرخ سطح آب با انتقال رسوب و بدون آن
- محاسبه نیمرخ سطح آب در شرایط جریان زیر بحرانی، فوق بحرانی و بینابین
- انتقال رسوب و تغییرات طولی و عرضی بستر
- محاسبات سپر شدگی و جور شدگی مصالح بستر
- محاسبه تغییرات در عرض و عمق مقطع بر اساس تئوری حداقل قدرت جریان (شبه سه‌بعدی)

با توجه به این‌که مدل شبه دایمی و شبه دو بعدی می‌باشد، برای جریان های متغیر سریع، جریان‌های غیر دایمی و شرایطی که جریان دو بعدی و سه‌بعدی می‌باشد و همچنین برای جریان‌های ثانویه کاربرد ندارد. این نرم افزار برای اولین بار به وسیله مولیناس و یانگ[1] در سال ۱۹۸۶ برای اداره آبیاری آمریکا تهیه گردید تا شرایط جریان را در یک روش شبه دو بعدی و تغییرات ابعاد هندسی آبراهه‌ها را در یک حالت شبه سه‌بعدی شبیه‌سازی نماید. آخرین نسخه جدید این نرم افزار با نام GSTARS3 ارائه شد که قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن به قرار زیر است:

- انجام محاسبات و تعیین ضرایب هیدرولیکی برای مجاری روباز در دو حالت مرز ثابت و متحرک
- توانایی محاسبه نیمرخ سطح آب در رژیم جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و بینابین
- شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات هیدرولیکی و رسوب در دو جهت طولی و عرضی
- شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات نیمرخ طولی آبراهه‌های آبرفتی و هندسه مقطع عرضی بدون توجه به ثابت بودن یا فرسایش‌پذیری کناره‌ها
- امکان محاسبات حمل رسوب چسبنده در نسخه های جدید (GSTARS2/0, 2/1, 3/0)
- روندیابی رسوب و تغییرات دانه‌بندی و تشکیل لایه مسلح

بنابراین از طریق این نرم افزار می‌توان تغییر تراز بستر و تغییرات جانبی مقاطع عرضی را در طول زمان پیش‌بینی نمود.

Fluvial-12 –

این مدل ریاضی با در نظر گرفتن مرز فرسایش‌پذیر، تغییرات مقطع طولی کف و عرض رودخانه و شکل و توپوگرافی بستر را شبیه‌سازی می‌کند. اطلاعات مورد نیاز به عنوان ورودی این مدل، شامل آبنمود جریان، ترکیب مواد رسوبی بستر و اطلاعات مقاطع عرضی آبراهه می‌باشد. در این مدل تغییر تراز بستر، شکل کف و عرض رودخانه در طی زمان شبیه‌سازی می‌گردد به نحوی‌که این مدل برای رودخانه‌های فرسایش‌پذیر قابل کاربرد می‌باشد. همچنین از جمله کاربردهای دیگر این نرم افزار برای ارزیابی فرسایش

1 - Molinas & Yang

عمومی در محل پل‌های رودخانه‌ای، تعیین نرخ رسوب حمل شده[1]، تغییرات ناشی از برداشت شن و ماسه در رودخانه و تعیین راستای مناسب رودخانه[2] و غیره می‌توان اشاره نمود [۴۵].

قابلیت‌های اصلی این مدل در راستای مطالعات ریخت‌شناسی عبارتست از:

- شبیه‌سازی تغییرات عرض آبراهه‌های طبیعی و آبراهه‌های مصنوعی
- شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر رودخانه
- شبیه‌سازی تغییرات شکل و فرم ناهمواری‌های بستر رودخانه
- شبیه‌سازی اثرهای انحنا و خم‌های رودخانه‌ای
- شبیه‌سازی اثرهای سازه‌های متقاطع رودخانه‌ای و سازه‌های طولی حفاظت

MIKE21-C –

این نرم افزار که قسمتی از بسته نرم افزاری MIKE21 است، توسط موسسه هیدرولیک دانمارک (DHI) به منظور شبیه‌سازی دو بعدی جریان و حمل رسوب در رودخانه‌ها توسعه یافته است. توسط این نرم افزار می‌توان تغییرات رودخانه در کف و پلان را در طی زمان، بررسی و شبیه‌سازی نمود. محدوده طولی مدل از چند صد متر تا بیش از یکصد کیلومتر بوده و محدوده بازه زمانی از چند ساعت تا ده‌ها سال می‌تواند در تهیه مدل رودخانه مورد نظر قرار گیرد.

از جنبه ریخت‌شناسی، شرایط و حالت‌های زیر را می‌توان توسط MIKE21-C شبیه‌سازی نمود و در مطالعات ریخت‌شناسی، نتایج و خروجی های آن مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۳۷].

- جریان و حمل رسوب
- فرسایش کناری و فرسایش کف
- فرسایش در قوس، فرسایش موانع رودخانه‌ای، فرسایش ناشی از به‌هم پیوستن رودخانه‌ها و فرسایش عمومی
- تشکیل و مسدود شدن آبراهه از جمله دو شاخه شدن
- پدیده رسوب‌گذاری در مصب[3] (در ناحیه جزر و مدی رودخانه)، بارهای رسوبی و پشته‌های رسوبی
- تشکیل لایه مسلح[4] و لایه درشت دانه در بستر رودخانه
- مقاومت آبرفتی[5]

بر این اساس کاربردهای معمول این نرم افزار عبارتست از:

- طرح حفاظت کناره در برابر فرسایش کف و کناره‌ها
- اقدامات کاهش و کنترل رسوب‌گذاری در مصب
- بررسی اثرهای سازه‌هایی مانند سرریز، آبشکن، بند انحرافی و سرریزهای جانبی

---

1 - Sediment Delivery
2 - Channelization
3 - Shoaling
4 - Armour Layer
5 - Alluvial Resistance

- تعیین راستا و ابعاد آبراهه‌های کشتیرانی به منظور به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری و لایروبی
- رسوب‌گذاری در آب‌گیرها، خروجی‌ها[1]، بندهای کشتیرانی، اسکله‌ها و مخازن
- بررسی اثر پل‌ها، تونل و خطوط لوله متقاطع با رودخانه بر فرسایش و رسوب رودخانه
- طرح‌های احیا و بازیابی زیست محیطی در سیلابدشت و آبراهه اصلی رودخانه‌ها
- شبکه‌های پایش بر مبنای پیش‌بینی‌های ریخت‌شناسی

CCHE –

از سال ۱۹۸۹ توسط مرکز ملی علوم هیدرولیک محاسباتی و مهندسی (NCCHE[2])، نسبت به تهیه و توسعه نرم افزارهایی به منظور شبیه‌سازی جریان و رسوب در محیط‌های طبیعی اقدام گردید که درنتیجه مدل‌هایی یک بعدی، دو بعدی و سه‌بعدی تهیه شد که برای شبیه‌سازی حالت‌های وسیعی از جریان سطح آزاد و حمل رسوب به کار گرفته شد. این نرم افزارها به نام‌هایCCHE 1D، CCHE 2D و CCHE 3D معرفی شده که به ترتیب دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد [۹۸]:

الف – CCHE 1D

این نرم افزار برای شبیه‌سازی یک بعدی جریان غیر دایمی و انتقال رسوب در شبکه آبراهه‌ها توسعه یافته است. نرم افزار مذکور به گونه‌ای طراحی شده که امکان ترکیبی مدل‌های حوضه آبریز و رودخانه را دیده است. مدل هیدرودینامیک CCHE1D شامل روند مخصوصی برای محاسبه جریان در تقاطع با سازه‌های هیدرولیکی کالورت‌ها، آبشارهای کوتاه و بلند، پل‌ها و فلوم‌های اندازه‌گیری می‌باشد. مدول انتقال رسوب، محاسبات حمل رسوب غیر تعادلی جریان غیر یکنواخت را انجام می‌دهد. این نرم افزار برای پیش‌بینی دراز مدت تغییرات ریخت‌شناسی طراحی شده و لذا می‌تواند برای ارزیابی اثر پذیری آبراهه و سازه‌های کنترلی بر روی میدان رسوب به کار گرفته شود.

ب – CCHE 2D

این نرم افزار یک بسته جامع برای شبیه‌سازی دو بعدی و تجزیه جریان یکنواخت رودخانه، انتقال رسوب و روند ریخت‌شناسی و کیفیت آب می‌باشد.

تغییرات شکل‌های بستر ناشی از انتقال بار بستر قابل شبیه‌سازی بوده و تاثیر جریان‌های ثانویه بر انتقال رسوب در بازه‌های قوسی قابل شبیه‌سازی است.

محدوده مدل سازی آن:

- مدل فرسایش کناره‌ها و جابجایی جانبی مسیر
- انتقال غیر تعادلی ذرات رسوب و پدیده جور شدگی مصالح بستر
- مدل انتقال بار معلق

---

1 - Outlets
2 - National Center for Computational Hydroscience and Engineering

- تغییرات ریخت‌شناسی بستر ناشی از انتقال بار بستر
- تغییر شکل بستر ناشی از نیروی ثقل

ج – CCHE 3D

این مدل، یک نرم افزار با قابلیت شبیه‌سازی سه‌بعدی برای محاسبات جریان‌های آزاد، آشفته و انتقال رسوب، انتقال آلودگی و مسایل کیفیت آب می‌باشد.

– SEFLOW

برای مطالعه جریان، انتقال رسوب و تغییرات ریخت‌شناسی در شبکه آبراهه‌ها و رودخانه‌ها در کشور هلند توسعه یافته است. این مدل یک بعدی بوده و در شرایط جریان ماندگار و غیر ماندگار قابل کاربرد می‌باشد. عمده قابلیت‌های این مدل به شرح زیر می‌باشد:

- روند یابی جریان و رسوب برای جریان ماندگار و غیر ماندگار در شبکه رودخانه‌ها و کانال‌ها
- بررسی اثرهای ناشی از احداث سازهای هیدرولیکی بر شرایط جریان، تغییرات بستر و ریخت‌شناسی رودخانه
- بررسی جریان‌های سیلابی در رودخانه‌های جزر و مدی
- مطالعه انتقال رسوب به صورت بار معلق و بار کل

این مدل برای پدیده‌هایی که شرایط دو بعدی یا سه‌بعدی در آنها حاکم است، کاربرد ندارد. به دلیل این‌که تعداد روش‌های به کار گرفته شده در این مدل برای انتقال رسوب کم است (سه روش)، قابلیت انعطاف برای انتخاب روش‌های مختلف محدود است.

– MOBED

برای تحلیل جریان و رسوب در رودخانه‌ها در کشور کانادا توسعه یافته است. این مدل یک بعدی بوده و برای جریان غیر ماندگار قابل کاربرد می‌باشد. این مدل برای پیش بینی تغییرات تراز بستر، بررسی تاثیر انحراف جریان، بررسی اثر سازه‌های هیدرولیکی نظیر سد بر نیمرخ بستر و بررسی تغییرات در مشخصات رسوبی بستر کاربرد دارد. مدل فقط برای رسوب غیرچسبنده قابل کاربرد بوده و به دلیل این‌که فقط از یک رابطه برای انتقال رسوب استفاده می‌کند، محدوده کاربرد آن کم می‌باشد [۷].

– MIKE11

برای شبیه‌سازی جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب در شبکه کانال‌ها و رودخانه‌ها در کشور دانمارک توسعه یافته و در سطح وسیعی از کشورها و از جمله ایران مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل یک بعدی دارای مولفه‌های مختلف برای مطالعات هیدرولوژی، پیش‌بینی سیلاب، شبیه‌سازی جریان، انتقال رسوبات چسبنده و غیرچسبنده، تغییرات ریخت‌شناسی و کیفیت آب در حالت‌های جریان ماندگار و غیرماندگار می‌باشد [۷].

زیر برنامه هیدرودینامیکهسته مرکزی مدل MIKE11 به شمار می‌رود و برای حل معادلات پیوستگی و مومنتوم و به طور کلی معادلات معروف سنت ونان به کار می‌رود.

کاربرد این زیر برنامه‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- پیش‌بینی سیل و عملکرد مخزن
- شبیه‌سازی کنترل سیل
- ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری و زهکش‌های سطحی
- طراحی سامانه‌ی کانال
- مطالعات جذر و مدی در رودخانه‌ها و خورها

HEC-RAS –

مدل ریاضی HEC-RAS، یک نرم افزار کاربردی و مناسب در مطالعات هیدرولیک رودخانه‌ها به‌شمار می‌آید. این مدل می‌تواند جریان متغیر تدریجی را با هر نوع مقطع عرضی در حالات دایمی، غیردایمی و همچنین انتقال رسوب در مرز متحرک را به‌صورت یک بعدی شبیه‌سازی می‌نماید. این مدل از معادله انرژی برای محاسبات استفاده کرده و برای حالاتی که تغییرات نیمرخ سطح آب سریع باشد، از معادله مومنتوم استفاده می‌کند. این مدل قادر به شبیه‌سازی جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی می‌باشد. در حل جریان غیردایمی از مدل UNET اقتباس می‌کند. در این مدل امکان ارتباط با GIS وجود دارد، به‌طوری‌که معمولا مقاطع عرضی و ضرایب مانینگ از محیط GIS وارد محیط HEC می‌شود و پس از انجام محاسبات هیدرولیکی مجددا به محیط GIS شده و خروجی در آنجا به‌دست می‌آید. البته می‌توان نتایج را در محیط HEC نیز مشاهده نمود. در این مدل انواع پل‌ها، آبگذرها، سرریزها، سازه‌های موجود در سیلابدشت و انواع کانال‌ها با اشکال مختلف شبیه‌سازی می‌شوند. در این مدل می‌توان زبری در طول کانال و همچنین فاصله مقاطع را متغیر انتخاب کرد. در این مدل ۷ معادله انتقال رسوب منظور شده است [۷].

جدول ۴-۶- مشخصه‌های مدل‌های کامپیوتری مورد استفاده در مطالعات رودخانه‌ها

شاخص‌های عددی	نام مدل								
	HEC-6	GSTARS3	FLUVIAL-12	MIKE21-C	CCHE	SEFLOW	MOBED	MIKE11	HEC-RAS
نوع مدل	یک بعدی	شبه دو بعدی	شبه دو بعدی	دو بعدی	یک، دو و سه‌بعدی	یک بعدی	یک بعدی	یک بعدی	یک بعدی
نوع جریان	ماندگار شبه ماندگار	ماندگار- شبه ماندگار	ماندگار- شبه ماندگار	غیر ماندگار	غیر ماندگار	غیر ماندگار	غیر ماندگار	ماندگار- غیر ماندگار	ماندگار- غیر ماندگار
حالت جریان	زیر بحرانی	زیر بحرانی فوق بحرانی	زیر بحرانی فوق بحرانی	زیر بحرانی فوق بحرانی	زیر بحرانی فوق بحرانی	زیر بحرانی	زیر بحرانی	مختلط	مختلط
نوع رسوب	چسبنده و غیر چسبنده	چسبنده و غیر چسبنده	غیر چسبنده	چسبنده و غیر چسبنده	چسبنده و غیر چسبنده	غیر چسبنده	غیر چسبنده	چسبنده و غیر چسبنده	چسبنده و غیر چسبنده
تعداد روش‌های حمل رسوب	۱۲	۱۱	۶	۵	۴	۳	۱	۵	۷
شبیه‌سازی اثرهای سازه‌های هیدرولیکی	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
شبیه‌سازی تغییرات عرضی مجرا	ندارد	دارد	دارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد
شبیه‌سازی تغییرات طولی	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
شبیه‌سازی جابجایی خم‌ها	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد
محل توسعه مدل	آمریکا	آمریکا	آمریکا	دانمارک	آمریکا	هلند	کانادا	دانمارک	آمریکا

علیرغم محاسن و قابلیت‌های زیادی که مدل‌های ریاضی در تحلیل فرآیند انتقال رسوب دارا می‌باشند شرط استفاده موثر از آنها اطمینان از نتایج حاصل را طلب می‌کند. به عبارتی برای اطمینان از عملکرد مدل انجام فرآیند واسنجی ضروری می‌باشد. این امر وجود داده‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های صحرایی را الزامی می‌کند.

۴-۲-۳-۳- تعیین منحنی سنجه- رسوب و رابطه بده رسوبی معلق مبتنی بر داده‌های آماری

در ایستگاه‌های آب‌سنجی علاوه بر اندازه‌گیری بده جریان (Q)، هم‌زمان غلظت مواد رسوبی معلق (C) نیز با نمونه‌برداری و انجام تجزیه آزمایشگاهی تعیین می‌گردد. این‌گونه اطلاعات بخشی از آمار کلاسیک رودخانه بوده و از طریق سازمان‌های مربوط (نظیر شرکت مدیریت منابع آب ایران- وزارت نیرو) قابل دسترسی است. با استفاده از مقادیر C و Q تناژ رسوب رودخانه از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$Q_s = 0.0864CQ_d \qquad (۹-۴)$$

که در این رابطه:

Q_s: نرخ انتقال رسوب معلق بر حسب تن در روز

C: غلظت مواد رسوبی معلق بر حسب میلی گرم در لیتر

Q_d: آبدهی روزانه بر حسب متر مکعب بر ثانیه می‌باشد

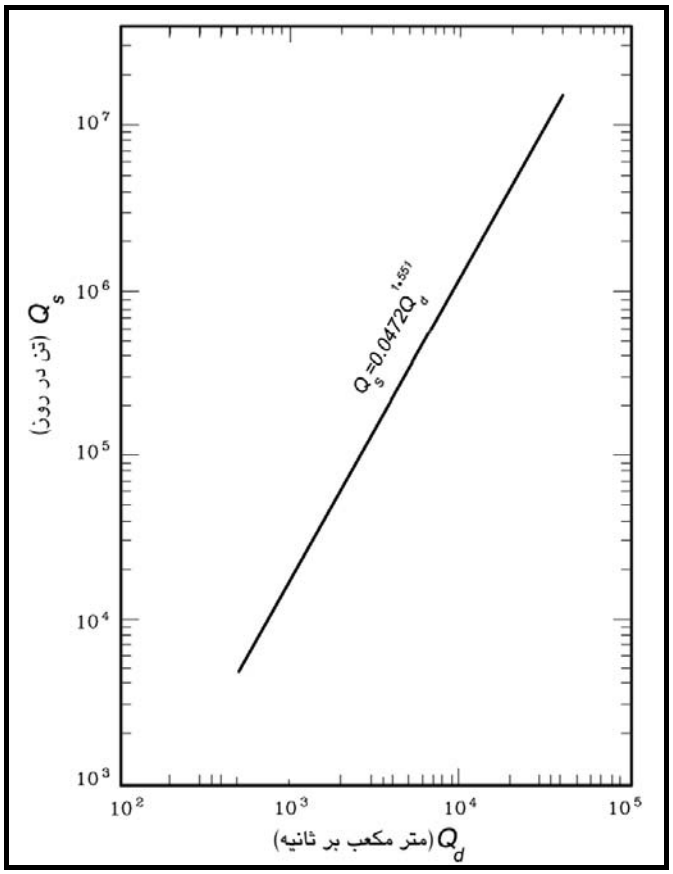
منحنی حاصل از برازش آماری بر داده‌های بده جریان و رسوب را منحنی سنجه رسوب[1] می‌نامند. در شکل (۴-۱۴) نمونه‌ای از منحنی سنجه رسوب نشان داده شده است [۸۷].

مطابق نمودار ارائه شده در شکل (۴-۱۴) منحنی سنجه رسوب معمولا توسط یک معادله نمایی مشخص می‌گردد. شکل کلی رابطه نمایی بده رسوبی معلق به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_s = aQ_d^b \qquad (۱۰-۴)$$

در این رابطه aوb ضرایب معادله هستند که به روش همبستگی تعیین می‌گردند.. در شکل (۴-۱۴) ضرایب معادله نمایی شامل $a = 0.0472$، $b = 1.551$ می‌باشد. بدیهی است برای هر رودخانه‌ای با توجه به شرایط حوضه‌ای، شاخص‌های ریخت‌شناسی، جنس مواد بستر و کناره‌ها و نظام هیدرولوژیک مقادیر a و b متفاوت می‌باشد. از دیدگاه ریخت‌شناسی بار معلق به خصوص در مواقع سیلابی که دارای غلظت بالایی است، در شکل‌گیری سیلابدشت‌ها و تقویت پوشش گیاهی و ایجاد زیست بوم مناسب در حاشیه‌های رودخانه دارای اهمیت زیادی است.

1 - Sediment Rating Curve



شکل ۴-۱۴- نمونه‌ای از منحنی سنجه رسوب و رابطه بده رسوبی معلق مربوط[۸۷]

۴-۲-۳-۴- تعیین تناژ رسوب معلق سالیانه حمل شده توسط رودخانه

رسوب معلق از جمله شاخص‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها تلقی می‌شود. تعیین تناژ رسوب معلق سالانه به دو روش زیر متداول است:

- استفاده از روش میانگین وزنی
- روش منحنی دوام جریان

در روش میانگین وزنی برای یک دوره آماربرداری مقادیر تناژ رسوب برای هر سال آبی تعیین و با میانگین‌گیری از آنها مطابق روابط زیر تناژ رسوب معلق سالانه محاسبه می‌شود:

$$Q_{syi} = \sum_{j=1}^{365} Q_{sj} \qquad (۱۱-۴)$$

$$\overline{Q_{sy}} = \sum_{i=1}^{N} Q_{syi} / N \qquad (۱۲-۴)$$

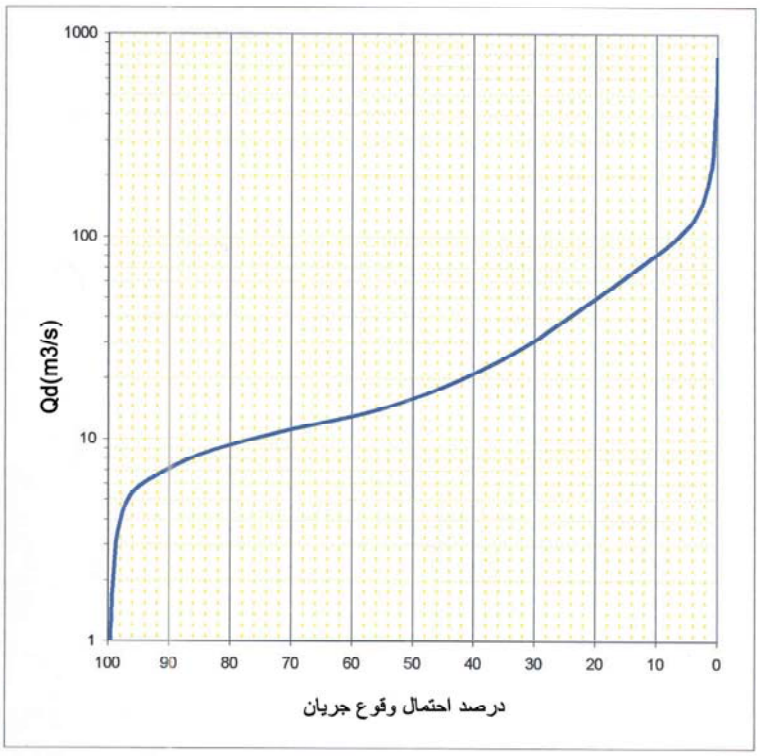
که در این روابط:

Q_{sj}: تناژ رسوب در روز مورد نظر از سال، j: شاخص روز (از ۱ تا ۳۶۵ تغییر می‌کند)، Q_{syi}: تناژ رسوب سالانه برای سال i (i از ۱ تا N تغییر می‌کند)، N: تعداد سال های آماری و $\overline{Q_{sy}}$ تناژ رسوب سالانه رودخانه می‌باشد.

در روش منحنی دوام جریان لازم است مطابق شکل (۴-۱۵) نمودار بده روزانه (Q_d) بر حسب احتمال وقوع جریان برای دوره آماری مشخص ترسیم گردد [۶۹]. با استفاده از منحنی دوام جریان براساس الگوی مندرج در جدول (۴-۷)، بده روزانه رتبه‌بندی شده و برای هر کلاس احتمال وقوع مشخص می‌گردد. با قرار دادن بده رتبه مربوط در معادله نمایی بده آب – بده رسوب (در مورد تعیین معادله بده آب – بده رسوب به مبحث ۴-۲-۴-۳ مراجعه شود) تناژ رسوب در هر رتبه تعیین و از جمع رتبه‌های متوالی متوسط تناژ رسوب روزانه تعیین و از حاصل‌ضرب آن در تعداد روزهای سال (۳۶۵) تناژ سالانه مشخص می‌گردد. مطابق جدول (۴-۷) برای رودخانه شاهرود متوسط بده رسوب روزانه(Q_s) برابر با۲۰۵۲۰ تن و متوسط تناژ رسوب معلق سالانه ۷۴۹۱۵۹۹= $\overline{Q}_{sy}$ تن در سال (حدود ۷٫۵ میلیون تن در سال) می‌باشد. همچنین برای رودخانه شاهرود معادله بده آب – بده رسوب به صورت زیر استخراج گردیده است [۶۹]:

$$Q_s = 1.0701 Q_d^{2.341} \qquad (۱۳-۴)$$

اطلاعات بیش‌تر در خصوص تعیین تناژ رسوب معلق در منابع مختلف ارائه شده است. ازجمله یانگ (۲۰۰۳) معادلات مختلفی را برای تعیین بار معلق ارائه داده است. به علاوه شن [۸۳] در کتاب مکانیک رودخانه روش‌های تعیین بار معلق و تعامل آن را با ریخت‌شناسی بررسی کرد. از دیدگاه ریخت‌شناسی تناژ رسوب سالانه حمل شده با توجه به تاثیر آن در شکل‌گیری مشخصه‌های هندسی رودخانه همواره مورد توجه متخصصین ریخت‌شناسی بوده است. از این رو مراجع مختلفی که برای بررسی ساختار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها تدوین گردیده است، بخشی از مباحث عنوان شده اختصاص به معادلات انتقال رسوب و نحوه تعیین تناژ رسوب سالانه دارد[۶۵، ۸۶،۹۷].



شکل ۴-۱۵- نمونه‌ای از منحنی دوام جریان برای دوره آماری مشخص (رودخانه شاهرود)[۲۶]

جدول ۴-۷- تعیین متوسط رسوب‌دهی سالانه (بار معلق) به روش منحنی دوام جریان برای دوره آماری ۴۳ ساله (منتهی به سال ۸۰-۷۹)

نتایج محاسباتی رسوب بار معلق در رودخانه شاهرود(ایستگاه لوشان)					
$Q_s(2)*(4)$ تن بر روز	Q_s تن بر روز	بده جریان متر مکعب بر ثانیه	احتمال وقوع در هر کلاس(درصد)	محدوده احتمال وقوع (درصد)	
۵	۴	۳	۲	۱	
۷/۰۱۶E۰/۰۵	۱/۴۰۳E۰/۰۱	۰/۴۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰
۸/۲۴۶E۰/۰۵	۱/۶۴۹E۰/۰۱	۰/۴۵	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۰۵
۴/۰۴۴E۰/۰۴	۴/۰۴۴E۰/۰۱	۰/۶۶	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۱۰
۳/۸۴۴E۰/۰۳	۱/۲۸۱E+۰۰	۱/۰۸	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۲۰
۲/۶۴۹E۰/۰۲	۵/۲۹۹E+۰۰	۱/۹۸	۰/۰۵	۱/۰۰	۰/۵۰
۱/۹۸۵E۰/۰۱	۱/۹۸۵E+۰۱	۳/۴۸	۱/۰۰	۲/۰۰	۱/۰۰
۱/۵۲۵E+۰۰	۵/۰۸۴E+۰۱	۵/۲۰	۳/۰۰	۵/۰۰	۲/۰۰
۴/۲۴۱E+۰۰	۸/۰۴۸E+۰۱	۶/۴۷	۵/۰۰	۱۰/۰۰	۵/۰۰
۱/۵۴۱E+۰۱	۱/۵۴۱E+۰۲	۸/۳۵	۱۰/۰۰	۲۰/۰۰	۱۰/۰۰
۲/۵۲۰E+۰۱	۲/۵۲۰E+۰۲	۱۰/۳۰	۱۰/۰۰	۳۰/۰۰	۲۰/۰۰
۳/۶۰۴E+۰۱	۳/۶۰۴E+۰۲	۱۲/۰۰	۱۰/۰۰	۴۰/۰۰	۳۰/۰۰
۵/۲۵۸E+۰۱	۵/۲۵۸E+۰۲	۱۴/۱	۱۰/۰۰	۵۰/۰۰	۴۰/۰۰
۹/۵۵۸E+۰۱	۹/۵۵۸E+۰۲	۱۸/۲۰	۱۰/۰۰	۶۰/۰۰	۵۰/۰۰
۲/۰۱۸E+۰۲	۲/۰۱۸E+۰۳	۲۵/۰۴	۱۰/۰۰	۷۰/۰۰	۶۰/۰۰
۵/۶۹۶E+۰۲	۵/۶۹۶E+۰۳	۳۹/۰۰	۱۰/۰۰	۸۰/۰۰	۷۰/۰۰
۱/۰۵۱E+۰۳	۱/۵۰۲E+۰۴	۵۹/۰۰	۷/۰۰	۸۷/۰۰	۸۰/۰۰
۱/۱۴۳E+۰۳	۲/۸۵۶E+۰۴	۷۷/۶۴	۴/۰۰	۹۱/۰۰	۸۷/۰۰
۸/۳۰۷E+۰۲	۴/۱۵۴E+۰۴	۹۱/۱۰	۲/۰۰	۹۳/۰۰	۹۱/۰۰
۱/۱۰۷E+۰۳	۵/۵۳۷E+۰۴	۱۰۳/۰۰	۲/۰۰	۹۵/۰۰	۹۳/۰۰
۱/۵۸۴E+۰۳	۷/۹۱۹E+۰۴	۱۲۰/۰۰	۲/۰۰	۹۷/۰۰	۹۵/۰۰
۱/۲۶۹E+۰۳	۱/۲۶۹E+۰۵	۱۴۶/۷۶	۱/۰۰	۹۸/۰۰	۹۷/۰۰
۲/۱۰۰E+۰۳	۲/۱۰۰E+۰۵	۱۸۲/۰۰	۱/۰۰	۹۹/۰۰	۹۸/۰۰
۲/۰۰۷E+۰۳	۴/۰۱۵E+۰۵	۲۴۰/۰۰	۰/۰۵	۹۹/۵۰	۹۹/۰۰
۳/۳۲۳E+۰۳	۱/۱۰۸E+۰۶	۳۷۰/۱۹	۰/۳۰	۹۹/۸۰	۹۹/۵۰
۱/۷۲۳E+۰۳	۱/۷۲۳E+۰۶	۴۴۷/۰۰	۰/۱۰	۹۹/۹۰	۹۹/۸۰
۴/۷۴۰E+۰۲	۲/۳۷۰E+۰۶	۵۱۲/۲۴	۰/۰۲	۹۹/۹۲	۹۹/۹۰
۵/۳۶۵E+۰۲	۲/۶۸۳E+۰۶	۵۴۰/۰۸	۰/۰۲	۹۹/۹۴	۹۹/۹۲
۵/۵۹۹E+۰۲	۲/۷۹۹E+۰۶	۵۵۰/۰۰	۰/۰۲	۹۹/۹۶	۹۹/۹۴
۵/۹۶۷E+۰۲	۲/۹۸۴E+۰۶	۵۶۵/۱۶	۰/۰۲	۹۹/۹۸	۹۹/۹۶
۱/۲۱۸E+۰۳	۶/۰۹۰E+۰۶	۷۶۶/۴۴	۰/۰۲	۱۰۰/۰۰	۹۹/۹۸
۲/۰۵۲E+۰۴			جمع		
مترمکعب بر ثانیه	۳۳/۳۸	بده متوسط			
تن بر روز	۲۰۵۲۰	بده رسوب متوسط			
تن در سال	۷۴۹۱۵۹۹	بده متوسط سالانه رسوب معلق			
تن بر کیلومتر مربع بر سال	۱۵۴۴/۳	بده ویژه متوسط			
معادله:	$Q_s = 1.0701 Q_d^{2.341}$				

۴-۲-۳-۵- تعیین ظرفیت حمل رسوب و مشخص کردن میزان بار بستر در بازه‌ها

رودخانه‌ها به تبعیت از شیب، بده جریان و دانه‌بندی مواد بستر قادر به حمل مقدار معینی بار رسوبی می‌باشند که اصطلاحا ظرفیت حمل رسوب [1] گویند. ظرفیت حمل رسوب شاخصی از توان فرسایشی رودخانه تلقی می‌شود.

از این‌رو در مطالعات ریخت‌شناسی آگاهی از ظرفیت حمل رسوب برای تحلیل رفتار رودخانه ضروری می‌باشد [۵۳،۷۳]. به طور کلی در مجرای اصلی ظرفیت حمل رسوب بیش‌تر از ناحیه سیلابدشت می‌باشد. با سرریز سیلاب بخش عمده‌ای از رسوب در سطح سیلابدشت ترسیب می‌شود. در امتداد مسیر جریان بازه‌هایی که دارای ظرفیت حمل رسوب بالایی هستند مستعد فرسایش بوده و در بازه‌های با توان حمل رسوب کم‌تر پدیده رسوب‌گذاری قابل انتظار است. برای تعیین ظرفیت حمل رسوب از معادلات مختلفی می‌توان بهره جست. تاکنون متجاوز از ۳۰ معادله انتقال برای محاسبه ظرفیت حمل رسوب ارائه شده است[۹۷]. بعضی از این معادلات برای بسترهای شنی که دارای دانه‌بندی درشتی می‌باشند کاربرد دارند. از این گروه می‌توان معادله مایر-پیتر- مولر [2]، شاکلیش [3] و شیلدز [4] را نام برد. معادلاتی وجود دارند که مناسب برای بسترهای ماسه‌ای و دانه‌بندی ریزتر می‌باشند. از جمله این معادلات می‌توان به ایکزر– وایت [5] و انگلند – هانسن [6] اشاره کرد.

با استفاده از معادلات انتقال می‌توان مقدار بار بستر را تعیین نمود. معادلاتی که برای تعیین بار بستر استفاده می‌شوند عبارتند از: معادله مایر- پیتر- مولر، شاکلیش، اسمارت، باگنولد [7]، یالین [8]، شیلدز [۴۲،۹۷، ۸۷].

شرح تفصیلی این معادلات توسط یانگ ارائه شده است [۹۷]. در زیر معادله شاکلیش، مایر- پیتر- مولر و شیلدز به عنوان نمونه معرفی می‌شود. این معادلات از جمله روابطی هستند که در مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها کاربرد زیادی دارند.

- معادله شاکلیش برای تعیین بار بستر:

$$q_{sb} = \frac{2.5}{Gs} S^{3/2} (q - q_c) \qquad (۱۴-۴)$$

$$q_c = 0.26\ (G_s - 1)^{5/3} \frac{D_{40}^{3/2}}{S^{7/6}} \qquad (۱۵-۴)$$

$$Q_{sb} = b * q_{sb} \qquad (۱۶-۴)$$

که در این روابط:

q_{sb}: بده بار بستر در واحد عرض (مترمربع بر ثانیه)، q: بده جریان در واحد عرض (مترمربع بر ثانیه) q_c: بده بحرانی جریان در واحد عرض (مترمربع بر ثانیه)، S: شیب رودخانه (شیب خط انرژی)، G_s: چگالی دانه‌های رسوب (بی بعد)، D_{40}: قطر نظیر ۴۰ درصد ریزتر وزنی مواد رسوبی بستر (متر)، Q_{sb}: بده بار بستر در تمام عرض مجرا (مترمکعب بر ثانیه) و b متوسط عرض رودخانه (متر) می‌باشد.

---

1 - Sediment Transport Capacity
2 - Meyer – Peter - Muller
3 - Schoklitsch
4 - Shields
5 - Ackers and White
6 - Engelund- Hansen
7 - Bagnold
8 - Yalin

معادله مایر- پیتر- مولر برای تعیین بار بستر:

$$\gamma(\frac{k_s}{k_r})^{3.2} RS = 0.047(\gamma_s - \gamma)d + 0.25\rho^{1.3}q_b^{2.3} \quad (۱۷-۴)$$

که در این رابطه:

q_b: نرخ بار بستر در واحد عرض (نیوتن بر متر ثانیه)، R: شعاع هیدرولیکی (متر)،S: شیب خط انرژی، γ و γ_s: به ترتیب وزن مخصوص آب و رسوب (نیوتن بر متر مکعب)، d: قطر میانه ذرات رسوب (متر) و ρ جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد.

از حاصل‌ضرب q_b در عرض رودخانه (b) بده بار بستر در عرض مجرا بر حسب (نیوتن بر ثانیه) حاصل می‌شود.

مقدار ($\frac{k_s}{k_r}$) از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$k_s = \frac{1}{n} \quad (۱۸-۴)$$

$$k_r = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad (۱۹-۴)$$

که در این روابط n: ضریب مانینگ مجرا و d_{90} قطر نظیر ۹۰ درصد ریزتر وزنی مواد بستر (متر) می‌باشد.

(۲۰-۴) معادله شیلدز

$$\frac{q_b\gamma_s}{\gamma q} = 10\frac{\tau_0 - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d}$$

که دراین رابطه:

q_b: بار بستر در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه بر متر)، q: بده جریان در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه بر متر)، τ_0: تنش برشی بستر (نیوتن بر مترمربع) و τ_c تنش برشی بحرانی می‌باشد که از منحنی شیلدز تعیین می‌شود. (نیوتن بر مترمربع)

با استفاده از روابط فوق می‌توان مقدار بار بستر حمل شده توسط رودخانه را در بازه‌های مختلف محاسبه و با هم مقایسه نمود. تفاوت بین بار بستر در مقطع ورودی و خروجی، وضعیت بازه را از نظر فرسایش و رسوب‌گذاری مشخص می‌دارد. در صورتی‌که رسوب ورودی بیش‌تر از خروجی باشد پدیده رسوب‌گذاری و بالاآمدن کف رودخانه قابل انتظار است. چنان‌که رسوب خروجی از بازه بیش‌تر از رسوب ورودی آن باشد فرسایش کف و کناره‌ها اتفاق می‌افتد.

۴-۲-۳-۶- تعیین بار کل رسوب[1]

بار کل مجموع بار بستر و بار معلق می‌باشد که به ازای بده معین باید تعیین گردد. در مباحث پیشین روش محاسبه بار بستر و بار معلق ارائه گردید. نظر به این‌که اندازه‌گیری بار بستر در ایستگاه‌های آب‌سنجی بر خلاف بار معلق متداول نمی‌باشد، لذا در کارهای مهندسی تعیین بار کل با بهره‌گیری از معادلات انتقال رسوب امکان‌پذیر است. در این روش با استفاده از معادلاتی نظیر یانگ، انگلند - هانسن و ایکرز- وایت مقدار بار کل برای بده مورد نظر مستقیما قابل محاسبه می‌باشد. جزییات کامل‌تری در خصوص معادلات

1 - Total Load

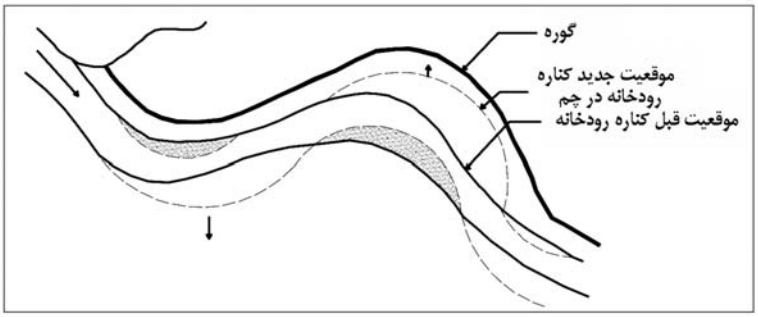
تعیین بار کل توسط یانگ معرفی شده است [۹۷]. بر اساس بررسی‌های یانگ معادلات مناسب برای تعیین بار کل مطابق جدول (۴-۸) می‌باشد. در این جدول رتبه ۱ متعلق به معادله یانگ بوده و نتایج حاصل از آن از نظر دقت ارزیابی در شرایط مشابه بر سایر معادلات ارجحیت دارد. این ارزیابی توسط انجمن مهندسین عمران آمریکا (ASCE[1]) انجام گرفته است [۹۷].

