

جمهوری اسلامی ایران
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه

نشریه شماره ۵۹۰

وزارت نیرو
دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا
<http://seso.moe.org.ir>

معاونت نظارت راهبردی
امور نظام فنی
nezamfanni.ir



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور

شماره: ۱۰۰/۶۵۶۳۰	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ: ۱۳۹۱/۰۸/۱۴	
موضوع: راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه	
به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی - مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۹۰ امور نظام فنی، با عنوان «راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود. رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۱ اجباری است.  بهروز مرادی	

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

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

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

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
 - ۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
 - 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 می شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی

Email: info@nezamfanni.ir

web: nezamfanni.ir

بسمه تعالی

پیشگفتار

بار رسوبی از جمله عوامل مهم تاثیرگذار در عملکرد هیدرولیکی و ساختار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها تلقی می‌شود. به‌علاوه اقدامات مهندسی و بهره‌برداری از منابع آب رودخانه‌ها در گروی آگاهی از کمیت بار رسوبی آن می‌باشد. از این‌رو استفاده از روش‌های مناسب برای محاسبه رسوب از دیرباز مورد توجه متخصصین مسایل رودخانه‌ای قرار گرفته و با توجه به تنوع طرح‌های مهندسی و کاربردهای میدانی، آگاهی از شیوه‌های کارآمد برای هریک از روش‌های محاسبه بار معلق و بار بستر را الزام آور نموده است. از طرفی روش‌های محاسباتی در مهندسی رسوب به‌دلیل تنوع طبیعت رودخانه‌ها از پیچیدگی و ظرافت خاصی برخوردار است. این واقعیت نگرشی فراگیر به مقوله‌های حاکم بر فرآیند انتقال رسوب را در انتخاب روش‌های مناسب محاسباتی طلب می‌نماید. در تنظیم نشریه چنین ملاحظات مدنظر قرار گرفته و در بخش‌های مختلف آن ضمن معرفی دیدگاه‌های نظری، روش‌های محاسباتی با بهره‌گیری از منابع تخصصی و تجارب موجود به‌گونه‌ای تنظیم گردیده که استفاده کنندگان با تکیه بر الگوهای محاسباتی ارائه شده، روش مناسب را در تعیین کمیت رسوب رودخانه اعم از باربستر، بارمعلق و بارکل انتخاب نمایند.

با توجه به اهمیت بحث فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه نشریه «راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه» 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

پاییز ۱۳۹۱

تهیه و کنترل راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه (نشریه شماره ۵۹۰)

مجری: معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مؤلف اصلی: فیروز بهادری خسروشاهی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دکترای عمران - آب

اعضای گروه تهیه کننده:

یوسفعلی احمدی	شرکت مهندسان مشاور آب و عمران فراز اندیش	فوق لیسانس مهندسی محیط زیست
حسن نقوی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	فوق لیسانس منابع آب
محمدحسین حامدی	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای عمران - هیدرولیک
فاطمه بهادری خسروشاهی	شرکت مهندسان مشاور آب و عمران فراز اندیش	فوق لیسانس مهندسی محیط زیست
فیروز بهادری خسروشاهی	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای عمران - آب
مجتبی شوریان	شرکت مهندسین مشاور سازه پردازی ایران	دکترای منابع آب

اعضای گروه نظارت:

محمد ابراهیم بنی حبیب	دانشگاه تهران	دکترای عمران - آب
کیاندرخت کباری	کارشناس آزاد	لیسانس مهندسی راه و ساختمان
غلامرضا نیک صفت	شرکت آب پویش گران نوین	فوق لیسانس مهندسی منابع آب

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

محمود افسوس	شرکت مهندسین مشاور سازه پردازی ایران	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
محمد ابراهیم بنی حبیب	دانشگاه تهران	دکترای عمران - آب
محمدحسن چیتی	شرکت مهندسین مشاور ساز آب پردازان	فوق لیسانس مهندسی سازه های آبی
فریدون خزاعی	انجمن شرکت های ساختمانی	فوق لیسانس 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	دکترای مهندسی آب
حسن سید سراجی	دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور	دکترای مکانیک سیالات
حسام فولادفر	موسسه تحقیقات آب	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
سید کمال الدین نوری	وزارت کشور	لیسانس مهندسی کشاورزی
جبار وطن فدا	وزارت نیرو	فوق لیسانس مهندسی سازه های هیدرولیکی

اعضای گروه هدایت و راهبردی پروژه:

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

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۳	فصل اول - چگونگی جمع‌آوری آمار و اطلاعات پایه
۵	۱-۱- کلیات
۵	۱-۲- اهمیت تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها
۶	۱-۳- اثرهای انتقال رسوب بر رفتار رودخانه و عملکرد مخازن سدها
۷	۱-۴- منابع تغذیه رسوبی رودخانه‌ها
۸	۱-۵- داده‌های آماری آبدهی، غلظت، باریستر و مواد بستر
۱۱	۱-۶- بازدید و بررسی ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی و محدوده مطالعاتی
۱۳	۱-۷- گردآوری اطلاعات پایه مورد نیاز
۱۴	۱-۷-۱- اطلاعات هواشناسی
۱۴	۱-۷-۲- داده‌های هیدرولوژیکی
۱۴	۱-۷-۳- مشخصات هندسی رودخانه
۱۴	۱-۷-۴- کاربری اراضی و پوشش گیاهی
۱۴	۱-۷-۵- اطلاعات مربوط به نوع خاک و خصوصیات مکانیکی
۱۵	۱-۸- گزارش‌ها، نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای
۱۷	فصل دوم - مروری بر عوامل موثر بر انتقال رسوب
۱۹	۲-۱- کلیات
۱۹	۲-۲- حوضه آبریز و خصوصیات فیزیوگرافیک آن
۱۹	۲-۳- هواشناسی و هیدرولوژی
۲۰	۲-۴- ریخت‌شناسی
۲۱	۲-۵- دانه‌بندی و لایه‌بندی مواد رسوبی بستر و کناره‌ها
۲۱	۲-۶- هیدرولیک جریان
۲۳	۲-۷- زمین‌شناسی
۲۴	۲-۸- کاربری اراضی، پوشش گیاهی و نوع خاک
۲۴	۲-۹- سازه‌های آبی و اقدامات حفاظتی
۲۵	۲-۱۰- برداشت مصالح
۲۷	فصل سوم- طبقه‌بندی انواع فرسایش و انتقال رسوب در رودخانه‌ها
۲۹	۳-۱- کلیات

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲۹	۳-۲- شکل‌های مختلف انتقال رسوب در رودخانه‌ها
۳۰	۳-۲-۱- بار معلق
۳۱	۳-۲-۲- باربستر
۳۳	۳-۲-۳- بار مواد بستر
۳۴	۳-۲-۴- بارکل
۳۴	۳-۲-۵- جریان‌های باغلظت بالا
۳۵	۳-۳- انواع فرسایش
۳۵	۳-۳-۱- فرسایش موضعی
۳۶	۳-۳-۲- فرسایش عمومی
۳۷	۳-۳-۳- فرسایش کناره‌ای
۳۹	فصل چهارم - روش‌های محاسبه بار معلق
۴۱	۴-۱- کلیات
۴۱	۴-۲- محاسبه بار معلق در شرایط وجود آمار
۴۲	۴-۲-۱- روش منحنی سنج رسوب
۵۵	۴-۲-۲- روش منحنی بده کلاسه
۵۸	۴-۳- محاسبه بار معلق در شرایط عدم وجود آمار رسوب
۵۸	۴-۳-۱- روش ایستگاه مبنا
۶۳	۴-۳-۲- روش منطقه‌ای محاسبه بار معلق رسوب
۶۴	۴-۳-۳- روش تجربی
۶۶	۴-۳-۴- استفاده از معادلات انتقال رسوب معلق (روش تتوریک)
۷۸	۴-۳-۵- کاربردی کردن معادلات تتوریک
۸۲	۴-۴- محاسبه بار معلق در شرایط عدم وجود آمار
۸۲	۴-۴-۱- روش هیدرولوژی
۸۴	۴-۴-۲- روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک
۸۹	فصل پنجم - روش‌های محاسبه باربستر
۹۱	۵-۱- کلیات
۹۱	۵-۲- تعیین باربستر در شرایط وجود آمار
۹۱	۵-۲-۱- بررسی آمار بده جریان و بده رسوب بستر