جدول ۴-۸- رتبه بندی معادلات رسوب بر اساس بررسی‌های یانگ [۹۵]

نام معادله		نوع معادله	رتبه معادله
Yang	یانگ	بارکل	۱
Laursen	لارسن	بارکل	۲
Ackers - White	اکرز-وایت	بارکل	۳
Engelund- Hansen	انگلند-هانسن	بارکل	۴
MPME	مایر- پیتر- مولر- انشتین	بارکل	۵

۴-۲-۳-۷- مشخص کردن وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری در بازه‌های مختلف رودخانه

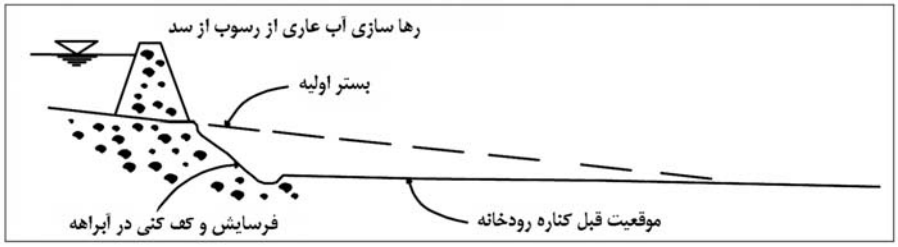
فرسایش و رسوب‌گذاری از جمله عوامل اصلی در مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه قلمداد می‌شود. از این رو در بررسی مشخصه‌های ریخت‌شناسی و تحلیل رفتار رودخانه‌ها، لازم است وضعیت بازه‌های مختلف از دیدگاه فرسایش و رسوب‌گذاری مشخص شود. انواع فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها را می‌توان به دو صورت عمومی[2] و موضعی[3] [۴۴،۸۱] در نظر گرفت. رودخانه در اثر فرسایش عمومی دچار کف‌کنی گردیده و احتمال ناپایداری و ریزش کناره‌ها تشدید می‌گردد. این امر پلان مسیر و مشخصه‌های هندسی رودخانه را دستخوش تغییر می‌نماید به علاوه فرسایش موضعی از جمله عوامل ناپایداری و تغییر شکل رودخانه‌ها تلقی می‌شود. پدیده فرسایش موضعی در خم رودخانه‌ها نمود بیش‌تری دارد. این امر موجب جابجایی عرضی و تغییر مسیر رودخانه می‌گردد. در شکل (۴-۱۶) نمونه‌ای از تغییر مسیر رودخانه در اثر فرسایش در خم‌ها نشان داده شده است. در مسیرهای مستقیم نیز در اثر پدیده پنجه شویی[4] ریزش توده‌ای و تخریب کناره‌ها و تعریض بستر قابل انتظار است.



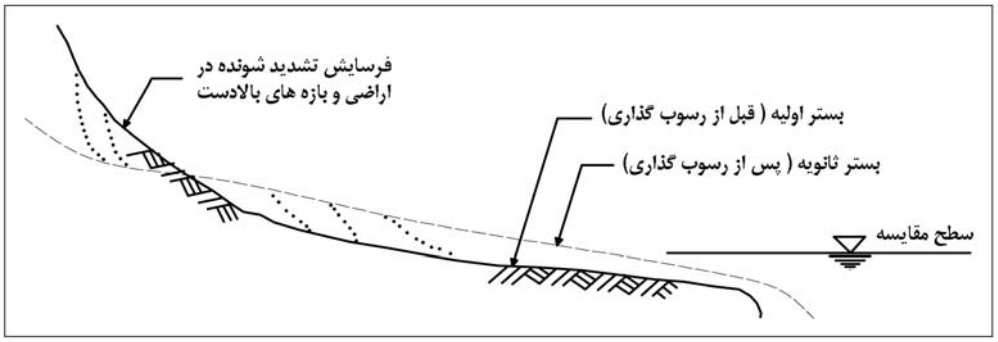
شکل ۴-۱۶- جابجایی مسیر رودخانه در اثر فرسایش در خم‌ها [۶۳]

1 - American Society of Civil Engineers
2 - General Scour
3 - Local Scour
4 - Toe Erosion

در وقوع فرسایش‌های عمومی و موضعی عوامل طبیعی و انسانی دخالت دارند. از جمله این عوامل می‌توان به وقوع سیلاب‌ها، تغییر آورد رسوب و بده جریان، احداث تاسیسات آبی نظیر سدها، بندها، سازه‌های حفاظتی، پل‌ها و برداشت شن و ماسه اشاره نمود. با احداث سد، کف‌کنی در بازه‌های پایین‌دست آغاز گردیده و تا رسیدن به شرایط تعادل ادامه می‌یابد. در شکل (۴-۱۷) تاثیر احداث سد در کف‌کنی فراگیر در مسیر رودخانه نشان داده شده است [۸۱]. علت اصلی در وقوع کف‌کنی در بازه‌های پایین‌دست سد، تله‌اندازی رسوب در مخزن سد و تخلیه آب صاف (عاری از رسوب) به پایین‌دست می‌باشد. بدیهی است هم‌زمان با کف‌کنی در پایین دست سد، رسوب‌گذاری در بالادست قابل انتظار است.



شکل ۴-۱۷-وقوع کف‌کنی عمومی در پایین‌دست سد مخزنی [۸۱]

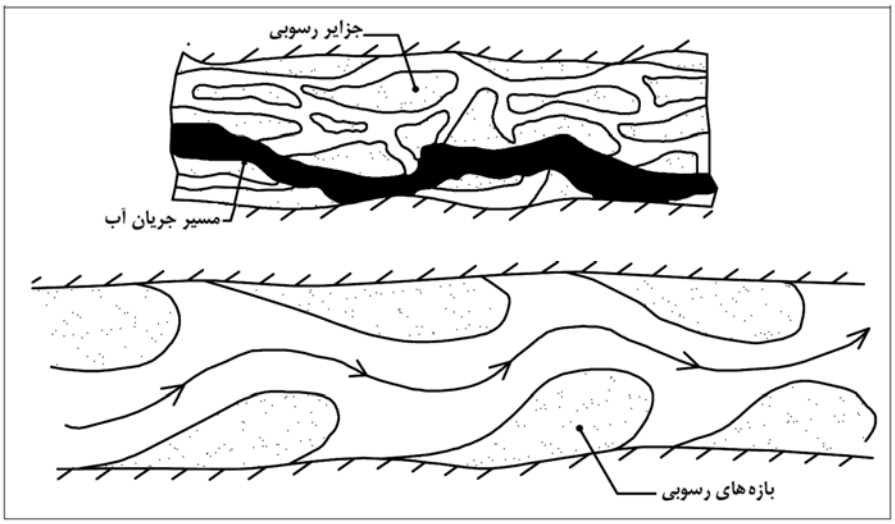


شکل ۴-۱۸- نمونه‌ای از رسوب‌گذاری ممتد در مسیر رودخانه و فرسایش در بازه‌ها و اراضی بالادست [۴۷]

علاوه بر فرسایش، رسوب‌گذاری نیز به نوبه خود بر ریخت‌شناسی رودخانه تاثیرگذار می‌باشد. رسوب‌گذاری ممتد موجب افزایش تراز بستر گردیده و از این طریق ظرفیت آبگذری رودخانه را کاهش می‌دهد. این امر موجب تشدید سیل گرفتگی و بر هم خوردن ساختار ریخت‌شناسی رودخانه می‌گردد. در شکل (۴-۱۸) نمونه‌ای از رسوب‌گذاری عمومی از مسیر رودخانه نشان داده شده است.

مطابق شکل با تشدید فرسایش در بازه‌های بالادست و سطح حوضه آبریز مواد رسوبی حمل شده در مسیر رودخانه ترسیب می‌کند، اثر رسوب‌گذاری اغلب به صورت شریانی شدن رودخانه و یا پیچابی شدن آنها ظاهر می‌شود [۴۷]. در مواردی نیز تشکیل انباشته‌های رسوبی در بستر نظیر تلماسه‌ها[1]، جزایر و پشته‌های رسوبی[2] افزایش تراز بستر و تشدید مقاومت در مقابل جریان را به دنبال دارد. وجود این‌گونه عوارض رسوبی موجب تفرق و انحراف جریان گردیده و این امر تخریب کناره‌ها و تعریض بستر را به دنبال دارد[۴۲]. در شکل (۴-۱۹) مواردی از تشکیل انباشته‌های رسوبی در رودخانه‌ها نشان داده شده است [۶۳،۴۲].

1 - Dune
2 - Bar



شکل ۴-۱۹- مواردی از تشکیل انباشته‌های رسوبی در بستر رودخانه‌ها [۶۳،۴۲].

۴-۲-۴- زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی

مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها از جنبه‌های زیادی با مطالعات زمین‌شناسی آنها ارتباط دارد. این مطالعات اهمیت زیادی در پاسخگویی به بسیاری از سوالات مطرح در مراحل اولیه شناسایی وارزیابی خطرات، ویژگی‌های سازندهای سنگی و آبرفتی مسیر و عوامل موثر بر ریخت‌شناسی رودخانه دارند. از آن‌جا که رودخانه‌ها و سازه‌های احداثی برای ساماندهی، با زمین بستر در ارتباط هستند، در نتیجه بررسی واکنش متقابل زمین و سازه در زمان احداث و بهره‌برداری از سازه‌های مورد نظر، حایز اهمیت فراوانی است. به عبارت دیگر طراحی و احداث هر نوع سازه در طبیعت باید به گونه‌ای انجام شود که تعادل متقابل سازه و شرایط زمین‌شناسی به‌وجود آید. در این خصوص ضروری است که پیش از اجرای هرگونه طرح ساماندهی رودخانه، مطالعه کلیه عوامل و عوامل مرتبط با ویژگی‌های زمین شامل خصوصیات عمومی و اختصاصی واحدهای زمین‌شناسی موجود در محدوده طرح، شرایط زمین ریخت‌شناسی ناحیه‌ای، پدیده‌های ژئودینامیکی و همچنین عوامل موثر بر شرایط ریخت‌شناسی مسیر رودخانه، مد نظر قرار گرفته و ارزیابی شود.

مطالعات زمین‌شناسی به طور معمول در مراحل شناسایی و توجیهی از مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه انجام می‌شود که گاهی تحت عنوان مطالعات مقدماتی و مطالعات نهایی زمین‌شناسی نیز تقسیم می‌گردد[۱۲]. در مرحله مطالعات مقدماتی زمین‌شناسی، مطالعات در سطح گسترده‌تر و کلی‌تر انجام می‌شود و هدف از آن کسب شناخت کلی از وضعیت زمین‌شناسی منطقه و فرآیندهای موثر برشرایط ریخت‌شناسی رودخانه است. هدف عمده این مطالعات بررسی و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی به منظور فراهم کردن اطلاعات لازم برای طراحان است که بر پایه آن بتوانند در ایجاد سازه‌های مهندسی و توسه‌ای، هماهنگی با زمین‌شناسی محیطی را به بهترین وجه ممکن رعایت کنند. بدون این هماهنگی، اجرای هرگونه سازه مهندسی بر روی رودخانه و یا تغییر در شرایط طبیعی آن، غالبا در حد قابل ملاحظه‌ای در تعادل دینامیکی محیط زمین شناختی اخلال ایجاد خواهد کرد. این امر ممکن است به پیامدهای زیانباری منجر شود که نه تنها بر جنبه اقتصادی و طول عمر سازه بلکه بر ایمنی آن نیز اثر سو بگذارد[۱۲].

به طورکلی درتهیه راهنمای حاضر سعی شده تمامی جنبه‌های مرتبط با ساختار زمین مد نظر قرار گرفته و مورد بحث و بررسی قرار گیرند. این جنبه‌ها در چهار بخش اساسی که عبارتند از بررسی پیشینه زمین‌شناسی رودخانه، تعیین روند تغییرات مکانی مسیر

رودخانه و مشخص کردن کمربند جابجایی، تعیین ساختار زمین‌شناسی سازندهای مسیر رودخانه، مشخص کردن پدیده‌های موثر در ریخت‌شناسی نظیر گسل‌ها، بیرون‌زدگی‌ها، تغییرات سطح اساس، زمین لغزه و کوه ریزش تشریح شده است.

۴-۲-۴-۱- بررسی پیشینه زمین‌شناسی رودخانه

مطالعات زمین‌شناسی عمومی[1] به منظور بررسی پیشینه زمین‌شناسی رودخانه‌ها در طرح‌های مربوط به ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، همانند سایر طرح‌های شناسایی و مهندسی به صورت مستقل انجام می‌گیرد. این مطالعات معمولا در دو قسمت اساسی، شامل بررسی تاریخچه زمین‌شناسی عمومی حوضه آبریز رودخانه و شناسایی رخساره‌های سنگی یا سازندهای موجود در منطقه طرح به انجام می‌رسد.

مطالعه و شناخت تاریخچه تحولات زمین‌شناسی مسیر رودخانه از آن جهت حایز اهمیت است که شناخت تاریخچه تحولات زمین‌شناسی که منجر به پیدایش پدیده‌های مختلف در منطقه شده است می‌تواند فهم مارا در ارزیابی صحیح تر و پیش‌بینی تحولات آتی بیش‌تر نماید. در این رابطه تعیین موقعیت حوضه آبریز رودخانه مورد مطالعه در نقشه تقسیمات ساختمانی و زمین‌شناسی ناحیه‌ای ایران، از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین شناسایی اثرهای مراحل مختلف کوهزایی و پیش‌روی یا پسروی دریاها در گذشته و همچنین زمان فعالیت‌های آتشفشانی در تکوین رخساره‌های سنگی منطقه، می‌تواند کمک شایانی در ارزیابی صحیح‌تر خصوصیات سازندهای سنگی و آبرفتی منطقه طرح ارائه نماید. بدین منظور تعیین سن انواع رخساره‌های سنگی حوضه آبریز با استفاده از منابع موجود ضرورت دارد. شناسایی و بررسی رخساره‌های سنگ چینه‌ای[2] نیز در مطالعات پیشینه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی از اهمیت خاصی برخوردار بوده و لازم است موارد زیر، مورد بررسی واقع شود.

- تعیین و تقسیم‌بندی سنگ چینه‌ای بر حسب سازند یا بخش‌بندی محلی
- تعیین نحوه گسترش واحدهای یاد شده و موقعیت تغییر رخساره‌های سنگی
- بررسی شکل بیرون‌زدگی‌های واحدهای سنگ شناسی مختلف
- شرح جزییات رخساره‌های سنگ چینه‌ای شامل جنس، رنگ، سن، ضخامت لایه‌بندی و ضخامت کلی
- تقسیم‌بندی سنگ شناختی بر پایه ویژگی‌های فیزیکی – شیمیایی
- تعیین نوع و درجه دگرگونی وچگونگی همبستگی آنها با فازهای تکتونیکی(مراحل زمین ساخت ناحیه‌ای)

معمولا در مطالعات کوچک مقیاس (کوچک‌تر از ۱:۱۰۰۰۰۰)، استفاده از منابع موجود اعم از نقشه‌های زمین‌شناسی و شرح این نقشه‌ها که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و شرکت ملی نفت ایران تهیه می‌شود، برای ارائه اطلاعات ذکر شده کافی می‌باشد، ولی در مطالعات با مقیاس متوسط و بزرگ (بزرگ‌تر از ۱:۱۰۰۰۰۰) مطالعه عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای به منظور تدقیق اطلاعات موجود ضروری است. همچنین استفاده از داده‌های گمانه‌ای پروژه‌های احتمالی اجرا شده درمنطقه طرح نیز برای تکمیل اطلاعات موجود و ترسیم مقاطع زمین‌شناسی می‌تواند بسیار سودمند باشد [۶۲].

---

1 - General Geology
2 - Lithostratigraphical Facies

۴-۲-۴-۲- تعیین روند تغییرات مکانی مسیر رودخانه و مشخص کردن کمربند جابجایی

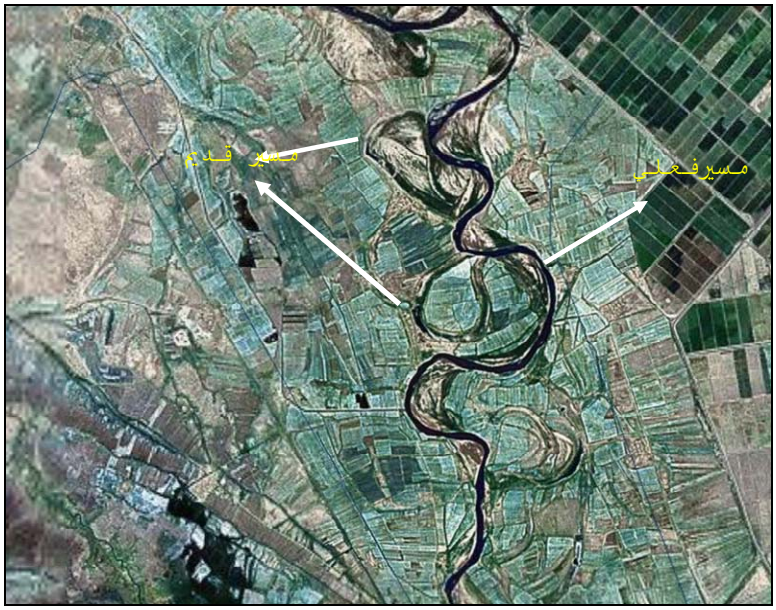
به منظور تعیین روند تغییرات مکانی مسیر رودخانه و مشخص کردن کمربند جابجایی احتمالی، بررسی و معرفی ویژگی‌های زمین ریخت‌شناسی حوضه آبریز رودخانه مورد مطالعه وعوامل موثر برریخت‌شناسی حاکم بر مسیر رودخانه، یکی دیگر از بخش‌هایی است که باید در مطالعات ریخت‌شناسی و مطالعات پایه رودخانه‌ها مورد بحث و بررسی قرار گیرد. در این خصوص ارائه وضعیت کلی حوضه از نظر واحدهای کلی زمین ریخت‌شناسی نظیر کوهستانی، نیمه کوهستانی، تپه ماهوری و دشت و تعیین نسبت مساحت هر یک از آنها در کل محدوده و میانگین ارتفاع آنها از سطح دریاهای آزاد ضروری است.

بررسی تغییر مسیرهای احتمالی در گذشته‌های دور ونزدیک با استفاده از بررسی عکس‌های هوایی مسیر وتصاویر ماهواره‌ای، درک روشنی از روند تغییرات احتمالی آینده رودخانه ارائه می‌دهد. معمولا اثرهای این تغییرات در عکس‌های هوایی با وضوح مناسب قابل شناسایی است[۶۴]. در شکل (۴-۲۰) نمونه‌ای از اثرهای برجای مانده از تغییر مسیر یک رودخانه، در عکس هوایی نشان داده شده است.

بررسی علل تغییرمسیرهای احتمالی نیز یکی از مواردی است که لازم است در بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها مدنظر قرارگیرد. از جمله این دلایل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تغییر سطح اساس بستر یا مصب رودخانه به دلیل پدیده‌های زمین ساختی ناحیه‌ای یا محلی
- افزایش آورد رسوب رودخانه و درنتیجه کاهش قدرت حمل ورسوب‌گذاری در بخش‌های خاصی از مسیر
- کاهش پوشش گیاهی ودرنتیجه افزایش میزان فرسایش خاک حوضه رسوبی و وقوع حرکات دامنه‌ای در طول مسیر آبراهه
- دستکاری‌های مصنوعی نظیر برداشت یا ریختن مصالح در بستر طبیعی آبراهه

از این رو در بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، مطالعه عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ (که به صورت پوشش کامل ایران در سال ۱۹۵۵ تهیه شده است) یا ۱:۲۰۰۰۰ و مقایسه آنها با عکس‌های هوایی جدیدتر تهیه شده و یا تصاویر ماهواره‌ای توصیه می‌گردد.



شکل ۴-۲۰- اثرهای برجای مانده ازتغییرات مسیر رودخانه در عکس هوایی

علاوه بر این، مطالعه و بررسی موارد زیر به عنوان عوامل موثردیگر برشرایط زمین ریخت‌شناسی حوضه آبریز رودخانه‌ها پیشنهاد می‌شود:

- زمین ریخت حوضه

زمین ریخت حوضه[1] شامل پرتگاه‌ها، شیب دامنه‌ها، الگوی آبراهه‌ها، شکل دره‌ها، همواری و احیانا آب‌گیر بودن زمین‌های پست می‌باشند که باید مورد بررسی قرار گیرند.

- عوامل کنترل شده شکل‌های زمین ریخت‌شناسی

این عوامل به دو گونه قابل تقسیم می‌باشند:

الف- عوامل اولیه

- سنگ شناسی: چگونگی همبستگی عوارض زمین ریختی با انواع سنگ‌های مسیر آبراهه، نوع سنگ و درجه استحکام انواع سنگ‌ها
- ساختاری: چگونگی همبستگی عوارض زمین ریختی با انواع ساختارهای زمین ریخت‌شناسی، رابطه انواع چین‌ها با ارتفاعات و دره‌ها (کوه‌های تاقدیسی و دره‌های ناودیسی و بالعکس)، دره‌های گسلی و مناطق فروافتاده
- آتشفشانی: ریخت‌های ویژه ناشی از فعالیت آتشفشانی، نقش آتشفشانی در ریخت‌شناسی گستره طرح

ب- عوامل ثانویه

- هوازدگی[2]: درجه، گسترش و عمق هوازدگی، عوامل موثر در هوازدگی اعم از فیزیکی، شیمیایی ومکانیکی
- دگرسانی[3]: درجه، گسترش و عمق دگرسانی، عوامل موثر در تشکیل آن اعم از فیزیکی، شیمیایی ومکانیکی
- قابلیت انحلال سنگ‌ها اعم از کربناته و غیرکربناته، علل و شدت انحلال، فراوانی و عمق حفره، ارتباط آنها با یکدیگر در عمق.

- زمین ریخت‌های فرسایشی[4]

بررسی زمین ریخت‌های فرسایشی یکی دیگر از عواملی است که در بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها حایز اهمیت فراوانی است. فرسایش به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن ذرات خاک از بستر اصلی خود جدا شده و به کمک یک عامل انتقال دهنده نظیر باد، یخچال، آب و یا نیروی ثقل به مکان دیگری حمل می‌شود. فرسایش خاک نه تنها خاک را از بین می برد و حاصل‌خیزی آن را

1 - Basin Geomorphous
2 - Weathering
3 - Alteration
4 - Erosional Geomorphous

کاهش می‌دهد، بلکه با ایجاد رسوب در آبراهه‌ها سبب انسداد آنها می‌شود. همچنین با پرکردن دریاچه‌ها و سدهای مصنوعی، ظرفیت آنها را کاهش داده و درنتیجه عوارض زیست محیطی زیادی را در منطقه سبب می‌شود [۱۰].

در بررسی زمین ریخت‌های فرسایشی موارد زیر باید مورد مطالعه قرارگیرند:

- فرسایش و رسوب‌خیزی: بررسی عوامل چیره فرسایش و آهنگ رسوب‌خیزی منطقه
- پهنه‌های آبرفتی: فراوانی، بلندی هر یک نسبت به یکدیگر و از بستر رودخانه، درجه گردشدگی و دانه‌بندی مواد به طور کلی و برآورد ضخامت رسوبات هر یک از آنها
- بادرفت‌ها: گسترش، منشا و برآورد ضخامت آنها
- یخ‌رفت‌ها: چگونگی تشکیل، گسترش و مواد متشکله آنها از نظر ابعاد و جنس

۴-۲-۴-۳- تعیین ساختار زمین‌شناسی سازندهای مسیر رودخانه

ساختارهای زمین‌شناسی مربوط به تشکیلات گسترش یافته در مسیر رودخانه، نقش مهمی در شکل‌گیری ریخت‌شناسی رودخانه داشته و انتظار می‌رود که در مطالعات زمین‌شناسی طرح، این ساختارها شناسایی و معرفی شوند. در این راستا در بررسی‌های مقدماتی ضمن جمع‌آوری و بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و انجام مطالعات صحرایی، ویژگی‌های ساختاری اعم از چین خوردگی‌ها و ناپیوستگی‌ها و سایر پدیده‌های ساختمانی شناسایی شده و در صورت امکان با ترسیم مقاطع و نیمرخ‌های مناسب تشریح می‌گردند.

در مطالعات تفصیلی نیز بسته به نیاز طرح، نقشه زمین‌شناسی دقیق‌تری از محدوده مورد مطالعه تهیه شده و ساختارهای زمین‌شناسی و ویژگی‌های زمین‌شناسی سطحی و زیر سطحی سازندهای مسیر رودخانه نمایش داده می‌شود. در تعیین و بررسی ساختارهای زمین‌شناسی سازندهای منطقه در این مرحله ممکن است از نتایج هرگونه عملیات شناسایی از قبیل عملیات ژئوتکنیک و یا ژئوفیزیک بهره گرفته شود. لازم است که در پایان این بخش از بررسی‌ها، ساختارهای زمین‌شناسی منطقه که ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه را متاثر ساخته‌اند به طور مجزا عنوان و معرفی گردد.

۴-۲-۴-۴- مشخص کردن پدیده‌های زمین‌شناسی موثر در ریخت‌شناسی نظیر گسل‌ها، بیرون‌زدگی‌ها، تغییرات سطح اساس، زمین لغزه و کوه ریزش

در چارچوب مطالعات ریخت‌شناسی، تعیین مخاطرات زمین‌شناسی به ویژه بررسی گسل‌ها و شکستگی‌ها و پدیده‌هایی مانند زمین لغزش، کوه ریزش و سایر ناپایداری‌های دامنه‌ای نیز باید به انجام رسیده و تغییرات احتمالی سطح اساس رودخانه مشخص گردد. پدیده‌های دیگر موثر در ریخت‌شناسی مانند بیرون‌زدگی‌های سنگی نیز عموما در دو بحث زمین‌شناسی عمومی و زمین ریخت‌شناسی محدوده مطالعاتی که پیش‌تر عنوان شد مورد بحث و بررسی واقع می‌شود.

در مورد تغییرات سطح اساس بستر یا مصب رودخانه ضمن بررسی تغییرات زمانی و مکانی، سطح اساس رودخانه باید به علل این تغییرات که ممکن است ناشی از پدیده‌های زمین ساختی ناحیه‌ای یا محلی و حتی به دلایل مصنوعی مانند برداشت‌های غیر اصولی مصالح بستر و تغییرات ریخت‌شناسی شدید ناشی از آن باشد اشاره و به آنها پرداخته شود.

همچنین بررسی رخنمون‌های (بیرون‌زدگی‌ها) سنگی که ریخت‌شناسی رودخانه را تحت تاثیر قرار داده‌اند از جمله مواردی است که در این بخش از مطالعات باید مورد توجه واقع شود. وجود برونزدهای مقاوم در بستر و کناره‌های رودخانه و ثبات نسبی

ریخت‌شناسی رودخانه و یا وجود برونزدهای سست ونامقاوم، درنتیجه تغییرات کوتاه مدت و یا بلند مدت در ریخت‌شناسی رودخانه‌ها نمونه‌هایی از این مورد می‌باشد که باید به دقت بررسی و تشریح گردد.

سایر پدیده‌های زمین‌شناسی در دو دسته کلی زمین ساخت و گسل‌های موجود در مسیر و مبحث جابجایی گرانشی و ناپایداری‌های دامنه‌ای به شرح زیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد:

الف- بررسی زمین ساخت وگسل‌های موجود در مسیر

زمین‌ساخت محلی و منطقه‌ای، نوع و نحوه توزیع گسل‌های هر منطقه، تاثیر بسزایی در تعیین سیما و وضعیت ظاهری رودخانه‌های هرمنطقه برجای می‌گذارد. شناسایی گسل‌های عمده و فرعی مسیر رودخانه از دوجنبه اساسی دارای اهمیت است[۶۱]. جنبه اول این موضوع دربرآورد خطر لرزه‌ای در محدوده مطالعاتی است. چراکه شناسایی گسل‌ها به عنوان منشای زمین‌لرزه‌ها، نخستین گام در تحلیل خطر زمین لرزه در یک ساختگاه به شمار می‌رود. دومین جنبه آن شناسایی وارزیابی میزان خطر گسیختگی سطحی وارزیابی اثرهای آن برسازه‌های احداثی در نزدیکی گسل‌ها است. از این‌رو مطالعه ویژگی‌های ساختاری ناحیه‌ای و شناسایی گسل‌های عمده مسیر رودخانه می‌تواند علاوه بر کمک به برآورد خطر زمین لرزه‌ای، در ارزیابی و توجیه صحیح‌تر عوارض زمین‌شناسی و زمین ریخت‌شناسی مسیر نیز سودمند باشد که این جنبه در مطالعات ریخت‌شناسی بیش‌تر مورد توجه می‌باشد.

در این خصوص علاوه بر استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای وهمچنین بازدیدهای صحرایی، انجام بررسی‌های زیر پیشنهاد می‌شود [۶۱]:

- تعیین ایالت زمین ساخت ناحیه‌ای[1]
- بررسی تاریخچه تحولات زمین ساختی، مراحل تکوین زمین ساخت بنیادی ونقش آنها در بازه مطالعاتی
- شناسایی و تعیین ویژگی‌های ساختاری نظیر چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها، درزه‌ها و خطواره‌ها وبررسی نقش آنها در تکوین ریخت‌شناسی امروزین رودخانه
- بررسی و ارزیابی نوزمین ساختی و دگریخت‌های مربوط به نهشته‌های دوران چهارم با استفاده از بررسی عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرایی

ب- جابجایی گرانشی[2] و ناپایداری‌های دامنه‌ای

مطالعه خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای در مطالعات مربوط به پروژه‌های خطی نظیر بررسی‌های مربوط به رودخانه‌ها از آن جهت حایز اهمیت است که معمولا به دلیل خطی و طولانی بودن، این نوع بررسی‌ها مستلزم شناخت وارزیابی عوامل نسبتا زیادی در طول مسیر است. عبور رودخانه‌ها از مناطق مختلف با خصوصیات متفاوت از نظر شیب، نوع مصالح سنگ و خاک و همچنین شرایط آب و هوایی، بررسی وشناخت دقیق عوامل مختلف را در طول مسیر ضروری می سازد. لذا بررسی شرایط مسیر از نظر خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای نظیر زمین لغزش، سنگ ریزش و واریزه‌های دامنه‌ای وشناسایی عوامل موثر بر ناپایداری‌های دامنه‌ای دارای اهمیت فراوانی است.

---

1 - Regional Tectonic Province
2 - Gravitational Movements

در این رابطه بررسی‌های زیر می‌تواند برای ارزیابی شرایط محدوده مطالعاتی از نظر ناپایداری‌های دامنه‌ای و تاثیر آن بر ریخت‌شناسی رودخانه مورد مطالعه مفید باشد[۹۲]:

- وضعیت کنونی شیب‌ها: احتمال ناپایداری و لغزش در توده‌های سنگی و خاکی به طور محلی یا ناحیه‌ای
- زمین لغزه‌های فعال[1]: منشا، ریخت‌شناسی و گسترش، چگونگی پویایی کنونی و پیش‌بینی وضعیت آینده
- زمین لغزه‌های قدیمی[2]: منشای ریخت‌شناسی، بررسی ابعاد گسترش زمین لغزه و احتمال فعالیت دوباره آن تحت شرایط اعمال بارهای دینامیکی (زلزله)، بالا آمدن سطح ایستابی و غیره، در صورتی‌که فعالیت دوباره این نوع زمین لغزه‌ها باعث تغییر مسیر رودخانه شده یا سازه‌های احداثی را تحت تاثیر قرار دهند؛ استفاده از عکس‌های هوایی بامقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و۱:۲۰۰۰۰ برای شناسایی زمین لغزش‌های فعال وقدیمی موجود درمسیر رودخانه ضروری است.

ناپایداری‌های دامنه‌ای براساس نوع حرکت، مصالح درگیر لغزش و عامل حرکت آنها به انواع مختلف تقسیم‌بندی شده‌اند. مهم‌ترین نوع ناپایداری‌های دامنه‌ای عباتند از[۹۳]:

- لغزش سنگ وخاک[3]: ارزیابی حجم، عمق و نوع مصالح درگیر لغزش وهمچنین شناخت عامل یا عوامل وقوع ناپایداری
- خزش [4]برآورد وسعت، اندازه حرکت وعوامل تشدید وقوع این نوع ناپایداری دامنه‌ای
- سنگ ریزش[5]: منشا و گسترش، اندازه بلوک‌ها به طور کلی و برآورد ضخامت توده درگیر سنگ ریزش
- ناپایداری‌های واریزه‌ای[6]: منشا، نحوه گسترش و برآورد ضخامت توده‌های درگیر این گونه ناپایداری‌های دامنه‌ای
- گلروانه[7]: منشا، گسترش و برآورد میزان خطر و فعالیت آنها در حوضه آبریز مورد مطالعه

۴-۳- الگوهای انجام مطالعات ریخت‌شناسی

۴-۳-۱- روش‌های تحلیلی بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

۴-۳-۱-۱- روش سنجش مستقیم

روش سنجش مستقیم عبارت از تحلیل اطلاعات ثبت شده از مشخصات و عوامل ریخت‌شناسی و تعیین روند تغییرات می‌باشد. تغییرات مشخصه‌های اصلی رودخانه مانند شیب بستر، دانه‌بندی رسوب، عرض بستر رودخانه، شعاع نسبی، ضریب خمیدگی و غیره در طول رودخانه به صورت مکانی از بالادست بازه به سمت پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفته و میزان تغییرات در قالب تجزیه

1 - Active Landslide
2 – Pre-Existing Landslides
3 – Rock and Soil Slides
4 – Creep
5 - Rock Fall
6 – Debris Flow
7 - Mudflow

آماری بیان می‌شود. اطلاعات اولیه از طریق بازدید میدانی، نمونه‌برداری، اندازه‌گیری شاخص‌های مربوط در محل، نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید.

- **شیب بستر:** یکی از رایج‌ترین روش‌های تحلیل آماری شیب بستر در رودخانه‌های آبرفتی توسط شولیتز[1] ارائه شده است. شیب بستر رودخانه به طور طبیعی از سرشاخه به طرف پایین‌دست کاهش می‌یابد. با تعیین شیب رودخانه در فواصل مختلف رودخانه، روند تغییرات آن به دست می‌آید. شولیتز، روند عمومی تغییر شیب رودخانه‌های آبرفتی را در قالب رابطه نمایی زیر پیشنهاد نموده است [۸۲]:

$$S_x = S_0 x e^{-\alpha x} \qquad (۲۱-۴)$$

که در این رابطه:

S_x: شیب در نقطه‌ای به فاصله x از مبنا

S_o: شیب در نقطه مبنا

α: ضریب تغییر شیب

با انتخاب نقطه مبنا در رودخانه یا بازه مورد نظر و اندازه‌گیری و تعیین شیب کف در فواصل مختلف مسیر رودخانه و با برازش نمودن منحنی تابع نمایی، رابطه روند تغییرات و ضریب تغییر شیب به دست می‌آید. چنانچه روند تغییرات شیب بستر رودخانه‌ای از رابطه نمایی شولیتز تبعیت نکند در آن صورت باید دلایل مشخصی که رفتار طبیعی رودخانه را دگرگون ساخته بررسی شود.

- **دانه‌بندی رسوب:** اندازه متوسط مواد بستر رودخانه از بالادست به سمت پایین‌دست کاهش می‌یابد. کاهش اندازه رسوب به دلیل پدیده سایش[2]، جور شدگی هیدرولیکی[3] و هوازدگی شیمیایی[4] می‌باشد.

پدیده سایش ناشی از برخورد قطعات رسوب در حال حمل و افت پیوستگی هیدرولیکی که به دلیل کاهش تدریجی توان هیدرولیکی رودخانه در طول مسیر و قدرت حمل رسوب می‌باشد، رخ می‌دهد. شولیتز همچنین در مورد روند تغییر دانه‌بندی رسوب در طول رودخانه رابطه‌ای نمایی همانند رابطه تغییرات شیب ارائه نموده است [۸۲].

$$D_{sx} = D_{s0} . e^{-\beta x} \qquad (۲۲-۴)$$

که در این رابطه:

D_{sx}: متوسط اندازه مواد کف در فاصله x پایین‌دست نقطه مبنا

D_{s0}: متوسط اندازه مواد کف در نقطه مبنا

β: ضریب فرسودگی

استرنبرگ[5] نیز رابطه مشابهی برای تغییرات دانه‌بندی با لحاظ نمودن متغیر وزن دانه‌ها به صورت زیر استنتاج نموده است. [۸۲]

$$W_L = W_0 e^{-\alpha L} \qquad (۲۳-۴)$$

---

1 - Shulits
2 - Abrasion
3 - Hydraulic Sorting
4 - Chemical Weathering
5 - Sternberg

که در این رابطه:

W_L: وزن ذره در فاصله L پایین‌دست نقطه مبنا

W_O: وزن ذره در نقطه مبنا

α: ثابت عددی

هر دو رابطه فوق نشان می‌دهد که روند طبیعی تغییرات دانه‌بندی رسوب رودخانه‌ها نزدیک به یک رابطه نمایی می‌باشد. در غیر این صورت لازم است علل عدم تطبیق تغییرات دانه‌بندی با رابطه نمایی مورد تحلیل قرار گیرد.

با اندازه‌گیری متوسط دانه‌های رسوب رودخانه در فواصل مختلف طول رودخانه و برازش بهترین منحنی نمایی، ضریب فرسودگی (β) و رابطه تغییرات دانه‌بندی به دست می‌آید.

- **عرض رودخانه:** با اندازه‌گیری عرض بستر رودخانه در فواصل مختلف از مسیر رودخانه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و یا عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای، و با ترسیم منحنی تغییرات عرض در طول رودخانه، روند تغییرات عرض بستر حاصل می‌گردد. در شرایط طبیعی عرض بستر رودخانه به طرف پایین‌دست مسیر، متناسب با کاهش شیب، افزایش می‌یابد.
- **ضریب خمیدگی یا نسبت پیچشی:** این عامل نشان دهنده نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول چم می‌باشد و میزان تکامل چم را نشان می‌دهد. معمولا در طول یک رودخانه تعداد معتنابهی چم با مشخصات گوناگون شکل گرفته و این چم‌ها در طول زمان نیز در حال توسعه به سمت افزایش شدت و ضریب خمیدگی می‌باشد. یکی از عوامل تعیین نوع رودخانه، بررسی خم‌ها و ضریب خمیدگی آنها می‌باشد. تعاریف خم، چم و ضریب خمیدگی در فصل یک ارائه شده است.

ضریب خمیدگی بزرگ‌تر از ۱/۴ تا ۱/۵ بیانگر پیچشی بودن رودخانه و کم‌تر از آن مستقیم بودن رودخانه و بازه مورد نظر است [۱] بر اساس معیار ولفرت[1] در مورد تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب میزان ضریب پیچشی، چهار نوع رودخانه شامل مستقیم، سینوسی، پیچانرودی و پیچانرودی شدید معرفی شده است. این تقسیم‌بندی در جدول (۴-۹) نشان داده شده است [۹۳].

جدول ۴-۹- تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر حسب ضریب خمیدگی [۹۴]

ضریب پیچشی	۱ – ۱/۰۵	۱/۰۶ – ۱/۲۵	۱/۲۵ – ۲	> ۲
شمای رودخانه				
نوع رودخانه	مستقیم	سینوسی	پیچانرودی	پیچانرودی شدید

1 - H.P. Wolfert

- **شعاع نسبی:** نسبت شعاع دایره محاط بر قوس و خم به عرض رودخانه که شعاع نسبی نامیده می‌شود، از معیارهای مهم در بررسی‌های ریخت‌شناسی می‌باشد. هر چه شعاع نسبی بزرگ‌تر باشد، نشانه ملایم‌تر بودن خم مربوط می‌باشد. شن[1] با توجه به دامنه شعاع نسبی خم‌ها، تقسیم‌بندی مندرج در جدول (۴-۱۰) را که معرف وضعیت خم است ارائه نموده است:

جدول ۴-۱۰- نوع رودخانه بر مبنای شعاع نسبی

محدوده شعاع نسبی	نوع خم
۵-۴/۵	خم آزاد[2]
۸-۷	خم محدود شده[3]
۳-۲/۵	خم تحت فشار[4]

با مشخص شدن شعاع نسبی خم‌های یک رودخانه در طول بازه مورد نظر و تعیین فراوانی و درصد بندی انواع خم‌ها مطابق با جدول (۴-۱۰)، نوع غالب خم‌های رودخانه به دست می‌آید.

- **زاویه مرکزی خم:** زاویه مرکزی بین دو شعاع متصل به نقاط عطف در دو خم متوالی تشکیل می‌گردد. این زاویه میزان توسعه پیچانرودی رودخانه را نشان می‌دهد. کورنیس[5] برای بیان کیفی توسعه و پیشرفت پیچانرودی شدن در رودخانه‌های آبرفتی و تمایز آنها از یکدیگر، با لحاظ نمودن زاویه مرکزی تقسیم‌بندی مشخصی مطابق با جدول (۴-۱۱) پیشنهاد نموده است. [۵]

با اندازه‌گیری زاویه مرکزی خم‌های متوالی رودخانه و مقایسه با جدول کورنیس و تعیین درصد کلاس بندی شکل رودخانه، حالت غالب آن حاصل می‌شود.

جدول ۴-۱۱- میزان توسعه چم رودخانه بر مبنای زاویه مرکزی

شکل رودخانه	زاویه مرکزی(درجه)
مستقیم	۰
شبه پیچانرودی	۱-۴۱
پیچانرودی توسعه نیافته	۴۱-۸۵
پیچانرودی توسعه یافته	۸۵-۱۵۸
پیچانرودی زیاد توسعه یافته	۱۵۸-۲۹۶
شاخ گاوی	> ۲۹۶

1 - Hsien Wen Shen
2 - Free Bends
3 - Limited Bends
4 - Forced Bends
5 - Kornis

۴-۳-۱-۲- روش استفاده از روابط تجربی شوم[1]

در صورتی‌که در میزان جریان و بار رسوبی یک رودخانه، تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد شود، به دنبال آن خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه در طی زمان مشمول تغییرات زیادی خواهد شد. روابط تجربی مربوط به رودخانه‌ها، جهت‌گیری این تغییرات را به‌خوبی نشان می‌دهد. شوم با استفاده از روابط تجربی حاکم بر رودخانه‌ها، چهار رابطه اساسی زیر را استخراج نموده تا بر مبنای آن نوع تغییرات تفسیر و تحلیل گردد.

تغییر در رژیم هیدرولوژی رودخانه که شامل تغییر بده جریان (Q) و نوع بار رسوبی (Q_s) می‌گردد، بسیاری از شاخص‌های هیدرولیکی را دستخوش تغییر می‌گرداند. معادلات زیر، پایه‌ای برای تغییرات طبیعی و یا ناشی از فعالیت‌های انسانی در ریخت‌شناسی رودخانه‌ها است [۷۸]. علامت مثبت نشانه افزایش و علامت منفی نشانه کاهش عامل مورد نظر می‌باشد:

$$Q^- = b^-, d^-, \lambda^-, S^+ \qquad (۲۴-۴)$$

$$Q^+ = b^+, d^+, \lambda^+, S^-$$

$$Q_s^- = b^-, d^+, \lambda^-, S^-, p^+$$

$$Q_s^+ = b^+, d^-, \lambda^+, S^+, p^-$$

که در این روابط b: معرف عرض بستر، d: عمق جریان، λ: طول چم، S: شیب هیدرولیکی و p ضریب خمیدگی می‌باشد.

کاهش بده جریان از طریق برداشت آب یا انحراف جریان به خارج رودخانه و افزایش بده با ورود جریان از شاخه‌های فرعی به داخل رودخانه امکان‌پذیر است. افزایش بده رسوب از طریق افزایش فرسایش در سطح حوضه امکان‌پذیر بوده و کاهش رسوب نیز از طریق اصلاح کاربری اراضی و یا از طریق اجرای برنامه حفاظت خاک در سطح حوضه و یا احداث سدهای رسوبگیر و مخزنی جدید در رودخانه محقق می‌گردد.

بررسی معادلات مربوط به روابط بین جریان و رسوب نشان می‌دهد که:

- عرض کف (b)، عمق جریان (d) و طول چم (λ) با بده جریان (Q) رابطه مستقیم دارد.
- شیب (S) به طور معکوس با بده جریان (Q) متناسب است.
- افزایش یا کاهش بده جریان موجب تغییر شیب و ابعاد آبراهه می‌گردد ولی افزایش یا کاهش بار رسوبی کف در شرایط ثابت ماندن بده جریان، نه تنها موجب تغییر ابعاد آبراهه می‌شود بلکه شکل آبراهه یعنی نسبت عرض به عمق و شدت پیچشی را هم دگرگون می‌سازد.
- در طبیعت به ندرت تغییر در جریان یا رسوب به تنهایی انجام می‌گردد بلکه معمولا تغییر در جریان همراه با تغییر در رسوب هم خواهد بود. منظور از افزایش و کاهش جریان و رسوب در واقع میزان و درصد آن و تغییر در غلظت است.

چهار حالت در رابطه با تغییر بده جریان و بده رسوب اتفاق می‌افتدکه در ادامه، ضمن ارائه حالت‌های مذکور، وضعیت تغییر مشخصه‌های رودخانه نیز در هر یک از حالات، ارائه شده است:

حالت اول- بده جریان و رسوب همزمان افزایش یابد.

---

1 - S.A. Schum

$$Q^{+}Q_{s}^{+} \cong b^{+}, d^{\pm}, \lambda^{+}, S^{\pm}, p^{-}, F^{+} \quad (۲۵-۴)$$

در این رابطه F نسبت عرض به عمق می‌باشد.

حالت فوق ممکن است زمانی که یک رودخانه با رسوب زیاد بستر وارد رودخانه دیگری با رسوب معلق زیاد می‌گردد، حاصل شود. معادله فوق نشان می‌دهد که افزایش توام بده جریان و بار رسوب بستر باعث افزایش عرض آبراهه، طول چم، نسبت عرض به عمق و ضریب پیچشی می‌گردد ولی روند تغییرات عمق و شیب به طور دقیق مشخص نیست. البته آنچه اثبات شده است آن است که تغییرات عمق جریان و شیب به طور معکوس خواهد بود. یعنی در شرایط ذکر شده اگر عمق جریان اضافه شود شیب کاهش می‌یابد.

حالت دوم- بده جریان و رسوب هم‌زمان کاهش یابد.

$$Q^{-}Q_{s}^{-} \cong b^{-}, d^{\pm}, \lambda^{-}, S^{\pm}, p^{+}, F^{-} \quad (۲۶-۴)$$

کاهش هم‌زمان جریان و رسوب که در حالتی مانند احداث سد ایجاد می‌شود حالت عکس رابطه قبلی را نشان می‌دهد.

حالت سوم- بده جریان افزایش و بده رسوب کاهش یابد

$$Q^{+}Q_{s}^{-} \cong b^{\pm}, d^{+}, \lambda^{\pm}, S^{-}, p^{+}, F^{-} \quad (۲۷-۴)$$

این حالت در شرایطی همانند ساخت بند انحرافی و انحراف یک آبراهه دیگر به آبراهه مورد نظر حاصل می‌شود.

این معادله نشان می‌دهد که در حالت افزایش بده جریان و کاهش بار رسوبی، عرض آبراهه و ضریب خمیدگی افزایش یافته در حالی‌که شیب و نسبت عرض به عمق کاهش می‌یابد.

در این حالت طول چم بدون تغییر می‌ماند و یا با توجه به تغییر در بده جریان و رسوب، کاهش یا افزایش می‌یابد. به‌هرحال اگر ضریب پیچشی افزایش یابد، به نظر می‌رسد که احتمالا طول چم کاهش خواهد یافت.

حالت چهارم- بده جریان کاهش و بده رسوب افزایش یابد.

$$Q^{-}Q_{s}^{+} \cong b^{\pm}, d^{-}, \lambda^{\pm}, S^{+}, p^{-}, F^{+} \quad (۲۸-۴)$$

این حالت در شرایط افزایش برداشت آب از رودخانه و افزایش کاربری اراضی حاصل می‌شود به نحوی که بده جریان کم و بار رسوبی افزایش می‌یابد.

شرایط تغییرات در حالت چهارم عکس حالت سوم می‌باشد.

روابط ذکر شده به طور کیفی بیان می‌کند که با تغییر جریان و بار رسوبی چگونه تغییرات ریخت‌شناسی اتفاق می افتد، در صورتی‌که میزان تغییر جریان و درصد تغییر بار رسوب بستر معلوم باشد می‌توان با استفاده از روابطی تجربی، میزان کمی تغییرات خصوصیات رودخانه را به دست آورد [۷۸].

۴-۳-۱-۳- روش توان واحد جریان

در دو دهه اخیر استفاده از مدل‌هایی که یک فرضیه حد نهایت را به عنوان بخشی از معادله‌های خود برای پیش‌بینی ریخت‌شناسی آبراهه به کار می‌برند، افزایش یافته است. در این مدل‌ها از معیار بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی یک پارامتر کلیدی از قبیل قدرت جریان، نرخ مصرف انرژی یا غلظت رسوب به عنوان سومین معادله لازم برای تحلیل کامل شیب، عرض و عمق جریان استفاده می‌کنند. از معادلات معروف استنتاج شده از این طریق می توان به توان واحد جریان رودخانه اشاره نمود. توان جریان از جمله

پارامترهای مهم رودخانه‌ای است که در تجزیه و تحلیل‌ها می‌توان از آن استفاده کرد. بنا به تعریف، توان جریان عبارت است از مقدار انرژی مصرف شده در واحد زمان که برحسب ژول بر ثانیه بیان می شود. یانگ در سال ۱۹۸۱ و با استفاده از مباحث ترمودینامیک چنین بیان کرد که رودخانه‌های پیچانرودی مسیری را طی می‌کنند که تغییرات انرژی پتانسیل در واحد زمان در آنها به حداقل مقدار خود برسد. انرژی پتانسیل مصرف شده بر واحد وزن آب را می توان با عنوان توان جریان به صورت زیر تعریف کرد [۹۷]:

$$P = \frac{w}{\tau} = \frac{(\rho Q \tau).g.\Delta h}{\tau} = \gamma Q \Delta h \qquad (۲۹-۴)$$

که در این رابطه: P توان جریان، W: کار انجام شده در زمان t، Q: بده جریان، γ: وزن مخصوص آب، ρ: جرم مخصوص آب، g: شتاب ثقل و Δh: نشانگر میزان استهلاک انرژی پتانسیل واحد وزن آب است.

بر اساس رابطه فوق، در مهندسی رودخانه توان جریان در واحد طول رودخانه که به اختصار توان واحد جریان نامیده می‌شود، به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$P_L = \frac{\gamma Q \Delta h}{L} = \gamma Q S \qquad (۳۰-۴)$$

که در این رابطه: P_L: معرف توان واحد جریان رودخانه است و سایر پارامترهای دخیل در معادله قبل از این معرفی شده‌اند. شایان ذکر است در رابطه (۴-۳۰) چون میزان $\frac{\Delta h}{L}$ را می‌توان معادل S شیب طولی رودخانه در نظر گرفت، بنابراین رابطه (۴-۲۹) به صورت رابطه (۴-۳۰) ساده شده است. همچنین بر اساس رابطه تحلیلی بالا چنین استدلال شده است که تغییرات در رودخانه‌های آبرفتی ناشی از توان واحد جریان است.

یانگ نظریه حداقل توان واحد جریان در واحد وزن آب را با این مضمون مطرح نمود که یک کانال زمانی پایدار است که کار انجام شده در واحد زمان برای واحد وزن آب کمینه شود. بنابراین رابطه ارائه شده توسط این محقق به خوبی توان جریان رودخانه و اندرکنش نیروی برشی آب با مقاومت بستر و در نهایت تعادل شکل آبراهه را مدل کرده است. از آن جا که ابعاد آبراهه به حجم بده بالادست و انرژی مصرفی به وسیله جریان آب بستگی دارد، این نظریه به خوبی روند توسعه ریخت‌شناسی رودخانه‌ها را توضیح می‌دهد و در نتیجه مقادیر به دست آمده از آن برای تخمین ابعاد رژیم رودخانه از دقت خوبی بهره‌مند می‌باشند.

۴-۳-۱-۴- روش تحلیل کیفی و ترسیمی تغییرات رودخانه

در روش تحلیل کیفی، عکس‌العمل رودخانه و تغییرات ریخت‌شناسی آن در نیمرخ طولی در برابر تغییراتی که در مشخصات هندسی و هیدرولیکی رخ می‌دهد، پیش‌بینی می‌گردد و در نهایت در یک بازه زمانی طولانی، پایداری و تعادل جدید رودخانه تخمین زده می‌شود. هرگونه تغییر و تحولی در مشخصات هیدرولیکی مانند کاهش و افزایش بده جریان، بده رسوب و تراز آب موجب بر هم خوردن شرایط تعادلی اولیه رودخانه می‌گردد و ضمن انطباق مشخصات رودخانه با شرایط جدید، ابعاد رودخانه نیز به سمت شرایط تعادلی جدید متمایل می‌گردد.

فهرستی از انواع تغییراتی که ممکن است به طور طبیعی یا در اثر فعالیت‌های انسانی در مشخصات رودخانه حاصل شود در زیر آمده است:

- کاهش بده جریان (آب‌گیری از رودخانه)

- افزایش بده جریان (تغذیه جریان رودخانه یا اتصال شاخه فرعی)
- کاهش رسوب (برداشت مصالح از بستر – احداث سد)
- افزایش رسوب (تخلیه ضایعات و ورود شاخه‌های فرعی پر رسوب)
- کاهش طول و افزایش شیب بستر (احداث آبراه میانبر)
- تنگ‌شدگی مقطع (احداث سازه‌های رودخانه‌ای)
- تعریض رودخانه (برداشت مصالح کناری)
- کاهش تراز آب پایین‌دست (تخلیه آب مخزن و دریاچه)
- افزایش تراز آب پایین‌دست (افزایش تراز آب مخزن ودریاچه)

در تحلیل پیش‌بینی عکس‌العمل رودخانه در برابر تغییرات ایجاد شده در مشخصات آن، مبانی و مفروضات زیر مورد نظر می‌باشد.

- بستر رودخانه به طور کلی فرسایش‌پذیر و آبرفتی می‌باشد.
- فرسایش کناره‌ها در مقایسه با فرسایش بستر ناچیز می‌باشد.
- ظرفیت حمل رسوب متناسب با سرعت جریان است.
- افزایش ظرفیت حمل رسوب نسبت به شرایط تعادلی موجب فرسایش بستر و کاهش آن موجب رسوب‌گذاری می‌گردد.

در تحلیل کیفی تغییرات ریخت‌شناسی نیمرخ طولی رودخانه برای نمونه به دو حالت کاهش تراز سطح آب پایین‌دست و احداث آبراه میانبر اشاره می‌گردد سایر موارد با مبانی مشابه، قابل انجام می‌باشد [۴۸]

مثال اول: تخلیه آب مخزن و دریاچه‌ها (پایین افتادگی سطح آب)

مشخصات جریان قبل از پایین افتادن سطح آب در مخزن

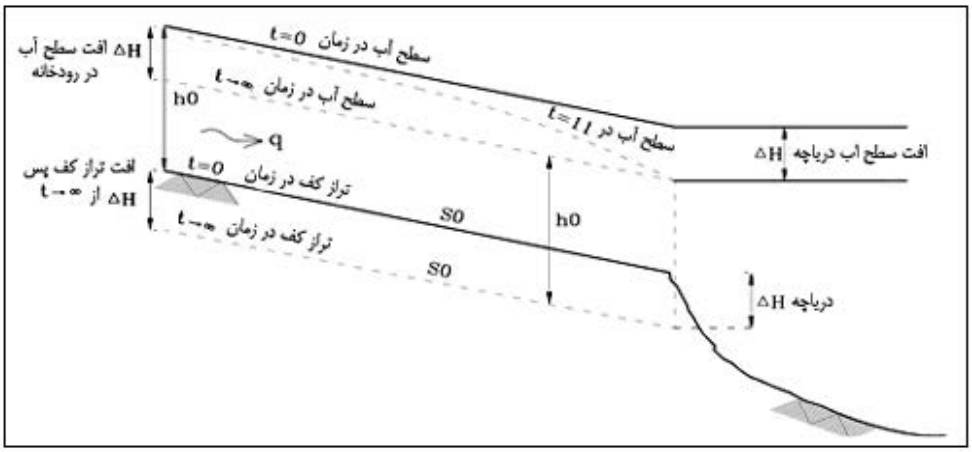
- جریان با بده ثابت q و شیب S_O و ارتفاع h_O به دریاچه می‌ریزد.
- رودخانه در حالت پایدار بوده و جریان نرمال می‌باشد.
- در مدخل رودخانه[1] ارتفاع آب از کف (نقطه مرز دریاچه و رودخانه) برابر h_O یا ارتفاع نرمال است.

مشخصات جریان پس از پایین افتادن سطح آب در مخزن

- سطح مخزن به اندازه ΔH در زمان نسبتا کوتاهی افت می‌کند
- پس از افت سطح آب، نیمرخ سطح آب به صورت پایین افتادگی و کاهش تدریجی ارتفاع آب و افزایش سرعت جریان خواهد بود.
- ظرفیت انتقال رسوب جریان در جهت دریاچه در حال افزایش است و لذا رودخانه در وضعیت فرسایش شونده قرار می‌گیرد.
- به مرور زمان فرسایش و افت سطح بستر از مدخل به طرف بالادست ادامه می‌یابد.

1 - River Mouth

- پس از طی زمان مناسب برای رسیدن به پایداری، ($t \to \infty$) جریان دوباره در رودخانه نرمال شده و شیب و ارتفاع جریان برابر حالت اولیه S_O و h_O می‌شود و نیمرخ سطح آب نیز یکنواخت خواهد بود.
- در نهایت تراز بستر و تراز سطح آب به اندازه ΔH پایین می‌آید شکل (۴-۲۱).



شکل ۴-۲۱ - تغییرات رودخانه در اثر پایین افتادگی سطح آب مخزن

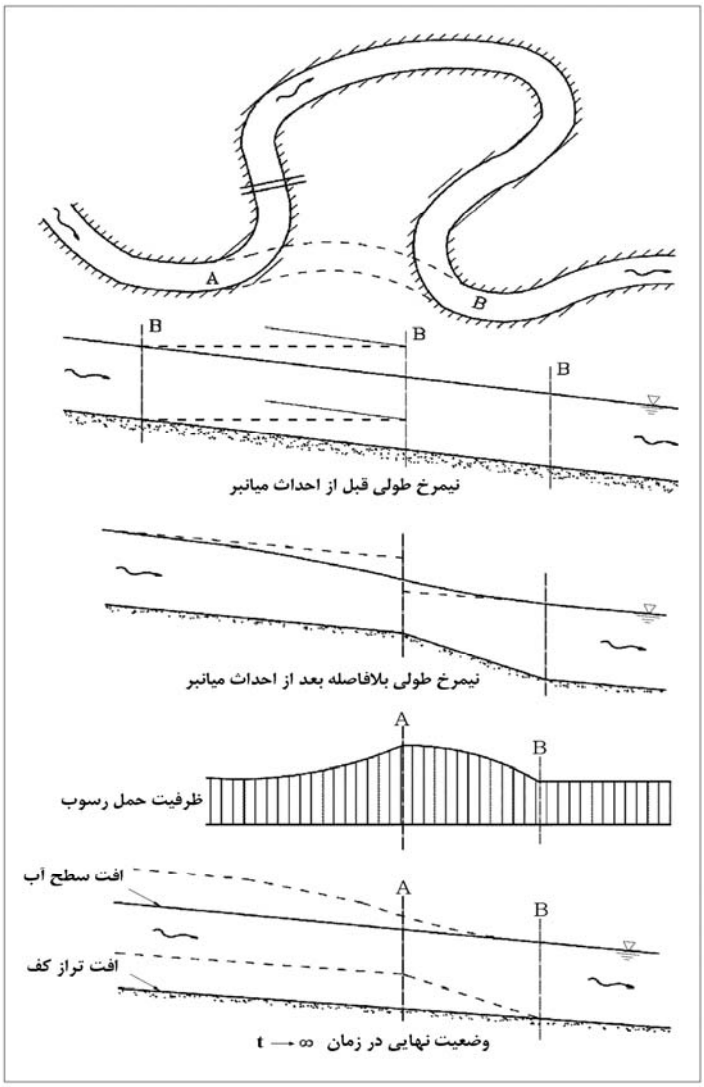
مثال دوم: احداث کانال میانبر

یک آبراه میانبر ممکن است برای اهداف زیر بر روی یک خم رودخانه با انحنای زیاد احداث شود:

- اصلاح مسیر برای کشتیرانی
- افزایش ظرفیت سیل‌گذری
- جلوگیری از فرسایش شدید کناره‌ها
- کاهش هزینه تثبیت کناره‌ها و سواحل و نیز هزینه سازه‌های مهار سیل
- خارج شدن اراضی اطراف چم از محدوده تاثیرات سیل

مشخصات جریان پس از احداث آبراه میانبر

- بلافاصله پس از احداث، مسیر رودخانه در فاصله ابتدا و انتهای آبراه دارای شیب نسبتا تندی خواهد بود زیرا طول مسیر کاهش یافته است.
- در بالادست آبراه میانبر به علت افت سطح آب و افزایش سرعت آب، ظرفیت انتقال رسوب جریان اضافه شده و درنتیجه در این ناحیه فرسایش بستر اتفاق می افتد.
- در زمانی که رودخانه مجددا به پایداری می‌رسد ($t \to \infty$)، جریان در آبراه میانبر و رودخانه یکنواخت شده و عمق جریان و شیب بستر، نرمال خواهد بود.
- نتیجه نهایی احداث یک آبراه میانبر روی قسمت بالادست، افت سطح آب و سطح بستر در بازه بالادست آبراه خواهد بود شکل (۴-۲۲).



شکل ۴-۲۲- مراحل تغییرات تراز کف و سطح آب بر اثر احداث کانال میانبر

۴-۳-۱-۵- روش استفاده از عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای

تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه از طریق مشاهده مستمر بازه مورد نظر و ثبت تغییرات واقعی آن به دست می‌آید که معمولا این روش مستلزم صرف زمان زیاد و نیروی انسانی فراوان است علاوه بر این استفاده از روش مذکور در مناطق وسیع و بازه‌های طولانی عملا کاری مشکل و غیر ممکن خواهد بود. بنابراین استفاده از عکس‌های هوایی یکی از بهترین گزینه‌های اقتصادی برای ارزیابی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌باشد که تاثیر به‌سزایی در کاهش مدت و هزینه‌های انجام کار خواهد داشت.

امروزه عکس‌های هوایی با مقیاس‌های ۱:۴۰۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰۰ از طریق سازمان جغرافیایی ارتش و سازمان نقشه‌برداری کشور قابل دسترسی می‌باشد.

دو روش مشخص برای استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای برای بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها وجود دارد که در زیر توضیح داده می‌شود:

الف- روش مقایسه عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای در یک بازه زمانی

در این روش با تحلیل عکس‌های هوایی و یا تصاویر ماهواره‌ای و مقایسه پلان رودخانه از دو یا چند سری تصاویر متعلق به زمان‌های مختلف، نقشه ریخت‌شناسی رودخانه مورد نظر تهیه و ترسیم می‌گردد. با ترسیم نقشه ریخت‌شناسی بسیاری از تغییرات رودخانه و جابجایی عرضی و تغییرات هندسه رودخانه قابل استخراج می‌باشد. روش تهیه نقشه ریخت‌شناسی از عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای در بخش (۴-۷) به تفصیل بیان شده است.

ب- روش تجزیه تصویری عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای

یکی از روش‌های استفاده از عکس‌های هوایی، تجزیه رقومی تصویر[1] می‌باشد. امتیاز روش تجزیه رقومی تصویر، کاهش زمان مورد نیاز برای رقومی کردن است.

به طور کلی مناطق مورد نظر در تصاویر از دو منطقه خاکی و آبی تشکیل شده است. ویژگی‌های هر کدام از آنها را می‌توان به وسیله اطلاعات رنگ‌های مختلف تشخیص داد. معمولا یک سلول تصویر رنگی، اطلاعات رنگ خود را در باندهایی[2] ذخیره می‌کند.

این باندها را می‌توان بر مبنای دو روش زیر قابل تعریف نمود.

- فضای رنگی RGB[3] که سلول تصویر رنگی ترکیبی از باندهای طیفی قرمز، سبز و آبی می‌باشد.
- فضای رنگی HSL[4] که سلول تصویر رنگی به عنوان مخلوطی از باند طیفی از کم رنگ تا اشباع است و با میزان پررنگی تعریف می‌شود.

مراحل کار:

- به دلیل اختلافاتی که در مقیاس و موقعیت عوارض روی عکس‌ها می‌باشد عکس‌های هوایی با آدرس زمینی اصلاح و دارای مقیاس استاندارد مورد نظر می‌شود. سپس محدوده مورد مطالعه در تصاویر انتخاب می‌گردد.
- از ترکیب رنگی HSL که از عکس‌های هوایی مرجع ساخته شده باندهای مختلف جدا می‌شود.
- هیستوگرام هر یک از باندها به طور جداگانه از پررنگ به کم رنگ ترسیم می‌گردد.
- با استفاده از ارزش رنگی پیکسل‌ها که در هیستوگرام وجود دارد می‌توان این ارزش‌ها را به دو دسته خشکی و آب به طور جداگانه مشخص کرد.
- با تعیین معیار تفکیک مناطق خشکی از مناطق آبی، این مناطق از روی عکس‌های هوایی جدا شده و همین اقدام بر روی عکس‌ها در زمان‌های مورد نظر انجام می‌گیرد.
- با مقایسه عکس‌ها و محدوده‌های آبی و خشکی تفکیک شده در سال‌های مختلف، روند تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه مشخص می‌گردد.

---

1 - Image analysis / Image Proccessing
2 - Channels
3 - Red Green Blue
4 - Hue Saturation Lightness

۴-۳-۲- استفاده از روش‌های تجربی در مطالعات ریخت‌شناسی

۴-۳-۲-۱- روش مشاهده مستقیم و اندازه‌گیری صحرایی

ساده‌ترین روش بررسی تغییرات رودخانه در ابعاد مختلف آن، مشاهده مستقیم رودخانه و ثبت این تغییرات در توالی زمانی کوتاه مدت می‌باشد. تغییرات پلان رودخانه و جابجایی کناره‌ها و مسیر جریان، تراز بستر و تراز سطح آب، بار رسوبی و سایر مشخصات هیدرولیکی با احداث ایستگاه‌های اندازه‌گیری و سنجش اطلاعات به طور پیوسته در یک بازه زمانی به دست می‌آید. این روش اگرچه به طور مستقیم و دقیق محقق را با روند رفتار ریخت‌شناسی رودخانه مواجه می‌سازد، ولی مستلزم صرف زمان و نیروی انسانی و هزینه نسبتا زیادی می‌باشد و عملا انجام مطالعات ریخت‌شناسی از این طریق به خصوص در بازه‌های طولانی، عملی بسیار مشکل و غیر اقتصادی خواهد بود.

۴-۳-۲-۲- روش بلنچ[1]

بلنچ در سال ۱۹۶۹، روابط زیر را برای تعیین عرض رودخانه و عمق جریان در رودخانه‌های ماسه‌ای ارائه نمود:

$$W = 14Q^{0.5}D^{0.25}F_s^{-0.5} \qquad (۳۱-۴)$$

$$Y = 0.38q^{0.67}D_{50}^{-0.17} \qquad (۳۲-۴)$$

که در این روابط:

W: عرض متوسط آبراهه به متر، Y: عمق متوسط جریان به متر و Q: بده مقطع پر به مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. برای تخمین پارامترهای هندسی آبراهه در شرایط سیلابی می‌توان از بده سیل طراحی در این روابط استفاده کرد. همچنین در این روابط q: بده در واحد عرض برابر $\frac{Q}{W}$ به مترمکعب بر ثانیه در متر، D_{50}: اندازه متوسط مصالح بستر به متر و F_s: ضریبی برای تخمین سختی کناره‌ها (ماسه لوم $Fs = 0.2$) و در کناره‌ها با مصالح چسبنده ($Fs = 0.3$) می‌باشد.

معادله زیر از معادله بلنچ جهت استفاده در آبراهه‌های شنی اقتباس شده است.

$$W = 3.26Q^{0.5} \qquad (۳۳-۴)$$

$$Y = 0.47q^{0.8}D_{90}^{-0.12} \qquad (۳۴-۴)$$

که در این روابط W، Y، Q و q قبلا تعریف شده و D_{90} اندازه متوسط مصالح بستر به متر، که ۹۰ درصد مصالح دیگر از آن کوچک‌تر باشند [۶].

۴-۳-۲-۳- روش کندی[2]

کندی اولین بار در سال ۱۸۹۵به طور تجربی با جمع آوری اطلاعات کانال‌های پایدار پنجاب در هندوستان، رابطه تجربی زیر را بین عمق و سرعت متوسط جریان برای کانال‌های رژیم ارائه نمود.

---

1 - Blench
2 - Kennedy

$$V = kY^n \quad (۳۵-۴)$$

که در این رابطه V: سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه) و Y عمق متوسط جریان (متر) می‌باشد.

کندی ضرایب k و n را به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۶۴ بر اساس مطالعاتی که روی تعدادی از کانال‌های آبیاری انجام شده بود، ارائه نمود. مفهوم رژیم از طرف کارشناسان کشورهای دیگر پیگیری و با به کارگیری اطلاعات بیش‌تر، صحت و اعتبار بیش‌تری یافت. در این روش با تعریف روابط تجربی حاصل از نتایج مشاهدات به طراحی کانال‌هایی پرداخته می‌شود که بدون این‌که فرسایش و یا رسوب‌گذاری محسوس و قابل ملاحظه‌ای داشته باشند، بار رسوبی وارده را منتقل می‌کنند به کانال‌هایی که بدین صورت رفتار می‌کنند اصطلاحا کانال‌های رژیم اطلاق می‌شود [۶].

۴-۳-۲-۴- روش لیسی[1]

لیسی (۱۹۵۸)، تمامی اطلاعات موجود از کانال‌های آبیاری هندوستان را جمع‌آوری نمود و روابط تجربی زیر را ارائه نمود. بر اساس تئوری لیسی، یک آبراهه زمانی در حالت رژیم است که شیب و سطح مقطع آن در شرایط تعادل قرار داشته و فرسایش یا رسوب‌گذاری در آن رخ ندهد، هر چند که امکان حمل رسوبات توسط جریان آب وجود دارد.

$$P = 4.835Q^{0.5} \quad (۳۶-۴)$$

$$R = 0.4725Q^{0.33}f^{-0.33} \quad (۳۷-۴)$$

$$S = 0.00055Q^{1.66}f^{-0.33} \quad (۳۸-۴)$$

$$V = 0.438Q^{0.166}f^{-0.33} \quad (۳۹-۴)$$

که در این روابط:

P: محیط خیس شده (متر)، R: شعاع هیدرولیکی (متر)، Q: بده مقطع پر (مترمکعب بر ثانیه)، f: عامل سیلت ($f = 1.587\sqrt{D_{50}}$) و D_{50} اندازه متوسط ذرات بستر (میلی‌متر) می‌باشد [۶].

۴-۳-۲-۵- روش سایمون و آلبرتسون[2]

سایمون و آلبرتسون (۱۹۶۳)، سعی کرده‌اند که برای پیش بینی عرض یک آبراهه پایدار، تئوری نیروی مماسی را به تئوری رژیم ربط بدهند و بر اساس داده‌های زیادی که از کانال‌ها و رودخانه‌های در حال رژیم از هندوستان و آمریکای شمالی جمع‌آوری کردند، انواع مختلف کانال‌ها را با توجه به ذرات تشکیل دهنده کف و کناره به پنج نوع تقسیم‌بندی نمودند.

نوع اول: کف و کناره ماسه‌ای

نوع دوم: کف ماسه‌ای و کناره چسبنده

نوع سوم: کف و کناره چسبنده

نوع چهارم: مواد درشت دانه غیرچسبنده

---

1 - Lacey
2 - Simons and Albertson

نوع پنجم: مانند نوع دوم، اما با غلظت زیاد مواد معلق (۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر)

روابط ارائه شده توسط سایمون و آلبرتسون به صورت زیر می‌باشد:

$$P = K_1\sqrt{Q} \quad (۴۰-۴)$$

$$W = 0.9P \quad (۴۱-۴)$$

$$W = 0.922T - 2.0 \quad (۴۲-۴)$$

$$R = K_2 Q^{0.36} \quad (۴۳-۴)$$

$$Y = 1.21R \qquad R \le 7ft \quad (۴۴-۴)$$

$$Y = 2 + 0.931R \qquad R \ge 7ft \quad (۴۵-۴)$$

$$V = K_3 (R^2 S)^m \quad (۴۶-۴)$$

$$\frac{C^2}{g} = \frac{V^2}{gdS} = K_4 (\frac{VW}{\nu}) \quad (۴۷-۴)$$

که در این روابط:

W: عرض کانال (فوت)، Q: بده (فوت مکعب بر ثانیه)، S : شیب کانال، Y: عمق متوسط جریان (فوت)، P: محیط خیس (فوت)، R: شعاع هیدرولیکی (متر)، V: سرعت جریان (فوت بر ثانیه)، C: ضریب ثابت شزی و T: عرض سطح آزاد آب (فوت) و مقادیر ضرایب K1، K2، K3 و K4 و m در جدول (۴-۱۲) ارائه شده است [۶].

جدول ۴-۱۲- ضرایب و توان‌های معادلات به نقل از سایمون و آلبرتسون (۱۹۶۳)

ضرایب	نوع کانال				
	۱	۲	۳	۴	۵
K_1	۳۵/۶	۷۱/۴	۹۸/۳	۱۷/۳	۱/۳
K_2	۵۷/۰	۴۱/۰	۴۱/۰	۲۵/۰	۳۷/۰
K_3	۳۵/۹	--	--	۸۶/۱۰	۷۱/۹
K_4	۳۳/۰	۸۷/۰	۸۷/۰	--	--
m	۳۳/۰	--	--	۲۹/۰	۲۹/۰

۴-۳-۲-۶- روش راسگن[1]

دیوید راسگن با بررسی تعداد بی‌شماری از آبراهه‌های مختلف، شناخت مناسبی از انواع رودخانه‌ها به دست آورده و در راستای شناخت رفتار رودخانه‌ها، مراحل تعیین خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه را ارائه و مجموعه نظریات خود را در کتاب «ریخت‌شناسی کاربردی رودخانه[2]» [۳] به طور مفصل تشریح نموده است.

1 - Rosgen
2 - Applied River Morphology

براساس روش راسگن، خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در چهار سطح مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و به ترتیب از سطح یک که شناخت مشخصات کلی و بر مبنای تجزیه سطحی است تا سطح چهار که ارزیابی بسیار دقیق و با جزییات کامل از ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه ارائه می‌دهد انجام می‌شود. در روش راسگن با تعیین نوع رودخانه بر اساس طبقه‌بندی انواع آن در هر سطح از ارزیابی، خصوصیات ریخت‌شناسی آن پیش‌بینی می‌گردد. سطوح مختلف ارزیابی ریخت‌شناسی در روش راسگن همراه با عوامل تاثیرگذار در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده و توضیحات تکمیلی در زیر ارائه شده است.

سطح یک- خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه را که از تلفیق اطلاعات مربوط به عوارض حوضه آبریز[1]، زمین ریخت[2] و ریخت‌شناسی دره به دست می‌آید بیان می‌کند. در این سطح، ابعاد و الگوها و نیمرخ‌های طولی و عرضی رودخانه‌ها برای ارائه ریخت‌شناسی رودخانه در مقیاس کلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از معیارهای سطح یک از نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین ریخت‌شناسی به دست می‌آید.

سطح دو- دراین سطح توصیف دقیق‌تری از ریخت‌شناسی و نوع رودخانه که از اطلاعات صحرایی به دست آمده، ارائه می‌دهد. ترانشه‌های رودخانه، ابعاد، الگو و مقاطع طولی و عرضی و مواد بستر در این سطح به صورت کمی و در قالب نوع جریان ارائه می‌گردد. در این سطح، یک ارزیابی منطقی و کمی ریخت‌شناسی به همراه اطلاعات ریزتر و دقیق‌تری برای کاربردهای مدیریتی مهیا می سازد.

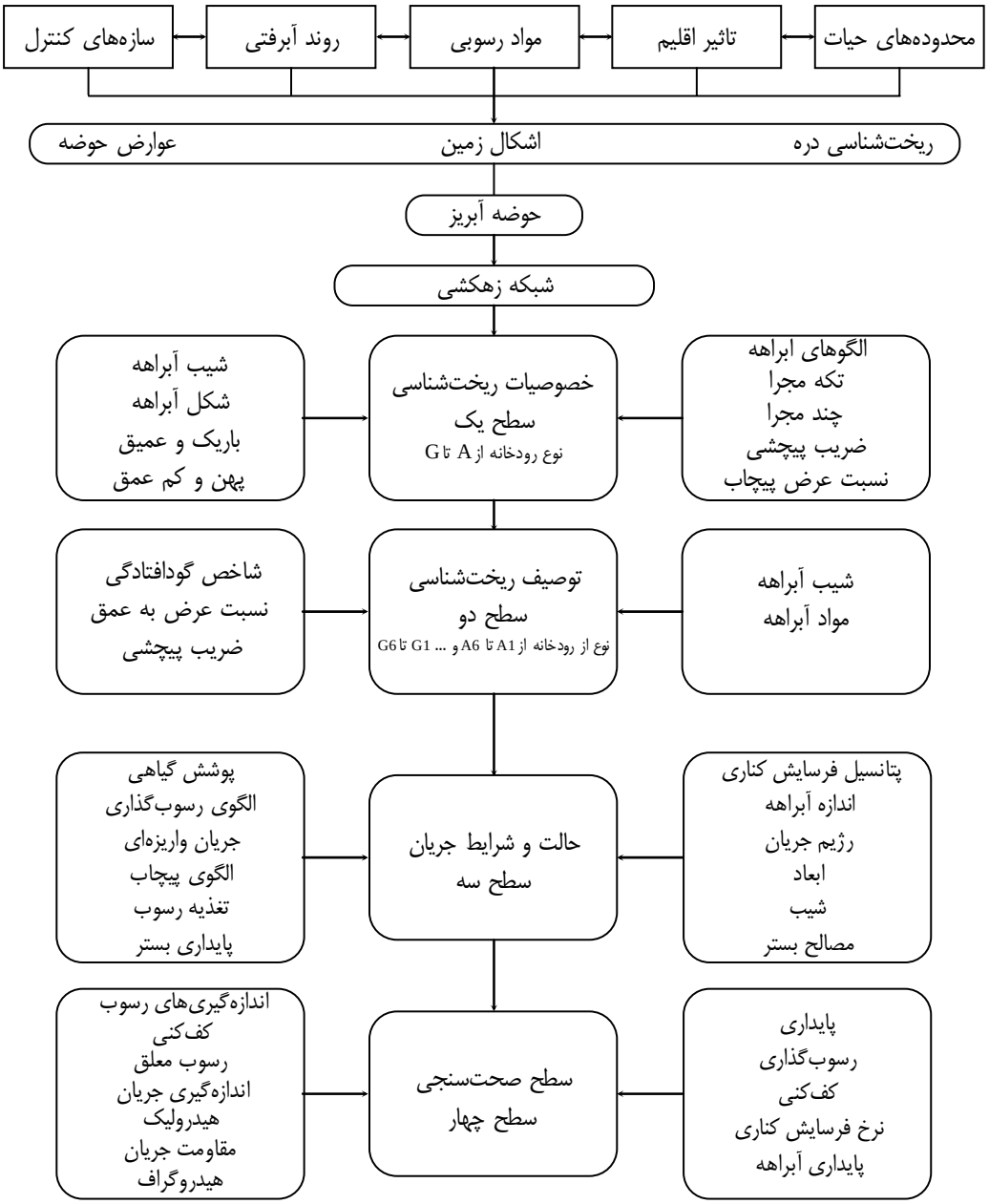
سطح سه- در این سطح، وضعیت موجود یا حالت جریان و آبراهه از جهت پایداری، قابلیت به روز رفتار عکس‌العملی رودخانه توصیف می‌گردد. در این سطح عوامل میدانی بیش‌تری از رودخانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این عوامل بر روی حالت جریان موثر خواهد بود. به عنوان مثال پوشش گیاهی، پایداری آبراهه، فرسایش کناری و وجود تلاطم و آشفتگی جریان مورد توجه قرار می‌گیرد.