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۹۱	۵-۲-۲- تعیین رابطه نمایی و ترسیم منحنی سنجهرسوب
۹۲	۵-۲-۳- تعیین باربستر روزانه، ماهانه و سالانه
۹۴	۵-۳- تعیین باربستر از بار معلق
۹۶	۵-۴- تعیین باربستر از معادلات تئوریک (با فرض وجود آمار آبدهی)
۹۷	۵-۴-۱- بررسی معادلات بار بستر و انتخاب معادلات مناسب
۱۰۳	۵-۵- تعیین بار بستر در شرایط عدم وجود آمار (روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک)
۱۰۵	فصل ششم - تعیین بارکل رسوب یا بارمواد بستر در رودخانه‌ها
۱۰۷	۶-۱- کلیات
۱۰۷	۶-۲- تعیین بارکل براساس آمار موجود
۱۰۸	۶-۳- تعیین بارکل براساس آمار رسوب معلق
۱۰۹	۶-۴- تعیین بارکل با استفاده از معادلات تئوریک (با وجود آمار آبدهی)
۱۰۹	۶-۴-۱- بررسی آمار آبدهی و انتخاب دوره آماری
۱۰۹	۶-۴-۲- بررسی معادلات انتقال رسوب و انتخاب معادله مناسب
۱۱۴	۶-۴-۳- اندازه‌گیری‌های میدانی
۱۱۵	۶-۵- تعیین بارکل(بارمواد بستر) با استفاده از مدل ریاضی فرسایش و رسوب
۱۱۶	۶-۶- تعیین بارکل در شرایط عدم وجود آمار (روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک)
۱۱۷	فصل هفتم - روش‌های برآورد رسوب‌گذاری در مخازن سدها
۱۱۹	۷-۱- کلیات
۱۲۱	فصل هشتم - توصیه روش‌های محاسبه باربستر و بار معلق و بارکل برای انواع رودخانه‌ها
۱۲۳	۸-۱- کلیات
۱۲۳	۸-۱-۱- بررسی انواع رودخانه‌ها از دیدگاه انتقال رسوب
۱۲۳	۸-۱-۲- روش‌های مناسب محاسبه بار بستر و بارکل در رودخانه‌های مختلف
۱۲۴	۸-۱-۳- روش‌های مناسب محاسبه بار معلق در رودخانه‌های مختلف
۱۲۷	پیوست
۱۵۷	منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۶	شکل ۱-۱- نمونه‌هایی از عوارض رسوبی تشکیل شده در بستر رودخانه
۶	شکل ۲-۱- نمایش نحوه انباشت رسوب در مخزن و وقوع کف‌کنی در بازه‌های پایین‌دست
۷	شکل ۳-۱- تاثیر اندازه دانه‌های رسوب حمل شده در شکل مقطع جریان
۱۰	شکل ۴-۱- نمونه‌ای از روند تغییرات زمانی غلظت مواد رسوبی معلق
۱۰	شکل ۵-۱- نمونه‌هایی از دستگاه‌های باربستر در رودخانه‌ها
۱۰	شکل ۶-۱- نمونه‌ای از حرکت نوسانی باربستر در رودخانه‌ها
۱۱	شکل ۷-۱- نمونه‌ای از نحوه توزیع دانه‌بندی مواد بستر در رودخانه‌ها
۱۲	شکل ۸-۱- اندازه‌گیری هم‌زمان بده جریان، غلظت رسوب و دمای آب
۲۰	شکل ۱-۲- هیدروگراف جریان و نمودار تغییرات غلظت متأثر از فرسایش خاک
۲۲	شکل ۲-۲- نحوه توزیع سرعت جریان و تاثیر آن در انتقال بار معلق و باربستر
۲۲	شکل ۳-۲- ناحیه‌بندی نحوه انتقال رسوب براساس مشخصه‌های هیدرولیک جریان و اندازه دانه
۲۳	شکل ۴-۲- شکل‌های مختلف انتقال رسوب در مسیر رودخانه‌ها
۲۵	شکل ۵-۲- تاثیرپذیری رژیم رسوبی رودخانه از سد مخزنی
۲۶	شکل ۶-۲- چگونگی بروز آثار برداشت مصالح رودخانه‌ای از دیدگاه انتقال رسوب
۲۹	شکل ۱-۳- شکل‌های مختلف انتقال مواد رسوبی در رودخانه‌ها
۳۰	شکل ۲-۳- نحوه معلق شدن دانه‌های رسوب موجود در بستر در اثر پدیده تلاطم
۳۲	شکل ۳-۳- نحوه جابجایی مواد رسوبی در بستر رودخانه و مفهوم لایه باربستر
۳۲	شکل ۴-۳- محدوده بار بستر براساس ناحیه‌بندی باگنولد
۳۳	شکل ۵-۳- نمونه‌ای از شکل‌گیری تلماسه‌ها ناشی از پدیده باربستر در رودخانه‌ها
۳۴	شکل ۶-۳- نمودار تغییرات بار موادبستر برحسب سرعت جریان
۳۶	شکل ۷-۳- فرسایش عمومی در پایین‌دست سد مخزنی ناشی از تله‌اندازی رسوب در بالادست و افزایش ظرفیت انتقال در پایین‌دست
۳۷	شکل ۸-۳- نمونه‌ای از فرسایش کناره‌ای و جابجایی عرضی در رودخانه‌ها
۴۵	شکل ۱-۴- منحنی سنجه رسوب و معادله نمایی نظیر و خطوط معرف محدوده تغییرات غلظت (رودخانه شاهرود - ایستگاه لوشان)
۴۵	شکل ۲-۴- نمونه‌ای از برازش منحنی سنجه رسوب برای دو محدوده بده جریان متفاوت (رودخانه قزل اوزن - ایستگاه گیلوان)
۴۶	شکل ۳-۴- نمونه‌ای از برازش منحنی سنجه رسوب با روش تعدیل FAO و مقایسه آن با روش معادله نمایی یک منحنی و دو منحنی (رودخانه ماربره ایستگاه دره‌تخت)
۵۰	شکل ۴-۴- نمونه‌ای از روند تغییرات آبدهی روزانه (Q_d) رودخانه‌ها یا هیدروگراف جریان سالیانه (شاهرود، ایستگاه لوشان - سال آبی ۱۳۴۸-۴۹)
۵۰	شکل ۵-۴- نمونه‌ای از روند تغییرات رسوب‌دهی روزانه (Q_s) رودخانه‌ها یا هیدروگراف رسوب سالیانه (شاهرود، ایستگاه لوشان - سال آبی ۱۳۴۸-۴۹)

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۵۱	شکل ۴-۶- روند تغییرات رسوب‌دهی ماهانه (شاهرود، ایستگاه لوشان - سال آبی ۴۹-۱۳۴۸)
۵۲	شکل ۴-۷- نمونه‌ای از روند تغییرات زمانی بارروسوبی معلق در ماه‌های مختلف سال (شاهرود، ایستگاه لوشان - سال آبی ۴۹-۱۳۴۸)
۵۴	شکل ۴-۸- نمونه‌ای از نمودار تغییرات بار معلق سالیانه یا رژیم رسوبی و متوسط دوره آماری در رودخانه‌ها
۵۴	(رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان دوره آماری ۲۰ ساله)
۵۴	شکل ۴-۹- نحوه نمایش روند تغییرات متوسط بار معلق ماهانه یا رژیم رسوب‌دهی ماهیانه و مقادیر حداکثر و حداقل رودخانه در دوره آماری (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷)
۵۴	شکل ۴-۱۰- نمونه‌ای از منحنی دوام جریان (بده کلاسه) رودخانه مورد استفاده در تعیین متوسط بار رسوبی سالیانه (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان، دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷)
۵۶	شکل ۴-۱۱- منحنی‌های دوام جریان ایستگاه مبنا و ایستگاه فاقد آمار رسوب برای تعیین متوسط رسوب سالیانه (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان (مبنا) و ایستگاه رجایی دشت (دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷)
۶۰	شکل ۴-۱۲- منحنی‌های دوام جریان رسوب در ایستگاه مبنا و بازسازی شده برای ایستگاه فاقد آمار (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان (مبنا) و ایستگاه رجایی دشت (دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷)
۶۱	شکل ۴-۱۳- نمودار و رابطه همبستگی منطقه‌ای مساحت و تناژ رسوب سالیانه (رودخانه‌های منطقه شاهرود - استان سمنان) ۶۳
۶۳	شکل ۴-۱۴- نمودار و رابطه همبستگی منطقه‌ای مساحت و رسوب‌دهی ویژه سالیانه (رودخانه‌های منطقه شاهرود - استان سمنان) ۶۴
۶۴	شکل ۴-۱۵- نمودار تغییرات غلظت نسبی مواد معلق برحسب عمق نسبی در رودخانه‌ها براساس معادله راس و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی
۶۹	شکل ۴-۱۶- نمودار رابی برای تعیین سرعت سقوط دانه‌های رسوب
۷۱	شکل ۴-۱۷- منحنی‌های بروکس برای تعیین غلظت بار معلق در رودخانه‌ها
۷۱	شکل ۴-۱۸- نمودار تغییرات Z_1 برحسب Z در روش بروکس
۷۲	شکل ۴-۱۹- منحنی‌های کالینسک برای تعیین پارامتر P_L در معادله غلظت
۷۳	شکل ۴-۲۰- تابع I_1 بر حسب پارامتر ξ_a و مقادیر مختلف Z_2
۷۴	شکل ۴-۲۱- تابع I_2 بر حسب ξ مقادیر مختلف Z_2
۷۵	شکل ۴-۲۲- فاکتور تصحیح X بر حسب زبری نسبی بستر δ/k_s در روش انشتین
۷۶	شکل ۴-۲۳- منحنی‌های تابع I_1 بر حسب پارامتر A برای مقادیر مختلف Z در روش انشتین
۷۷	شکل ۴-۲۴- منحنی‌های تابع I_2 بر حسب پارامتر A برای مقادیر مختلف Z در روش انشتین
۷۸	شکل ۴-۲۵- نمونه‌ای از اندازه‌گیری غلظت و تعیین غلظت مبنا (C_a) در رودخانه‌ها - رودخانه تیزا (Tisza River of Danube branch) از شعبات دانوب
۷۹	شکل ۴-۲۶- نمودار شیلدز برای تعیین τ_{cr} برحسب قطر دانه‌ها - d
۸۰	شکل ۴-۲۷- نمونه‌ای از الگوی دانه‌بندی مواد بستر در رودخانه‌ها
۸۰	شکل ۴-۲۸- نمونه‌ای از توزیع دانه‌بندی مواد بستر و مشخص کردن کلاس‌های مختلف دانه‌بندی
۸۱	شکل ۴-۲۹- نمونه‌ای از مقطع جریان در رودخانه و مشخصات هندسی آن مورد استفاده در تعیین بار رسوبی
۸۱	شکل ۴-۳۰- نمونه‌ای از منحنی‌های A, P, R بر حسب تراز آب (اشل) در رودخانه، مورد استفاده در تعیین بار رسوبی

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۸۳	شکل ۳۱-۴- نمودار لانگبین- شوم برای تعیین بار رسوبی معلق سالیانه
۸۵	شکل ۳۲-۴- نمونه‌ای از منحنی‌های تیپ SCS برای توزیع رگبارها
۸۵	شکل ۳۳-۴- نمونه‌ای از هیتوگرام رگبار دو ساعته، الگوی توزیع بارندگی
۸۶	شکل ۳۴-۴- نمونه‌ای از منحنی‌های همباران و تعیین بارش متوسط حوضه برای رگبارها
۸۷	شکل ۳۵-۴- هیدروگراف واحد بی‌بعد SCS
۹۲	شکل ۱-۵- منحنی سنجه باربستر (رودخانه کارون ایستگاه ملاثانی)
۹۵	شکل ۲-۵- نمودار تجربی نسبت باربستر به بار معلق در رودخانه‌ها
۹۶	شکل ۳-۵- روند نمای مراحل مختلف تعیین باربستر سالیانه از بار معلق سالیانه
۹۷	شکل ۴-۵- نمودار تغییرات τ_c برحسب d در رابطه دوبویز
۹۸	شکل ۵-۵- نمودار تعیین τ_c برحسب d در روش شیلدرز
۹۹	شکل ۶-۵- نمودار کالینسک برای تعیین بار بستر
۱۰۱	شکل ۷-۵- نمودار تابع بار بستر انشتین - براون برحسب عدد شیلدرز
۱۰۱	شکل ۸-۵- نمونه‌ای از مقطع جریان رودخانه در ایستگاه آب‌سنجی مورد استفاده در تعیین بار رسوبی
۱۱۲	شکل ۱-۶- نمودار لارسن برای تعیین تابع $f(\frac{U_*}{w_i})$
۱۱۳	شکل ۲-۶- نمودار تعیین ضریب تصحیح e_b در روش باگنولد
۱۱۳	شکل ۳-۶- نمودار تعیین پارامتر α در روش باگنولد
۱۳۰	شکل پ.۱- نمودار توزیع عمقی غلظت و غلظت متوسط در روش راس
۱۳۴	شکل پ.۲- هیدروگراف واحد شش ساعته برای حوضه‌آبریز مورد نظر
۱۳۵	شکل پ.۳- الگوی توزیع بارش شش ساعته یا هیتوگرام رگبار در حوضه‌آبریز مورد نظر
۱۳۸	شکل پ.۴- هیدروگراف سیلاب به دست آمده از روش هیدروگراف واحد برای دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه‌آبریز مورد نظر
۱۳۹	شکل پ.۵- مقطع جریان رودخانه برای تعیین بار رسوبی معلق
۱۴۰	شکل پ.۶- منحنی سنجه‌رسوب و معادله‌نمایی آن برای تعیین بار معلق به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌ها
۱۴۸	شکل پ.۷- منحنی سنجه‌رسوب و معادله‌نمایی آن برای تعیین باربستر به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌ها
۱۵۵	شکل پ.۸- منحنی سنجه‌رسوب و معادله‌نمایی آن برای تعیین بارکل به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌ها

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۳	جدول ۱-۱- بررسی وضعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی موجود و ارائه پیشنهادات
۲۱	جدول ۱-۲- چگونگی تاثیرپذیری بار رسوبی حمل شده از خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها
۳۱	جدول ۱-۳- معیار معلق شدن دانه‌های رسوب در رودخانه‌ها براساس نظریات محققین مختلف
۴۳	جدول ۴-۱- نمونه‌ای از ثبت هم‌زمان بده جریان روزانه (Q_d)، غلظت (C) و تناژ رسوب روزانه (Q_s) در یک ایستگاه آب‌سنجی
۴۸	جدول ۴-۲- مقادیر آبدی روزانه (Q_d) بر حسب مترمکعب بر ثانیه برای یک سال آبی، مورد استفاده در تعیین تناژ رسوب روزانه
۴۹	جدول ۴-۳- مقادیر بار رسوبی روزانه (1000 ton/day) برای یک سال آبی براساس معادله نمایی رسوب
۵۱	جدول ۴-۴- مقادیر بار رسوبی ماهانه (1000 ton) برای یک سال آبی براساس جمع بار رسوب روزانه
۵۳	جدول ۴-۵- نمونه‌ای از تنظیم جدول مقادیر رسوب ماهانه و سالیانه (۱۰۰۰ تن) برای دوره آماری مورد نظر
۵۵	جدول ۴-۶- تنظیم جدول محاسباتی برای ترسیم منحنی دوام جریان
۵۷	جدول ۴-۷- تشکیل جدول محاسباتی برای تعیین متوسط رسوب معلق سالیانه به‌روش منحنی دوام جریان
۶۲	جدول ۴-۸- مراحل محاسباتی تعیین متوسط بار رسوبی سالیانه ایستگاه فاقد آمار رسوب براساس ایستگاه مبنا
۶۴	جدول ۴-۹- مقادیر a' و n در معادله نمایی رسوب برای پوشش‌های گیاهی مختلف
۸۶	جدول ۴-۱۰- نسبت‌های هیدروگراف بدون بعد SCS
۱۱۶	جدول ۶-۱- مواردی از مدل‌های ریاضی متداول در تعیین باررسوبی رودخانه‌ها
۱۲۳	جدول ۸-۱- روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین باریستر در رودخانه‌های کوهستانی
۱۲۴	جدول ۸-۲- روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین باریستر در رودخانه‌های شریانی
۱۲۴	جدول ۸-۳- روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین بار مواد بستر یا بارکل در رودخانه‌ها
۱۲۵	جدول ۸-۴- روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین بار معلق در رودخانه‌ها
۱۲۹	جدول پ.۱- داده‌های مورد نیاز برای تعیین بار معلق رودخانه
۱۳۰	جدول پ.۲- تعیین غلظت متوسط در روش راس
۱۳۲	جدول پ.۳- مقایسه مقادیر بار معلق روزانه به دست آمده از روش‌های مختلف
۱۳۳	جدول پ.۴- خصوصیات هیدرولیک جریان، دانه‌بندی و مشخصه‌های فیزیکی آب در مثال کاربردی ۲
۱۳۴	جدول پ.۵- داده‌های مورد نیاز برای تعیین بار معلق رودخانه در شرایط عدم وجود داده‌های آماری بده جریان
۱۳۴	جدول پ.۶- مشخصات فیزیوگرافی و پارامترهای هیدروگراف واحد حوضه آبریز مورد نظر
۱۳۵	جدول پ.۷- مقادیر بارندگی برای دوره بازگشت‌های مختلف برای بارش شش ساعته
۱۳۶	جدول پ.۸- ضریب جریان برای سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف
۱۳۷	جدول پ.۹- نحوه استخراج هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف (دو سال) برای حوضه آبریز موردنظر
۱۳۷	جدول پ.۱۰- مقادیر بده جریان سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف برای تعیین بار رسوبی (m^3/s)
۱۳۹	جدول پ.۱۱- مشخصات هیدرولیکی رودخانه برای محاسبه رسوب معلق
۱۴۰	جدول پ.۱۲- محاسبه غلظت مبنا، C_a ، به روش وان‌راین
۱۴۰	جدول پ.۱۳- محاسبه رسوب معلق روزانه رودخانه به روش بروکس برای بده‌های مختلف جریان
۱۴۱	جدول پ.۱۴- تعیین بار رسوبی معلق به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول پ.۱۵- جدول داده‌های مورد نیاز برای تعیین بار معلق رودخانه	۱۴۳
جدول پ.۱۶- مقایسه مقادیر باربستر محاسبه شده از معادلات مختلف با مقدار مشاهده شده	۱۴۵
جدول پ.۱۷- معادلات مناسب توصیه شده برای تعیین باربستر	۱۴۶
جدول پ.۱۸- داده‌های مورد نیاز برای تعیین باربستر رودخانه در شرایط عدم وجود آمار آینده	۱۴۶
جدول پ.۱۹- مشخصات فیزیوگرافی و پارامترهای هیدروگراف واحد حوضه آبریز مورد نظر	۱۴۶
جدول پ.۲۰- مشخصات هیدرولیکی رودخانه برای محاسبه باربستر (برگرفته از مثال کاربردی ۳)	۱۴۷
جدول پ.۲۱- محاسبه باربستر روزانه رودخانه به روش MPM برای بده‌های مختلف جریان	۱۴۷
جدول پ.۲۲- تعیین باربستر به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف	۱۴۸
جدول پ.۲۳- جدول داده‌های مورد نیاز برای تعیین بارکل رودخانه	۱۴۹
جدول پ.۲۴- مقایسه مقادیر بارکل محاسبه شده از معادلات مختلف با مقدار مشاهده شده	۱۵۲
جدول پ. ۲۵- معادلات مناسب توصیه شده برای تعیین بارکل	۱۵۳
جدول پ.۲۶- داده‌های مورد نیاز برای تعیین بارکل رودخانه در شرایط عدم وجود آمار آینده	۱۵۳
جدول پ.۲۷- مشخصات فیزیوگرافی و پارامترهای هیدروگراف واحد حوضه آبریز مورد نظر	۱۵۳
جدول پ.۲۸- مشخصات هیدرولیکی رودخانه برای محاسبه بارکل (برگرفته از مثال کاربردی ۳)	۱۵۴
جدول پ.۲۹- محاسبه بارکل روزانه رودخانه به روش انگلند- هانسن برای بده‌های مختلف جریان	۱۵۵
جدول پ.۳۰- تعیین بار رسوبی کل به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف	۱۵۶

مقدمه

تعیین مقدار رسوب حمل شده توسط رودخانه‌ها از جنبه‌های مختلف دارای اهمیت است. در طرح‌های مهندسی با هدف بهره‌برداری از منابع آب رودخانه نظیر تاسیسات تنظیم و انحراف جریان، سدهای مخزنی و ایستگاه‌های پمپاژ، بار رسوبی رودخانه از جمله عوامل مهم و تاثیرگذار در تعیین مشخصه‌های هندسی سازه و عمر مفید آنها تلقی می‌شود. در ساماندهی رودخانه‌ها که به منظور مهار فرسایش و رسوب‌گذاری و یا تثبیت بستر و دفع سیلاب انجام می‌گیرد آگاهی از میزان رسوب حمل شده توسط رودخانه و تاثیرپذیری آن از اقدامات حفاظتی، ضروری می‌باشد. به‌علاوه در مواردی که اهداف کشتیرانی در رودخانه مد نظر است برای انجام عملیات لایروبی ضروری است مقدار رسوب حمل شده توسط رودخانه پیشاپیش مشخص گردد. از طرفی رودخانه‌ها منبع مناسبی برای تامین مصالح مورد نیاز طرح‌های عمرانی قلمداد شده و برداشت شن و ماسه از دیرباز در این عرصه متداول بوده است. همچنین موارد عدیده‌ای از طراحی تاسیسات انتقال آب، شبکه‌های آبیاری، حوضچه‌های ترسیب، تصفیه‌خانه‌های آب و نظایر آن‌را می‌توان بر شمرده که همگی با مساله رسوب رودخانه‌ها ارتباط نزدیک دارند. به‌لحاظ اهمیت و نقش پدیده انتقال رسوب در عرصه‌های مختلف مهندسی تعیین کمیت بار رسوبی از دیرباز مورد توجه متخصصین مسایل رودخانه‌ای قرار گرفته است. براساس بررسی‌های انجام شده تاکنون بیش از سی معادله انتقال رسوب توسط محققین مختلف ارائه گردیده لیکن به‌لحاظ پیچیدگی‌های حاکم بر فرآیند انتقال، امکان معرفی یک معادله واحد جهانی برای تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها میسر نبوده است [۲۵]. بررسی پیشینه مطالعات بیانگر آن است که تا قبل از ۱۹۳۰ توجه اصلی در عرصه رسوب به ارائه معادلات برای تعیین بار بستر^۱ معطوف بوده است [۲۲]. تعیین بار معلق^۲ و ارائه روابط محاسباتی آن نیز به دهه‌های سی و چهل میلادی معطوف می‌گردد. در این مرحله همچنین توسعه تجهیزات اندازه‌گیری بار معلق و باریستر به‌عنوان راهکار موثر در تعیین کمیت رسوب و سنجش اعتبار معادلات انتقال را، می‌توان عنوان نمود [۲۲]. با فرا رسیدن دهه پنجاه میلادی نظر متخصصین به ارائه روش‌هایی برای تعیین بارکل^۳، معطوف و تا دهه هفتاد معادلات و راهکارهای مناسبی فراهم گردید [۲۵]. دهه هشتاد را می‌توان سرآغاز تحولی بزرگ در عرصه مطالعه و تعیین رسوب رودخانه‌ها قلمداد نمود [۲۷]. در این دوره با ورود رایانه به حوزه مطالعات و به تبع آن توسعه سریع مدل‌های کامپیوتری بررسی فرآیند انتقال و تعیین کمیت رسوب حمل شده شتاب بیش‌تری به‌خود گرفت و امکان تحلیل عملکرد رودخانه‌ها در شرایط طبیعی و چگونگی تاثیرپذیری آن از طرح‌های مختلف مهندسی تحقق یافت. امروزه با توسعه امکانات نرم‌افزاری و بهره‌گیری از فناوری‌های جدید، انجام سنجش‌های میدانی، بررسی‌های دقیق آزمایشگاهی و پردازش سریع اطلاعات، شناخت هرچه بهتر فرآیند انتقال رسوب فراهم گردیده و با تکیه بر تجارب ارزنده دهه‌های اخیر زمینه لازم برای معرفی روش‌های مناسب محاسبه بار رسوبی رودخانه‌ها محقق شده است [۱۱، ۲۶].