سطح چهار- در این سطح اندازه‌گیری‌هایی برای تصدیق و تایید روابط ریخت‌شناسی که از مرحله قبل استنباط شده، به کار گرفته می‌شود. در این صورت روابطی تجربی برای پیش‌بینی خصوصیات ریخت‌شناسی مهیا می‌گردد. این روابط مانند تعیین ضریب مانینگ از سرعت اندازه‌گیری شده، همبستگی بین بار کف با بده جریان، محاسبه مشخصات هیدرولیکی از اطلاعات ایستگاه سنجش می‌باشد.

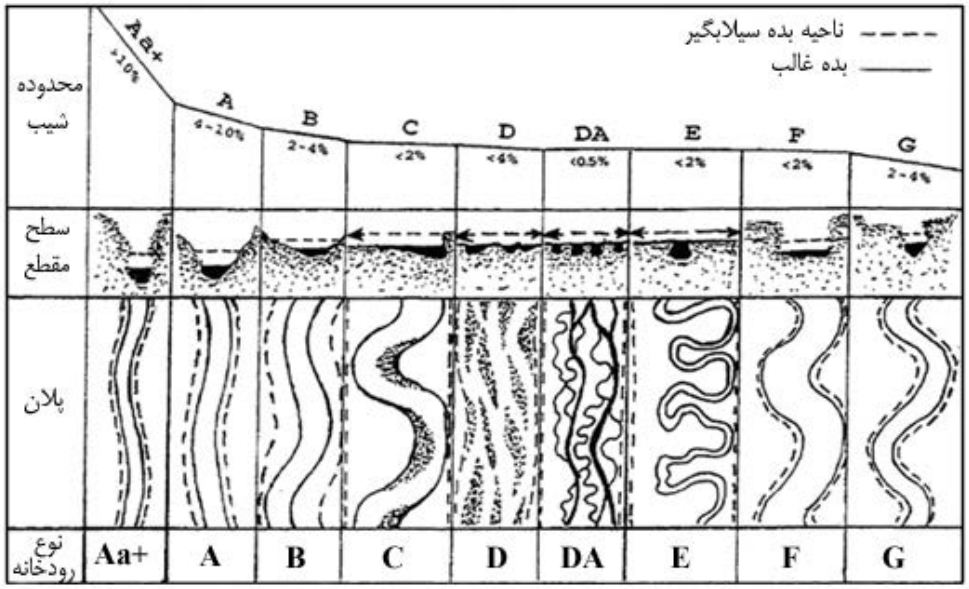
۴-۳-۲-۶-۱- سطح یک، طبقه‌بندی کلی

طبقه‌بندی رودخانه‌ها با در نظر گرفتن اطلاعات حاصل از نیمرخ رودخانه و عوارض دره و شکل سطح مقطع و الگوی پلان به دست می‌آید. نتیجه طبقه‌بندی رودخانه‌ها در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است. در این شکل با تعیین محدوده شیب رودخانه با استفاده از نیمرخ طولی آن، نوع رودخانه از نوع A تا نوع G همراه با خصوصیات کلی، شکل سطح مقطع و الگوی شکل سطح جریان مشخص می‌گردد.

1 - Basin Relief
2 - Land Form



شکل ۴-۲۳- سطوح مختلف ارزیابی ریخت‌شناسی رودخانه بر اساس روش راسگن [۳۵]



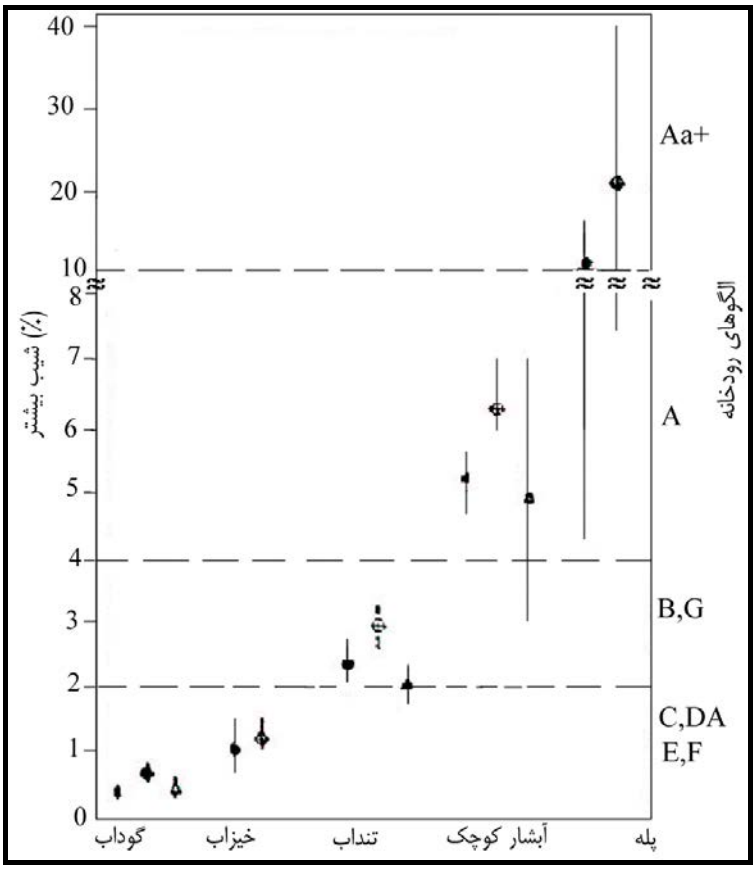
شکل ۴-۲۴- نمایی از شکل پلان، نیمرخ طولی مقاطع عرضی الگوهای رودخانه

بنابراین از نظر ریخت‌شناسی مقطع طولی، الگوی Aa^{+} مربوط به رودخانه‌های با شیب بسیار تند (بیش‌تر از ۱۰٪) و با آبشارها و گوداب‌های ناشی از آبشستگی می‌باشد.

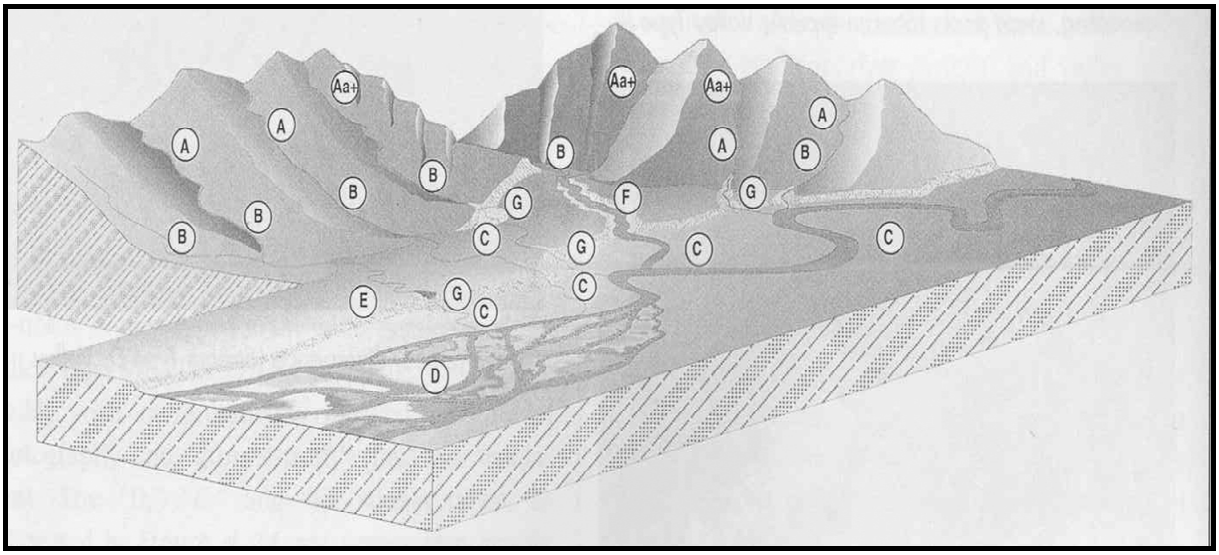
نوع A دارای شیب تند بین ۴ تا ۱۰ درصد و با گوداب‌های پله‌ای و آبشارهای کوچک و متوالی می‌باشد. تشریح سایر انواع رودخانه در مرجع [۳۴] ذکر شده است. یکی از عوامل مهم در ریخت‌شناسی، الگوی شکل بستر است که با شیب رودخانه در ارتباط می‌باشد. شکل‌های مختلف بستر در تقسیم‌بندی راسگن به گوداب[1]، خیزآب[2]، تنداب[3]، آبشار کوچک[4] و پله تقسیم شده و ارتباط آن با شیب بستر را در شکل (۴-۲۵) ارائه شده است. همچنین شکل (۴-۲۶) شمایی از موقعیت رودخانه‌های مختلف در سطح حوضه را نمایش می‌دهد. در تشریح ریخت‌شناسی سطح یک، شکل مقطع عرضی به صورت مقاطع عمیق و باریک تا عریض و کم عمق و با سیلاب‌دشت‌های وسیع است و این معیار در قالب نسبت عرض به عمق بیان می‌شود.

الگوهای پلان رودخانه شامل بازه مستقیم، پیچانرودی با نسبت شدت پیچشی‌های متفاوت و شریانی پایدار و ناپایدار در تقسیم‌بندی رودخانه‌ها در سطح یک مشخص می‌شود. نقش پوشش گیاهی در طبقه‌بندی رودخانه‌ها در این سطح به طور ضمنی مورد توجه قرار گرفته و اطلاعات دقیق‌تری از پوشش گیاهی در سطح سه بیان شده است. در جدول (۴-۱۳) خلاصه خصوصیات رودخانه‌های طبقه‌بندی شده بر اساس معیارهای راسگن در سطح یک آورده شده است.

1 - Pool
2 - Riffle
3 - Rapid
4 - Cascade



شکل ۴-۲۵- محدوده ارتباط شکل کف با شیب بستر برای انواع رودخانه‌ها



شکل ۴-۲۶- موقعیت انواع رودخانه‌ها در سطح حوضه

جدول ۴-۱۳- خلاصه معیارهای ترسیمی برای طبقه‌بندی در سطح وسیع

نوع رودخانه	توصیف عمومی	نسبت گود افتادگی	نسبت عرض به‌عمق	سینوسیته	شیب	شکل نواحی/خاک/ حالات مختلف بستر
Aa+	شیب خیلی زیاد، سیلابدشت کم، حاوی جریانات رسوبی واریزه‌ای، بستر گودافتاده	< ۱/۴	<۱۲	۱ تا ۱/۱	> ۰/۱	فرسایش، کف صلب یا حالات رسوبی، پتانسیل جریان واریزه‌ای، بستر گودافتاده، پله‌های قائم با حوضچه‌های آبشستگی، آبشارهای متعدد
A	شیب زیاد، بستر گود افتاده، آبشارهای کوتاه، حوضچه‌ها و پله‌های متعدد، جریانات واریزه‌ای همراه با خاک‌های رسوبی مجرای پایدار در حالت کف صخره‌ای	< ۱/۴	<۱۲	۱ تا ۱/۲	۰/۰۴ تا ۰/۱	کف رسوبی یا فرسایش‌پذیر و صلب، بستر گودافتاده و محدود شده با آبشارهای متعدد. حوضچه‌های پله‌ای عمیق
B	گودافتادگی متوسط، شیب متعادل، تلماسه‌های حاکم بر مجرا، حوضچه‌های غیر متعارف، پلان و نیمرخ بسیار پایدار، کناره‌های پایدار	۱/۴ تا ۲/۲	>۱۲	> ۱/۲	۰/۰۲ تا ۰/۰۳۹	گودافتادگی بستر با وسعت متعادل و نسبت عرض به عمق متوسط. دره‌های باریک و با شیب ملایم، حوضچه‌های اتفاقی محدود شده
C	شیب کم، پیچانرودی، بار رسوبی نقطه‌ای، شکل بستر به صورت تلماسه‌ها و حوضچه‌ها، مجاری آبرفتی وسیع، سیلابدشت‌های مشخص	< ۲/۲	>۱۲	> ۱/۴	<۰/۰۲	دره‌های سیلابدشتی، خاک‌های آبرفتی سیلابدشت با گسترش ملایم به همراه مجرای پیچانرودی مشخص، بستر تلماسه‌ای- حوضچه‌ای
D	مجرای شریانی با تپه‌های رسوبی طولی یا عرضی، مجرای بسیار عریض با سواحل فرسایش‌پذیر	متغیر	>۴۰	متغیر	> ۰/۰۴	دره‌های وسیع با مخروط افکنه‌های آبرفتی و واریزه‌های یخچالی و حالات مختلف رسوب‌گذاری، تطابق دراز مدت، منابع رسوبی فراوان
DA	مجاری چند گانه باریک و عمیق با سیلابدشت حاوی پوشش گیاهی توسعه یافته با شدت پیچشی بسیار متغیر، سواحل پایدار	> ۴	<۴۰	متغیر	< ۰/۰۰۵	دره‌های با شیب کم، رسوبات نرم و یا خاک، مجاری چند گانه با کنترل زمین‌شناسی، پوشش گیاهی فراوان در سیلابدشت‌های وسیع پایدار
E	شیب کم، جریان حوضچه‌ای- تلماسه‌ای پیچانرودی با نسبت عرض به عمق کم و رسوبات اندک، پایدار، عرض چم بالا	> ۲/۲	<۱۲	> ۱/۵	< ۰/۰۲	دره‌های وسیع، مصالح آبرفتی، دارای شکل سینوسی وسیع، کناره‌های پایدار حاوی پوشش گیاهی، شکل بستر حوضچه‌ای – تلماسه‌ای با نسبت عرض به عمق بسیار اندک
F	مجرای حوضچه‌ای- تلماسه‌ای با سیلابدشت محدود با شیب‌های کم و نسبت عرض به عمق زیاد	< ۱/۴	<۱۲	> ۱/۴	< ۰/۰۲	گودافتادگی وسیع در بستر به همراه مصالح هوازده، شیب ملایم با نسبت عرض به عمق بالا، پیچانرودی ناپایدار دراز مدت با نرخ فرسایش کناره بالا، ریخت‌شناسی حوضچه‌ای تلماسه‌ای
G	سیلابدشت‌های با عرض کم، حاوی گوداب‌های متعدد و نسبت عرض به عمق کم با شیب متوسط	< ۱/۴	<۱۲	> ۱/۲	۰/۰۲تا ۰/۰۳۹	بستر حوضچه‌ای پله‌ای با گوداب‌های متعدد شیب و نسبت عرض به عمق متوسط، دره‌های باریک، مصالح آبرفتی با دانه‌بندی‌های متفاوت، مخروط افکنه‌ها یا دلتاهای ناپایدار با نرخ فرسایش کناره بالا

۴-۳-۲-۶-۲- سطح دو، طبقه‌بندی توصیفی

دومین سطح از تحلیل ریخت‌شناسی رودخانه و خصوصیات رفتاری آن در روش تجربی راسگن، توصیف ریزتر و دقیق‌تری از کلاس‌بندی رودخانه‌ها را ارائه می‌دهد. در این سطح با در نظر گرفتن اطلاعات حاصل از بررسی‌های میدانی و صحرایی و از جمله وضعیت مصالح بستر، تقسیم‌بندی کامل‌تری از رودخانه‌ها داده می‌شود. مصالح بستر رودخانه‌ها متشکل از یکی از موارد بستر سنگی، بستر صخره‌ای از قطعات سنگی[1]، بستر قلوه سنگی[2]، بستر شنی[3]، بستر ماسه‌ای[4] و بستر رسی ـ سیلتی[5] می‌باشد. بنابراین هر نوعی از رودخانه‌ها که در سطح یک، از انواع A تا G برحسب شیب بستر ارائه شده، بسته به آن‌که مصالح آن از کدام یک از انواع فوق باشد، به دسته ریزتر مطابق با شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) تقسیم می‌گردد و در مجموع در این تقسیم‌بندی ۴۲ نوع رودخانه با ویژگی‌های رفتاری خاص خود ارائه شده است. نتایج بررسی‌های گسترده راسگن بر روی خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر شیب بستر یا شیب سطح آب، دامنه تغییرات سه عامل ریخت‌شناسی دیگری در هر طبقه‌بندی قابل تعریف می‌باشد. این عوامل شامل شاخص گودافتادگی[6] (نسبت E)، نسبت عرض به عمق و ضریب خمیدگی است که دامنه تغییرات هر کدام در شکل شماره (۴-۲۷) آمده است.

- شاخص گودافتادگی (نسبت E) نشان دهنده وضعیت شکل مقطع از جهت فرورفتگی عمقی بستر و یا گسترش در سیلابدشت می‌باشد و این شاخص به صورت نسبت عرض پهنه سیلاب در ارتفاعی معادل عمق دو برابر حداکثر عمق بده لبریز به عرض سطح آب متناظر بده لبریز تعریف می‌شود. تغییرات شاخص گودافتادگی در رودخانه‌های مختلف در شکل (۴-۲۷) مشخص شده است.
- نسبت عرض به عمق $\left(\frac{W_{bkf}}{d_{bkf}}\right)$ عبارت است از نسبت عرض سطح آب در بده لبریز به متوسط عمق آب متناظر در بده لبریز این شاخص معرف شکل رودخانه است. دامنه تغییرات نسبت عرض به عمق در انواع رودخانه‌ها در شکل (۴-۲۸) در محدوده کم‌تر از ۱۲ تا بیش‌تر از ۴۰ معرفی شده است.
- ضریب خمیدگی بیانگر میزان توسعه یافتگی و انحنای قوس‌های رودخانه‌ای است و میزان آن از مقدار یک برای بازه‌های مستقیم و تا فراتر از ۱/۵ در رودخانه‌های پیچابی در تقسیم‌بندی رودخانه‌ها قرار گرفته است.

با توجه به توضیحات فوق، مراحل مختلف تعیین نوع رودخانه در سطح دو در شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است.

۴-۳-۲-۶-۳- سطح سه، ارزیابی شرایط و حالت جریان

معیارهای ارائه شده در سطح دو ارزیابی ریخت‌شناسی، در واقع قالب فیزیکی آبراهه را معرفی می‌کند که نمود کاملی از وضعیت موجود روند ریخت‌شناسی آن می‌باشد. عوامل متعددی در رابطه با مسایل هیدرولوژی، زیستی، اکولوژی و انسانی بر روی وضعیت

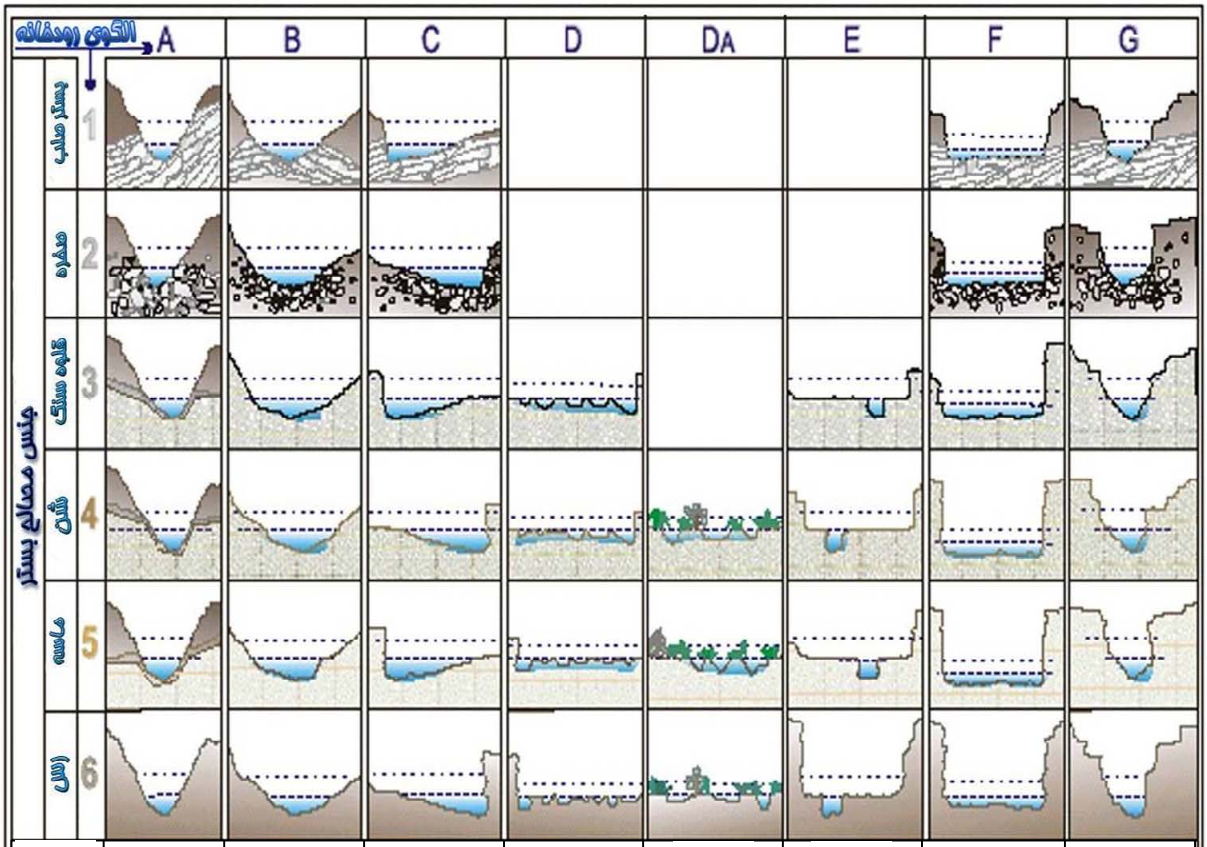
---

1 - Boulder
2 - Cubble
3 - Gravel
4 - Sand
5 - Silt- Clay
6 - Entrenchment

موجود ریخت‌شناسی رودخانه تاثیرگذار است. سطح سه تاثیر جمعی عوامل فوق را بر قالب ریخت‌شناسی مورد تحلیل قرار می‌دهد. برای تشریح سطح سه، مفهوم دو واژه «پایداری» و «پتانسیل» رودخانه را باید مورد توجه قرار داد.

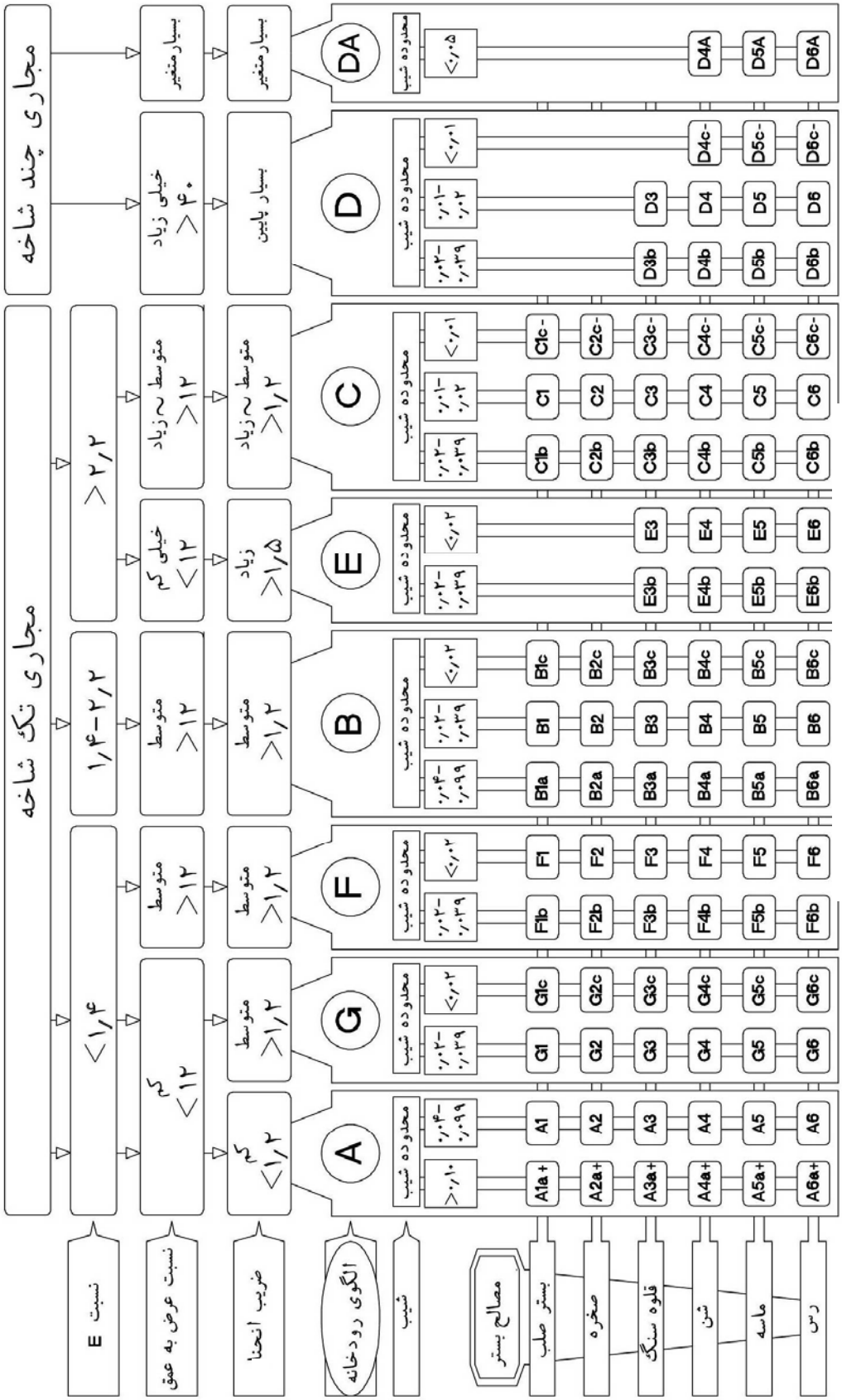
پایداری یک آبراهه از نظر ریخت‌شناسی، توانایی آبراهه در حفظ شرایط موجود و باقی ماندن بر آن در طی زمان و از جمله حفظ ابعاد، الگو و مقاطع آن می‌باشد، به نحوی‌که رودخانه نه رسوب‌گذار و نه در حالت کف‌کنی باشد. رودخانه پایدار، قادر به حمل رسوب بدون ایجاد اثرهای نامطلوب بر جریان و رسوب حوضه است.

پتانسیل رودخانه، شرایط مطلوب رودخانه و روند عملکرد آن‌را دگرگون می‌سازد. تغییر در بده جریان، رژیم جریان، کاربری اراضی در داخل حوضه آبریز و احداث سازه‌های رودخانه‌ای ازمهم‌ترین عوامل دگرگونی پایداری می‌باشد. عکس‌العمل و پاسخ رودخانه در برابر دگرگونی های ایجاد شده بستگی به «نوع رودخانه» دارد. هر نوعی از رودخانه مطابق با دسته‌بندی‌های سطح یک و دو در برابر آشفتگی‌های ناشی از عوامل طبیعی و انسانی، رفتار و پاسخی خاص و منحصر به خود را ارائه می‌دهد. ارزیابی سطح سه ریخت‌شناسی به توصیف شرایط رودخانه در رابطه با سه عامل «پایداری»، «پتانسیل» و «عملکرد» منجر می‌شود.

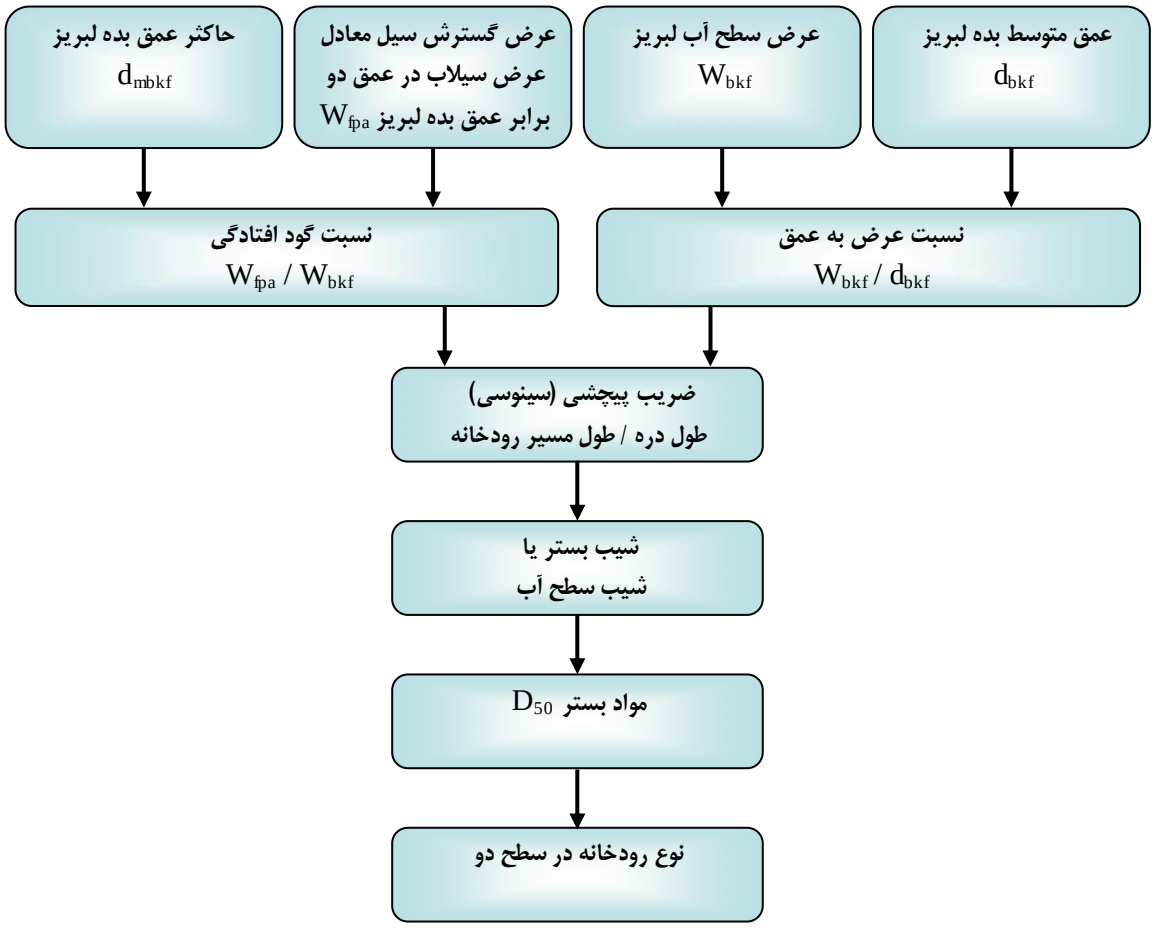


	A	B	C	D	DA	E	F	G
نسبت E	<۱/۴	۱/۴-۲/۲	>۲/۲	عدد مشخصی نیست	>۴	>۲/۲	<۱/۴	<۱/۴
نسبت عرض به عمق	<۱۲	>۱۲	>۱۲	>۴۰	<۴۰	<۱۲	>۱۲	<۱۲
ضریب انحنا	۱ - ۱/۲	>۱/۲	>۱/۲	عدد مشخصی نیست	متغیر	>۱/۵	>۱/۲	>۱/۲
شیب	۰/۰۴-۰/۰۹۹	۰/۰۳-۰/۰۳۹	<۰/۰۲	<۰/۰۴	<۰/۰۰۵	<۰/۰۲	<۰/۰۲	۰/۰۳-۰/۰۳۹

شکل ۴-۲۷- تقسیم‌بندی اولیه رودخانه‌ها



شکل ۴-۲۸-کلید تقسیم‌بندی رودخانه‌ها (روش راسگن)



شکل ۴-۲۹- مراحل تعیین نوع رودخانه در سطح دو راسگن

موضوعات ارزیابی سطح سه عبارتند از:

- تهیه و توسعه مبانی کمی برای مقایسه رودخانه‌هایی که دارای ریخت‌شناسی مشابه ولی در شرایط و مراحل مختلف باشند.
- تشریح وضعیت پایداری رودخانه در شرایط موجود
- تعیین جابجایی و تغییر نوع رودخانه از حالت مبنا
- تهیه دستور العمل برای ارزیابی اطلاعات اضافی صحرایی مربوط به عوامل مختلف رودخانه که بر نوع رودخانه تاثیرگذار است. این اطلاعات شامل رژیم جریان، ابعاد آبراهه، تغذیه رسوب، پایداری آبراهه، فرسایش‌پذیری کناره و سازه‌های رودخانه‌ای می‌باشد.
- تهیه روشی برای پیش‌بینی تغییرات و پایداری آبراهه
- تهیه مبانی برای ارزیابی سطح چهار که مرحله تصدیق نمونه‌برداری و تحلیل اطلاعات است

برای کسب اطلاع بیش‌تر از روند ارزیابی سطح سه و مثال‌های منطبق با موضوعات فوق به فصل ۶ مرجع [۳۵] مراجعه شود.

۴-۳-۲-۶-۴- سطح چهار، تصدیق اطلاعات صحرایی

سطح چهار به صحت‌سنجی ارزیابی‌های مربوط به شرایط موجود، پتانسیل و پایداری جریان که در سطوح قبلی پیش‌بینی شده بود، می‌پردازد. صحت‌سنجی از طریق مشاهده یک بازه خاص و تحلیل وضعیت رسوب، جریان آب و پایداری رودخانه به دست می‌آید. پس از آن‌که شرایط ریخت‌شناسی بازه مورد تصدیق قرار گرفت، اطلاعات آن به منظور برقراری روابط تجربی برای آزمون، تصدیق و توسعه پیش‌بینی سرعت، مشخصات هندسی و هیدرولیکی، خصوصیات حمل رسوب، نرخ فرسایش کناری و پایداری آبراهه مورد استفاده قرار می‌گیردکه در آن روابطی تجربی می‌تواند برای هر نوع رودخانه در شرایط مشخصی فراهم گردد و برای سایر بازه‌های مربوط به همان نوع رودخانه که اطلاعات آن در دسترس نمی‌باشد، گسترش داده شود.

مراحل مربوط به سطح چهار ارزیابی ریخت‌شناسی عبارتند از:

- اندازه‌گیری‌های جریان
- تحلیل رسوب
- تصدیق پایداری جریان

۴-۳-۳- بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های رایانه‌ای

یکی از روش‌های بررسی و تعیین تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، به‌کارگیری نرم افزارهای رایانه‌ای و شبیه‌سازی ریاضی می‌باشد. امروزه نرم افزارهای متعددی با قابلیت‌های مختلف برای شبیه‌سازی هیدرولیک و هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب در دسترس می‌باشد. این مدل‌ها قادرند رفتار مورفودینامیکی رودخانه و تغییرات عمقی و عرضی و سایر مشخصات ریخت‌شناسی را در بازه زمانی مورد نظر شبیه‌سازی نمایند.

استفاده از این نرم افزارها عموما مستلزم اطلاعات مربوط به مشخصات هندسی مسیر، دانه‌بندی مواد بستر، رژیم هیدرولوژی رودخانه و لحاظ نمودن تاسیسات آبی و سازه‌های کنترل جریان می‌باشد. در ادامه مدل‌های رایانه‌ای متداول در مطالعات ریخت‌شناسی و قابلیت‌های مربوط ارائه گردیده است.

۴-۳-۳-۱- مدل‌های ریاضی متداول در ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

مدل‌های ریاضی زیادی برای بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها توسعه یافته که برخی از آنها جنبه تجاری پیدا کرده و به دفعات در پروژه‌های متعدد در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته اند. مدل‌های HEC-6، GSTARS3، Fluvial- 12، MOBED، SEFLOW، Mike11، CCHE (1,2,3D)، و MIKE21-C از جمله این مدل‌ها می‌باشند. در بند ۴-۲-۳-۲ به معرفی جزییات بیش‌تری از مدل‌های مذکور که در مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه استفاده می شوند، پرداخته شده است.

۴-۴- تعیین ابعاد و مشخصات رفتاری رودخانه‌ها و نقش عوامل موثر بر آن

۴-۴-۱- بررسی پدیده‌ها و تغییرات عرضی و طولی رودخانه نظیر دو شاخگی، بهمرود، آبشار و جابجایی‌های عرضی و عوامل موثر بر آنها

یک رودخانه تحت تاثیر رژیم بده جریان ورسوب و مشخصات هندسی و هیدرولیکی خود در بازه‌های مختلف ممکن است در حالت کف‌کنی[1] و یا بالا آمدن سطح اساس بستر[2] باشد. یک بازه در شرایط کف‌کنی، به طور مستمر نسبت به زمان در حال تعمیق است. این شرایط در اثر تغییر در سطح مبنای رودخانه، نوسانات سطح آب در محل خروجی نهایی(محل اتصال به دریا یا دریاچه)، احداث سد مخزنی و یا تعمیق و لایروبی مجرای رودخانه پدید می‌آید. تغییر در رژیم بده و رسوب هم عامل موثری در ایجاد این‌گونه تغییرات است. برای مثال در پایین‌دست یک سد مخزنی، به دلیل کاهش بار رسوبی رودخانه، عمل فرسایش و کف‌کنی تشدید می‌شود. شاخه‌های ورودی به رودخانه نیز عامل دیگری در ایجاد این تغییرات هستند. مثلا اگر دانه‌بندی مصالح شاخه فرعی ریز دانه باشد، باعث افزایش بار کف و کف‌کنی در رودخانه اصلی شده و اگر درشت دانه‌تر باشد، باعث کاهش بار کف و ته‌نشین شدن مواد رسوبی خواهد شد.