1- Bed Load
2- Suspended Load
3- Total Load

- هدف

هدف از تدوین نشریه «راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر» معرفی روش‌های مختلف محاسبه رسوب و ارائه راهکارهای مناسب برای تعیین بار معلق، باربستر و بارکل حمل شده توسط رودخانه‌ها می‌باشد. در این راستا پرداختن به شیوه‌های ارزیابی بار رسوبی با تکیه بر داده‌های آماری و بهره‌گیری از معادلات انتقال در تعیین نرخ رسوب حمل شده مد نظر قرار گرفته است.

- دامنه کاربرد

در این راهنما مجموعه‌ای از روش‌ها و معادلات متداول در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها ارائه گردیده و ویژگی‌ها و محدوده کاربرد آنها برای محاسبه بار معلق، باربستر و بارکل معرفی شده است. در عین حال الگوهای ارائه شده برای مواردی نظیر جریان‌های گلی^۱ جریان‌های غلیظ^۲ و همچنین رودخانه‌های جزرومدی معتبر نبوده و پیچیدگی‌ها و مکانیسم‌های حاکم بر آنها طبعاً نشریه تخصصی خود را طلب می‌کند. روش‌های برآورد رسوب‌گذاری در مخازن سدها نیز به‌طور مجمل معرفی گردیده و شرح تفصیلی آن به نشریه روش‌های برآورد رسوب‌گذاری در مخازن سدها موکول شده است. کاربرد مدل‌های ریاضی از دیگر مواردی است که بخشی از روش‌های محاسبه رسوب رودخانه‌ها را در این راهنما به‌خود اختصاص داده است. لیکن با توجه به تنوع و گستردگی موضوع، پرداختن به جزییات آن نیازمند انجام مطالعات جداگانه و تدوین راهنمای مستقلی می‌باشد. استفاده از این نشریه برای دست‌اندرکاران مطالعات و اجرای طرح‌های مهندسی رودخانه، کارشناسان طراح در عرصه سازه‌های هیدرولیکی و شبکه‌های آبیاری و همچنین متولیان برداشت مصالح رودخانه‌ای و مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب رودخانه‌ها، مفید می‌باشد.

فصل ۱

چگونگی جمع آوری آمار و اطلاعات

پایه

۱-۱- کلیات

تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها مستلزم تهیه داده‌های آماری و انجام اندازه‌گیری‌های میدانی و تهیه اطلاعات پایه‌ای مرتبط با سامانه رودخانه‌ای و حوضه آبریز آن می‌باشد. به لحاظ اهمیت و نقش ثبت داده‌های آماری در بررسی و شناخت پدیده انتقال رسوب استفاده از روش‌های تجربی از اوایل قرن نوزدهم میلادی متداول گردید و برای اولین بار اندازه‌گیری بار معلق توسط گراس و سابورس^۱ در ۱۸۰۸ انجام گرفت [۱]. با توسعه مبانی نظری و ضرورت استفاده از روش‌های علمی در ساماندهی رودخانه‌ها و طراحی تاسیسات متنوع هیدرولیکی با هدف مهار و بهره‌برداری از منابع آب رودخانه‌ها انجام سنجش‌های میدانی فراگیر با هدف تعیین بده جریان، بار معلق، بار بستر و مشخصات مواد رسوبی با استفاده از ابزارهای تخصصی، به‌ویژه بین سال‌های ۱۹۲۵ تا ۱۹۴۰، بسط و گسترش فراوانی یافت [۲۲]. از دهه هفتاد با فراگیر شدن تجهیزات الکترونیکی و ورود سامانه‌های ماهواره‌ای به عرصه داده‌سنجی، ثبت تغییر و تحولات رودخانه‌ها و شیوه تعیین کمیت رسوب حمل شده با تکیه بر داده‌های آماری از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار گردید. در این فصل ضمن اشاره مجمل به اهمیت تعیین بار رسوبی، پدیده انتقال رسوب و منابع تغذیه رسوبی، که به‌نوعی با راهکارهای اندازه‌گیری رسوب رودخانه‌ها مرتبط می‌باشد، به جنبه‌های مختلف جمع‌آوری آمار و اطلاعات پایه مورد نیاز در محاسبه رسوب رودخانه‌ها پرداخته می‌شود.

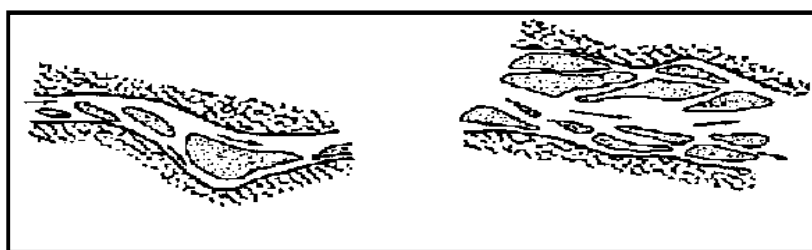
۱-۲- اهمیت تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها

رسوب حمل شده توسط جریان آب عامل مهمی در شکل‌گیری ساختار هندسی و خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها تلقی می‌شود. هرگونه کاهش و یا افزایش بار رسوبی رودخانه پیامدهای مختلفی از جمله وقوع پدیده کف‌کنی^۲ و یا ترازافزایی^۳، تغییر دانه‌بندی مصالح و شکل مسطحه^۴ و نیمرخ طولی^۵ آن‌را در پی دارد [۲۰]. به‌علاوه استفاده از منابع آب رودخانه‌ها مستلزم احداث سازه‌های کنترل جریان نظیر سد، بند، کانال‌های انتقال و نظایر آن می‌باشد که طراحی و بهره‌برداری از آنها آگاهی از میزان رسوب حمل شده را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. در بسیاری از اقدامات مهندسی رودخانه نیز توجه به کمیت رسوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۵]. شن^۶ در خصوص اهمیت و جایگاه تعیین بار رسوبی تاکید می‌نماید که با وجود نارسایی‌های موجود در شناخت فرآیند انتقال رسوب هرکار مهندسی آب الزاما باید با محاسبه بار رسوبی رودخانه همراه باشد. این ارزیابی شرایط قبل و بعد از اقدامات مهندسی را شامل می‌شود [۱۹]. چنین ارزیابی‌هایی اندازه‌گیری میدانی و ثبت داده‌های رسوب را الزام‌آور می‌نماید.

1- Grosse & Subours
2- Degradation
3- Aggradation
4- Planform
5- Longitudinal Profile
6- Shen

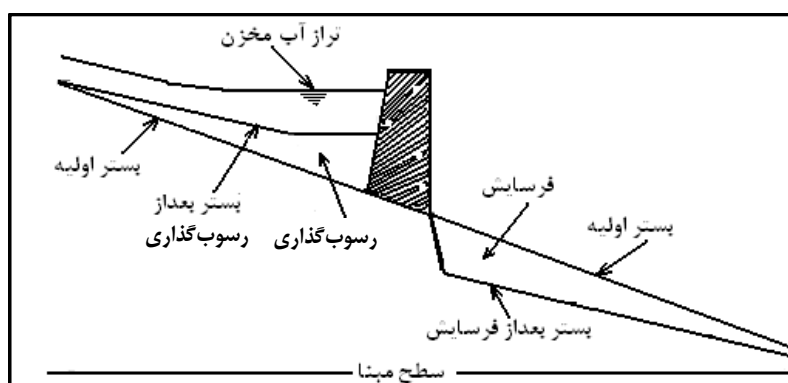
۱-۳- اثرات انتقال رسوب بر رفتار رودخانه و عملکرد مخازن سدها

انتقال رسوب به انحای مختلف رفتار رودخانه‌ها را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. تشکیل تلماسه‌ها^۱، جزایر^۲، و بارهای رسوبی^۳ را می‌توان از جمله پیامدهای انتقال رسوب عنوان نمود که نقش مهمی در عملکرد هیدرولیک جریان و خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها ایفا می‌کند. در شکل (۱-۱) نمونه‌ای از تشکیل جزایر و بارهای رسوبی در بستر رودخانه‌ها نشان داده شده است. این گونه عوارض سطحی موجب تشدید اصطکاک بستر و کاهش ظرفیت حمل رسوب می‌گردد به گونه‌ای که ظرفیت حمل رسوب برای بستر صاف^۴ به‌طور محسوسی بیش‌تر از بستر تلماسه‌ای است [۲۰]. برقراری حالت رژیم از دیگر مصادیق بارز پدیده انتقال رسوب در رودخانه‌ها می‌باشد. براساس نظریه لیزی^۵ حالت رژیم در رودخانه‌هایی مصداق دارد که مقدار بار رسوبی حمل شده با مقدار رسوب ورودی از سطح حوضه آبریز (تغذیه طبیعی) آن در تعادل باشد [۹].



شکل ۱-۱- نمونه‌هایی از عوارض رسوبی تشکیل شده در بستر رودخانه [۱۰]

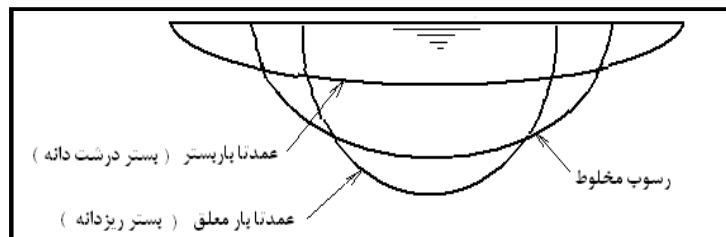
بدیهی است شناخت شرایط رژیم مستلزم انجام اندازه‌گیری‌های میدانی و تعیین نرخ انتقال رسوب می‌باشد. احداث سد از جمله مواردی است که شرایط تعادل رودخانه را به هم زده و با تله‌اندازی رسوب در مخزن تغذیه بازه‌های پایین‌دست را دچار اختلال می‌نماید (شکل ۱-۲). خروج آب صاف از مخزن موجب افزایش ظرفیت حمل رسوب گردیده و فرآیند کف‌کنی را به گونه‌ای که در شکل نشان داده شده است به همراه دارد.