راسگن، قابلیت فرسایش‌پذیری کناره‌ها را در برابر فرسایش متاثر از عوامل زیر می داند:

۱- نسبت ارتفاع کناره به تراز حالت بده مقطع پر

۲- نسبت عمق ریشه‌های گیاهی به ارتفاع کناره

۳- تراکم ریشه‌های گیاهان در خاک

۴- ترکیب و جنس خاک کناره‌ها

۵- زاویه کناره‌ها نسبت به بستر رودخانه (شیب کناره‌ها)

۶- چینه های موجود در کناره‌ها یا وجود عدسی‌های خاکی در کناره‌ها

۷- حفاظت سطحی کناره‌ها با پوشش گیاهی یا قلوه سنگ و نظایر این‌ها

این محقق، عوامل کیفی فوق را با استفاده از داده‌های بازه‌های مختلف رودخانه‌های کلرادو[3] و یلو استن[4] که در برگیرنده محدوده متنوعی از شرایط هیدرولوژی و هیدرولیکی بودند را در قالب شاخصی به نام شاخص فرسایش‌پذیری کناره‌ها [5] (BEHI) به صورت کمی درآورد. که جهت اطلاعات تکمیلی می‌توان به مرجع [۷۰] رجوع کرد. همچنین این محقق، پتانسیل فرسایش‌پذیری را به گرادیان سرعت و تنش برشی مرتبط کرده است (جدول ۴-۱۴).

---

1 - Degradation
2 - Base Level
3 - Colorado
4 - Yellowstone
5 - Bank Erosion Hazard Index

جدول ۴-۱۴- حدود تغییرات عوامل موثر در فرسایش کناره و شاخص‌های آنها[۷۱]

میزان فرسایش‌پذیری کناره	گرادیان سرعت*(متر بر ثانیه برمتر)	نسبت تنش برشی**
خیلی کم	کم‌تر از ۰/۵	کم‌تر از ۰/۸
کم	۰/۵ –۱	۰/۸ –۱/۰۵
متوسط	۱/۱ –۱/۶	۱/۰۶ –۱/۱۴
زیاد	۱/۶۱ –۲	۱/۱۵ –۱/۱۹
خیلی زیاد	۲/۱ –۲/۴	۱/۲ –۱/۶
شدید	بیش‌تر از ۲/۴	بیش‌تر از ۱/۶

* گرادیان سرعت، حاصل تقسیم اختلاف سرعت در کناره نسبت به مرکز خطوط هم سرعت در راستای عمود بر خطوط هم سرعت به طول کناره تا مرکز بـر حسب متر برثانیه بر متر

** نسبت تنش برشی عبارتست از تنش برش کناره بخش بر تنش برشی متوسط (تنش برشی متوسط= وزن مخصوص آب× شیب × عمق متوسط)

دو شاخگی و بهمرود از پدیده‌های طبیعی و معمول در رودخانه‌ها هستند. این کاملا منطقی است که رفتار بهمرود و دو شـاخگی با ویژگی‌های خاص رفتاری رودخانه مشخص می‌شود. در بندهای (۲-۶) و (۲-۷) مواردی از ویژگی‌های بهمرود و دو شاخگی عنوان شده است و در این قسمت مواردی دیگر عنوان می‌شود.

- در دو شاخگی، توزیع بده جریان بر اساس اختلاف کلی هر دو شاخه پایین دست نسبت بـه تـراز مبنـای رودخانـه اصـلی انجام می‌شود و توزیع بده رسوب بر اساس الگوی موضعی جریان محل انشعاب صورت می پذیرد و به این جهت هندسـه مقطع در محل انشعاب دارای اهمیت زیادی می‌باشد.
- در بهمرود، اختلاف بده شاخه‌ها یک عامل محدود کننده است. اگر بده یک شاخه از شاخه دیگر بـیش‌تـر باشـد اثرهـای فرآب شدید در شاخه دوم (با بده کم‌تر) دیده می‌شود. از این‌رو، تغذیه مواد رسـوبی از شـاخه بـا بـده کـم‌تـر بـه صـورت نامنظم‌تری انجام می‌شود. به عبارت دیگر، در شاخه با بده کم‌تر در نزدیکی محل انشعاب ارتباط مستقیم بین بده جریـان و بده رسوب وجود ندارد[۴۷].
- در دو شاخگی، توزیع اندازه ذرات و مصالح کف شاخه‌های پایین‌دست به صورت عمده متاثر از جورشدگی مـصالح اسـت. این جورشدگی به میزان زیادی از هندسه دو شاخگی تاثیر می‌پذیرد. در بهمرود، اگر انـدازه ذرات و یـا مقـادیر بـده‌هـای جریان در شاخه‌های بالادست اختلاف زیادی با یکدیگر داشته باشند، توزیع اندازه ذرات در رودخانه اصلی کـه از پیوسـتن دو شاخه بالادست پدید می‌آید، در زمان‌های مختلف متفاوت است.
- در مورد دو شاخگی هیچ الزامی ندارد که ایستگاه اندازه‌گیری بده جریان نسبتا به محل انشعاب نزدیک باشد. اما در مـورد بهمرود، محل ایستگاه اندازه‌گیری بده جریان، به ویژه در مورد شاخه با بده کم‌تر، بسیار حایز اهمیت بوده و باید بـالاتر از محدوده تاثیر فرآب قرار گیرد.
- برای اندازه‌گیری رسوب، محل ایستگاه باید به اندازه کافی ازمحل دو شاخگی یا بهمرود دور باشد. علت این امر آن است کـه در مجاورت محل انشعاب، در هر دو حالت دو شاخگی و بهمرود، مقادیر فرسایش و رسوب‌گذاری نسبتا زیاد است [۴۷].

در بهمرودها اگر دهانه یک شاخه فرعی به کناره مقعر رودخانه اصلی متصل شود، انحراف رسـوب از شـاخه فرعـی بـه رودخانـه اصلی به درستی انجام شده و ترسیب در محل تقاطع رخ نمی‌دهد. زاویه اتصال شاخه فرعی به رودخانه اصلی به ارتباط بده و رسـوب بستگی دارد. در حالت کلی، بهترین حالت آن است که شاخه‌های فرعی بزرگ با زاویه‌ای بـین ۲۰ تـا ۶۰ درجـه بـه رودخانـه اصـلی

متصل شده باشند اما برای شاخه‌های فرعی کوچک که بار رسوب بسیار کمی دارند، زاویه اتصال ۹۰ درجه هم مشکلی ایجاد نمی‌کند. هرچه زاویه اتصال تندتر باشد، سرعت جریان و تاثیرات جریان بر جریان اصلی رودخانه کم‌تر خواهد بود. بهترین زوایا بین ۲۰ تا ۳۰ درجه می‌باشد. در زوایای بالاتر از ۶۰ درجه، در محل اتصال تشدید آشفتگی جریان موجب ترسیب مواد رسوبی ورودی از شاخه فرعی و به تبع آن، تشکیل تپه آبی[1] (تپه‌ای که در زیر آب در اثر انباشت طبیعی رسوبات در بستر رودخانه‌ها ایجاد شده و در مقابل فرسایش ناشی از جریان مقاوم می‌باشد) را به دنبال خواهد داشت.

در مورد شاخه‌های فرعی که شیب آنها از شیب رودخانه اصلی بیش‌تر است، قطر رسوبات از رسوبات رودخانه اصلی ممکن است بزرگ‌تر باشد. در این حالت، زمانی که جریان سیلاب مقادیر زیادی از رسوبات را به رودخانه اصلی حمل می‌کند و این رسوبات در مصب و محل اتصال ته‌نشین می‌شود که این امر سبب ایجاد تغییراتی در محور جریان و تشکیل پشته‌های رسوبی می‌شود.

اگر هم در شاخه اصلی و هم در شاخه فرعی جریانات با بده بالا رخ دهد، به دلیل تاثیر فرآب، رسوبات فراوانی در شاخه فرعی ته‌نشین می‌شود. این پدیده در زمانی که جریان رودخانه اصلی زیاد و جریان شاخه فرعی کم است، به وقوع می‌پیوندد. بدین ترتیب بستر شاخه فرعی بالاتر آمده و شیب آن در محدوده اتصال کم می‌شود. در چنین حالاتی، پشته‌های رسوبی بزرگ ایجاد می‌شود و حتی در مواردی مجاری فرعی کوچک‌تر در محدوده محل اتصال در شاخه فرعی ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر در محدوده اتصال، شاخه فرعی چند شاخه می‌شود [۶۵].

۴-۴-۲- بررسی پدیده تعریض و کف‌کنی و شکل‌گیری پدیده‌های خم‌ها، چم‌ها در مسیر و عوامل موثر بر آنها

در قوس خارجی رودخانه به دلیل ایجاد نیروی جانب مرکز سطح آب بالا می‌آید که به آن ارتفاع اضافه[2] می‌گویند. از سوی دیگر در قوس مقابل (داخلی) سطح آب افت می‌کند و در این صورت یک جریان چرخشی در مقطع عرضی و در محل قوس ایجاد می‌شود که باعث گودشدن مقطع در قوس خارجی می‌شود. حال اگر کناره رودخانه صلب باشد، فرسایش محدود به بستر خواهد شد ولی اگر کناره رودخانه قابل فرسایش باشد، دیواره خارجی تحت فرسایش قرار می‌گیرد و مطابق شکل (۴-۳۰-الف) ریزش می‌کند تا گودال ایجاد شده را پرکند. ادامه این روند، موجب فرسایش با سرعت قابل توجه در جهت قوس خارجی خواهد شد[۵]. در صورتی‌که بستر رودخانه صلب بوده ولی کناره‌ها فرسایش‌پذیر باشد، فرسایش کناره‌ای متوجه قوس خارجی شده و مطابق شکل (۴-۳۰- ب) جابجایی جانبی را به دنبال دارد.

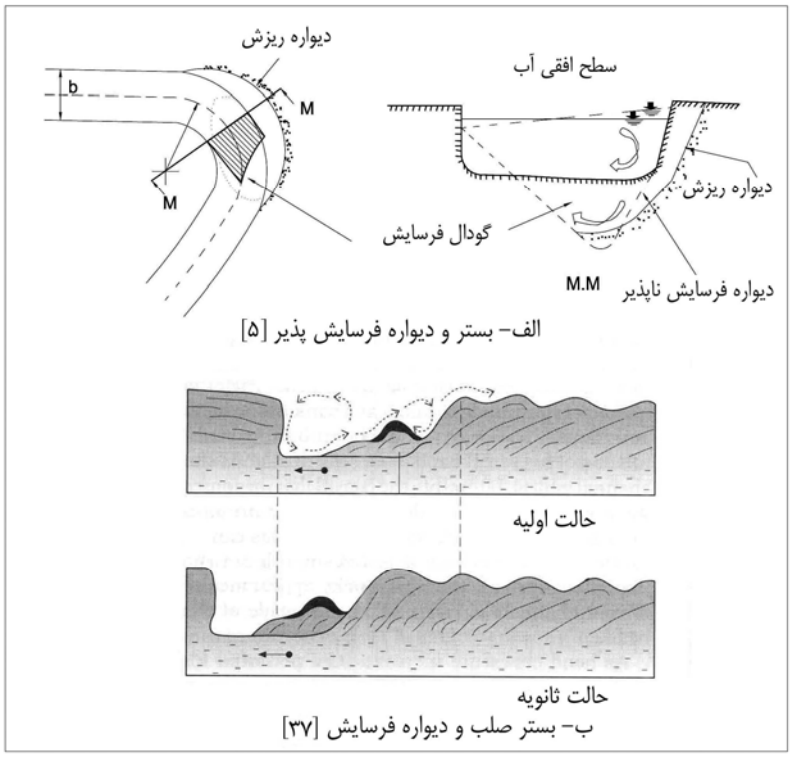
ماهیت سه بعدی جریان در رودخانه‌ها منجر به ایجاد اشکال مختلف بستر نظیر گوداب و خیزاب و تغییراتی در شکل پلان می‌شود. وجود جریان ثانویه الگوی توزیع سرعت و تنش برشی را دگرگون می‌سازد.

تنش برش و بار کل رسوب قابل حمل توسط جریان بستگی به اشکال مختلف ایجاد شده در بازه‌های رودخانه (خیزاب، گوداب، بازه مستقیم و پیچانرودی) و به تبع آن توزیع سرعت و الگوی جریان ثانویه دارد. در شکل (۴-۳۱) تاثیر جریان‌های ثانویه بر نحوه توزیع تنش برشی در امتداد عرضی در محل قوس و مقطع انتقال نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش بده جریان توزیع تنش برشی در محل قوس ناهمگن‌تر می‌شود. در مقطع انتقالی با تاثیر پذیری از شکل هندسی مقطع، توزیع تنش در بده‌های کم

---

1 - Shoal
2 - Superelevation

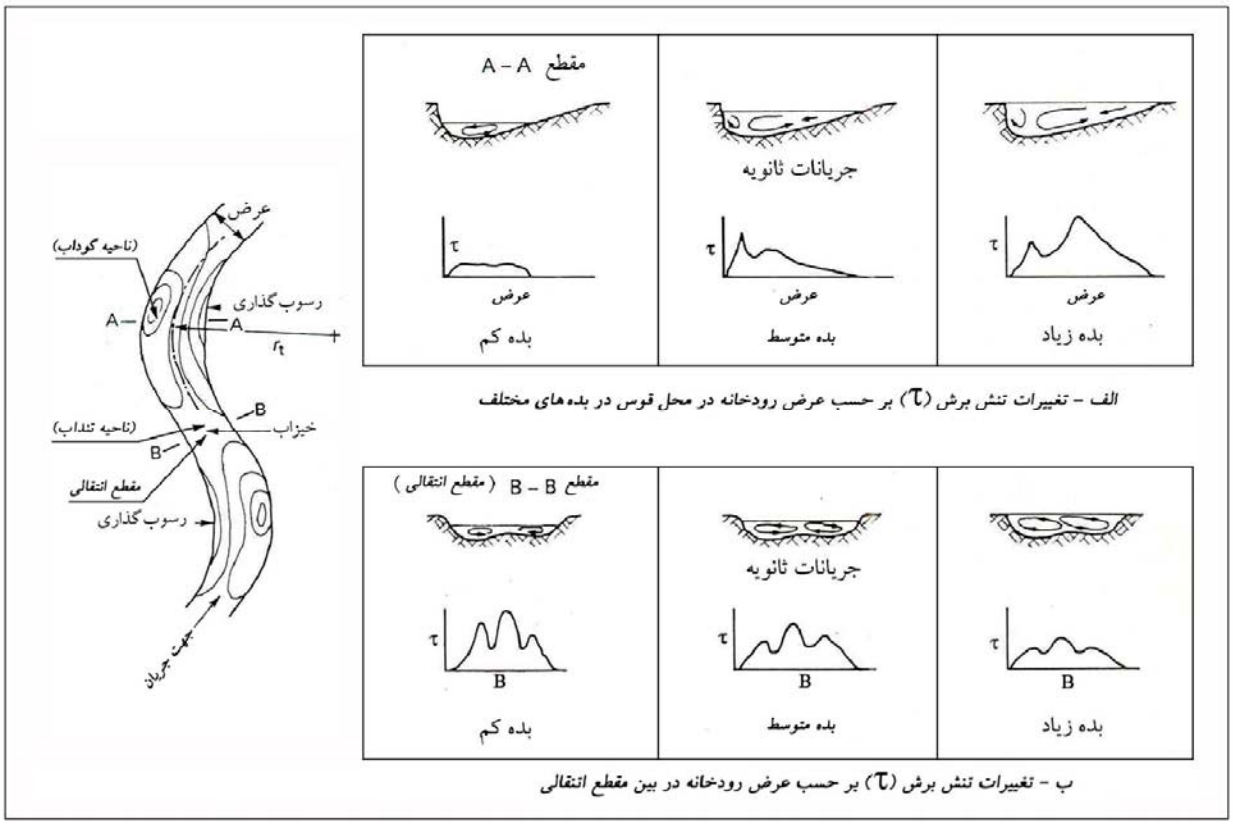
ناهمگونی بیش‌تری دارد و با افزایش بده، دامنه تغییرات آن کاهش می‌یابد. در یک مجرای پیچابی، جریان موجود به سمت کف مجرا با جریان چرخشی (ثانویه) ترکیب شده و سبب ایجاد تنش برشی بیش‌تر از حالت معمولی می‌شود. نتیجه تعامل جریان اصلی و ثانویه، فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، بیش‌ترین مقدار تنش برشی در راستای قوس خارجی رخ می‌دهد. در جریانات با بده کم، حداکثر تنش برشی در راس قوس خارجی رخ می‌دهد اما با افزایش بده جریان، محل حداکثر تنش برشی به سمت نقطه عطف پایین‌دست منتقل می‌شود[۷۶].



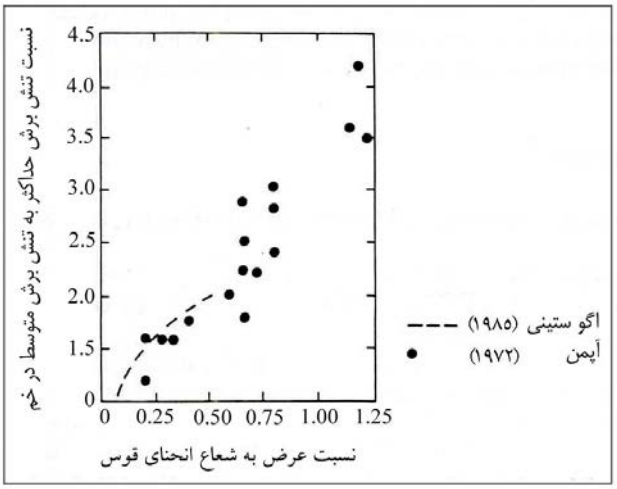
شکل ۴-۳۰- نحوه فرسایش در قوس رودخانه

در حالت کلی محل و میزان فرسایش کناره‌ها به بده جریان و جنس مصالح کف و کناره‌ها که عامل مهمی در تعیین تنش بحرانی است بستگی دارد. نسبت تنش برشی حداکثر ایجاد شده در قوس به تنش برشی متوسط جریان تابعی از شعاع نسبی (نسبت عرض به شعاع قوس)، زبری کناره‌ها و وجود قوس در بالادست قوس مورد نظر است. حداکثر تنش برشی ایجاد شده در مواردی تا ۳ برابر تنش برش متوسط جریان می‌باشد. شکل (۴-۳۲) تغییرات نسبت حداکثر تنش برشی ایجاد شده در قوس به تنش برشی متوسط را بر اساس تغییرات عکس شعاع نسبی بر اساس نتایج تحقیقات آگوستینی[1] (۱۹۸۵) و آپمن[2] (۱۹۷۲) نشان می‌دهد [۷۶].

1 - Agostini
2 - Apmann



شکل ۴-۳۱- نحوه ایجاد جریان ثانویه و توزیع تنش برشی با توجه به موقعیت مقطع و بده جریان[۷۶]



شکل ۴-۳۲- تغییرات نسبت حداکثر تنش برشی به تنش متوسط در قوس بر اساس تغییرات انحنای قوس [۷۶]

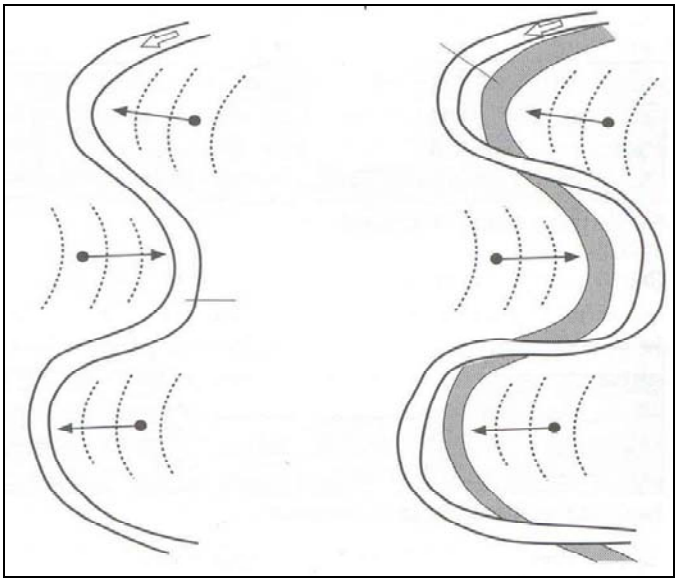
در زمینه فرسایش کناری و پیچانرودی شدن رودخانه‌ها، بررسی‌های فراوان انجام گرفته است اما هنوز عوامل این پدیده به طور کامل مشخص نشده است، ولی می‌توان دلایل پیچانرودی شدن را به صورت زیر خلاصه کرد:

- تخریب موضعی دیواره‌ها که خود به دلیل حرکت پیچشی، تنش برشی جریان، عدم مقاومت کافی دیواره‌ها در برابر تنش برشی و اشباع شدن خاک دیواره‌ها بروز می‌کند.

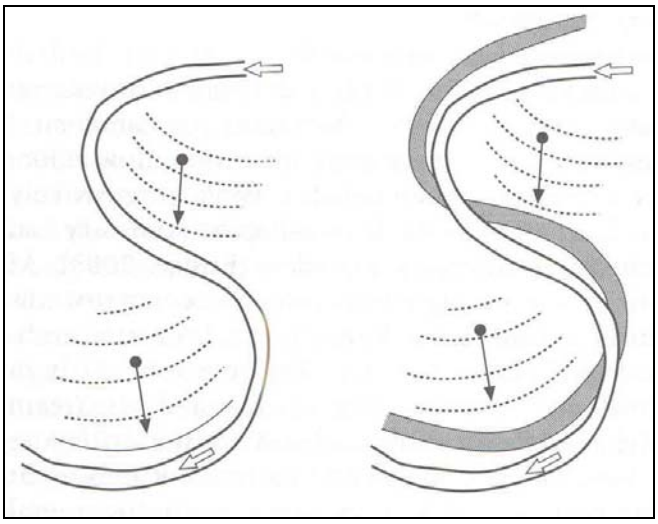
- در اثر حرکت دورانی زمین، تمایل به فرسایش جانبی در جهت شرقی – غربی و یا غربی – شرقی در برخی رودخانه‌ها ایجاد می‌شود.
- انرژی مازاد بر تداوم جریان رودخانه و اتلاف انرژی در بستر
- اثرهای متقابل تغییر در شرایط و شکل بستر رودخانه بر روی جریان آب، فرسایش و رسوب‌گذاری[۵]

با افزایش شعاع نسبی یک خم، فرسایش‌پذیری خط‌القعر افزایش می‌یابد که این امر منجر به فرسایش بیش‌تر کناره خواهد شد و درنتیجه افزایش نرخ فرسایش کناره‌ها را به دنبال خواهد داشت. مهاجرت خم زمانی که شعاع نسبی آن به ۳ می‌رسد به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در مقادیر بیش‌تر از ۳، خم در راستای یک محور فرسایش دیگر پیش می‌رود.

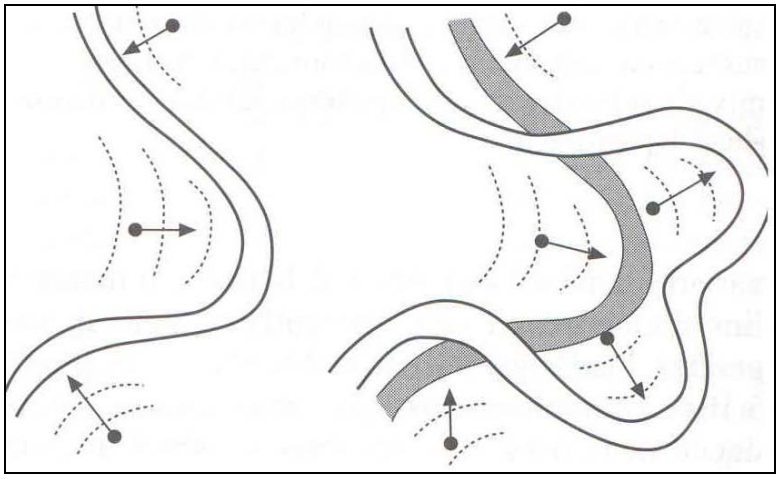
در حالت کلی در یک خم، حداکثر سرعت جریان به سمت پایین‌دست در قوس خارجی افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش ضریب پیچشی شده که به تبع آن پیچاب‌های پر پیچ و خم تولید می‌شود. در بده‌های کم، حداکثر سرعت جریان در انتهای بالادست راس قوس خارجی ایجاد می‌شود که نتیجه آن گسترش یک سویی خم خواهد بود (شکل ۴-۳۳). در بده‌های زیاد، تمرکز حداکثر سرعت جریان در پایین‌دست راس قوس، سبب انتقال خم می‌شود (شکل ۴-۳۴). تغییر شرایط حاکم بر رودخانه و الگوهای فرسایش مختلف در بده‌های مختلف سبب ترکیب حالات گسترش و انتقال قوس و ایجاد حالات چرخشی خم و توسعه پیچاب‌ها با اشکال مختلف خواهد شد (شکل ۴-۳۵). اگر در مسیر حرکت خم موانعی نظیر سنگ‌های غیر قابل فرسایش یا رسوبات چسبنده وجود داشته باشد، انتقال یا چرخش خم به طرف پایین‌دست متوقف و سبب ایجاد یک الگوی نامنظم برای پیچاب می‌شود[۴۰] (شکل ۴-۳۶).



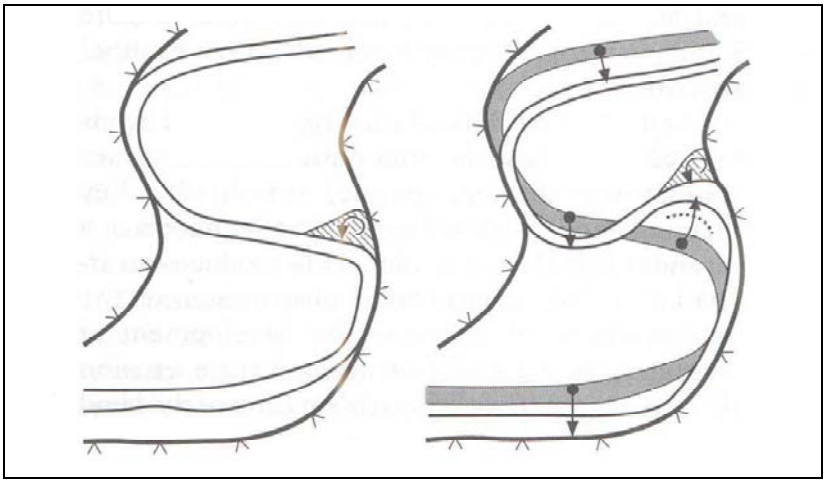
شکل ۴-۳۳- گسترش یک‌سویی خم رودخانه[۴۰]



شکل ۴-۳۴- انتقال یک‌سویی خم رودخانه[۴۰]



شکل ۴-۳۵- ترکیب گسترش و انتقال که منجر به چرخش و توسعه پیچاب شده است[۴۰]



شکل ۴-۳۶- انتقال و چرخش خم در حالی‌که کناره‌ها صلب هستند[۴۰]

به طور کلی هرگونه تغییر در حلقه خم‌های یک چم و نیز تغییر در شکل هندسی آنها، مستلزم بروز فرسایش در سواحل رودخانه است. در تمامی چم‌های رودخانه، فرآیندی پیوسته با شدت کم یا زیاد از فرسایش سواحل رودخانه در محل ساحل مقعر یا قوس خارجی خم و ته‌نشینی رسوبات در محل ساحل محدب یا قوس رودخانه به عنوان نهشته های بار نقطه‌ای وجود دارد. برآیند اثر مداوم این دو پدیده در طول زمان یا تغییر مکان پیوسته محل رئوس سواحل مقعر و محدب به سمت پایاب و یا حرکت جانبی چم‌های عمود بر محور دره را تشکیل می‌دهد. به عبارت دیگر تغییر چم‌ها دو نوع است:

- مهاجرت و پیش‌روی به سمت پایین‌دست
- توسعه چم و میانبری

حرکت واقعی چم‌ها را در طبیعت می‌توان ترکیبی از دو حالت دانست. هر یک از حرکت‌های فوق نیز ترکیبی از مولفه های تغییر در خم‌ها می‌باشد حرکت طولی خالص در چم، حاصل انتقال حلقه خم بوده و حرکت جانبی در اثر توسعه خم به‌وجود می‌آید[۱۸].

هر دو نوع این تغییرات در یک چم اغلب در مکان‌های خاص اتفاق می افتد. چم‌ها طول جریان را زیاد و شیب را کاهش می‌دهند. پدیده شکل‌گیری چم را می‌توان به عنوان مراحل عمومی تطابق رودخانه با شیب دره‌ای که در آن جریان دارد دانست. هندسه چم به واسطه فرسایش و رسوب‌گذاری شکل می‌گیرد.

تغییرات چم‌ها در جاهایی که رودخانه پیچ و خم زیادی ندارد، به صورت میانبری رخ نمی‌دهد بلکه به صورت حرکت به سمت پایین‌دست رخ می‌دهد. با توجه به این‌که این پدیده به صورت سیستماتیک رخ می‌دهد، نرخ پیشرفت به سمت پایین‌دست اصولی و منظم است. بر این اساس می‌توان حرکت متناوب[1] پیچاب را از یک کناره به سمت کناره دیگر رودخانه تعریف کرد. مدت زمان این حرکت تناوبی بستگی به دوره بازگشت سیلاب‌های رخ داده و جنس مصالح کناره‌ها دارد. لذا در بازه‌های مختلف یک رودخانه، این حرکت مدت زمان تناوبی متفاوتی می‌تواند داشته باشد اما معمولا در یک بازه، زمان تناوب ثابت است [۵۸].

۴-۴-۳- بررسی پدیده وقوع میانبرها و عوامل موثر بر آنها

طبق تعریف پدیده ای که در روند رخداد آن، جریان در یک رودخانه آبرفتی در طول پیچ وخم‌های مسیر، یک پیچ خاص را رها کرده و در طول یک آبراهه نسبتا کوتاه تر و مستقیم تر حرکت نموده و کانال جدیدی را ایجاد می‌کند و درنتیجه منجر به حذف پیچ مذکور می‌گردد میانبر نامیده می‌شود [۲۱]:

میانبرها ۲ نوع هستند:

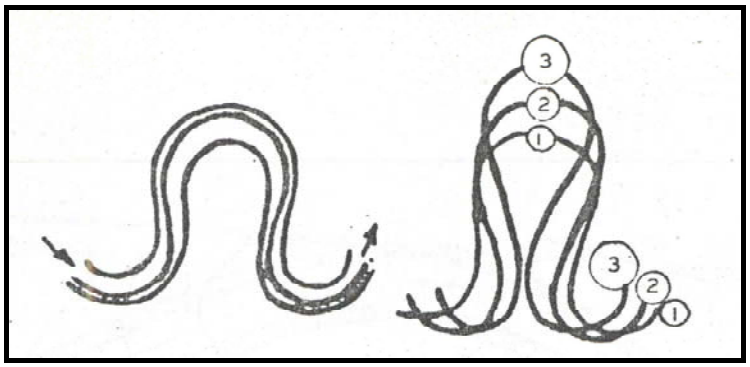
۱- میانبر گلوگاهی یا حلقه‌ای[2]

۲- میانبر شوتی [3]

میانبر گلوگاهی که عمومی‌تر است، زمانی ایجاد می‌شود که فرسایش پیش‌رونده کناره در یک قوس شدید (با زاویه تند) موجود باشد. شکل (۴-۳۷) مراحل ایجاد این میانبر را نشان می‌دهد.

---

1 - Cyclic
2 - Loop or Neck Cut-Offs
3 - Chute Cut-Offs



شکل ۴-۳۷- نحوه ایجاد و توسعه میانبر گلوگاهی [۵۸]

شعاع انحنای خم یا قوس یک رودخانه با ادامه مراحل فرسایش قوس خارجی کاهش می‌یابد و درنتیجه انحنای رودخانه زیادتر می‌شود. همزمان با این مساله، سرعت جریان کاهش و فرسایش متوقف می‌شود اما بازوهای میانبر ایجاد شده رفته رفته به یکدیگر بسیار نزدیک می‌شوند تا جایی که به یکدیگر می رسند و مسیر جریان رودخانه عوض می‌شود. مجرای جدید جریان به اندازه مجرای قدیمی افت انرژی خواهد داشت. اما با سرعت‌های نسبتا بالاتر عرض مجرای جریان افزایش می‌یابد تا این‌که تمام بده رودخانه از این مسیر عبور و مسیر قبلی به طور کلی متروکه می‌شود.

میانبر شوت به طور معمول در امتداد (یا عرض) یک چم مسطح رخ می‌دهد و احتمال رخداد آن کم‌تر از میان بر گلوگاهی است. درمورد رودخانه‌ای که در یک مسیر پرپیچ و خم در یک دشت جریان دارد (شکل ۴-۳۸)، مجاری جانبی کم عمق در نزدیکی مجرای اصلی در محل خم‌ها وجود دارند. این مجاری جانبی می‌توانند باقی‌مانده آبراهه‌های قدیمی‌باشند یا به واسطه ریزش سیلاب و سرریز کردن سیلاب از کناره‌ها به سیلابدشت ایجاد شده باشند.

در هنگام رخداد سیلاب با بده بالا، گوداب‌های عمیق و فراوانی در مجرای اصلی و در محل راس قوس ایجاد می‌شوند. همچنین در محدوده نقاط عطف چم، پشته‌های رسوبی ایجاد می‌شوند. نتیجه این فعل و انفعالات، انحراف جریان به سمت مجرای کناری (فرعی) است. با فروکش کردن سیلاب، جریان در مجرای اصلی کاهش می‌یابد در حالی‌که آب در مجرای کناری با بده زیاد در جریان است. لذا این مجاری کناری گسترش می‌یابند در حالی‌که رودخانه اصلی در حال رسوب‌گذاری به صورت پشته‌های رسوبی در محل قوس‌ها می‌باشد. در این حالت میانبر شوت کاملا شکل گرفته است.

با توجه به یکسان بودن ابتدا و انتهای مجرای اصلی و کناری، اختلاف تراز جریان در هر دو مجرا یکسان است اما طول و عمق مجرای کناری از طول و عمق مجرای اصلی کم‌تر است که نتیجه آن ایجاد سرعت‌های زیاد در مجرای کناری نسبت به مجرای اصلی است لذا در انتهای مجرای کناری یک آبشار تولید می‌شود که به توسعه میانبری کمک شایانی می‌کند.

همچنین مدت زمان سیلاب هم یک عامل مهم در توسعه میانبر شوت است. اگر مدت زمان رخداد سیلاب کوتاه باشد، فرصت کافی برای آن‌که کناره‌ها و کف فرسایش یابند وجود ندارد [۵۸].

شکل ۴-۳۸- نحوه ایجاد و توسعه میانبر شوت [۵۸]

۴-۴-۴- تاثیر پدیده‌های زمین‌لغزه و کوه ریزش[1] بر رفتار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

تاثیر فرآیندهای زمین‌شناسی در ریخت‌شناسی مسیر رودخانه یکی از بحث‌های اساسی در مباحث کلی تغییرات ریخت‌شناسی مسیر رودخانه است. یک رودخانه بر سر راه خود با انواع و اقسام پدیده‌ها و مصالح زمین‌شناسی روبرو می‌شود و در برابر هرکدام از این‌ها واکنش مشخص و معینی دارد که تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه یکی از جلوه‌های ظاهری و قابل مشاهده این واکنش‌ها است. لغزش زمین (به عبارت دیگر ناپایدار شدن شیب های موجود در مسیر رودخانه) باعث می‌شود حجم زیادی از مصالح که معمولا محدوده دانه‌بندی وسیعی نیز دارند به سمت پایین حرکت کرده و به عنوان سد طبیعی (هر چند موقتی) در مسیر رودخانه عمل کند. این پدیده می‌تواند مسیر رودخانه را تغییر داده و رژیم جریان و رسوب‌گذاری آن را عوض کند. بدیهی است که دیگر پدیده‌های زمین‌شناسی نیز از جمله گسل‌ها و حرکات زمین لرزه هم می‌توانند در جریان طبیعی رودخانه تاثیر گذاشته و مسیر قبلی آن‌را عوض کنند. مبحث اصلی در این مورد مربوط به تاثیر زمین لغزش بر مسیر رودخانه است که در مباحث مربوط به بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد. در این رابطه بررسی‌های زیر می‌تواند برای ارزیابی شرایط محدوده مطالعاتی از نظر ناپایداری‌های دامنه‌ای (همچنین پتانسیل‌های موجود) و تاثیر آن بر ریخت‌شناسی رودخانه مورد مطالعه مفید باشد:

- وضعیت کنونی شیب‌ها: احتمال ناپایداری و لغزش در توده‌های سنگی و خاکی به طور محلی یا ناحیه‌ای
- زمین لغزه‌های فعال: منشا، ریخت‌شناسی و گسترش، چگونگی پویایی کنونی و پیش‌بینی وضعیت آینده
- زمین لغزه‌های قدیمی: منشا، ریخت‌شناسی، بررسی ابعاد گسترش زمین لغزه و احتمال فعالیت دوباره آن تحت شرایط اعمال بارهای دینامیکی (زلزله)، بالا آمدن سطح ایستابی و غیره، در صورتی‌که فعالیت دوباره این نوع زمین لغزه‌ها باعث

1 – Avalanche

تغییر مسیر رودخانه شده یا سازه‌های احداثی را تحت تاثیر قرار دهند؛ استفاده از عکس‌های هوایی بامقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و۱:۲۰۰۰۰ برای شناسایی زمین لغزش‌های فعال وقدیمی موجود درمسیر رودخانه ضروری است.

۴-۵- بررسی آثار اقدامات مهندسی رودخانه و سازه‌های موجود در مسیر رودخانه بر رفتار رودخانه

۴-۵-۱- نقش اقدامات مهندسی رودخانه در تغییر رفتار رودخانه‌ها

تغییرات و جابجایی‌هایی که در اثر عوامل طبیعی یا مصنوعی در مسیر و مشخصه‌های هندسی رودخانه رخ می‌دهد، نتیجه منطقی عکس‌العمل سامانه رودخانه در جهت برقراری موازنه جدید بین فرآیند فرسایش و رسوب‌گذاری می‌باشد. از این رو انجام اقدامات ساماندهی و دخالت در نظام رودخانه‌ای مستلزم شناخت قواعد خاص حاکم بر آن بوده و قبل از انجام هر نوع اقدام مهندسی رودخانه، بررسی و پیش‌بینی عکس‌العمل رودخانه ضروری است. در این میان به خصوص تغییرات رودخانه‌ای ناشی از احداث سازه‌های آبی از اهیمت خاصی برخوردار می‌باشد. احداث سازه‌های آبی در مسیر رودخانه موجب بهم خوردن رژیم طبیعی جریان رودخانه شده و رودخانه برای انطباق و سازگاری مشخصه‌های هندسی خود با شرایط جدید با رسوب‌گذاری یا فرسایش وضعیت موجود را در جهت نیل به تعادل تغییر می‌دهد. در چنین شرایطی، عوامل مهم رودخانه از جمله شیب، تراز کف، دانه‌بندی، عرض بستر و عمق جریان ممکن است تا رسیدن به وضعیت پایدار دست‌خوش تغییرات گردد.

بدیهی است ایجاد سازه‌های رودخانه‌ای در مسیر جریان می‌تواند بده جریان، بار رسوبی و یا هر دوی آنها را تحت تاثیر قرار داده و موجبات تغییرات ریخت‌شناسی آن را فراهم نماید. به عنوان مثال مطابق آنچه که در جدول (۴-۱۵) درج گردیده است با احداث سد مخزنی پدیده رسوب‌گذاری در بازه‌های بالا دست سد قابل انتظار است. هم‌زمان در بازه‌های پایین سد، کف‌کنی از بستر راحت‌تر به وقوع می پیوندد. در جدول (۴-۱۵) دلایل ناپایداری و ایجاد تغییرات در هندسه رودخانه ناشی از انجام اقدامات ساماندهی و عوامل طبیعی درج شده است.