شکل ۱-۲- نمایش نحوه انباشت رسوب در مخزن و وقوع کف‌کنی در بازه‌های پایین‌دست [۱۷]

- 1- Dunes
- 2- Islands
- 3- Bars
- 4- Flat Bed
- 5- Lacy

نکته مهم دیگر در مبحث انتقال رسوب توجه به دانه‌بندی بستر و نوع رسوب حمل شده می‌باشد. مطابق شکل (۱-۳) در رودخانه‌های با بستر درشت دانه بخش عمده‌ای از رسوب حمل شده به صورت بار بستر بوده و از این رو دارای بستر عریض و کم عمق می‌باشند. در بسترهای ریزدانه بار معلق غالب بوده و مقطع رودخانه عمیق و کم عرض است. در صورتی که رسوب حمل شده مخلوطی از بار بستر و معلق باشد مقطع دارای حالت بینابینی است [۶، ۱۶].



شکل ۱-۳- تاثیر اندازه دانه‌های رسوب حمل شده در شکل مقطع جریان [۱۶]

۱-۴- منابع تغذیه رسوبی رودخانه‌ها

حوضه‌های آبریز منبع اصلی تغذیه رسوبی رودخانه‌ها تلقی می‌شود. فرسایش سطح خاک حوضه بخش مهمی از رسوب حمل شده توسط رودخانه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. طبق بررسی‌های انجام شده سالیانه به طور متوسط معادل $۱۸/۳$ میلیارد تن مواد رسوبی از سطح قاره‌ها فرسایش یافته و از طریق رودخانه‌ها به دریاها و اقیانوس تخلیه می‌شود [۲۱]. انواع مختلف فرسایش در سطح حوضه آبریز را می‌توان به صورت زیر معرفی نمود [۲۱، ۲۲]:

۱- فرسایش ورقه‌ای و آبراهه‌ای^۱

۲- فرسایش خندقی^۲

۳- زمین لغزش^۳

۴- رخداد جریان واریزه‌ای^۴

۵- کوه ریزش^۵

فرسایش ورقه‌ای و آبراهه‌ای منجر به جدا شدن ذرات خاک به خصوص ریزدانه‌ها نظیر رس و سیلت توسط بارندگی از سطح خاک حوضه آبریز می‌گردد. با تمرکز جریان در آبراهه‌های کوچک مواد رسوبی فرسایش یافته به سمت آبراهه‌های بزرگ‌تر و نهایتاً رودخانه حمل می‌شود. فرسایش خندقی نیز عمدتاً در اراضی با شیب ملایم و یا نسبتاً تند که دارای ضخامت خاک زیادی هستند تشکیل می‌شود. وقوع بارش‌های متمرکز، کاهش پوشش گیاهی، بهره‌برداری غیراصولی از زمین و افت بستر رودخانه‌ها را می‌توان از جمله عوامل اصلی در وقوع فرسایش خندقی بر شمرد [۲۱]. پدیده زمین لغزش عامل مهم دیگری در تغذیه رسوبی رودخانه‌ها می‌باشد. در اثر زمین لغزش توده عظیم مواد رسوبی اشباع شده به سمت رودخانه سرازیر و به تدریج با جریان رودخانه‌ای به پایین دست حمل می‌شود. رخداد جریان واریزه‌ای نیز شکل دیگری از حرکت توده‌ای مواد

1- Sheet and Rill Erosion
2- Gully Erosion
3- Land Slide
4- Debris Avalanche
5- Avalanche

رسوبی است که طی آن دانه‌های رسوب در سیال غلیظی از آب و رس شناور شده و به صورت مخلوطی از ذرات ریز تا قطعات بزرگ سنگ، راه خود را به سوی رودخانه باز می‌کند. از این رو مواد رسوبی به دست آمده از آن، که پدیده جریان گلی نیز خوانده می‌شود، دارای طیف دانه‌بندی وسیعی است [۱]. در مناطق کوهستانی علاوه بر متداول بودن پدیده‌های زمین لغزش و جریان گلی بخش مهمی از رسوب ورودی به رودخانه‌ها حاصل پدیده کوه ریزش می‌باشد. در شیب‌های تند توده‌های سنگ متلاشی شده همراه با خاک و سنگ‌ریزه‌ها در اثر پدیده هوازدگی و با تاثیرپذیری از حرکات بطئی تکنیکی و اثرهای ناشی از رطوبت به دست آمده از بارندگی به قعر دره‌ها و داخل رودخانه‌ها سرازیر می‌گردد. ریزش این مواد در پای دامنه‌ها منجر به تشکیل مخروط افکنه‌های واریزه‌ای متوالی در مسیر رودخانه گردیده و منبع تغذیه رسوب مستمری را فراهم می‌آورد. علاوه بر منابع رسوب ورودی از سطح حوضه آبریز، مواد رسوبی موجود در بستر و کناره‌های رودخانه‌ها نیز بخشی از منابع تغذیه رسوبی را به خود اختصاص می‌دهد. وقوع کف کنی حاصل فرسایش مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها می‌باشد. به علاوه در اثر پدیده کف کنی، خاک کناره‌ها نیز ناپایدار شده و در اثر ریزش توده‌ای همراه با جریان آب به پایین دست حمل می‌شود. در مسیر رودخانه‌ها همچنین بعضی شاخه‌های فرعی مواد رسوبی به رودخانه تخلیه می‌کند.

۱-۵- داده‌های آماری آبدهی، غلظت، باربستر و مواد بستر

ضرورت آگاهی از فرآیند انتقال رسوب به عنوان عامل تاثیرگذار در طراحی تاسیسات آبی، بهره‌برداری از منابع آب، گسترش کشتیرانی، و اقدامات مختلف ساماندهی رودخانه‌ها توسعه راهکارهای مناسب جهت ثبت داده‌های آماری غلظت، باربستر و مواد بستر را به موازات جمع‌آوری آمار بده جریان از دیرباز مطرح نموده است. ثبت داده‌های آماری بده جریان از اوایل قرن نوزدهم هم‌زمان با توسعه دانش هیدرولوژی آغاز گردید و اولین بار اندازه‌گیری منظم آبدهی و تراز آب از سال ۱۸۸۸ میلادی بر روی رودخانه می‌سی‌سی‌پی^۱ توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۲ گزارش شده است [۱۵]. اندازه‌گیری منظم غلظت و تعیین بار معلق، باربستر و نمونه‌برداری از مواد بستر نیز به دهه‌های سی و چهل میلادی معطوف می‌گردد [۲۰ و ۲۲]. در این مرحله همچنین به منظور هماهنگ نمودن الگوهای اندازه‌گیری و ثبت داده‌های آماری، تجهیزات استاندارد برای نمونه‌برداری‌ها و سنجش‌های میدانی اعم از بده جریان، غلظت، باربستر و مواد بستر مورد توجه جدی قرار گرفت.

در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها اندازه‌گیری بده جریان ضروری بوده و لازم است در طول دوره آماربرداری بده جریان روزانه ثبت و گزارش شود. روش‌های متعددی برای تعیین بده جریان متداول است که جزییات بیش‌تر در مراجع مختلف از جمله [۱، ۲۳] ذکر شده است. نمونه‌برداری از آب و تعیین غلظت بار معلق هم‌زمان با اندازه‌گیری بده جریان با استفاده از دستگاه‌های نمونه‌برداری استاندارد انجام می‌شود. از جمله این دستگاه‌ها می‌توان به نمونه‌بردارهای US DH-59، US DH-48 و US D-49 که از نوع تجمع در عمق^۳ بوده و نمونه‌بردارهای US P-61 و نی‌ریپیک^۴ که از سری نمونه‌بردارهای نقطه‌ای^۵ می‌باشند اشاره نمود [۲۲، ۳۸]. برای نمونه‌بردارهای تجمعی با حرکت تدریجی دستگاه نمونه‌بردار در امتداد قائم نمونه مواد معلق از تمام عمق جریان

1- Mississippi River

2- U.S. Geological Survey

3- Depth Integrating Suspended Load Sampler

4- Neyrpic Point Sampler

5- Point Integrating Suspended Load Sampler

اخذ می‌شود. نمونه‌برداری‌های نقطه‌ای نیز دارای ساختار مشابه بوده با این تفاوت که نمونه‌برداری از یک عمق خاص و به‌صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد. در هر نوبت نمونه‌برداری حجمی معادل ۰/۵ تا ۱ لیتر، بسته به ظرفیت محفظه دستگاه، می‌توان از آب رودخانه نمونه‌برداری نمود (برای جزییات بیشتر به راهنمای ادوات نمونه برداری بار رسوبی رودخانه‌ها نشریه شماره ۱۴۶ طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور مراجعه شود).

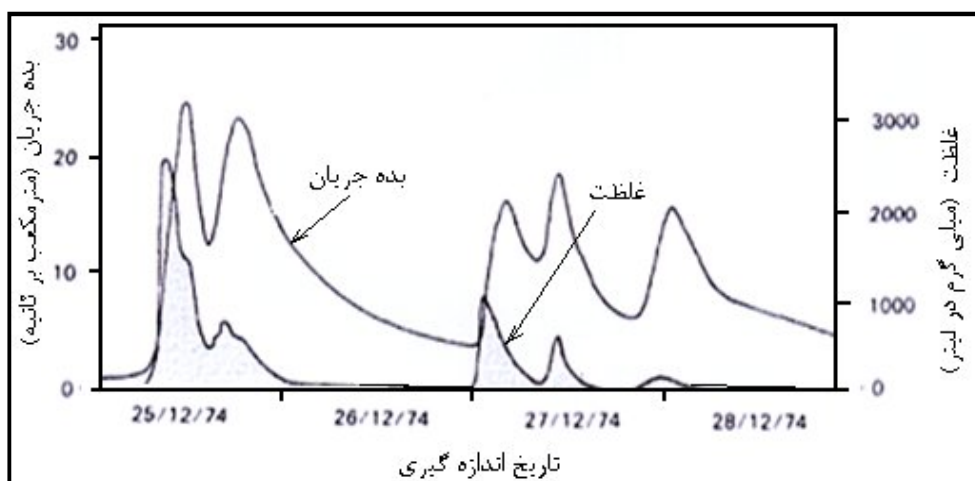
غلظت بار معلق به‌صورت میلی‌گرم در لیتر (mg/l) و یا (ppm)^۱ و بعضاً نیز به‌صورت تن در روز (ton/day) گزارش می‌شود. غلظت مواد معلق نسبت به عمق و زمان تغییر می‌کند از این رو ثبت اطلاعات مربوط به تغییرات زمانی غلظت بخشی از داده‌های آماری را به خود اختصاص می‌دهد. در شکل (۱-۴) روند تغییرات زمانی غلظت نشان داده شده است. علاوه بر بار معلق اندازه‌گیری باربستر نیز بخشی از اقدامات متداول در جمع‌آوری داده‌های آماری مرتبط با بار رسوبی رودخانه‌ها تلقی می‌شود. عموماً اندازه‌گیری باربستر هم‌زمان با بده جریان و بار معلق انجام می‌گیرد تا علاوه بر امکان بررسی تعامل بین آنها تعیین بارکل که مجموع بار معلق و باربستر می‌باشد فراهم گردد.

داده‌های آماری بار بستر اغلب به‌صورت تن در روز (ton/day)، کیلوگرم در ثانیه (kg/s) کیلوگرم در ثانیه در متر (kg/s-m) ارائه می‌شود. اندازه‌گیری باربستر برخلاف بار معلق دارای محدودیت‌های زیادی است. علت این امر برهم خوردن شرایط جریان ناشی از استقرار دستگاه اندازه‌گیری در کف رودخانه می‌باشد که عملاً الگوی طبیعی حرکت باربستر را دچار اختلال می‌نماید [۱۰]. در اندازه‌گیری باربستر استفاده از تجهیزاتی نظیر نمونه‌گیر جعبه‌ای یا زنبیلی^۲ موسوم به هلی اسمیت و همچنین نمونه‌گیر طشتکی متداول می‌باشد. در شکل (۱-۵) نمونه‌هایی از دستگاه‌های اندازه‌گیری باربستر نشان داده شده است [۲۱، ۲۳]. مطابق شکل در نمونه‌گیر طشتکی پره‌های عرضی جهت تله‌اندازی هرچه بیشتر تر رسوب بستر تعبیه شده است. به‌علاوه در نمونه‌گیر زنبیلی با تعبیه توری مواد رسوبی تله‌اندازی شده و جریان آب ورودی از قسمت انتهایی به پایین‌دست تخلیه می‌شود (در خصوص ادوات نمونه‌برداری بار رسوبی رودخانه‌ها به نشریه شماره ۱۴۶ مراجعه شود).

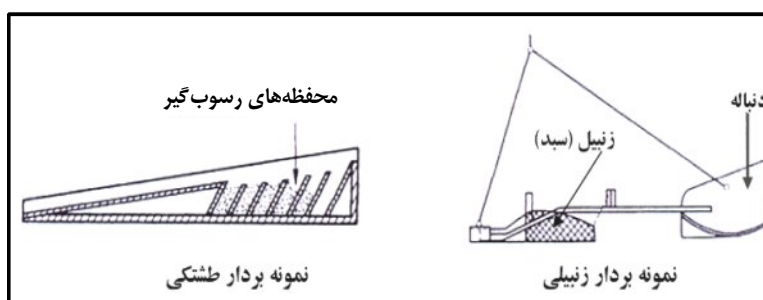
از دیگر نکات مهم در ثبت داده‌های آماری باربستر توجه به این واقعیت است که به‌علت عبور تلماسه‌ها و جابجایی انباشته‌های رسوبی انتقال باربستر مطابق شکل (۱-۶) به‌صورت نوسانی بوده و این ویژگی در تعیین بار بستر تاثیرگذار می‌باشد [۲۳]. بنا به ملاحظات فوق داده‌های آماری باربستر در مقایسه با بار معلق از گستره کم‌تری برخوردار است. در عین حال نقش مهم باربستر در بررسی رفتار و عملکرد هیدرولیکی و ریخت‌شناسی رودخانه‌ها ضرورت توجه به سنجش‌های میدانی بار بستر را الزام‌آور نموده است.

1- Part Per Million

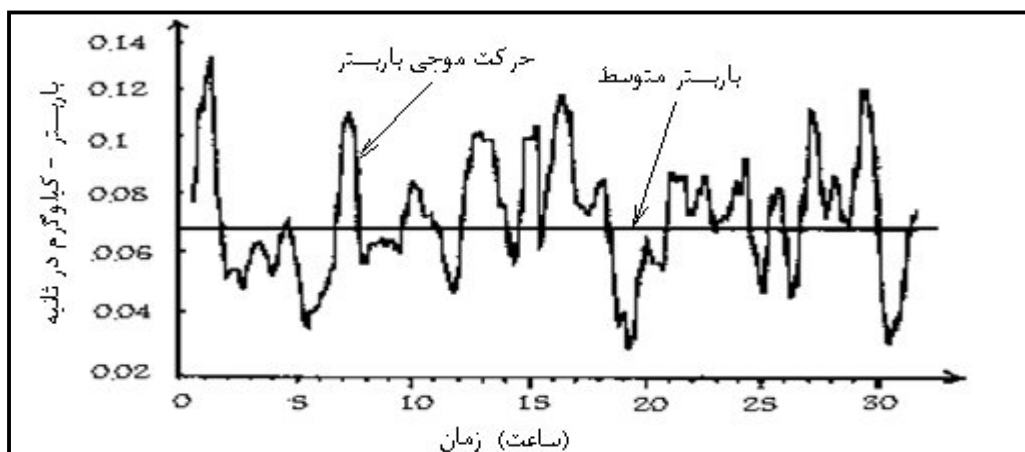
2- Basket or Box Type Bed Load Sampler



شکل ۱-۴- نمونه‌ای از روند تغییرات زمانی غلظت مواد رسوبی معلق [۲۳]

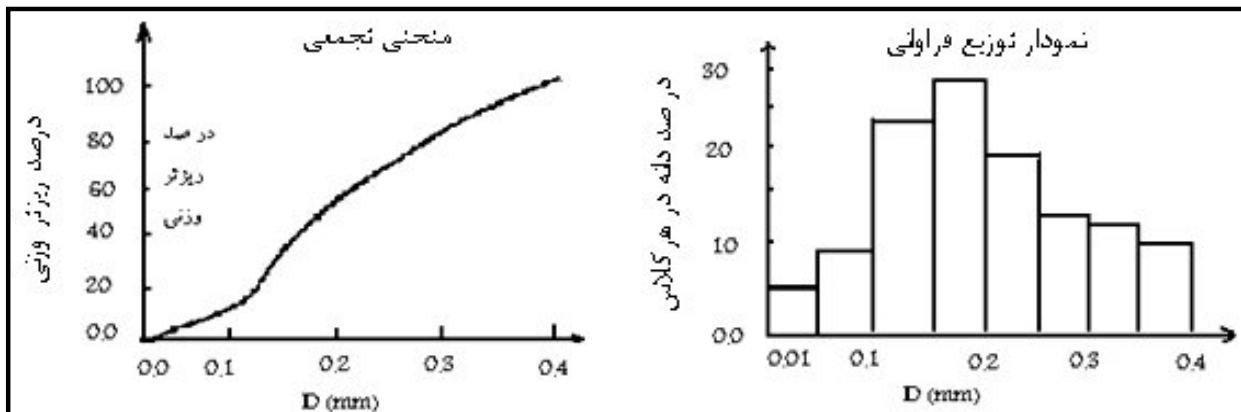


شکل ۱-۵- نمونه‌هایی از دستگاه‌های باربستر در رودخانه‌ها [۱۰]



شکل ۱-۶- نمونه‌ای از حرکت نوسانی باربستر در رودخانه‌ها [۲۱]

در بسیاری از موارد امکان اندازه‌گیری مستقیم باربستر فراهم نبوده و از این رو لازم است با نمونه‌برداری از مواد بستر و با بهره‌گیری از معادلات نرخ باربستر برای شرایط مختلف، بده جریان محاسبه و تعیین گردد. در شکل (۱-۷) نمونه‌ای از دانه‌بندی مواد بستر و توزیع آن در کلاس‌های مختلف نشان داده شده است. نمونه‌برداری منظم و ثبت داده‌های آماری مواد بستر راهکار موثری در تعیین مشخصات دانه‌بندی مواد بستر تحت شرایط مختلف جریان اعم از پرآبی، کم‌آبی و حالت متوسط می‌باشد.



شکل ۱-۷- نمونه‌ای از نحوه توزیع دانه‌بندی مواد بستر در رودخانه‌ها [۲۶]

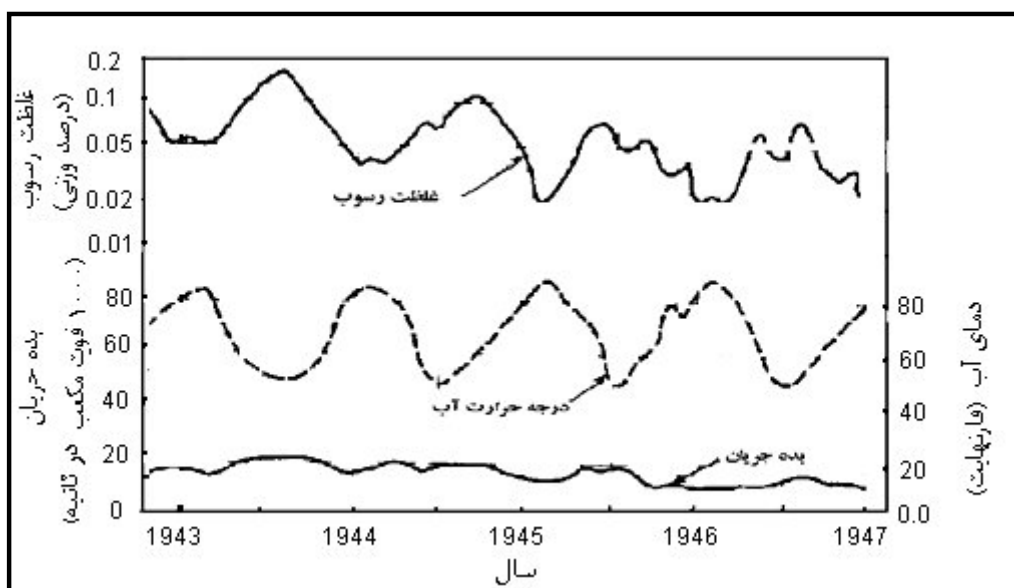
تجهیزات مختلفی برای نمونه‌برداری از مواد بستر رودخانه‌ها به کار گرفته می‌شود که از آن جمله می‌توان به نمونه‌بردار سطلی^۱، نمونه‌بردار چنگکی^۲ و نمونه‌بردار به روش مغزه‌گیری^۳ اشاره نمود [۱۵ و ۲۲]

۱-۶- بازدید و بررسی ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی و محدوده مطالعاتی

انجام بازدیدهای میدانی و بررسی موقعیت و وضعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی موجود به‌خصوص در محدوده مطالعاتی برای تعیین بار رسوبی و انتخاب معادلات مناسب ضروری است. در ایستگاه‌های آب‌سنجی^۴ اندازه‌گیری بده جریان و همچنین نمونه‌برداری مواد معلق متداول می‌باشد. در ایستگاه‌های رسوب‌سنجی^۵ نیز اندازه‌گیری باربستر، بار معلق و نمونه‌برداری از مواد بستر انجام می‌گیرد [۷، ۲۲]. براساس نمونه‌های تهیه شده از ایستگاه‌های رسوب‌سنجی، همچنین تعیین مشخصات دانه‌بندی بار معلق، باربستر و مواد بستر فراهم می‌گردد.