جدول ۴-۱۵- مواردی از تغییرات در هندسه رودخانه ناشی از اقدامات ساماندهی و عوامل طبیعی [۱و۶]

نوع تغییرات	علت ناپایداری
کف‌کنی	- کانالیزه کردن رودخانه واقدامات ساماندهی رودخانه - کاهش تراز پایه (در محل اتصال رودخانه به دریا و یا رودخانه) - لایروبی و برداشت شن و ماسه - سد مخزنی - کاهش فرسایش در سطح حوضه آبریز
رسوب‌گذاری	- بالادست مخازن - پایین دست اتصالات فرعی به رودخانه - افزایش تراز پایه - پایین‌دست انتهای بازه لایروبی شده - انحراف یک جریان پر رسوب به رودخانه - افزایش فرسایش سطحی در حوضه آبریز - افزایش تولید رسوب ناشی از کارهای ساختمانی - تخلیه رسوبات انباشته در سد مخزنی

۴-۵-۱-۱- سازه‌های عرضی

سازه‌های عرضی بسته به شکل سازه و نحوه قرارگیری در مسیر رودخانه می‌توانند موجب تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه گردند. به طور مثال سازه‌های عرضی نظیر سدهای مخزنی، انحرافی و تنظیمی می‌توانند با مسدود نمودن مسیر جریان موجب تغییرات ریخت‌شناسی نظیر تغییر شیب و همچنین تراز بستر و سطح آب جریان رودخانه در بالادست و پایین‌دست سدها گردند و بعضی از سازه‌ها نیز نظیر پل‌ها به صورت موضعی جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهند و برخی نظیر آبشکن‌ها موجب تنگ شدگی مسیر جریان رودخانه می‌شوند که در زیر به جزییات تاثیر هر یک، از دیدگاه ریخت‌شناسی پرداخته خواهد شد.

- پل‌ها

ایجاد پل در مسیر رودخانه بر الگوی جریان تاثیر گذاشته و موجب تغییر در الگوی رفتاری رودخانه و هندسه آبراه می‌گردد.

احداث پل‌ها به طور عمده موجب کاهش عرض مقطع جریان گردیده و از این رو سرعت جریان در این بازه افزایش یافته و با افزایش ظرفیت حمل رسوب، بستر رودخانه در اطراف پایه‌های پل در اثر فرسایش دچار پایین افتادگی می‌گردد. از طرفی رسوب حاصل از فرسایش به پایین‌دست منتقل گردیده و شکل‌گیری انباشته‌های رسوبی را سبب می‌گردد. تشکیل انباشته‌های رسوبی مشخصه‌های هندسی رودخانه را دچار تغییر می‌نماید. در مواردی نیز در اثر وقوع سیل برگشت آب در بالادست پل شکل می‌گیرد که این امر موجب کاهش سرعت جریان شده و انباشته شدن مواد رسوبی را در بالا دست سبب می‌گردد [۸].

- آبشکن‌ها

آبشکن‌ها سازه‌هایی هستند که عموما با هدف دور ساختن جریان از ساحل فرسایش‌پذیر رودخانه، ایجاد مسیر مناسب برای هدایت جریان، مهار سیل، فراهم آوردن شرایط لازم برای رسوب‌گذاری در امتداد کناره‌ها و تثبیت موقعیت رودخانه و بعضا تامین عمق لازم جریان برای کشتیرانی احداث می‌گردند [۱۴].

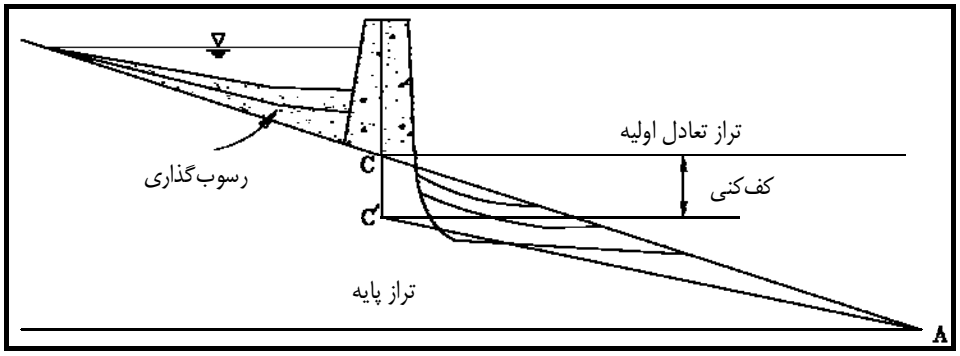
در واقع با احداث آبشکن بخشی از مواد رسوبی رودخانه تله‌اندازی شده و زمینه تثبیت کناره‌های فرسایشی را فراهم می‌نماید. از طرفی ایجاد آبشکن موجب کاهش مقطع جریان گردیده و در تعامل با جریان رودخانه، وقوع فرسایش‌های طولی و موضعی را به همراه دارد. طبق بررسی‌های پترسن میزان تنگ شدگی و کاهش مقطع طبیعی جریان توسط آبشکن‌ها از ۳۰ درصد نباید تجاوز کند [۶۳].

دلیل این امر اجتناب از تبعات نامطلوب حاصل از افزایش توان بده رسوبی مقطع تنگ شده و انتقال رسوب به بازه‌های پایین دست است که با رسوب‌گذاری مجدد موجب بر هم خوردن سامانه رودخانه می‌گردد به علاوه تشدید فرسایش در محدوده آبشکن‌ها بازه‌های بالادست را متاثر نموده و زمینه فرسایش بستر و ناپایداری کناره‌ها را فراهم می آورد.

به طور خلاصه می‌توان گفت که طراحی و احداث آبشکن‌ها باید با شناخت از وضعیت آبدهی و رسوب رودخانه و شرایط توپوگرافی آن به نحوی انجام گردد که کم‌ترین تغییرات را در وضعیت طبیعی عوامل موثر بر وضعیت هندسی رودخانه نظیر ظرفیت حمل رسوب، دانه‌بندی بستر و عمق جریان ایجاد نماید. در غیر این صورت با تغییر این عوامل، همان‌گونه که قبلا اشاره شد احتمال فرسایش و کف‌کنی در مقطع تنگ شده و رسوب‌گذاری در بازه پایین‌دست و بالا دست قابل انتظار است.

- سدهای مخزنی

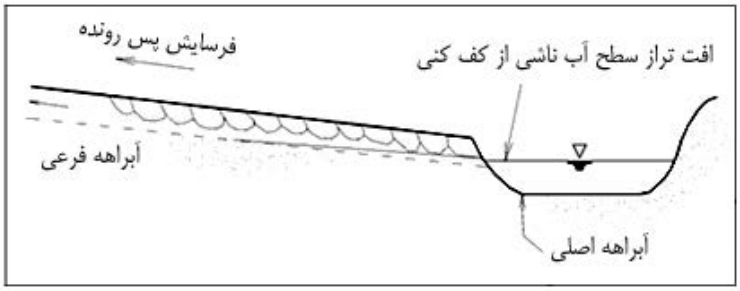
احداث سدهای مخزنی موجب تغییر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شده که این امر اثرهای زیادی بر هندسه و مشخصات ریخت‌شناسی رودخانه برجای می‌گذارد. این گونه اثرها در سه بازه بالادست، پایین‌دست و محل ایجاد سد آشکار می‌گردد. در بالادست سد مخزنی به دلیل وقوع پدیده برگشت آب، تشکیل دلتا و بالاآمدن تراز بستر مشاهده می‌شود. در مراحل اولیه احداث سد، تله‌اندازی رسوبات در مخزن موجب آن می‌گردد تا جریان آب عاری از رسوب از سد خارج گردیده و برای جبران کمبود رسوب خود و رسیدن به ظرفیت انتقال، بازه‌های پایین‌دست را فرسایش داده و افت عمومی تراز بستر رودخانه را در پایین‌دست به‌وجود آورد. در شکل (۴-۳۹) نحوه تاثیرپذیری رودخانه از فرآیند فرسایش و رسوب‌گذاری ناشی از احداث سد که منجر به افزایش تراز بستر در بالادست و کف‌کنی در پایین‌دست می‌گردد در یک دوره طولانی بهره‌برداری نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل مذکور مشخص است، بستر اولیه (خط CA) پس از احداث سد با توجه به وقوع کف‌کنی ممتد و مستمر به وضعیت تعادل جدید (خط CA) تغییر یافته است. هم‌زمان با توجه به تله‌اندازی رسوبات در مخزن سد تراز بستر افزایش یافته و به تدریج حوضه تاثیر آن به بازه‌های بالادست گسترش می‌یابد.



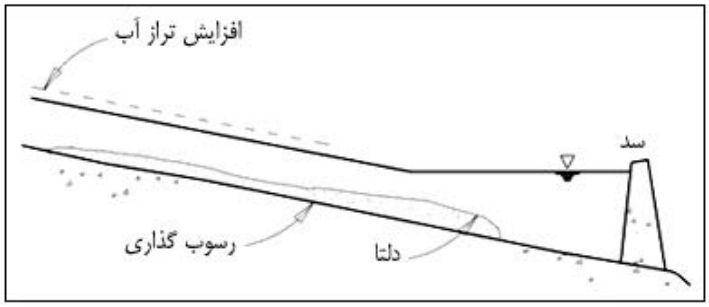
شکل ۴-۳۹ - چگونگی تغییرات در ریخت‌شناسی رودخانه در بالادست و پایین دست محل سد [۸۱]

بدیهی است تغییرات ایجاد شده در رودخانه به تدریج منجر به بروز تغییرات در دیگر شاخه‌های متصل و رودخانه‌های فرعی ورودی به آن می‌گردد. از آن‌جایی که تراز سطح آب در رودخانه اصلی برای شاخه‌های فرعی به عنوان تراز پایه محسوب می‌شود، لذا با تغییر تراز پایه ناشی از احداث سد، بالادست و پایین دست رودخانه‌های فرعی نیز دست‌خوش تغییرات می‌گردد. مطابق شکل (۴-۴۰) در اثر وقوع کف‌کنی در بازه پایین‌دست سد تراز سطح آب (تراز پایه) نیز کاهش یافته و این امر موجب می‌گردد تا شاخه فرعی دچار پدیده فرسایش پس رونده [1] گردیده و درنتیجه با پایین افتادن بستر مجرا ناپایداری و ریزش کناره‌ها نیز افزایش یافته و تعریض بستر را به دنبال دارد. از طرفی در بالادست سد همان‌گونه که در شکل (۴-۴۱) نشان داده شده است اثرهای برگشت آب و پدیده رسوب‌گذاری موجب می‌گردد تا تراز سطح آب در مسیر رودخانه متصل به دریاچه افزایش یابد. این افزایش تراز و رسوب‌گذاری علاوه بر آن‌که خصوصیات هندسی رودخانه اصلی را مطابق آنچه که در جدول (۴-۱۶) درج شده است متاثر می سازد، شاخه‌های فرعی را نیز دستخوش تغییر می‌نماید. از جمله این اثرهای رسوب‌گذاری در شاخه فرعی و بالا آمدن تراز بستر و درنتیجه تغییر مشخصه‌های هندسی آنها می‌باشد. در جدول (۴-۱۶) پیامدهای ناشی از رسوب‌گذاری در بالادست سد درج شده است.

1 - Headcut



شکل ۴-۴۰- اثرهای پایین افتادگی سطح آب (تراز پایه) رودخانه اصلی بر رودخانه فرعی



شکل ۴-۴۱- اثرهای افزایش تراز پایه در رودخانه اصلی بر روی رودخانه‌های فرعی

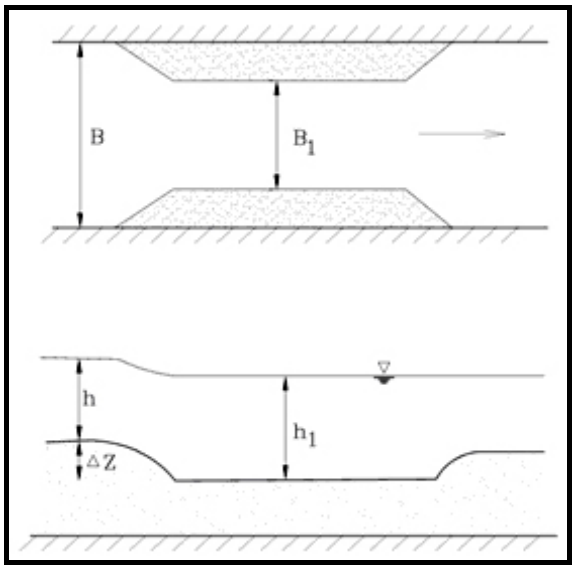
جدول ۴-۱۶- اثرهای رسوب‌گذاری و افزایش سطح آب در رودخانه اصلی و شاخه فرعی

شاخه اصلی	شاخه‌های فرعی
کم شدن ظرفیت عبور جریان	تغییر در تراز پایه برای رودخانه فرعی
تغییر در هندسه رودخانه	رسوب‌گذاری در رودخانه فرعی در نزدیکی محل اتصال به رودخانه اصلی و پیامدهای ریخت‌شناسی آن
افزایش تراز سیل	رسوب‌گذاری به دلیل وقوع پدیده برگشت آب در شاخه‌های فرعی

۴-۵-۱-۲- سازه‌های طولی

سازه‌های طولی با هدف مهار سیلاب و حفاظت دیواره‌های ساحلی رودخانه در مقابل نیروهای فرسایشی جریان احداث می‌گردند. این سازه‌ها موجب تغییر مشخصه‌های هندسی مجرا و بروز شرایط هیدرولیکی جدید شده که این امر به نوبه خود پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری و خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه را متاثر می‌نماید. عموما با احداث این سازه‌ها جریان آب در محدوده مشخصی هدایت شده و مقطع جریان نسبت به حالت طبیعی کاهش می‌یابد. این پدیده به خصوص در مواردی که سازه‌ها در حاشیه مجرای اصلی احداث می‌گردند، از نمود بیش‌تری برخوردار است. با هدایت جریان در مسیر مشخص و تنگ شدگی نسبی مقطع، ظرفیت حمل رسوب افزایش یافته و این امر موجب بروز فرسایش‌های عمومی[1] و موضعی[2] می‌گردند. منابع رسوبی حاصل از وقوع فرسایش عمومی و موضعی در محدوده سازه‌های طولی به پایین‌دست منتقل شده و با رسوب‌گذاری در بستر رودخانه سبب به هم خوردن شرایط موجود و تغییر ساختار ریخت‌شناسی آن می‌شود. از این رو لازم است اثرهای فرا بازه‌ای احداث سازه‌های طولی در تغییرات ریخت‌شناسی پیش‌بینی و تمهیدات جهت کنترل آن در نظر گرفته شود [۵ و ۸].

1 - General Scour
2 - Local Scour



شکل ۴-۴۲ - الگوی فرسایش عمومی در تنگ شدگی ممتد ناشی از احداث سازه‌های طولی [۶۵]

۴-۵-۲- تاثیر برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه

برداشت غیر اصولی از بستر و حریم رودخانه‌ها موجب تغییر مقطع عرضی جریان شده و در صورت عدم رعایت معیارهای فنی (مانند رعایت حداقل فاصله گودال برداشت در سیلابدشت از کناره) انحراف جریان رودخانه در مواقع سیلابی به داخل گودال‌های برداشت و در نتیجه تغییر مسیر رودخانه و دگرگونی شرایط ریخت‌شناسی آن را به همراه دارد. در این رابطه در راهنمای برداشت مصالح رودخانه‌ای (نشریه شماره ۳۳۶ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور) توضیحات بیش‌تری ارائه شده است.

۴-۵-۳- تاثیر تجاوز به حریم رودخانه و توسعه زمین‌های کشاورزی

دست اندازی و استفاده‌های نامناسب از حریم رودخانه‌ها که باعث تغییراتی بر مقطع و هندسه رودخانه می‌شود به شکل‌های زیر انجام می‌گیرد:

- توسعه کشاورزی در حریم و حتی بستر رودخانه
- تغییر کاربری حریم رودخانه و استفاده از آن به عنوان جاده دسترسی، مجرای عبور فاضلاب و غیره
- ساخت و ساز در حریم رودخانه
- محدود شدن مجرای جریان به دلیل خاکریزی ناشی از گسترش اراضی حاشیه برای اهداف کشاورزی و ساخت و ساز

مهم‌ترین تاثیر محسوس توسعه زمین‌های کشاورزی و یا ساخت و ساز در حریم رودخانه‌ها، محدود کردن مجرای جریان است که به طور عمده سبب افزایش عمق و یا سرعت جریان می‌شود. این مساله باعث تسریع در آب گرفتگی زمین‌های مجاور و افزایش پدیده آبشستگی بستر و کناره‌ها و تغییر رژیم رسوبی و ابعاد مقطع و جابجایی عرضی خواهد شد.

همچنین انجام عملیات کشاورزی در حریم و بستر رودخانه، موجب می گردد تا زه‌آب‌های ناشی از آبیاری اراضی، به صورت سطحی و زیرزمینی، زمینه فرسایش بستر و کناره‌ها و در نتیجه جابجایی آن را فراهم نماید. زه‌آب‌های سطحی که غالبا به سمت رودخانه‌ها جاری می شوند، فرسایش شیاری و خندقی در اراضی اطراف رودخانه و فرسایش توده‌ای در کناره‌ها را به دنبال دارد.

۴-۶- پیش‌بینی روند تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه در آینده

رودخانه‌ها تحت تاثیر عوامل و متغیرهای مختلف از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در تغییر هستند. این تغییرات دارای بعد زمانی و مکانی بوده و متاثر از بده جریان و رسوب، مشخصات رسوب ورودی به سامانه، دانه‌بندی مصالح بستر (کف وکناره‌ها)، پوشش گیاهی کناره‌ها و دخالت‌های انسانی می‌باشد. تغییر پذیری در رودخانه‌ها در دراز مدت ممکن است تدریجی و پیوسته بوده و در کوتاه مدت یا تحت شرایط خاص ناپیوسته و ناگهانی باشد.

پیش‌بینی روند تغییرات در آینده، منوط به شناخت رفتار و ریخت‌شناسی فعلی رودخانه و بررسی تغییرات گذشته بوده و مطالعه روند تغییرات سامانه رودخانه در گذشته می‌تواند راهنمای خوبی در پیش‌بینی روند تغییرات آتی باشد.

درکل بررسی روند تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها به منظور رسیدن به یک شناخت روشن از موارد زیر می‌باشد [۷۳]:

۱- عامل(یا عوامل) ایجاد تغییرات چیست؟

۲- پاسخ سامانه رودخانه نسبت به عامل (یا عوامل) مزبور چگونه بوده است؟

۳- نتیجه پاسخ رودخانه به عامل (یا عوامل) ایجاد تغییرات چیست؟

۴- در صورت نامطلوب بودن تغییرات، چگونه می‌توان مشکلات احتمالی ناشی از تغییرات مزبور را حل کرد؟

۵- چگونه می‌توان از بروز مجدد مشکلات مزبور در آینده جلوگیری نمود؟

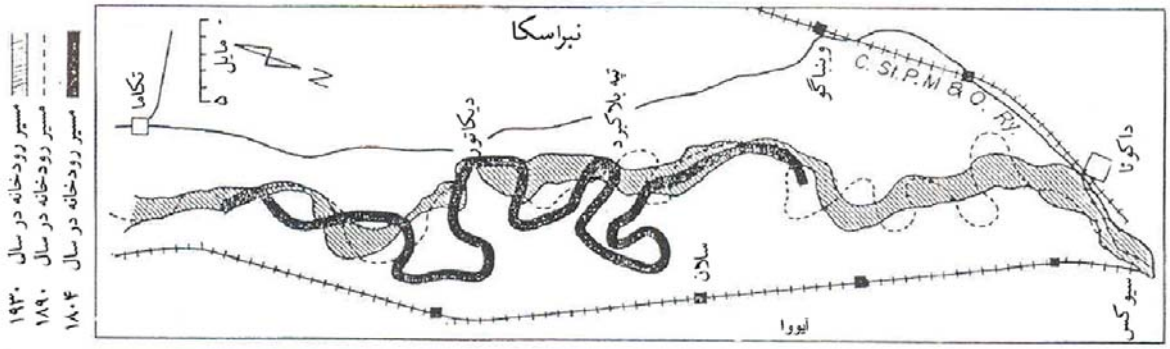
۴-۶-۱- پیش‌بینی محدوده جابجایی عرضی (کمربند جابجایی)

از جمله عوامل طبیعی موثر در فرسایش رودخانه‌ها رشد پیچانرودها می‌باشد که در زمره فرسایش موضعی قرار دارد. این‌گونه فرسایش که حاصل وقوع جریان پیچشی یا حلزونی[1] در چم رودخانه است، یکی از مهم‌ترین عوامل در تغییر شکل بلند مدت رودخانه‌های پیچانرودی شناخته می‌شود. جابجایی‌های عرضی، تغییر پلان مسطحه و نیمرخ طولی رودخانه در طی سال‌های متمادی حاصل فرسایش موضعی در پیچانرودها می‌باشد. در شکل (۴-۴۳) نمونه‌ای از جابجایی‌های عرضی و تغییر شکل رودخانه میسوری[2] در بین سال‌های ۱۸۰۴ تا ۱۹۳۰ نشان داده شده است [۸۳ و۸].

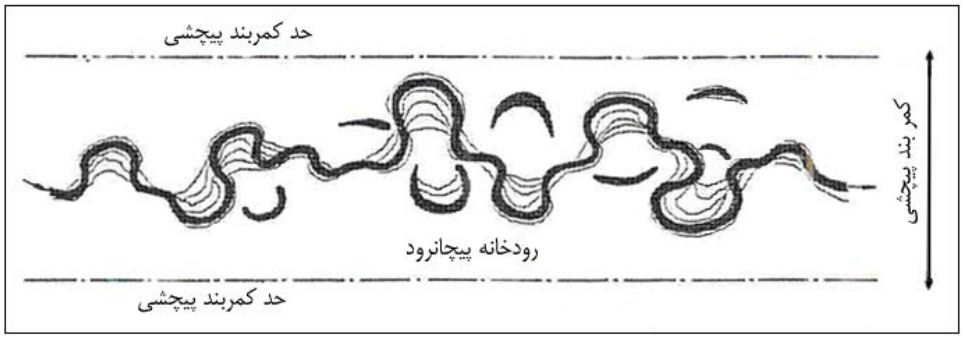
رودخانه‌های پیچانرودی نظیر شکل (۴-۴۴) در یک محدوده عرضی مشخصی جابجا می‌شوند. این محدوده کمربند پیچشی[3] نامیده می‌شود. در شکل (۴-۴۴) موقعیت کمربند پیچشی نشان داده شده است [۱۳و۴۷]. به علاوه در چنین رودخانه‌هایی عرض بستر تقریبا ثابت بوده، لیکن به علت فرسایش مستمر موضعی در چم رودخانه، در یک محدوده عرضی مشخصی به طور دایم جابجا می‌شود. در بعضی رودخانه‌ها فرسایش به صورت تعریض بستر نمایان می‌گردد. این‌گونه فرسایش در رودخانه‌های شریانی عمومیت دارد. به علاوه در رودخانه‌های مستقیم نیز فرسایش متوجه کناره‌ها بوده و همراه با تعریض بستر می‌باشد. در این نوع رودخانه‌ها حد نهایی تعریض بستر را اصطلاحا کمربند فرسایشی گویند [۱۳و۴۷]. در شکل (۴-۴۵) موقعیت کمربند فرسایشی نشان داده شده است.

1- Spiral Flow
2- Missouri River
3- Meandering Belt

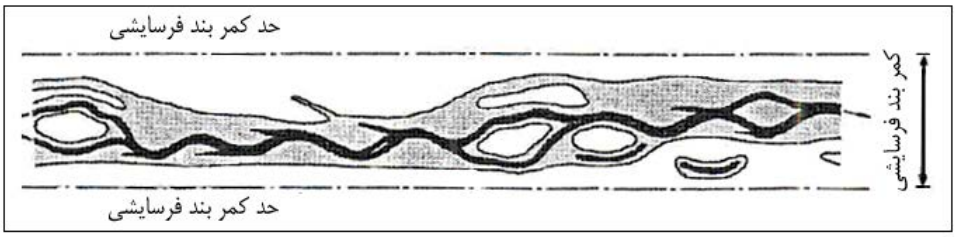
از دیدگاه مهندسی، مشخص کردن پهنای کمربند پیچشی که بیانگر محدوده جابجایی عرضی رودخانه در طی زمان می‌باشد و همچنین موقعیت کمربند فرسایشی دارای اهمیت زیادی است. چنین پدیده‌ای ضمن مشخص کردن نقش فرآیند فرسایش در رفتارشناسی رودخانه‌ها، تاثیرپذیری اقدامات ساماندهی را از الگوهای مختلف فرسایش آشکار می‌نماید. با استفاده از عکس‌های هوایی تهیه شده در دوره‌های زمانی مختلف و همچنین انجام بررسی‌های زمین‌شناسی و بازدیدهای میدانی محدوده کمربند پیچانرودی و فرسایش را می‌توان مشخص نمود.



شکل ۴-۴۳- جابجایی عرضی و موقعیت مسیر رودخانه میسوری در دوره‌های زمانی مختلف [۸۳و۸]



شکل ۴-۴۴- موقعیت کمربند پیچشی در یک رودخانه پیچانرودی[۴۷]



شکل ۴- ۴۵- موقعیت کمربند فرسایشی در رودخانه‌های شریانی و مستقیم [۴۷]

۴-۶-۲- پیش‌بینی تغییرات نیمرخ طولی و میزان کاهش یا افزایش تراز بستر

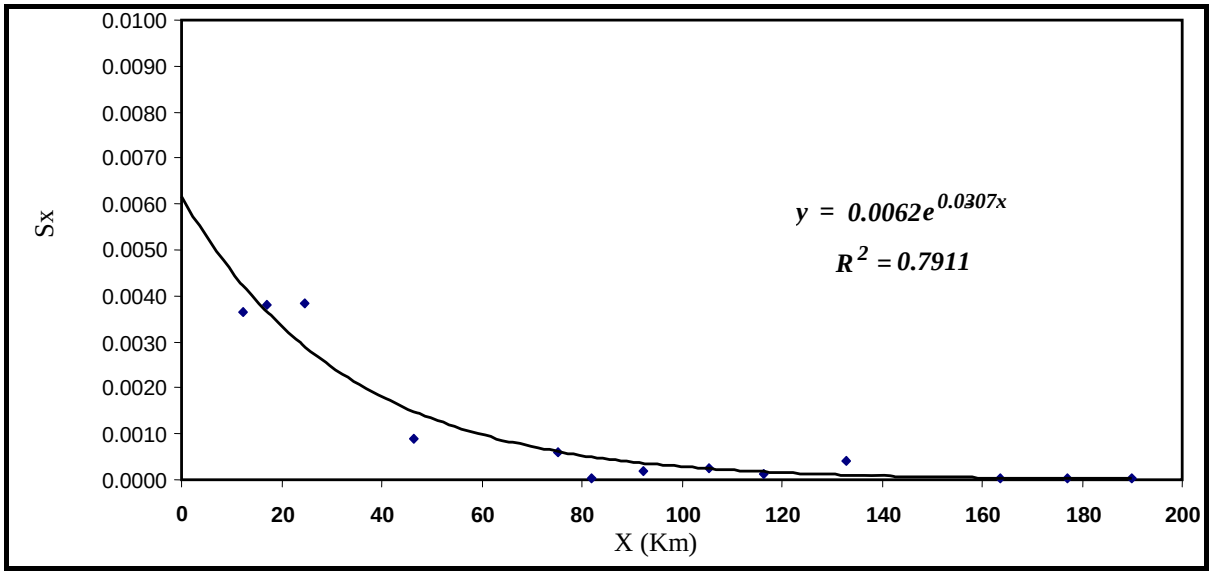
شیب رودخانه، ابتدا به وسیله شرایط و مشخصه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی حوضه آبریز کنترل و سپس به آهستگی در اثر پدیده فرسایش و تخریب تغییر پیدا می‌کند تا درنهایت به اندازه‌ای برسد که شیب، مجموع اثرهای جریان آب و اثرهای توپوگرافی و

زمین‌شناسی باشد. تاثیر جریان ممکن است بعد از مدتی زایل و شیب صرفا تحت تاثیر شرایط رودخانه‌ای[1] شکل‌گیرد. در حالت کلی شیب بستر رودخانه از بالادست به طرف پایین‌دست کاهش می‌یابد، لذا نیمرخ طولی کف رودخانه‌ها در یک بازه، به صورت یک قوس مقعر نمایان می‌شود. همان‌گونه که قبلا اشاره شد، شولیتز[2] رابطه زیر را برای تغییرات شیب در طول مسیر پیشنهاد نموده است[۵]:

$$S_x = S_0 e^{-\alpha x} \qquad (۳۱-۴)$$

که در این رابطه S_x: شیب در مقطعی به فاصله x از مبدا، S_0: شیب در مبدا و α ضریب تغییر شیب می‌باشد.

در شکل (۴-۴۶) روند تغییرات شیب طولی قسمتی از رودخانه دز، از محل سد دز تا محل اتصال به رودخانه کارون نشان داده شده است. با توجه به شکل مزبور، شیب مبنا (S_0) برابر ۰/۰۰۶۲ بوده و رودخانه در بازه مزبور دارای ضریب تغییر شیب (α) برابر با ۰/۰۳۰۷ می‌باشد.

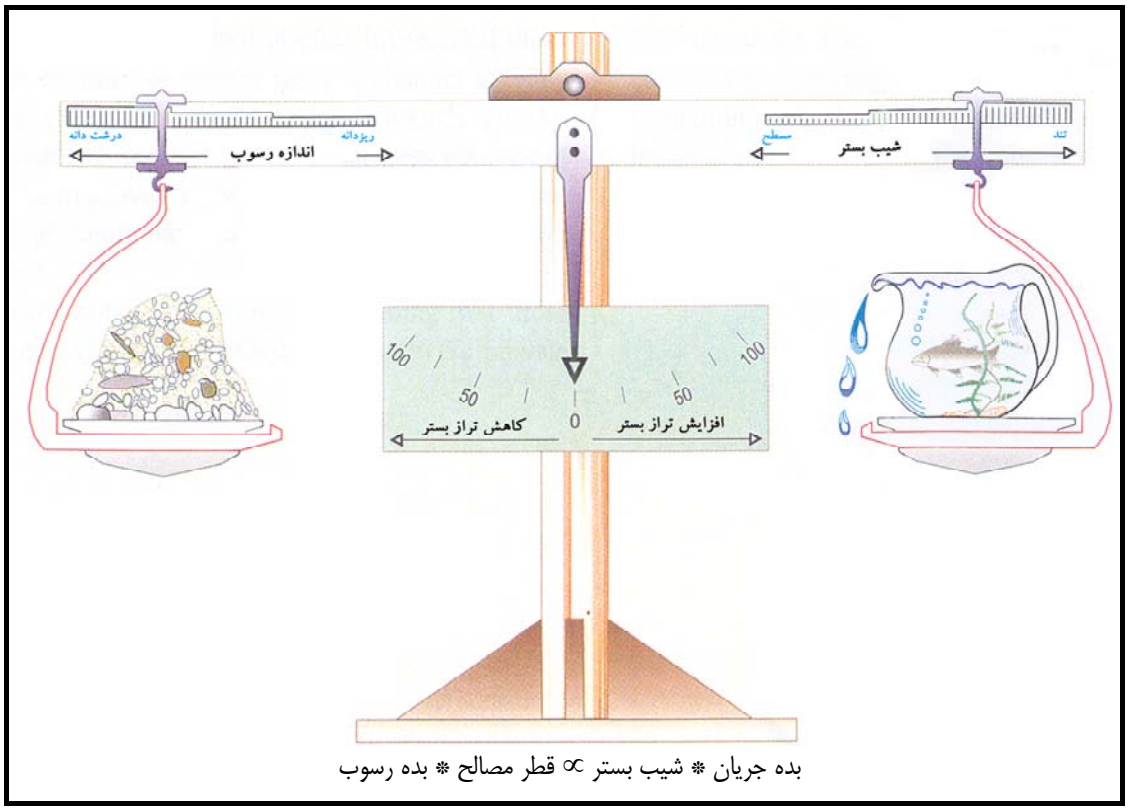


شکل ۴-۴۶- روند تغییرات شیب طولی بستر در قسمتی از رودخانه دز

[مطالعات بیلان رسوب رودخانه‌های دز و کارون – در حال انجام- مهندسین مشاور سازه پردازی ایران]

یک رودخانه تحت تاثیر رژیم بده – رسوب و هندسه هیدرولیکی آن ممکن است در بازه‌های مختلف در حالت کف‌کنی (کاهش تراز بستر) و یا رسوب‌گذاری (افزایش تراز بستر) باشد. شکل (۴-۴۷) به صورت شماتیک تاثیرپذیری شیب بستر (تغییر نیمرخ طولی و وقوع فرسایش و رسوب‌گذاری) از بده جریان، قطر مصالح و بده رسوب را براساس تحلیل کیفی لین نشان می‌دهد [۷۲].

1 - Fluvial Conditions
2 - Shulitz



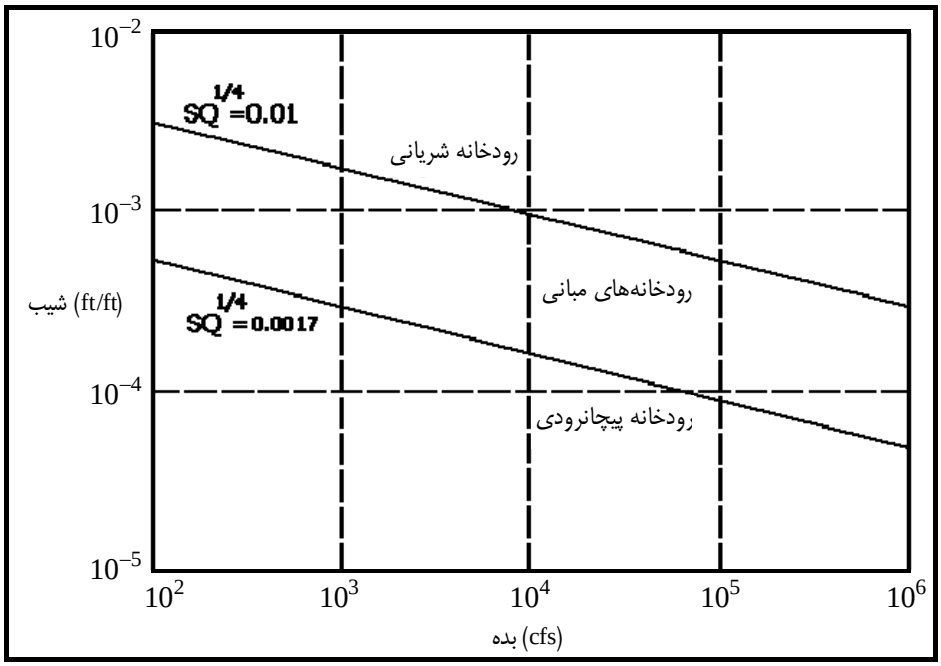
شکل ۴-۴۷- شکل شماتیک رابطه کیفی لین بین متغیرهای اصلی جریان و رسوب در رودخانه[۷۳]

یک بازه در شرایط کف‌کنی به طور مستمر نسبت به زمان در حال تعمیق بوده و موقعیت آن در جهت بالادست یا پایین‌دست در حال انتقال می‌باشد. این شرایط در اثر تغییر در سطح مبنای رودخانه، به واسطه نوسانات سطح آب در محل خروجی نهایی آنها یا در اثر احداث سد مخزنی یا تعمیق و لایروبی نیز پدید می‌آید. همچنین تغییر در رژیم بده و رسوب نیز عامل دیگری خواهد بود؛ به طوری‌که در پایین دست سد مخزنی، کاهش بار رسوبی سبب افزایش پتانسیل حمل و انتقال شده و عمل فرسایش و کف‌کنی را سبب می‌شود.

شاخه‌های فرعی ورودی به رودخانه نیز تاثیر متقابلی خواهند داشت به طوری‌که اگر ذرات بار رسوبی آنها از ذرات بار کف رودخانه اصلی ریزتر باشد، سبب افزایش بار کف و کف‌کنی در قسمت‌هایی از رودخانه و کاهش شیب آن در پایین‌دست می‌گردد. بالعکس در صورتی‌که بار رسوبی شاخه فرعی درشت تر از بار کف رودخانه اصلی باشد، باعث ته نشست مواد و افزایش شیب خواهد شد.

بررسی‌های صورت گرفته توسط محققین مختلف نشان می‌دهد که شیب بستر رودخانه از عوامل بسیار مهم در تغییر شکل مسطحه رودخانه می‌باشد. برای یک بده معین، با فرض ثابت بودن سایر عوامل، شکل مسطحه رودخانه به وسیله شیب تعیین می‌شود. در شیب بسیار کم، مقطع عمیق و باریک، همراه با سرعت جریان بسیار کم با خط‌القعر مستقیم ظاهر می‌شود. افزایش مقدار شیب، سبب پدیدار شدن جریان‌های مارپیچی می‌شود که عاملی برای ایجاد خط‌القعر سینوسی در امتداد مسیر مستقیم موجود می‌باشد. مرحله‌ای وجود دارد که با افزایش بیش‌تر شیب، مسیر مستقیم به سمت مسیر پیچانرودی و اگر باز هم شیب تندتر شود، در صورت وجود کناره‌های فرسایش‌پذیر الگوی پیچانرودی به الگوی شریانی میل می‌کند. در صورتی‌که کناره‌ها فرسایش‌پذیر نباشد، به جای ترکیب شریانی، رودخانه شکل مستقیم به خود می‌گیرد.

از آن‌جایی که فرسایش بستر موجب کاهش شیب رودخانه می‌گردد، لذا با آغاز روند فرسایشی ممکن است رودخانه‌های شریانی یا مستقیم به تدریج حالت پیچانرودی به خود بگیرند. لین با بررسی‌هایی که برروی تعداد زیادی از رودخانه‌ها انجام داد، تغییر نوع رودخانه را نسبت به شیب بستر (S) و آبدهی متوسط سالانه (Q) مطابق شکل (۴-۴۸) بیان نمود [۳ و ۱۳]. مطابق شکل یادشده چنانچه برای یک رودخانه از نوع مستقیم که دارای آبدهی متوسط $Q=10^4$ CfS و شیب S=0.001 می‌باشد؛ در اثر فرسایش بستر شیب آن تا حد S=0.00175 کاهش پیدا نماید، رودخانه حالت پیچانرودی به‌خود گرفته و این امر با تشدید حالت ناپایداری موجب فرسایش کناره‌ها و وقوع پدیده جابجایی عرضی در مسیر رودخانه می‌گردد.



شکل ۴-۴۸- رابطه تغییرشکل مسطحه رودخانه برحسب بده متوسط سالانه و شیب بستر [۵۲]

۴-۶-۳- پیش‌بینی روند تغییر شکل چم‌ها

در رودخانه‌های پیچانرودی در حالت کلی، مشخصات جریان تحت تاثیر شرایط توپوگرافی در مقاطع بالادست، داخل و پایین‌دست خم، مشخصات جریان در مقاطع بالادست و پایین‌دست خم، مشخصات هندسی خم شامل شعاع انحنا، عرض و زاویه خم و مشخصات رسوب بستر و نیز بار رسوبی ورودی به سامانه می‌باشد.

برای چندین دهه، محققین و مهندسین توزیع سرعت و تنش برشی در خم رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده اند؛ چرا که این دو پدیده، تاثیر غالب و مهمی روی جابجایی و تغییر شکل چم رودخانه‌ها دارند. رودی[1] در سال ۱۹۸۴ جریان ثانویه و گرادیان طولی فشار کل را به عنوان دو عامل اصلی در نحوه توزیع سرعت و تنش برشی بستر بازه‌های پیچانرودی رودخانه‌ها عنوان کرده است[۷۴].