بررسی در مورد وجود این گونه داده‌ها و کیفیت آنها و عملکرد ایستگاه‌های موجود بخشی از بررسی‌های میدانی و ارزیابی وضعیت داده‌سنجی تلقی می‌شود. به لحاظ تاثیر متقابل خصوصیات هیدرولوژیکی و فرآیند انتقال رسوب معمولاً ایستگاه‌های رسوب‌سنجی مجهز به ابزارهای ایستگاه‌های آب‌سنجی نیز می‌باشند تا امکان اندازه‌گیری هم‌زمان بده جریان و بده رسوب فراهم گردد [۱، ۲۲]. در شکل (۱-۸) نمونه‌ای از نتایج اندازه‌گیری هم‌زمان بده جریان، دمای آب و غلظت رسوب معلق نشان داده شده است.

- 1- Bucket Type Bed Material Samplern
- 2- Grab Sampler
- 3- Core Sampler
- 4- Hydrometry Station
- 5- Sediment Gauging Statio



شکل ۸-۱- اندازه‌گیری هم‌زمان بده جریان، غلظت رسوب و دمای آب [۲۲]

در صورت عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری در محدوده مطالعاتی لازم است با توجه به اهداف مطالعات پیشنهاد احداث ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی انجام گیرد. به‌علاوه تجهیز و تکمیل ایستگاه‌های موجود در راستای تحقق اهداف مورد نظر ضروری می‌باشد. به‌منظور ارزیابی وضعیت ایستگاه‌های موجود و ارائه پیشنهادات تکمیلی جدول (۱-۱) در خصوص تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها معرفی می‌شود.

مطابق این جدول در موقع اندازه‌گیری بار رسوبی لازم است ضمن درج مشخصات عمومی رودخانه و حوضه آبریز نوع ایستگاه نیز مشخص گردد. برای ایستگاه آب‌سنجی درج پارامترهای مورد اندازه‌گیری اعم از بده جریان و مشخصه‌های هیدرولیکی در محاسبه کمیت رسوب می‌تواند کارساز باشد. در ایستگاه رسوب‌سنجی نیز علاوه بر بده جریان و مشخصه‌های هیدرولیکی، اندازه‌گیری بار رسوبی (اعم از بستر و معلق) و همچنین نمونه‌برداری برای تعیین دانه‌بندی مطابق مندرجات جدول باید مدنظر قرار گیرد. به‌علاوه ارائه پیشنهادات جهت تکمیل و یا احداث ایستگاه جدید از موارد مرتبط با فرآیند ارزیابی ایستگاه‌ها تلقی می‌شود. در تنظیم جدول همچنین تاریخ تکمیل فرم و نمونه‌برداری قید شود.

جدول ۱-۱- بررسی وضعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی موجود و ارائه پیشنهادات

نام رودخانه	نام حوضه آبریز	ایستگاه آب‌سنجی	دارد	ندارد
ایستگاه رسوب‌سنجی	دارد	ندارد	تاریخ تکمیل فرم	
نوع ایستگاه آب‌سنجی*	درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	درجه ۴
مساحت حوضه آبریز (km ²)		طول رودخانه تا محل ایستگاه (km)	ارتفاع از مبدا (m)	سال تاسیس
وضعیت ایستگاه:	فعال	تعطیل		
پارامترهای مورد اندازه‌گیری:	مقطع برداری	سرعت جریان	بده جریان	تراز آب
	نیمرخ طولی در محدوده ایستگاه	شیب بستر	شیب خط انرژی	دمای آب
	منحنی بده سنج	سایر موارد		کیفیت
				ضریب مانینگ
نوع ایستگاه رسوب‌سنجی:	بار معلق	بار بستر	نمونه مواد بستر	سال تاسیس
مساحت حوضه آبریز (km ²)		طول رودخانه تا محل ایستگاه (km)	ارتفاع از مبدا (m)	
وضعیت ایستگاه:	فعال	تعطیل		
پارامترهای مورد اندازه‌گیری:	مقطع برداری	بده جریان	تراز آب	دمای آب
	دانه‌بندی مواد معلق	بار رسوب معلق	بار بستر	دانه‌بندی بار بستر
	نیمرخ طولی در محدوده ایستگاه	شیب بستر	شیب خط انرژی	ضریب مانینگ
	منحنی بده سنج	سایر موارد		غلظت مواد معلق
				مشخصات تلماسه‌ها
پیشنهادات:	احداث ایستگاه آب‌سنجی	تکمیل ایستگاه آب‌سنجی	احداث ایستگاه رسوب‌سنجی	
	تکمیل ایستگاه رسوب‌سنجی	سایر موارد		

* ایستگاه درجه ۴ فقط دارای اشل می‌باشد. در ایستگاه درجه ۳ علاوه بر اشل دستگاه لیمینوگراف نیز نصب می‌شود. برای ایستگاه درجه ۲ علاوه بر اشل، پل تلفریک و رپر نیز نصب می‌شود. ایستگاه درجه ۱ کامل بوده و شامل تجهیزات اشل، پل تلفریک، رپر و لیمینوگراف است.

۱-۷- گردآوری اطلاعات پایه مورد نیاز

در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها لازم است اطلاعات پایه موجود جمع‌آوری و مورد تجزیه و تحلیل قرارگیرد. بارندگی از جمله پارامترهای هواشناسی است که برای محاسبه شاخص‌های فرسایش خاک نظیر شدت بارندگی و مدت تداوم رگبارها کاربرد دارد [۲۰]. به‌علاوه از نقشه منحنی‌های همباران برای تعیین بارش متوسط سالیانه حوضه آبریز و مشخص کردن نرخ رسوب‌دهی ویژه^۱ استفاده می‌شود [۱۲]. داده‌های هیدرولوژیکی نظیر بده جریان، سیلاب‌ها، نمودار آبدی روزانه و منحنی تداوم جریان از جمله عوامل موثر در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها تلقی می‌شوند. از این‌رو جمع‌آوری این‌گونه اطلاعات پایه اعم از هواشناسی و هیدرولوژی در بررسی رسوب رودخانه‌ها متداول می‌باشد. مشخصات هندسی رودخانه نیز از جمله داده‌های مورد نیاز بوده و در این خصوص جمع‌آوری اطلاعات مربوط به نقشه‌برداری مسیر رودخانه، مقاطع عرضی و نیمرخ طولی، پهنه سیلاب‌دشت و مجرای اصلی، مشخصات پل‌ها و تاسیسات مختلف سازه‌ای که تاثیرگذار در فرآیند انتقال رسوب می‌باشند، قابل ذکر است. کاربری اراضی و پوشش گیاهی نقش عمده‌ای در پدیده فرسایش خاک و تغذیه رسوبی رودخانه‌ها به عهده دارد [۱۹، ۲۲]. به‌طور کلی وضعیت پوشش گیاهی، فعالیت‌های کشاورزی، توسعه شهری، جنگل‌ها و مراتع در تعیین شاخص‌های فرسایش خاک، تولید رواناب و انتقال رسوب دخیل

می‌باشند. اطلاعات مربوط به نوع خاک و خصوصیات فیزیکی آن به‌خصوص در اراضی حاشیه مسیر رودخانه بخشی از داده‌های پایه را به‌خود اختصاص می‌دهد [۱۸]. در زیر فهرست اطلاعات پایه ارائه شده است.

۱-۷-۱- اطلاعات هواشناسی

- شدت، مدت و کمیت رگبارها
 - بارش متوسط سالانه حوضه آبریز
- اطلاعات فوق عموماً برای تعیین نرخ فرسایش خاک استفاده می‌شود [۱۲]. مثال‌هایی از کاربرد رگبارها و بارش سالیانه در تعیین باررسوبی رودخانه‌ها در مبحث ۴-۲، ۵-۴ و ۶-۵ آورده شده است.

۱-۷-۲- داده‌های هیدرولوژیکی

- بده جریان روزانه
 - سیلاب‌ها شامل بده حداکثر و هیدروگراف سیلاب‌های مشاهده شده و دوره برگشتی
 - منحنی دوام جریان
- اطلاعات هیدرولوژیک در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها نقش عمده‌ای دارد و در فصل‌های ۴، ۵ و ۶ شیوه استفاده از داده‌های هیدرولوژیک در تعیین باربستر، بار معلق و بارکل تشریح شده است.

۱-۷-۳- مشخصات هندسی رودخانه

- تهیه مقاطع عرضی رودخانه (مجرای اصلی و سیلابدشت)
- نیمرخ طولی
- شیب رودخانه
- مشخصات سازه‌های عرضی نظیر پل‌ها، سدها و بندها

۱-۷-۴- کاربری اراضی و پوشش گیاهی

- نقشه‌های کاربری اراضی حوضه آبریز (عموماً با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰)
 - نقشه‌های پوشش گیاهی حوضه آبریز (عموماً با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰)
- در مبحث ۴-۲ و ۴-۳ مواردی از نحوه استفاده از پوشش گیاهی و کاربری اراضی در تعیین باررسوبی رودخانه‌ها آورده شده است.

۱-۷-۵- اطلاعات مربوط به نوع خاک و خصوصیات مکانیکی

- دانه‌بندی مواد رسوبی بستر
- چگالی دانه‌ها
- سرعت ترسیب دانه‌ها

جزئیات بیش‌تری در خصوص استفاده از مشخصات دانه‌بندی و سایر ویژگی‌های مواد رسوبی در تعیین بار معلق، باربستر و بارکل در مبحث ۲-۴، ۳-۴، ۳-۵، ۴-۵، ۳-۶ و ۵-۶ ارائه شده است.

۸-۱- گزارش‌ها، نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای

برای مشخص کردن محدوده حوضه آبریز، ترسیم شبکه رودخانه‌ای، تعیین محل ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و آب‌سنجی موجود و پیشنهادی، موقعیت مخازن سدها و تاسیسات مختلف آبی و انواع سازه‌های هیدرولیکی جمع‌آوری نقشه‌های با مقیاس‌های مختلف (۱/۲۵۰۰۰ تا ۱/۲۵۰۰۰) و همچنین عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای ضروری می‌باشد. در مواردی تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با هدف شناخت گسترش سازندهای فرسایش‌پذیر و یا مقاوم در سطح حوضه آبریز و امتداد رودخانه و همچنین نقشه‌های خاک‌شناسی برای بررسی لایه‌بندی و نوع خاک مفید می‌باشد. به‌علاوه گزارش‌های هواشناسی، هیدرولوژی، فیزیوگرافی حوضه آبریز، هیدرولیک جریان، کاربری اراضی، ریخت‌شناسی و زمین‌شناسی از جمله منابع مهم تهیه اطلاعات پایه مورد نیاز برای بررسی رسوب رودخانه‌ها قلمداد می‌شوند. گزارش بازدیدهای صحرائی که با هدف بررسی وضعیت رودخانه از دیدگاه فرسایش و رسوب‌گذاری و همچنین وقوع پدیده‌های زمین لغزش، کوه ریزش، جریان گلی، وضعیت دانه‌بندی مواد رسوبی بستر و کناره‌ها، وجود تلماسه‌ها، جزایر و انباشته‌های رسوبی، بخشی از اطلاعات پایه تکمیلی را می‌تواند فراهم نماید.