1 - Rodi

جریان‌های ثانویه به واسطه خاصیت پیچشی جریان در داخل مقاطع عرضی، باعث انتقال جانبی اندازه حرکت طولی جریان و به عبارت دیگر انتقال جریان پر سرعت به سمت ساحل کناری و در نتیجه افزایش تنش برشی اعمالی از طرف جریان به کف و کناره‌های رودخانه می‌شود. گرادیان فشار ناشی از تغییر تراز سطح آب در امتداد جداره‌های داخلی و خارجی، می‌تواند منجر به انتقال جریان پر سرعت به طرف کناره‌های داخلی و یا خارجی شود. به طوری‌که در ورودی بازه‌های پیچانرودی به واسطه کاهش تراز سطح آب در امتداد کناره داخلی و در مقابل، افزایش عمق جریان در امتداد کناره خارجی، سرعت جریان در امتداد کناره داخلی افزایش می‌یابد و اندازه حرکت طولی جریان به سمت کناره داخلی قوس منتقل می‌شود. در خروجی بازه‌های پیچانرودی، عکس حالت فوق رخ داده و کاهش عمق جریان در امتداد کناره بیرونی منجر به ایجاد گرادیان منفی فشار در جهت طولی رودخانه و افزایش سرعت می‌شود [۷۴].

لازم به ذکر است که اندرکنش عوامل مذکور (جریان ثانویه و گرادیان فشار)، عوامل هندسی چم و مشخصات جریان و رسوب منجر به اعمال تنش‌های برشی با توزیع های متفاوت به بستر و کناره‌های رودخانه شده و درنتیجه باعث ایجاد تغییرات در شکل چم‌ها به صورت‌های مختلف می‌شود که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود. انحنای نسبی (نسبت شعاع انحنا به عرض رودخانه) یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین توزیع تنش برشی در قوس‌ها می‌باشد. برای یک قوس با انحنای نسبی بیش‌تر از ۳/۵، توزیع تنش برشی تقریبا در ناحیه ورودی خم یکنواخت می‌باشد و یک ناحیه تنش برشی قوی درنزدیکی انتهای قوس خارجی اتفاق می افتد. با کاهش مقدار انحنای نسبی خم از مقدار ۳/۵، در منطقه تنش برشی قوی در قسمت انتهایی قوس خارجی و در قسمت ابتدای قوس داخلی اتفاق می افتد. زمانی که مقدار انحنای نسبی قوس تا حد ۱/۵ کاهش می‌یابد، یک ناحیه تنش برشی خیلی قوی در تمام قسمت داخلی قوس به وقوع می پیوندد. شکل (۴-۴۹) روند تغییرات تنش برشی حداکثر در طول قوس با شعاع انحناهای مختلف را نشان می‌دهد.

برایس[1] در سال ۱۹۸۲ انواع تغییرات شکل پلان خم رودخانه‌ها را به صورت شکل (۴-۵۰) دسته بندی نموده است[۳۰]. با توجه به این شکل، الگوهای مختلف تغییر شکل پلان خم رودخانه به صورت زیر می‌باشد:

۱- گسترش[2]: در این وضعیت، حرکت خم رودخانه به طور عمده در جهت جانبی می‌باشد. این حالت برای خم‌های با شعاع انحنای نسبی بزرگ‌تر از ۳/۵ اتفاق می افتد (شکل ۴-۵۰).

۲- انتقال: در این حالت خم رودخانه بدون تغییر شکل به سمت پایین‌دست حرکت می‌نماید. حالت انتقال خم معمولا به ندرت اتفاق می‌افتد مگر در مواقعی که خم در یک دشت سیلابی باریک قرار گرفته باشد و یا توسط خاکریزهای طولی محدود شده باشد(شکل ۴-۵۰).

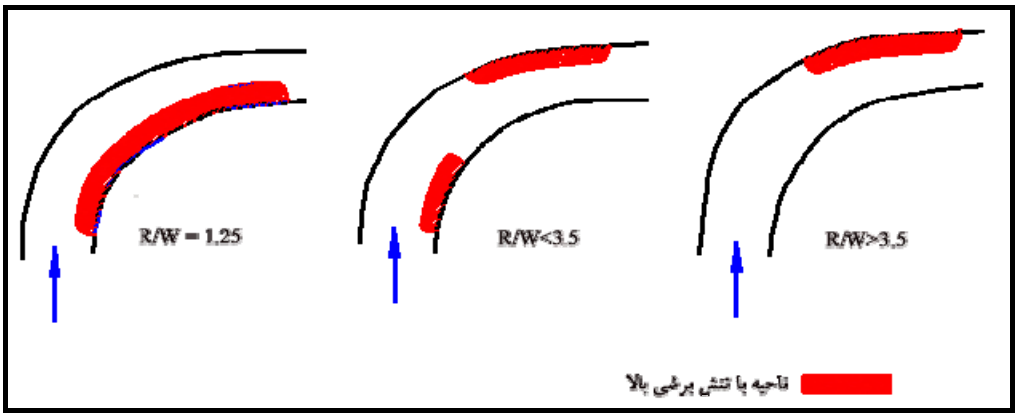
۳- چرخش: در این حالت خم رودخانه به سمت پایین‌دست چرخش پیدا می‌کند. حالت چرخش، غالب‌ترین شکل تغییر شکل خم‌ها می‌باشد. جابجایی یک خم معمولا در این حالت صورت می‌گیرد و این به دلیل فرسایش ناشی از تمرکز زیاد تنش برشی قوی در انتهای قوس خارجی و همچنین تنش برشی نسبتا قوی در ابتدای قوس داخلی خم می‌باشد. این نوع تغییر شکل معمولا برای انحنای نسبی کم‌تر از ۳/۵ صورت می‌گیرد (شکل ۴-۵۰).

---

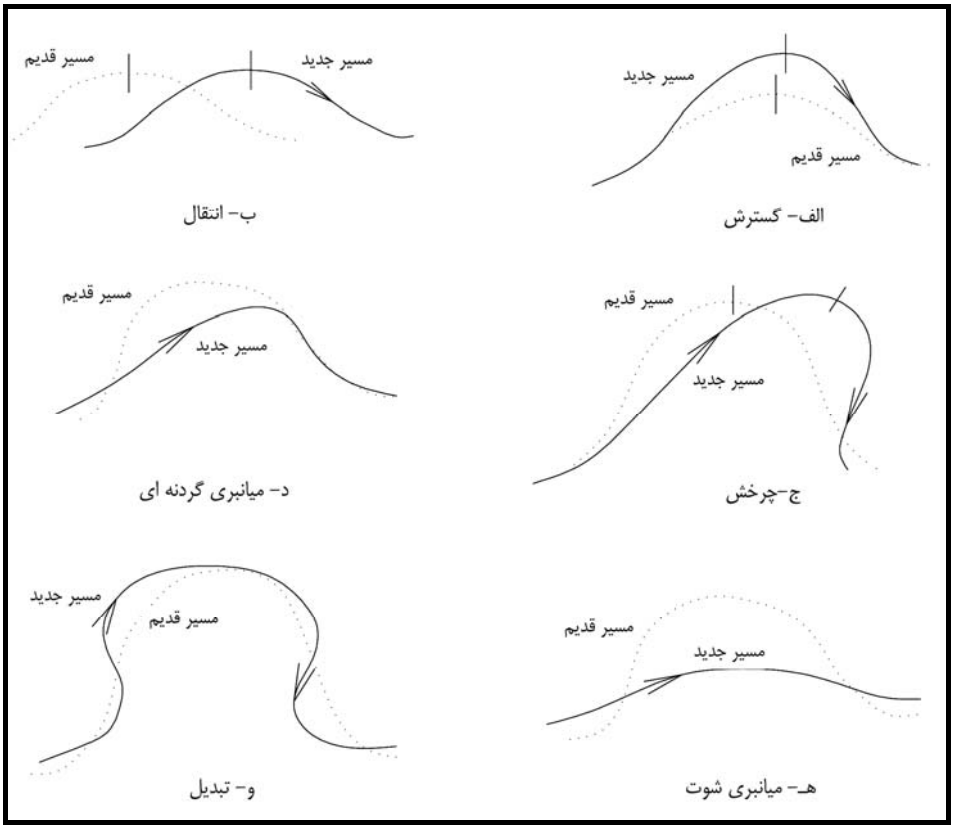
1 - Brice
2 - Extension

۴- میانبر: زمانی که انحنا نسبی یک خم به کم‌تر از ۱/۵ برسد، یک ناحیه تنش برشی قوی در اطراف قوس داخلی خم اتفاق می افتد. در این حالت پدیده میانبری توسط شوت صورت می‌گیرد (شکل ۴-۵۰).

۵- تبدیل[1]: شکل خم رودخانه به خم مرکب تبدیل شده و به طور کلی شکل مسطحه بازه تغییر می‌کند(شکل ۵-۵۰).



شکل ۴-۴۹- نواحی با تنش برشی بالا در خم رودخانه با شعاع انحناهای مختلف [۳۰].



شکل ۴-۵۰- الگوهای مختلف تغییر پلان مسطحه خم رودخانه [۳۰].

1 –Conversion

۴-۷- تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

در این مرحله از مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه، استفاده از نتایج و اطلاعات به دست آمده در بخش‌های قبلی نقش بسزایی را در ارائه نقشه‌های ریخت‌شناسی رودخانه در زمان گذشته، حال و آینده ایفا می‌نماید.

۴-۷-۱- تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی در زمان گذشته و حال

ریخت‌شناسی یا رفتارشناسی رودخانه، مبتنی بر تحلیل عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای سال‌های مختلف در بازه‌های مورد مطالعه می‌باشد. از جمله نکاتی که در این بخش از مطالعات باید به آن اشاره شود، این است که تفاوت در کیفیت، مقیاس و زمان تهیه عکس‌ها و تصاویر ممکن است مشکلات متعددی را به‌وجود آورد. به عبارت دیگر ممکن است عکس‌های تهیه شده مربوط به دوره‌های پرآبی و یا کم آبی و یا از نظر مقیاس با یکدیگر متفاوت باشد. همچنین به دلیل حرکات زمین و ماهواره در هنگام تصویربرداری، خطاهایی برروی تصاویر پدید می‌آید که قبل از برطرف کردن آنها، تصویر ماهواره‌ای با نقشه‌های همسان مطابقت کامل ندارد و از این رو در برخی مطالعات مشکلاتی بروز می‌کند. عدم توجه به این مسایل، در دقت تحلیل و تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی تاثیر بسزایی خواهد داشت. بنابراین قبل از بررسی و تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی رودخانه، مراحل زیر انجام می‌گیرد [۵۳]:

۱- نگاشت یا تبدیل عکس‌های هوایی به یک مقیاس مشترک

۲- تهیه تصویر مسیر رودخانه با استفاده از همپوشانی و یکپارچه سازی عکس‌های هوایی (فتوموزاییک سازی)

۳- مشخص نمودن آدرس مختصات زمینی عارضه‌های همسان موجود در تصویر و دنیای واقعی. به عبارت دیگر انطباق سامانه مختصات تصویر با یکی از سامانه‌های مختصات بین المللی، نظیر طول و عرض جغرافیایی یا سامانه متریک UTM[1] در این صورت تصویر تصحیح شده در واقع با نقشه‌های نظیر انطباق می‌یابد و به عبارت دیگر هر نقطه از تصویر، مختصات جغرافیایی نقطه نظیر خود را در دنیای واقعی و بر روی نقشه‌های تهیه شده از آن خواهد داشت.

۴- رقومی نمودن شکل کلی مشخصات رودخانه

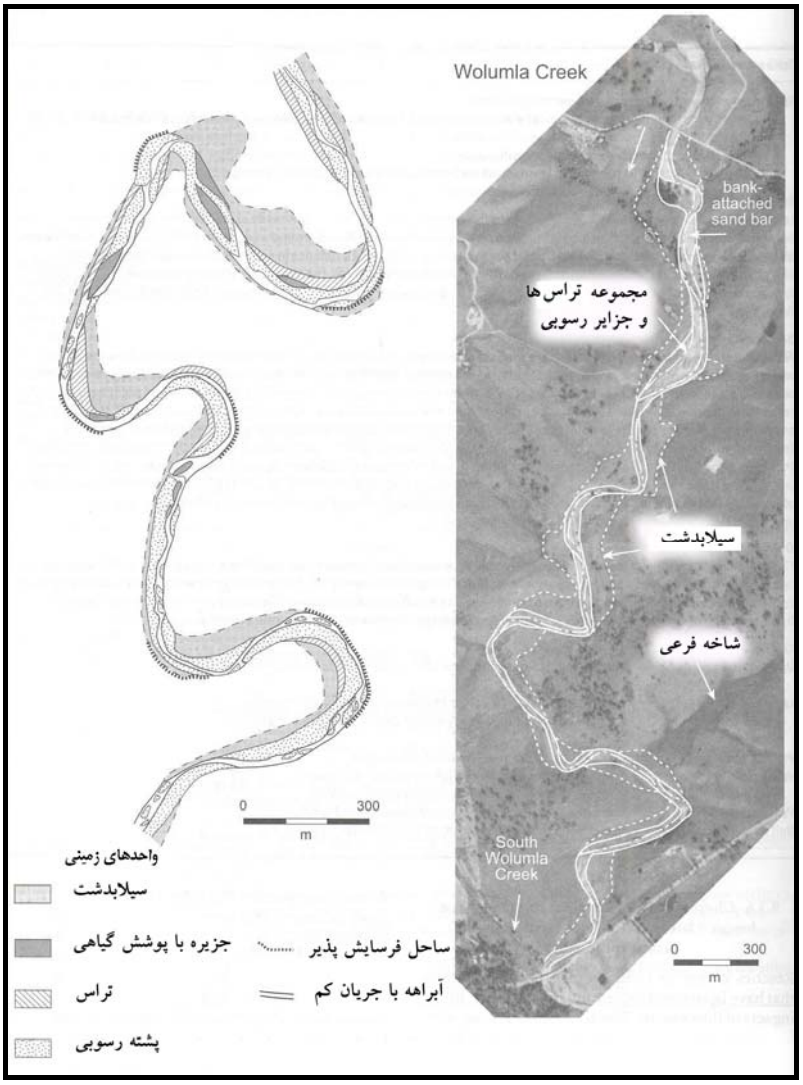
۵- ذخیره‌سازی اطلاعات به فرمت قابل انتقال در محیط نرم افزارهای مورد استفاده در تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی (اتوکد و سامانه اطلاعات جغرافیایی)

به منظور تبدیل عکس‌های هوایی به یک مقیاس مشترک از چندین نقطه مشترک موجود در عکس‌ها استفاده می‌شود. به طور معمول نقاط مشترک را می‌توان محل تلاقی جاده‌ها و یا محل پل‌ها برروی رودخانه‌ها و جاده‌ها منظور نمود.

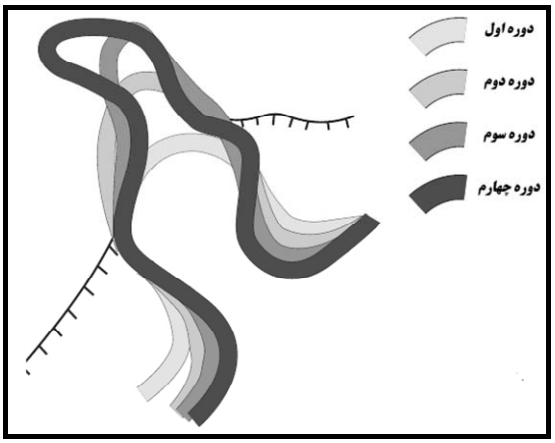
پس از انجام مراحل فوق و تهیه تصاویر یکپارچه از مسیر رودخانه در سال‌های گذشته، می‌توان از نرم افزار اتوکد و یا نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی همچون ArcInfo، Arcview و ArcGis و بااستفاده از ابزار در اختیار، شکل کلی رودخانه، جزیره‌ها، آبراهه‌های جانبی و مانداب‌ها را رقومی نمود. بدین ترتیب با معرفی هریک از اجزای تفکیک شده، نقشه رودخانه در سال‌های گذشته و حال به دست می‌آید. شکل (۴-۵۱) نمونه‌هایی از نحوه تهیه نقشه ریخت‌شناسی رودخانه از عکس هوایی را نشان

1 - Universal Transverse Mercator (U.T.M)

می‌دهد[۴۰]. به منظور بررسی تغییرات رودخانه در سال‌های مختلف لازم است تا براساس عکس‌های هوایی چندین دوره از رودخانـه مورد مطالعه، مسیر سال‌های مختلف(از گذشته تا حال) را مطابق شکل (۴-۵۲) استخراج نمود.



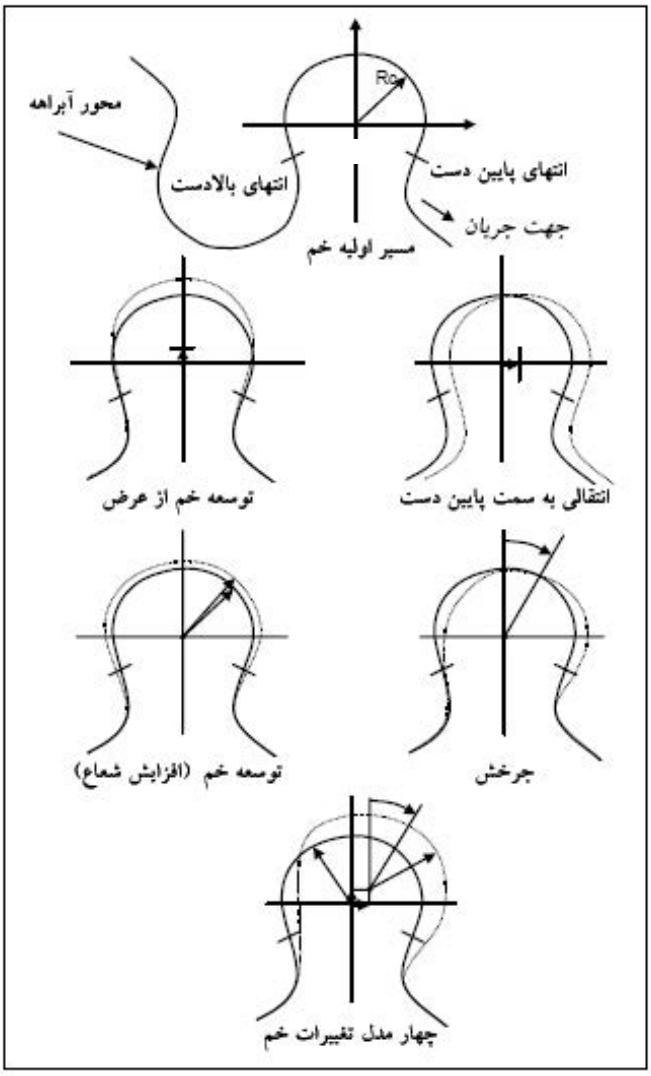
شکل ۴-۵۱- نمونه‌ای از نحوه تهیه نقشه ریخت‌شناسی رودخانه از عکس‌های هوایی[۴۰]



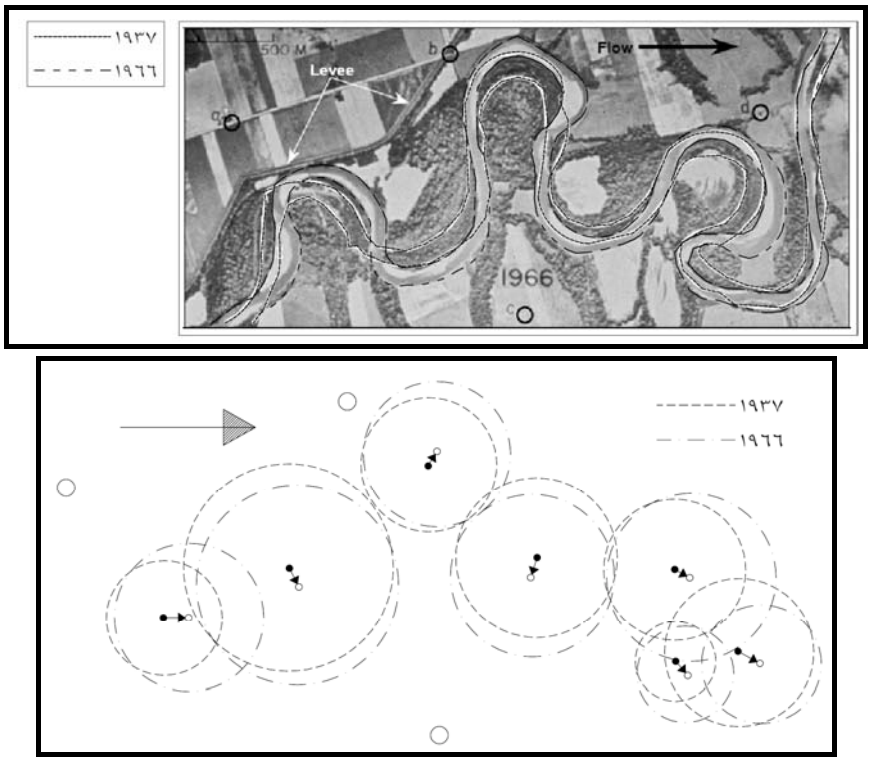
شکل ۴-۵۲- تهیه نقشه مسیر رودخانه از زمان گذشته تا حال[۵۳]

۴-۷-۲- تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی در زمان آینده

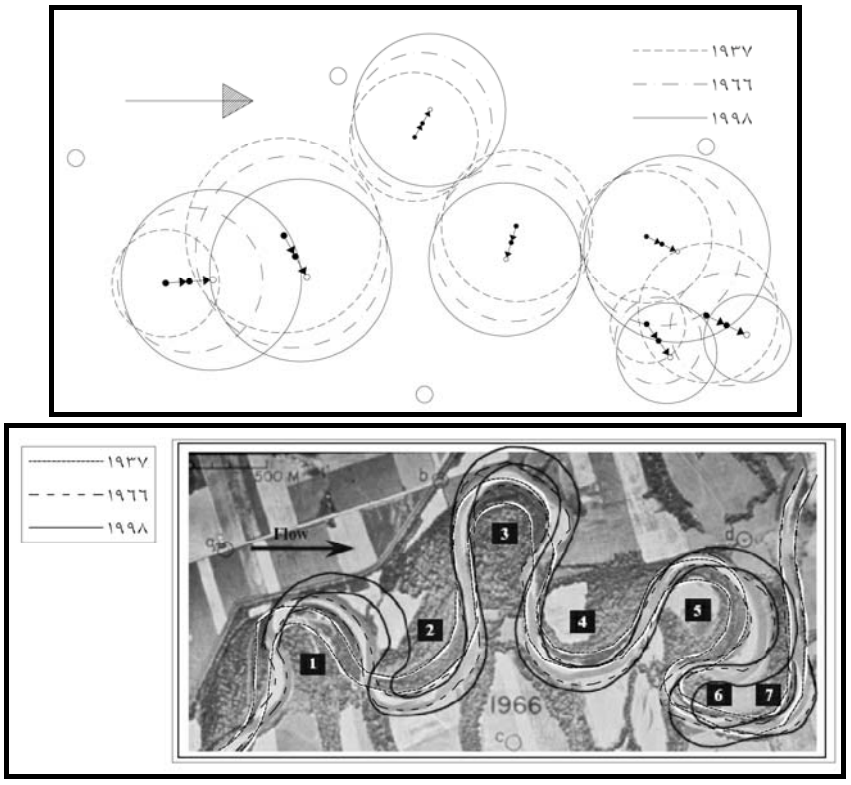
پس از تهیه نقشه ریخت‌شناسی براساس عکس‌های ادوار گذشته و شرایط موجود، مشخصه‌های ریخت‌شناسی همچون میزان یا نرخ جابجایی مرکز خم‌ها و میزان انبساط و انقباض شعاع خم‌ها در طول سال‌های مورد بررسی تعیین گردیده و با توجه به معیارهای موجود، رفتار رودخانه در دوره آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در ادامه با توجه به میزان تغییر مکان مرکز خم‌ها و طول شعاع منحنی به دست آمده از عکس‌های سال‌های قبل و با عنایت به سال و یا سال‌های مورد پیش‌بینی، میزان تغییرات بر اساس سال مورد نظر برون یابی می‌گردد. شکل (۴-۵۴) روش اندازه‌گیری جابجایی مرکز خم‌ها را نشان می‌دهد[۵۳]. همچنین شکل (۴-۵۵) نمونه‌ای از روند اندازه‌گیری تغییرات ریخت‌شناسی یک رودخانه در سال‌های ۱۹۳۷ و ۱۹۶۶ را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان براساس نتایج به دست آمده در سال‌های مذکور، مسیر جدید رودخانه را در سال‌های آتی ترسیم نمود. شکل (۴-۵۶) پیش‌بینی تغییرات ریخت‌شناسی در سال ۱۹۸۸ نشان می‌دهد که براساس تحلیل‌های صورت گرفته نقشه مسیر رودخانه در سال مذکور تهیه شده است. در نهایت به منظور ارائه نتایجی در خصوص مقایسه بین مسیر پیش‌بینی شده و واقعی رودخانه‌ای شکل (۴-۵۶) ارائه شده است.



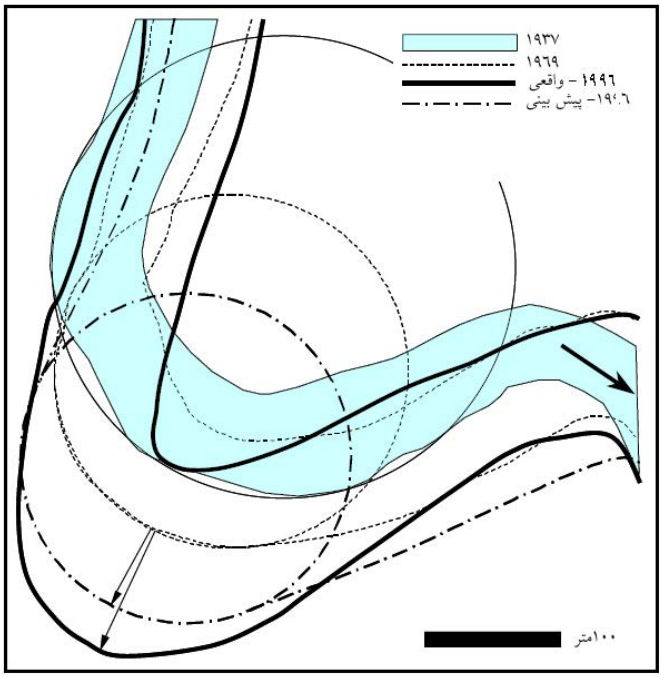
شکل ۴-۵۳- اندازه‌گیری جابجایی خم‌ها [۵۳]



شکل ۴-۵۴- نمونه‌ای از مقایسه صورت گرفته توسط عکس‌های هوایی سال‌های مختلف یک رودخانه و تحلیل جابجایی خم‌ها [۵۳]



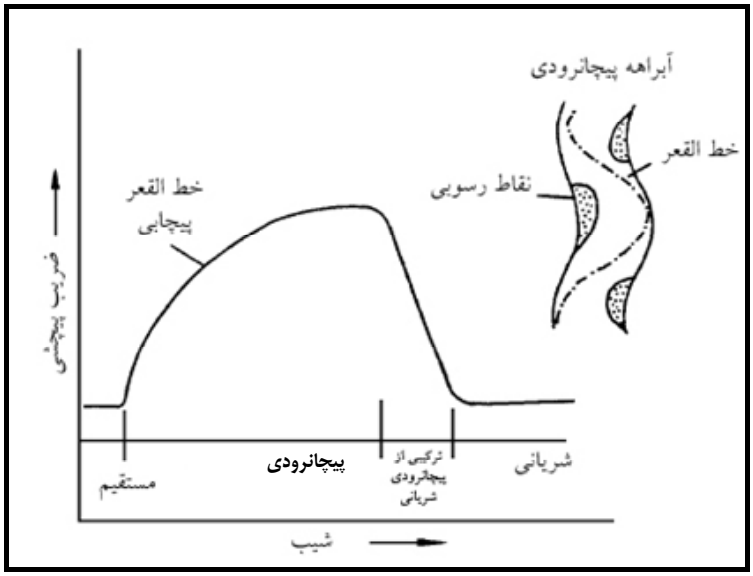
شکل ۴-۵۵- نمونه‌ای از پیش بینی تغییرات ریخت‌شناسی در سال‌های آتی و تهیه نقشه مربوط به آن [۵۳]



شکل ۴-۵۶- مقایسه بین مسیر واقعی رودخانه در سال ۱۹۹۶ و مسیر پیش‌بینی شده در همان سال [۵۳]

۴-۷-۳- نقشه بازه بندی رودخانه از نظر نوع رودخانه

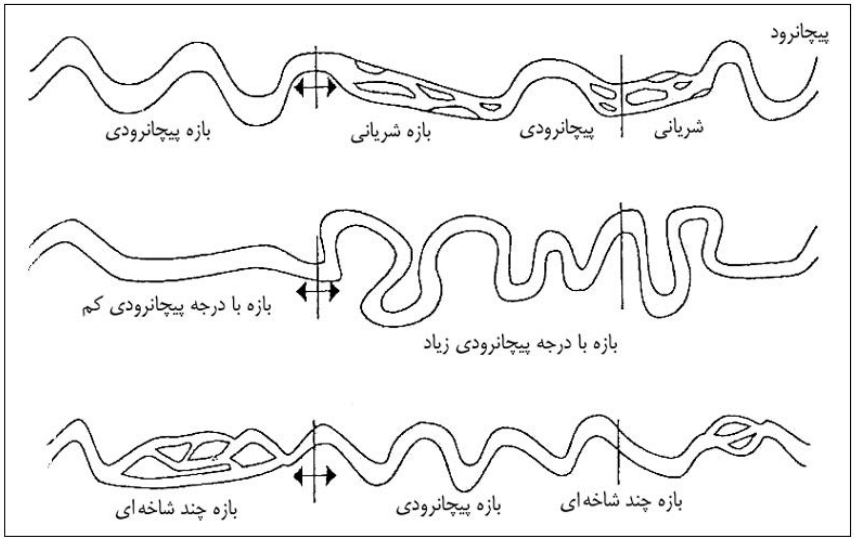
رودخانه‌ها از نظر شکل ظاهری به سه گروه اصلی: مستقیم، مارپیچی و شریانی تقسیم می‌شوند. برای تفکیک آنها از همدیگر از ضریبی بنام ضریب خمیدگی یا سینوسی استفاده می نمایند. این ضریب برای رودخانه‌های مستقیم نزدیک به یک و به تدریج در رودخانه‌های با پیچ و خم زیاد افزایش یافته و مجددا برای رودخانه‌های شریانی کاهش می‌یابد. در شکل (۴-۵۷) تقسیم‌بندی مربوط نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۷- تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر اساس ضریب خمیدگی [۹۴]

در یک نگاه اجمالی این‌گونه طبقه‌بندی به نظر مناسب می‌رسد. درصورتی‌که از نقطه نظر مهندسی برای این‌گونه طبقه‌بندی نیاز به جزییات بیش‌تر در مورد هویت شکل پلان رودخانه می‌باشد. باید این نکته را در نظر داشت که تغییر شکل پلان رودخانه‌های ماسه‌ای و شنی به یک روند معین صورت نمی‌گیرد. در رودخانه‌های ماسه‌ای تغییر شکل پلان از پیچانروی به شریانی در اثر سیلاب‌های بزرگ قابل مشاهده می‌باشد. درصورتی‌که رودخانه‌های شنی تمایل زیادی به حالت شریانی دارند. رودخانه‌های سنگلاخی و قلوه سنگی در مقایسه با رودخانه‌های ماسه‌ای و شنی به میزان کم‌تری پیچانرود می‌باشند و این خود نشان دهنده وابستگی شکل پلان رودخانه به مواد تشکیل دهنده کف و کناره می‌باشد. بدین معنا که هرچه مواد تشکیل دهنده کف وکناره‌ها درشت‌تر باشند احتمال تغییر شکل ناگهانی در پلان دراثر سیلاب‌های بزرگ کم‌تر می‌باشد.

با توجه به تحلیل‌ها و بررسی‌های انجام شده در خصوص تعیین شکل رودخانه در بخش‌های قبلی، می‌توان برروی نقشه‌های رودخانه، نوع و شکل رودخانه را براساس پارامتر پیچشی و بازدیدهای صحرایی مشخص نمود. شکل (۴-۵۸) نمونه‌ای از تقسیم‌بندی رودخانه از نظر شکل ظاهری برروی نقشه ارائه شده است [۵۳].



شکل ۴-۵۸- نمونه‌ای از تقسیم‌بندی رودخانه از نظر شکل ظاهری برروی نقشه [۵۳]

۴-۷-۴- نقشه بازه بندی رودخانه از نظر فرسایش و رسوب‌گذاری

در این مرحله از نتایج حاصل از مدل‌سازی فرسایش ورسوب رودخانه که شامل میزان فرسایش و رسوب‌گذاری در هریک از مقاطع و یا بازه‌های رودخانه می‌باشد و توسط نرم افزارهایی همچون HEC-6، HEC-6T، MIKE 11 و SED2D-WES به دست می‌آیند، استفاده نموده و به روش‌های دستی و کامپیوتری، بازه‌های فرسایشی و رسوب‌گذار برروی نقشه‌ها مشخص می‌گردند. در روش دستی، پس از کسب نتایج مدل‌سازی و تحلیل آنها و همچنین کنترل آن براساس بازدیدهای صحرایی، بازه‌های فرسایش‌پذیر و رسوب‌گذار برروی نقشه مشخص می‌شود. در روش کامپیوتری نیز از نرم افزارهایی که بتوانند با استفاده از اطلاعات توصیفی و کمی، پهنه‌های فرسایش‌پذیر و رسوب‌گذار را مشخص نمایند، استفاده می‌شود. از جمله این نرم افزارها می‌توان به سری نرم افزارهای GIS اشاره نمود که براساس داده‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده، پهنه‌های مذکور را مشخص می نمایند. روش تهیه پهنه‌های مذکور بدین صورت است که ابتدا براساس نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی رسوب در هریک از نقاط رودخانه، شبکه‌ای

(GRID) تعریف گردیده و براساس روش درون‌یابی، اطلاعات دیگر نقاط شبکه به دست می‌آید. سپس براساس اطلاعات بـه دسـت آمده، مدل شبکه نامنظم مثلثی (TIN) از نحوه فرسایش و رسوب‌گذاری تهیه می‌شود. بدین ترتیب مناطق فرسایش‌پذیر و رسوب‌گذار براساس تفکیک رنگ‌ها در طول مسیر رودخانه قابل تشخیص می‌باشد.

پیوست

واژه‌نامه

آب تل زایی Shoaling

پدیده به‌وجود آمدن تپه‌های رسوبی زیر آبی در بستر رودخانه که در مقابل فرسایش مقاوم می‌باشد که عمدتا در بالادست مـصب رودخانه‌های جزر و مدی مشاهده می‌شود [۱۸].

اضافه ارتفاع Super Elevation

اضافه ارتفاع ناشی از اثر قوس رودخانه بر روی جریان آب

انرژی ویژه Specific Energy

انرژی آب برحسب بلندا از کف مجرا که برابر است با مجموع میانگین عمق آب و بار ارتفاعی حاصل از سرعت میانگین جریان[۱۶].

بازه بالایی (رودخانه کوهستانی) Upper Reach

این نوع رودخانه معمولا در مناطق کوهستانی و یا مرتفع جاری بوده که به عنوان بازه بالایی یک رودخانه نیز شناخته می‌شـود و معمولا دارای شیب تند، آب شفاف و توان زیاد برای حمل مواد رسوبی می‌باشد[۱۸].

بازه پایینی Lower Reach

بازه پایینی رودخانه که معمولا در دشت سیلابی جریان دارد و حالت پیچشی داشته و مواد رسوبی آن شبیه مواد بستر می‌باشد[۱۸].

بازه میانی Middle Reach

قسمتی از بازه مطالعاتی واقع در محدوده میانی را شامل می‌شود.

بار کل Total Load

مجموع بار بستر و بار معلق که توسط جریان رودخانه حمل می‌گردد [۱۸].

بار کف یا بار بستر Bed Load

به آن قسمت از رسوبات درشت دانه جریان آبراهه یا رودخانه که در نزدیکی بستر به صورت پرش، غلتیدن و یا لغزش روی بستر آبراهه در حرکت باشند گفته می‌شود. بار بستر همچنین به دو بخش بار تماسی و بار جهشی تقسیم می‌شود [۱۸].

بار نقطه‌ای Point Bar

انباشته‌های رسوبی موضعی در بستر رودخانه

بار معلق Suspended Load

مواد ریزدانه‌ای که به صورت معلق به وسیله جریان آب در آبراهه حمل می‌گردد. اندازه رسوبات معلق با توجه به مشخصات هیدرولیک جریان متفاوت بوده و از موادی نظیر رس، لای، ماسه و حتی شن نیز تشکیل می‌گردد [۱۸].

بار شسته Wash Load

آن قسمت از رسوبات رودخانه می‌باشد که از سطح حوضه به وسیله رواناب سطحی یا وزش باد وارد رودخانه می‌گردد. بار شسته شامل مواد ریزدانه ای نظیر رس یا لای می‌باشد که به صورت معلق در رودخانه حرکت می‌کند [۱۸].

برگشت آب (فراآب) Back Water

افزایش رقوم سطح آب درنتیجه وجود موانعی از قبیل سد یا سد تنظیم کننده و یا برجستگی بستر رودخانه که به سمت بالادست سرایت کند [۱۶].

بده مقطع پر، بده لبریز Bankful Discharge

بده متناظر با ارتفاع سطح آب در حد لبریز شدن از کنار رودخانه یا آبراهه را گویند به طوری‌که جریان بیش از آن باعث می‌شود سواحل رودخانه در زیر آب قرار گیرد [۱۸].

بده غالب، آبدهی غالب Dominant Discharge

بدهی که از نظر مقدار، به قدر کافی بزرگ و وقوع آن دارای تناوب کافی بوده و نقش تعیین کننده‌ای در تعیین ابعاد و مشخصات مسیر مقطع و بستر رودخانه دارد. بده غالب بستگی به آبدهی حداکثر و متوسط، تداوم جریان و تناوب سیل دارد و غالبا معادل بده با دوره بازگشت ۱/۵ ساله و یا ۳/ ۲ بده لبریز رودخانه اختیار می‌گردد [۱۸].

بده کل رسوب Total Sediment Discharge

مجموعه بار بستر و بار معلق حمل شده توسط رودخانه را شامل می‌شود.

پشته، بار Bar

یک پشته آبرفتی و یا تل‌هایی از ماسه، شن یا مواد تحکیم نیافته دیگر که در دهانه یک آبراهه یا رودخانه و یا در هر نقطه‌ای از مسیر آن به‌وجود می‌آید و به صورت مانعی در مقابل جریان آب یا کشتیرانی عمل کند. در زمان کم آبی، این بارهای رسوبی به صورت جزایر کوچک نمایان می‌شوند [۱۸].

پادتلماسه Antidune

موج‌های سینوسی در بستر آبراهه که موازی موج‌های سطح آب بوده و معمولا به سمت بالادست حرکت می‌کند و به تدریج ناپدید شده و مجددا موج‌های دیگری جانشین آنها می‌شود[۱۸].

پنجه شویی، زیر شویی، زیرکنی Undercutting

فرسایش یا شسته شدن سنگ‌ها یا خاک پنجه صخره‌ها یا کناره‌های رودخانه به وسیله جریان آب یا عمل موج و فروریزی قسمت‌های فوقانی که زیر آن شسته شده است. این پدیده باعث ایجاد کناره‌هایی با شیب تند شده و مقطع آبراه یا رودخانه معمولا به شکل U در می‌آید [۱۸].

پیچانرود، چم‌رود Meandering River

در پلان شامل یک‌سری پیچ و خم‌های متناوب و متوالی می‌باشد که توسط بازه‌های مستقیم به یکدیگر می‌پیوندند و شیب این‌گونه رودخانه نسبتا کم بوده و مجرای آنها ناپایدار می‌باشد و غالبا در قسمت بیرونی پیچ‌ها سرعت آب زیاد شده که موجب فرسایش و تعمیق این ناحیه و تخریب دیواره خارجی رودخانه می‌گردد. درنتیجه استمرار این فرسایش، خم رودخانه به سمت بیرونی خود و نیز به سمت پایین‌دست رودخانه پیش‌روی می‌کند [۱۸].

تبدیل Transition

- تغییر جریان آرام به جریان متلاطم که در ناحیه محدودی از مسیر جریان اتفاق می‌افتد.
- قطعه‌ای از نهر یا لوله که در آن مقطع به تدریج از یک وضعیت به وضعیت دیگر تغییر می‌کند و برحسب اندازه طول این قطعه چنین نامیده می‌شود: قطعه اتصال کوتاه، طولانی، تدریجی و ناگهانی
- همچنین برحسب شکل هندسی بدنه اتصال به نام‌های: محدب یا مقعر، مستقیم، کج یا اریب، بازشونده و پروفیله، برحسب نوع جریان در این قطعه به نام‌های: جریان آرام، جریان طغیانی (یک بعدی یا دو بعدی)، بر حسب نوع ساختمان به نام‌های: گالری، شیر، شیر فلکه، ورودی یا خروجی یا انتهایی نامیده می‌شود. در انگلیسی غالبا Conversion نیز نامیده می‌شود [۱۶].

تلماسه Dune

یک موج ماسه‌ای با مقطع تقریبی مثلثی شکل (در یک سطح قائم موازی جهت جریان آب) که شیب بالادست آن ملایم و شیب پایین‌دست آن تند است. ذرات رسوبی از روی شیب بالادست تلماسه بالا رفته و بر روی شیب پایین‌دست نشست کرده و درنتیجه این عمل، تلماسه به سمت پایین‌دست رودخانه حرکت می‌کند. تلماسه به عنوان یکی از انواع شکل‌های بستر رودخانه شناخته می‌شود[۱۸].

تلاقی‌گاه، بهمرود Confluence

- محل پیوستن دو یا چند رودخانه به یکدیگر را گویند.
- پدیده اتصال یا تلاقی دو یا چند شاخه رودخانه به یکدیگر را گویند [۱۸].

تخریب شیمیایی Chemical Weathering

تخریب سنگ‌ها و فرسایش بر اثر انجام یافتن واکنش‌های شیمیایی مثل هیدرولیز یا اکسیداسیون و ... [۱۶].

جریان ثانویه، جریان عرضی Secondary Flow

جریانی است که در مقطع عرضی و عمود بر جهت اصلی جریان، به ویژه در پیچ و خم رودخانه ایجاد شده و موجب فرسایش کناره و کف در سمت بیرونی خم و رسوب‌گذاری در سمت داخلی آن می‌گردد [۱۸].

جریان حلزونی Helicoidal Flow (Spiral Flow)

در خم رودخانه‌ها شرایط خاصی برای جریان ایجاد می‌شود که از ترکیب جریان اصلی رودخانه که در راستای مسیر رودخانه می‌باشد و جریان ثانویه یا جانبی که عمود بر محور جریان اصلی و در عرض رودخانه تشکیل می‌شود جریان مارپیچی یا حلزونی به‌وجود می‌آید که مشخصه اصلی حرکت آب در خم‌ها می‌باشد [۱۸].

جریان واریزه‌ای Debris Flow

جریانی که با خود مواد مختلفی اعم از مواد سنگی ریزدانه، درشت دانه و نیز قطعات چوب، شاخه‌های درختان، آشغال و غیره را حمل می‌کند [۱۸].

جور شدگی هیدرولیکی، جداشدگی هیدرولیکی Hydraulic Sorting

پدیده جدا شدن دانه‌های مولد بستر رودخانه‌ها در اثر کاهش توان حمل مواد جامد توسط جریان آب را جور شدگی یا جداسازی هیدرولیکی گویند در روند رخداد این پدیده مواد بستر از بالادست رودخانه به سمت پایین‌دست آن به تدریج از درشت دانه به ریز دانه ردیف می‌گردد [۱۸].

جابجایی Migration

جابجایی جانبی که عمدتا در قوس رودخانه‌ها اتفاق می افتد

چرخش Rotation

- حرکت چرخشی حول یک محور یا یک مرکز
- در آبیاری به انشعاب جریان کامل آب در نهرها و یا لوله‌های جانبی برای تامین آب مورد نیاز (نوبت آبیاری) گفته می‌شود [۱۶].

خم رودخانه River Bend

انحنا و یا تغییر مسیر رودخانه یا آبراهه را گویند.

خزش Creep

تغییر شکل دایمی تدریجی حاصل از تاثیر تنش ها در اجسام سخت و یا متشکل از دانه‌ها که بعد از برداشتن اثر تنش بـه حالـت اولیه برنمی‌گردد [۱۶].

خروجی Outlet

- نقطه‌ای که آب رودخانه و یا سایر آب های جاری از آن خارج شود.
- نقطه‌ای که آب رودخانه، جویبار، آب های جاری، دریاچه، زهکشی زمین‌های گود، جزر و مد، لوله، سد و یا سایر سازه‌های هیدرولیکی از آن خارج می‌شود [۱۶].
- در رودخانه می سی سی پی، به آبراهه‌های بزرگی گفته می‌شود که در داخل و یا نزدیک دلتای رودخانه از شـاخه اصـلی جدا می‌شوند و به دریا می‌پیوندند.

خط‌القعر Thalweg

خطی که در امتداد عمیق ترین قسمت‌های بستر یا مجرای یک رودخانه می‌باشد[۱۸].

خیزاب، شکنج آب Riffle

خیزاب یا آبشارک‌های کم عمق در جریان آب آبراه که شیب بستر آن به صورت موضعی تند می‌باشد و به وسیله مانعی که تمـام یا قسمتی از آنها در زیر آب قرار دارد، به‌وجود آمده و سطح آب موجدار است [۱۸].

دامنه چم Meander Amplitude

فاصله عرضی رئوس محور رودخانه در دو خم متوالی یک چم را گویند [۱۸].

دو شاخگی، بخش گاه Bifurcation

تقسیم آبراهه اصلی به دو شاخه مجزا که این پدیده بر عکس پدیده چنداب یا بـه‌هـم پیوسـتن دو یـا چنـد آبراهـه بـه یکـدیگر می‌باشد[۱۸].

دلتا، سه گوش Delta

به ناحیه آبرفتی گفته می‌شود که درنتیجه ته‌نشین شدن مواد معلق رودخانه‌ها در محل ورود به دریا، اقیانوس، دریاچه و نیز مخزن سد به‌وجود می‌آید. شکل عمومی دلتاها به صورت سه گوش بوده و جریان اصلی رودخانه از طریق مجموعه ای از آبراهه‌های کوچک و بزرگ موجود در این ناحیه تخلیه می‌گردد [۱۸].

دوره بازگشت Recurrence Interval

فاصله زمانی بین رویدادهای واقعی یک واقعه هیدرولوژیک به یک مقدار معین و یا بزرگ‌تر از آن مثلا در یک مجموعه طغیان سالانه فاصله متوسط را که در آن، یک طغیان به یک اندازه معین به صورت یک حداکثر سالیانه تکرار می‌شود، فاصله برگشت می‌نامند [۱۶].

رودخانه آبرفتی Alluvial River

رودخانه‌ای که در میان آبرفت‌های خودش جریان دارد و دایما سیلابدشت خود را با سرریز کردن می سازد، رسوباتی که این رودخانه حمل می‌کند (به جز بار معلق آن) به مواد بستر و دیواره رودخانه شباهت دارد [۱۸].

رودخانه مستقیم Straight River

رودخانه‌ای که دارای تغییر مسیر شدید و یا پیچ و خم نباشد.

رودخانه شریانی Braided River

رودخانه‌ای با بستر بسیار عریض و کم عمق که در آن جریان از درون نهرهای متعدد متصل به هم که به وسیله پشته‌ها و جزایر رسوبی از یکدیگر جدا می‌شوند عبور می‌کند در چنین رودخانه‌ای نهرهای کوچک ممکن است پیچ و خم‌هایی پیدا کنند [۱۸].

رودخانه رسوب‌گذار Aggrading River

رودخانه‌ای که در شرایط رسوب‌گذاری بوده و تراز بستر آن دایما در حال افزایش است [۱۸].

رودخانه فرسایشی Degrading River

به رودخانه‌ای که در معرض فرسایش و کاهش تراز کف قرار دارد و در اثر این فرسایش، شیب طولی آن کاهش پیدا می‌کند رودخانه فرسایشی گویند.

رودخانه متعادل Graded River

رودخانه‌ای که بده رسوب ورودی آن با بده رسوب خروجی آن تقریبا برابر بوده و به همین دلیل تراز بستر آن تغییر نمی‌کند و به عبارت دیگر رودخانه در شرایط تعادل به سر می برد [۱۸].

رودخانه جوان Young River

رودخانه‌های جوان از نظر زمین‌شناسی دسته‌ای از رودخانه‌ها می‌باشند که در مناطق کوهستانی و با شیب تند در دره‌های V شکل جریان دارند. شکل آنها بسیار نامنظم بوده و معمولا فرآیند فرسایش در آنها شدید است و از این رو مقطع آنها دایما در حال تغییر می‌باشد، در طول مسیر آنها آبشار، گوداب و حالت پلکانی به طور مکرر دیده می‌شود [۱۸].

رودخانه بالغ Mature River

رودخانه‌ای با شیب طولی نسبتا کم که در دوره‌ای عریض جریان دارد در این نوع رودخانه عموما مواد حاصل از فرسایش کناره‌ها جایگزین مواد فرسایش یافته کف می‌شود رودخانه بالغ پایدار بوده و مقاطع عرضی در هر بازه آن قادر به حمل مواد رسوبی ورودی به آن بازه می‌باشد [۱۸].

رودخانه پیر Old River

رودخانه‌ای با شیب کم، جریانی آرام و یک سیلابدشت عریض که معمولا دارای مسیرها و دریاچه‌های نعل اسبی فراوان می‌باشد. این رودخانه شدیدا پیچ و خم‌دار بوده و در دوران سیلابی فرسایش یافته و در سایر زمان‌ها رسوب‌گذاری می‌کند. معمولا گوره‌های طبیعی در امتداد سواحل آن تشکیل می‌گردد [۱۶].

رودخانه دایمی Perennial River

رودخانه‌ای که در سرتاسر سال آب در آن روان است و اغلب سطح آب در آن پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی در زمین‌های اطراف می‌باشد [۱۸].

رودخانه غیردایمی Ephemeral River

رودخانه غیردایمی که در طی یک دوره زمانی طولانی خشک و فاقد جریان است معمولا مقطع تیپ این رودخانه‌ها عریض، کم عمق و مستطیل شکل با نسبت عرض به عمق ۵۰ برابر یا بیش‌تر می‌باشد [۱۸].

رودخانه فصلی Seasonal River

رودخانه‌ای که در یک فصل معین از سال، آب در آن جاری می‌باشد [۱۸].

رودخانه جزر و مدی، کشندرود Tidal River

بازه‌ای از رودخانه که در آن جریان و شیب سطح آب تحت تاثیر شرایط کشندی (جزر و مدی) می‌باشد و ممکن است در بعضی اوقات جهت جریان رودخانه نیز تغییر نماید و یا گاهی در شرایط مد (برکشند) امکان وقوع جریانات دو لایه با دو غلظت متفاوت وجود دارد. در بعضی رودخانه‌ها احتمال دارد جریان جزر و مد تا بیش از صد کیلومتر از دهانه رودخانه ادامه یابد [۱۸].

رودخانه میرا Virgin River

این نوع رودخانه بیش‌تر در نواحی خشک وجود دارد و معمولا جریان در آن قبل از پیوستن به یک رودخانه دیگر یا دریا در اثر نفوذ و یا تبخیر زیاد ناپدید می‌گردد [۱۸].

رودخانه بستر شنی Gravel River

این نوع رودخانه دارای بستری با مواد شنی بوده و عموما در مناطق کوهستانی یافت می‌شود ویا آبراهی با بستر ماسه‌ای که مـواد ریزدانه آن در اثر جریان آب به مرور از آن بازه خارج شده و یـک لایـه حفـاظتی شـنی در بـستر آن ایجـاد مـی‌شـود. سـطح مقطـع رودخانه‌های بستر شنی تقریبا مستطیل شکل بوده و نسبت عرض به عمق آنها زیاد می‌باشد [۱۸].

رژیم جریان Flow Regime

تایید مشترک نیروی ثقل و نیروی لزجت رژیم جریان را در کانال‌های باز مشخص می‌کند.

رژیم جریان زیر بحرانی Lower Regime

در این جریان ۱> عدد فرود و ۵۰۰ >عدد رینولدز می‌باشد [۲].

رژیم جریان انتقالی Transition Regime

در جریان آب در کانال‌ها یک حالت حد وسط مشاهده می‌شود که به جریان نه آشفته و نه آرام طبقـه‌بنـدی و در آن، جریـان بـه راحتی از آشفته به آرام و بالعکس تبدیل می‌گردد. این حالت به حالت تبدیلی یا انتقالی موسوم است [۲].

رژیم جریان فوق بحرانی Upper Regime

درا ین جریان ۱< عدد فرود و ۵۰۰< عدد رینولدز می‌باشد [۲].

راستای رودخانه River Alignment

راستا یا مسیری که محور آبراهه، کانال یا رودخانه در امتداد آن قرار می‌گیرد [۱۸].

رژیم هیدرولوژیک Hydrologic Regime

تغییرات آبدهی طولانی مدت سالانه رودخانه که در آن وقوع دوره‌های ترسالی و خشکسالی نمایان می‌شود.

رسوبات چسبنده (ریزدانه‌ها) Cohesive Sediment / Fine Bed Material

موادی که دارای نیروی چسبندگی کافی بوده و در مقابل تنش برشی که توسط جریان آب وارد می‌آید از جا کنده نمی‌شود.

رسوبات غیر چسبنده (درشت دانه) Non Cohesive Sediment / Coarse Bed Material

شن و ماسه درشت دانه را شامل می‌گردد که دارای چسبندگی بین دانه‌ای نمی‌باشند.

رسوب‌گذاری ممتد Long Term Aggradation

فرآیند بالا آمدن کف آبراهه بر اثر حمل و ته‌نشینی رسوبات در دراز مدت را گویند

رخساره‌های سنگ چینه‌ای Lithostratigrophical Facies

کلیه خصوصیات و ساختمان‌های ظاهری که درهر لایه یا واحدهای سنگی یک منطقه بـه چـشم مـی خـورد و نـشانگر شـرایط رسوب‌گذاری و حوادث رخ داده در طی عمر زمین‌شناسی آن واحد می‌باشد را شامل می‌شود [۱۶].

زمین‌شناسی عمومی General Geology

شرایط زمین‌شناسی هر منطقه را شامل می‌شود (سنگ شناسی، آب‌های زیر زمینی، چینه شناسی).

سایش Abrasion

- سایش ذرات جامد بر اثر جریان آب در بستر رودخانه و یا جریان باد که باعث کوچک شدن تدریجی اندازه آنها می‌شود
- کوچک شدن ذرات رسوب به علل گوناگون اصطکاک ذرات با یکدیگر یا با کف رودخانه
- عمل سایش دیواره‌ها، پرتگاه‌ها، بیرون زدگی‌ها و زبانه‌های سنگی بر اثر باد [۱۸].

سرعت عرضی Transverse Velocity

در جریان های با میدان دو بعدی رخ می‌دهد مانند رژیم جریان در ورودی سرریز و یا پیچ های رودخانه که در این محل‌ها مولفه سرعت عمود بر جریان اصلی بیش‌تر می‌شود.

سنگ Rock

در مهندسی به اجتماع طبیعی ذرات کانی گفته می‌شود که با نیروهای چسبنده به هم متصل شـده باشـند. سـنگ‌هـای آذریـن و دگرگونی از بلوهای درهم قفل شده و سنگ‌های رسوبی از ذرات کانی متراکم شده تشکیل شده‌اند که غالبا با خمیره طبیعی بـه هـم متصل شده‌اند [۱۶].

سنگ شناسی Lithology

علم بررسی و مطالعه سنگ‌ها [۱۶].

سنگ بستر Bed Rock

سنگ جامد که در زیر لایه سنگ‌های ناپیوسته غیر متراکم در سطح پوسته زمین قرار دارد در بسیاری از مناطق سـنگ بـستر در سطح، ظاهر شده است [۱۶].

سنگ ریزش Rock Fall

سقوط سنگ به طرف پایین دامنه بر اثر نیروی ثقل [۱۶].

سطح اساس، سطح پایه Base Level

آخرین یا پایین ترین سطحی که جریان آب می‌تواند بستر خود را فرسایش دهد [۱۶].

سامانه متریک Universal Transverse Mercator (U.T.M)

سامانه اندازه‌گیری طول وعرض جغرافیایی بر حسب متر

سامانه اطلاعات جغرافیایی Geographical Information System

سامانه‌ای است که با به‌کارگیری اطلاعات جغرافیایی بـه صـورت فعـال و رقـومی پـردازش داده‌هـا و تجزیـه و تحلیـل آنهـا در زمینه‌های مختلف مهندسی کاربر را به نتایج مفیدی می رساند.

شکل بستر Bed Form

شکل و نوع پستی و بلندی‌های بستر آبراهه که اندازه آن از اندازه بزرگ‌ترین دانه‌های تشکیل دهنده بستر بزرگ‌تر می‌باشد . این شکل‌ها که در بستر آبراهه به‌وجود می‌آید ناشی از تاثیر متقابل بین جریان آب و مواد بستر می‌باشد [۱۸].

شرایط رودخانه‌ای Fluvial Conditions

پدیده‌ای مربوط به رودخانه، فرآیندها و موجودات در رودخانه یا پدیده‌هایی که به وسیله رودخانه ایجاد می‌شوند.

طول چم Meander Length

فاصله طولی رئوس دو چم متوالی را گویند [۱۸].

ظرفیت انتقال Transport Capacity

توانایی رواناب در انتقال رسوب از یک نقطه به نقطه دیگر بار حمل شده توسط جریان سطحی با این عوامل ارتبـاط دارد: انـدازه، شکل و وزن مخصوص ذره، مقدار سرعت و تلاطم جریان، مقطع عرضی، تندی شیب و زبری هیدرولیکی آبراهه [۱۶].

عرض چم Meander Belt

فاصله عرضی دو راس خارجی خم‌های متوالی یک چم رودخانه را گویند [۱۸].

عمق بحرانی Critical Depth

عمق جریان آب (در حالت بحرانی) در آبراهه روباز یا مجرای نیمه پر

عمق پایاب Tail Water Depth

عمق آبی که درست در پایین‌دست یک سازه قرار گرفته است [۱۸].

غرقاب شدن Inundation

قرار گرفتن سطح زمین در زیر آب ناشی از سیلاب‌های رودخانه‌ای و یا پیشرفت آب دریا را گویند.

فشار بالا برنده Uplift pressure

- فشار رو به بالای وارد شده به زیر یک سد نفوذ ناپذیر که از اطراف آب در بالای سد و یا فشار سطح بالایی درز افقی و یا ترک اعمال می‌شود. چنین فشاری تمایل دارد که وزن سد و پایداری و مقاومت آن در مقابل واژگونی را کاهش دهد.
- در زمین‌شناسی به بالا آمدن بعضی از طبقات و لایه‌ها در مقایسه با لایه‌های هم سن گفته می‌شود [۱۸].

فرسایش عمومی، آبشستگی عمومی General Scour

عمق فرسایش آب جاری در رودخانه‌ها که باعث کنده شدن و حمل این مواد از بستر و کناره مجاری می‌شود. آبشستگی ممکن است در مواد خاکی و مواد سنگی رخ دهد.

فرسایش موضعی Local Scour

فرسایش ناشی از تاثیر مستقیم سازه‌ها بر روی جریان، مثلا در پایین‌دست سدها و بندهای انحرافی، اطراف پایه پل‌ها، دماغه آبشکن‌ها و ...

قوس عمیق Entrenchment

قوسی که در اثر کنده شدن بستر رودخانه دارای کناره‌های غیر قابل فرسایش به‌وجود می‌آید.

کف‌کنی Degradation

فرآیند پایین افتادن کف آبراه بر اثر فرسایش و حمل مواد بستر را گویند [۱۸].

کمر بند فرسایشی Scouring Belt

محدوده‌ای که معرف جابجایی عرض رودخانه ناشی از فرسایش کناره‌ها و قوس ها در یک دوره طولانی مدت می‌باشد.

گذرگاه Crossing

بازه مستقیم حد فاصل دو خم متوالی معکوس از رودخانه که نسبتا کوتاه و کم عمق می‌باشد [۱۸].

گلروان، جریان گل Mudflow

جریان مواد و ذرات غیر متجانس نظیر ذرات خاک، سنگ و غیره که با مقدار زیادی آب مخلوط بوده و معمولا در مسیر قبلی آب جریان می‌یابد. در بعضی از مراجع معادل واژه Debris Flow گرفته شده است با این تفاوت که مواد محموله در Debris Flow درشت‌تر از مواد Mudflow می‌باشد [۱۸].

گوداب Pool

قسمت عمیق و معمولا مثلثی شکل که در بستر رودخانه ایجاد می‌شود [۱۸].

لایه سپر، لایه محافظ Armor Layer

جداسازی یا جورشدگی دانه‌های مخلوط اولیه مواد بستر ممکن است منجر به ایجاد یک پوشش از دانه‌های درشت‌تر روی بستر رودخانه شود. این پوشش محافظ ممکن است باعث کاهش و یا حتی قطع فرسایش بستر گردد [۱۸].

مدل بستر متحرک Mobile- bed Model

نوعی مدل فیزیکی که بستر و کناره‌های آن قابل فرسایش می‌باشد. مطالعات فرسایش رودخانه معمولا در آزمایشگاه‌های هیدرولیک با استفاده از این نوع مدل‌ها صورت می‌گیرد [۱۸].

میانبر Cut off

پدیده‌ای که در روند رخداد آن، جریان در یک رودخانه آبرفتی در طول پیچ و خم‌ها، مسیر یک پیچ خاص را رها کرده و در طول یک آبراه نسبتا کوتاه‌تر و مستقیم‌تر حرکت نموده و کانال جدیدی را ایجاد می‌کند و درنتیجه منجر به حذف پیچ مذکور می‌گردد. در مواردی به منظور اصلاح مسیر رودخانه کانال میانبر به طور مصنوعی ایجاد می‌گردد [۱۸].

منحنی سنجه رسوب Sediment Rating Curve

منحنی که ارتباط بین ترازهای یک رودخانه و بده رسوب آن را نشان می‌دهد.

مسیر سازی Channelization

- مسیرسازی، هدایت مسیر با هدف بهبود شرایط هیدرولیکی رودخانه برای هدایت جریان و سیلاب‌ها
- آبراه‌سازی با هدف ایجاد شرایط هندسی و هیدرولیکی مناسب برای کشتیرانی و برقراری ترابری آبی. [۱۸].

میانبر گلوگاهی یا حلقه‌ای Loop or Neck Cut- off

در صورت وجود موقعیت های مناسب برای انتقال جریان از نقطه‌ای به نقطه دیگر و اجتناب از تشکیل جریان های فوق بحرانی با استفاده از شوت های حلقوی و زیاد کردن طول شوت با استفاده از حلقه‌های پی در پی و کاهش شیب امکان انتقال جریان به آرامی و با سرعت کم به نقطه مورد نیاز مهیا می‌شود.

میانبر شوت Chute Cut- offs

به منظور انتقال جریان از نقطه‌ای به نقطه دیگر به واسطه محدودیت‌های توپوگرافی گاهی اوقات استفاده از Chute مطرح می‌شود و عمدتا اختلاف ارتفاع در این دو نقطه و در نهایت شیب میانبر به شدت افزایش می‌یابد و رژیم جریان فوق بحرانی با سرعت‌های بالا بر جریان این ناحیه حاکم می‌شود.

نسبت چم Meander Ratio

نسبت دامنه یک چم رودخانه به طول آن چم را گویند [۱۸].

نسبت خمیدگی Sinuosity Ratio

نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره آن را گویند [۱۸].

نیمرخ طولی رودخانه Longitudinal Profile

منحنی که تغییرات ارتفاعی رودخانه را در امتداد جریان نشان می‌دهد.

نهشته های رسوبی Bar Deposition

ته نشست آبرفتی و یا برجستگی شنی و یا ماسه‌ای و یا سایر مواردی که در دهانه یک رودخانه، در داخل مسیر آن به‌وجود می‌آید. جزایر موجود در رودخانه‌های شریانی نیز در زمره پشته‌های رسوبی هستند.

منابع و مراجع

۱- آل یاسین، احمد، «کاربرد مهندسی رودخانه در رودخانه‌های دز و کارون»، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، (۱۳۷۹).

۲- ابریشمی، جلیل، حسینی، سید محمود، «هیدرولیک کانال‌های باز»، دانشگاه امام رضا (ع)، (۱۳۷۸).

۳- اسپندار، رادین، امام، علی، «روش‌های کنترل فرسایش در رودخانه»، دفتر مهندسی رودخانه‌ها و سواحل شرکت مدیریت منابع آب ایران، (۱۳۷۳).

۴- بهادری، فیروز، «اصول و مبانی برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها»، دفتر مهندسی رودخانه‌ها و سواحل شرکت مدیریت منابع آب ایران، (۱۳۷۸).

۵- تلوری، عبدالرسول، «اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه»، پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری (وزارت جهاد کشاورزی)، (۱۳۸۳).

۶- «راهنمای شکل هندسی مقطع و راستای رودخانه»، نشریه شماره ۳۶۶- الف طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور – وزارت نیرو، (۱۳۸۹).

۷- «راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه»، نشریه شماره ۳۲۰-الف طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور – وزارت نیرو، (۱۳۸۶)

۸- «راهنمای مطالعات فرسایش و رسوب در ساماندهی رودخانه‌ها»، نشریه شماره ۳۸۳ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، (۱۳۸۶).

۹- «راهنمای مهار فرسایش و حفاظت رودخانه‌ها»، نشریه شماره ۱۴۹ طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور – وزارت نیرو، (۱۳۸۳).

۱۰- رفاهی، حسینقلی، «فرسایش آبی وکنترل آن»، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۷۵).

۱۱- زراتی، امیر رضا، «نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل‌ها»، انتشارات دانشگاه هرمزگان، (۱۳۷۹).

۱۲- «راهنمای مطالعات پایه زمین‌شناسی مهندسی در پروژه‌های مهندسی آب» معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، (۱۳۷۹).

۱۳- «راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری گوره‌ها»، نشریه شماره ۲۱۴ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، (۱۳۸۰).

۱۴- «فرسایش و رسوب‌گذاری در محدوده آبشکن‌ها»، نشریه شماره ۲۴۸ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، (۱۳۸۱).

۱۵- شفاعی بجستان، محمود، «هیدرولیک رسوب»، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۷۸).

۱۶- کمیته فرسایش و رسوب، «فرهنگ تخصصی فرسایش و رسوب»، (۱۳۸۲).

۱۷- کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، «فرهنگ فنی آبیاری و زهکشی»، (۱۳۷۶).

۱۸- لیاقت، علی، «اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه»، پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری، (۱۳۸۲).

۱۹- مدنی، حسن، «زمین‌شناسی ساختمانی وتکتونیک»، موسسه انتشارات جهاد دانشگاهی تهران، (۱۳۷۳).
۲۰- مصباحی، جمشید، چیتی، محمد حسن، (۱۳۷۷)، «فرهنگ مهندسی رودخانه»، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور- وزارت نیرو، (۱۳۷۷).
۲۱- معماریان، حسین، «زمین‌شناسی مهندسی وژئوتکنیک»، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۷۴).
۲۲- «راهنمای طراحی و ساخت دیواره‌های مهار سیلاب (گوره‌ها)»، انتشارات آوای نور، تهران، شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران، (۱۳۸۰).
۲۳- «راهنمای طراحی و ساخت و نگهداری پوشش‌ها در کارهای مهندسی رودخانه»، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، نشریه شماره ۳۳۲ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، (۱۳۸۵).
۲۴- نجمایی، محمد، «هیدرولیک کاربردی»، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۷۲).
۲۵- یاسی، مهدی، «اصلاح مسیر و حفاظت دیواره‌های سیلابی با روش ساختمانی و بیولوژیکی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، (۱۳۶۷).
۲۶- «گزارش مطالعات ساماندهی رودخانه شاهرود»، شرکت مهندسین مشاور سازه پردازی ایران، (۱۳۸۵).

27- ASCE , (1984), " ASCE Task Committee on Relations between Morphology and Sediment Yield" , Journal of the Hydranlics Division, ASCE,Vol, 108,no, Hy11, Proceeding Paper 17450, pp.(1328-1365)
28- Barenes,H.H. , (1967)," Roughness Characteristics of Natural Channels " ,U.S. Geological Survey Water-Supply
29- Bradley,C., and Smith, D.G.(1984), " Meandering Channel response to Altered Flow Regime:Milk River, Alberta and Montana" , Water Resources Research, Vol.20, No.12,pp.(1913-1920)
30- Brice, J.C., (1982), "Stream Channel Stability Assessment", Report Fhwa/Rd-82/021, U.S. Departement of Transportation Federal Highway Adminstration.
31- Chanson,Hubert,1999,"The Hydraulics of Open Channel Flow", John Wiley & Sons Inc.
32- Chang, H.H., (1996)," FLUVIAL-12 Users Manual" , USA
33- Chow, V.T., (1964), " Handbook of Applied Hydrology" , Mc.Graw Hill Pub. Co. , New york.
34- Chow,V.T. , (1959)," Open Channel Hydraulics ",McGraw-Hill book company
35- David L. Rosgen, (1994), A Classification of Natural Rivers, Catena, Elsevier,
36- Danish Hydraulic Institute, (1993), "MIKE11, Version 3.01 Users Manual."
37- DHI, MIKE21C, River Morphology, A Short Description
38- French,Richard, (1987)," Open-Channel Hydraulics ", McGraw-Hill book company
39- Garde, R.J, Ranga Raju, K.G, (1985), Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems.2nd Ed. New York, Jhon Wiley.
40- Gary j. Brierley & Kirstie A. Fryirs,2005, "Geomorphology and River Management" Blackwell Publishing
41- Gray,D.H , and Leiser, A.T, (1982), " Bio-Technical slope Protection and Erosion Control", Van Nostrand Reinhold Company inc., New York,
42- Henderson,F.M.(1966), " Open Channel Flow" Mac-Millan Pub.co.,
43- Hey,R.D,(1982) " Gravel- Bed Rivers" , John Wiley and Sons ltd.,Chichester, England, 87Sp
44- Hey,R.D., (1986)," River Response to Hydraulic Structures", UNESCO, Paris.

45- H.H.CHANG, FLUVIAL-12,Mathematical Model For Erodible Channels,User Manual, 1998
46- Jansen.Petal, 1979, Principle of River Engineering , Pitman
47- Jansen,p-ph., (1983), Principle of River Engineering, Pitman, Pub.co., London
48- J.J.Vander Zwaard, 1986, Applied River Hydraulics, IHE, Delft, Netherlands
49- Kellerhals, R., et .al.(1976), “Classificantion and Analysis of River Processes” .j.of Hyd, Div. ASCE, Vol. 102, pp.813-829.
50- Klingeman, P.C, and Bradely, J.B, (1976) , “Willamette River Basin stream Bank Stabilization By Natural Means”, Water Resourcers Research Institute, Oregon State University,corvallis, Oregon, 238 P.
51- Krishrapan, B.G., (1981), “Programming for Mobed- An Unsteady, Nonuniform, Mobile Boundary Flow Model”, Canada Center for Inland waters.
52- Lane, E.W., (1955), “The Importance & Fluvial Morphology In Hydraulic Engineering, In River Mechanics, VII, Ch.20,” Fort Collins, Colorado, USA.
53- Lagasse, P.F., Zevenbergen, L.W., Spitz, w.J., Thorne, C.R., (2004), “ Methodology for Predicting Channel Migration” Prepared for : National Cooperative Highway Research Program, Fort Collins, Colorado.
54- Leopold et al., (1965), "Fluvial Processes in Geomorphology", W.H Freeman and Company Sanfransico.
55- Linsley, R.K., (1972), “ Water Resources Engineering” , Mc Graw-Hill Book Co, U.S.A
56- Linsley, R.K., (1972),Hydrology For Engineers” , Mc Graw Hill Book Co. New York
57- Mangelsdrof, J., Scherumann, Weiss F.H, (1990) " River Morphology", Springer.
58- Malcha marg , (1978), "River Behaviour Management and Training", new Delhi
59- Olsen, B., (2004), “A Three Dimensional Numerical Model For Simulation & Sediment Movement, SSIIM Users Manual”, The Norwegian University & Sciences and Technology.
60- O.P.Srivihok, H.Tanaka, (2003), River Mouth Morphology Change Analysis by using Aerial photograph. Tohoku university, Japan
61- Panizza M. (1996), Environmental Geomorphology-Developments in earth surface processes 4, Elsevier.
62- Peter R. Thomas, (1991), Geological Maps and Sections For Civil Engineering, Blackie and Sons Ltd. London, UK.
63- Petersen M.S, (1986), River Engineering, Prentice-Hall
64- Petts G.E., Moller H. and Roux A.L., (1989), Historical Change Of Large Alluvial Rivers, John Wiley & Sons.
65- Przedwojski,(1995) ," River Training Techniques ",A.A.Balkema
66- Raudkivi,A.J. , (1976)," Loose Boundary Hydraulics ",2d ed., Pergamon Press
67- Rijn, L. C,Van. (1986) , Manual Sediment Transport Measurements, Delft Hydraulics Laboratory
68- Rijn, C.Van , (1993)," Principles of Sediment Transport in Rivers ,Estuaries and Coastal Seas" , Aqua, Amsterdam.
69- Richardson E.V., (1976), “Highways In The River Environment”, U.S Department & Transportation, USA.
70- Richardson, E.V., (1983), “ Highways In The River Environment, Hydraulic And Environmental Design Considerations” , Fort Collins, Colorado, U.S.A
71- Rosgen,Dave , (2004),"Applied River Morphology ", Hilton lee Silvey

72- Robert L. Wold , (1989), Landslides Loss Reduction: A Guide For State And Local Government, FEMA, 182, Washington.
73- Rosgen D., (1996),” Applied River Morphology”, Colorado, USA.
74- Rodi W., and Leschziner A., (1978) "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow" Journal of Hydraulic Division, Vol. 105, No. HY10.
75- Ruff, J.F.,et.al. (1976), “Remote Sensing of Mississipi River Characteristics” , J.of Water Ways and Harbors and Civil Eng.Div., ASCE, Vol.102, No.WW2, pp 189-202
76- R.W.Hemphill, M.E.Bramley,(1990),"Protection of River and Canal banks", Cambridge University Press
77- Schumm, S.A., (1968) , “River Adjustment to Altered Hydrologic Regime”, U.S.Geological Survey, Porfessional Paper, 548,65 pp.
78- Schumm,S.A. (1971) , “ Fluvial Geomorphology : The Historical Perspective” , Chapter 5.of River Mechanics Vol .1 , Fort Collins, Colorado
79- Schumm, S.A, (1984), “ Channel Morphology” , Symposium on River Meandering- June 1984, Colorado State University, Fort Collins, Colorado
80- Simons,D.B,(1971) “ River and Canal Morphology”, Fort Collins, Colorado
81- Simons,D.B, Senturk, F . (1992), Sediment Transport Technology, Book Crafters Inc, Chelsea, U.S.A
82- Shen, H.W,(1984), “ River and Related Problems ”, Symposium on River Meandering-june 1984, Colorado State-University , fort Collins,Colorado
83- Shen, H.W,(1971), “ River Mechanics, Vol I. and II ”, Colorado State-University , Fort Collins
84- Sharp,. J.J., (1981), “ Hydraulic Modeling”, Butterworth and Co. Publisher.
85- Stevens,M.A,et. al (1975), “ Non-Equilibrium River form” , J. of hud . Div. , ASCE. Vol . 101.pp : 557-566
86- Subramanya,K. , (1982)," Flow in Open Channel ",Vol.1,Tata McGraw-Hillbook Company
87- Thorn, C.R, (1987),” Sediment Transport In Gravel-Bed Rivers”, John Wiles and Sons, New York.
88- US Army Corps Of Engineers, (2003), “ HEC-6 Users Manual”, USA.
89- US Army Corps oF Engineers, (2003) ,” HEC-RAS Users Manual”, USA.
90- U.S.Army corps of Engineers (1981), “The Stream Bank Erosion Control Evaluation and Demonstration Act of (1974)”, Find Report to Congress
91- U.S. Department of Interior, (2003), " User Manual for GSTARS3.0", Colorado.
92- Varnes, D. J., (1978), Slope Movement: Type And Processes. In R. L. Schuster and R. J. Krizek (editors), Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., Special Report, 176, pp 11-33.
93- Viessman, J.R., (1972), “ Introduction to Hydrology” , Pergamon Press, New York.
94- Wolfert, H.P., (2001) “Geomorphologic Change and River Rehabilitation, Case Studies on Lowland Fluvial Systems in the Netherlands “, Alterra Green World Research, Wageningen.
95- www.ncche.olemiss.edu
96- Yang, C.T, (2003), “GSTARS 3.0, Users Manual” , USA.
97- Yang, C.T., (1996), “ Sediment Transport”, McGraw Hill Co.,USA.
98- Yafei JIA,SAM S.Y. WANG, (2001),CCHE2D,Technical Report No.NCCHE-TR-2001-1,National Center for Computational Hydrosience and Engineering,The University of Missisippi
99- Kumura , S.G. , (1998) , Hydrology and Water Resources Engineering Khana Publishers.

خواننده گرامی

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

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision

Guidline On The River Morphology Studies

No. 592

Office of Deputy for Strategic Supervision
Department of Technical Affairs
nezamfanni.ir

Ministry of Energy
Bureau of Engineering and Technical Criteria for Water and Wastewater
http://seso.moe.org.ir

2012

این نشریه

بـاعنوان «راهنمـای مطالعـات ریخـت‌شناسـی رودخانه‌ها» برای ارائه الگویی به منظور شناخت ابعاد مختلف رفتار رودخانه‌ها و همچنین انجـام مطالعـات آن تهیه شده است. در کلیه طرح‌های رودخانـه‌ای از جمله طرح‌های ساماندهی، بهـسازی و زیباسـازی و همچنین طرح‌هایی مانند سازه‌ها و ابنیه‌های عرضی و یا طولی که به‌نحوی با رودخانه‌هـا تعامـل خواهـد داشت، انجام مطالعات ریخت‌شناسی برای پیش‌بینی تاثیر متقابل سازه مورد نظر و رودخانه لازم می‌باشد. این نشریه راهنمـایی بـرای تبیـین ابعـاد مختلـف و روش‌های مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌باشد که با توجه به کمبود منابع فارسی، مـی‌توانـد مـورد استفاده طـرح‌هـای مطالعـاتی، پژوهـشی و اجرایـی مرتبط با رودخانه‌ها قرار گیرد.