فصل ۲

مروری بر عوامل موثر بر انتقال رسوب

۲-۱- کلیات

عوامل مختلفی در جابجایی و انتقال مواد رسوبی رودخانه‌ها تاثیرگذار می‌باشد. شناخت این گونه عوامل و نقش هریک در کمیت و نحوه انتقال رسوب از جمله گام‌های اساسی در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها قلمداد می‌شود. در زیر به بررسی هریک از عوامل موثر، به اجمال پرداخته شده است.

۲-۲- حوضه آبریز و خصوصیات فیزیوگرافیک آن

رسوب حمل شده در رودخانه‌ها از خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه‌های آبریز نظیر مساحت، شیب، تراکم شبکه آبراهه‌ها، شکل حوضه و نیمرخ طولی رودخانه تاثیرپذیری دارد. در حوضه‌های کوهستانی وقوع پدیده‌های زمین لغزش و کوه ریزش متداول بوده و نرخ فرسایش خاک نیز شدیدتر می‌باشد [۲۱، ۲۳]. نیمرخ طولی رودخانه از جمله شاخص‌های فیزیوگرافیک حوضه‌های آبریز می‌باشد که نقش مهمی در انتقال رسوب ایفا می‌کند. شیب زیاد رودخانه در بالادست توان انتقال را افزایش داده و امکان حمل مواد رسوبی درشت‌دانه فراهم می‌گردد. در بازه‌های پایین‌دست با کاهش شیب طولی مواد درشت‌دانه ته‌نشین شده و رسوبات ریزدانه فرصت انتقال پیدا می‌کنند. همچنین مقدار رسوب حمل شده با افزایش مساحت حوضه آبریز روبه افزایش می‌گذارد. علت این امر ورود رسوب از شاخه‌ها و شعبات فرعی موجود در مسیر رودخانه است. در مناطق جلگه‌ای بخش عمده‌ای از حوضه آبریز را ناحیه سیلابدشت^۱ تشکیل می‌دهد. در مواقع سیلابی پخش جریان سیل که دارای مواد رسوبی زیادی است فرصت لازم را برای ته‌نشینی رسوبات در سیلابدشت فراهم می‌آورد. به‌عنوان یک قاعده کلی عموماً مواد رسوبی از اراضی بالادست حوضه آبریز شسته شده و در بازه‌های پایین‌دست از جمله سیلابدشت ترسیب می‌نماید.

۲-۳- هواشناسی و هیدرولوژی

از جمله عوامل هواشناسی موثر در انتقال رسوب شدت بارندگی و مدت دوام آن می‌باشد. این عوامل در تعیین نرخ فرسایش خاک و انتقال آن به شبکه آبراهه‌ها حایز اهمیت است. در بسیاری از مدل‌های فرسایش خاک نظیر مدل پسیاک^۲ و یونیورسال^۳ شدت و مقدار بارندگی دخیل می‌باشد [۲۰]. به‌علاوه در تعیین نرخ فرسایش خاک بارش متوسط حوضه آبریز به‌عنوان عامل اصلی توسط لانگبین^۴ استفاده شده است [۱۱]. در موارد عدیده‌ای بارش‌های متمرکز و ناگهانی منجر به وقوع سیلاب‌های بزرگ می‌شود که در اثر فرسایش شدید خاک دارای غلظت رسوب بالایی می‌باشند. به‌علاوه وقوع جریان‌های گلی و جریان‌های واریزه‌ای اغلب حاصل تعامل بارش‌های شدید و فرسایش خاک و لایه‌های رسوبی است که تحلیل رفتار آنها مستلزم انجام بررسی‌های مربوط به بارندگی، رواناب سطحی و سیلاب می‌باشد [۳]. در تعیین کمیت انتقال رسوب ثبت بده روزانه و غلظت مواد معلق به‌عنوان بخشی از داده‌های هیدرولوژیک متداول بوده و از این طریق اثرهای فرسایش خاک در افزایش غلظت مواد رسوبی نیز قابل بررسی است. در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از بده روزانه ثبت شده و غلظت مواد معلق نشان داده شده است. در این شکل نقطه اوج منحنی غلظت، بیانگر تاثیر

1- Flood Plain

2- PSIAC

3- Universal Soil Loss Equation (USLE)

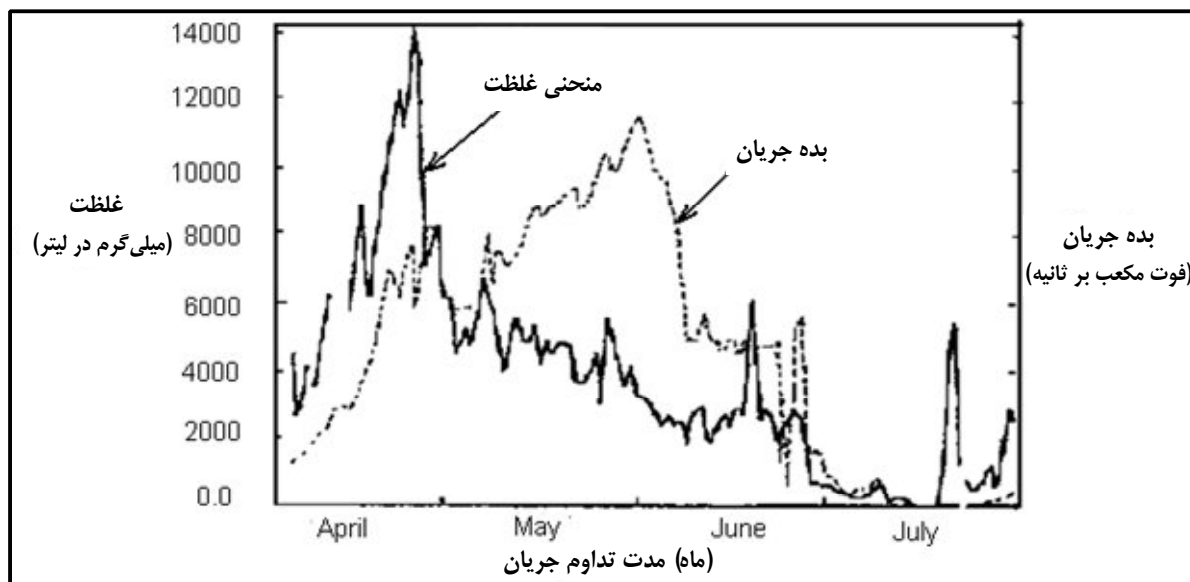
4- Langbein

فرسایش خاک در شروع بارندگی است و با تداوم بارش و شسته شدن ذرات ناپایدار خاک سطحی غلظت کاهش می‌یابد هر چند بده جریان رو به افزایش می‌گذارد. وجود تاخیر زمانی در وقوع حداکثر غلظت و حداکثر بده جریان از جمله عوارض فرسایش خاک می‌باشد. در یک دوره طولانی مدت عموماً رژیم رسوبی رودخانه‌ها از رژیم هیدرولوژیک تبعیت می‌نماید.

۲-۴- ریخت‌شناسی

خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها برپدیده انتقال رسوب تاثیرگذار می‌باشد. براساس بررسی‌های انجام شده توسط شوم^۱ و مطابق جدول (۱-۲) بار رسوبی رودخانه‌ها با شکل آنها ارتباط مستقیم دارد. مطابق جدول در رودخانه‌های پیچانرودی شدید انتقال رسوب عمدتاً به صورت بار معلق بوده و در نتیجه آن رودخانه دارای عمق زیاد و عرض کم می‌باشد (نسبت W/D کمتر از ۷ است که در آن W معرف عرض رودخانه و D عمق جریان در حالت مقطع پر می‌باشد).

در رودخانه‌های مستقیم و شریانی سهم باربستر قابل توجه بوده و مشخصه‌های هندسی رودخانه براساس آن شکل می‌گیرد. در این رودخانه‌ها عرض افزایش زیادی یافته و عمق کاهش پیدا می‌کند (نسبت W/D بیش‌تر از ۲۵ می‌باشد). برای رودخانه‌هایی که حالت مختلط حاکم می‌باشد تاثیر توأم بار معلق و باربستر شکل رودخانه را رقم می‌زند (نسبت W/D بین ۷ تا ۲۵ تغییر می‌کند). در پیچانرودها همچنین بخشی از بار رسوبی حمل شده حاصل فرسایش در قوس‌ها بوده و برای بررسی جابجایی‌های عرضی و طولی ناشی از آن تعیین کمیت بار رسوبی به دست آمده از فرسایش قوس‌ها ضروری می‌باشد. تعامل ریخت‌شناسی و انتقال رسوب همچنین منجر به تشکیل تلماسه‌ها و پاد تلماسه‌ها^۲ و همچنین بارها و جزایر رسوبی متعددی می‌شود [۳۶] که در تعیین بار رسوبی باید مد نظر قرار گیرد.



شکل ۲-۱- هیدروگراف جریان و نمودار تغییرات غلظت متاثر از فرسایش خاک [۲۲]

جدول ۲-۱- چگونگی تاثیرپذیری بار رسوبی حمل شده از خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها [۱۹]

نوع رودخانه	شیب	ضریب تغییرات ^۵	W/D	درصد رس و سیلت در بستر و کناره‌ها	بار بستر %	بار معلق %	نوع بار رسوبی
پیچانرودی شدید	کم	$>2/1$	<7	۹۰ - ۱۰۰	۰ - ۲۰	۸۰ - ۱۰۰	عمدتاً بار معلق
پیچانرودی	ملايم	$1/5 - 2/1$	۷ - ۲۵	۳۰	۱۵ - ۳۵	۶۵ - ۸۵	مختلط (بار بستر و بار معلق)
مستقیم و شریانی	نسبتاً تند	$1 - 1/5$	>25	۰	۳۵ - ۷۰	۳۰ - ۶۵	عمدتاً بار بستر

در جدول (۱-۲) ضریب تغییرات عبارت است از نسبت طول رودخانه به طول دره

۲-۵- دانه‌بندی و لایه‌بندی مواد رسوبی بستر و کناره‌ها

مقدار رسوب حمل شده با اندازه دانه‌های موجود در بستر و کناره‌ها مرتبط است. نرخ حمل مواد رسوبی ریزدانه به مراتب بیش‌تر از دانه‌های درشت می‌باشد. اندازه مواد رسوبی به تبعیت از شیب رودخانه و شرایط هیدرولیکی تغییر می‌نماید. در نواحی کوهستانی که رودخانه دارای شیب زیادی است قطعات درشت سنگ و لاشه سنگ به همراه دانه‌های خرد شده شن و ماسه منتقل می‌شود. با کاهش شیب رودخانه در مناطق کوهپایه‌ای و آستانه ورود به نواحی جلگه‌ای قطر دانه‌های رسوبی نیز کاهش می‌یابد. در نواحی جلگه‌ای اندازه دانه‌های رسوب کاهش محسوسی یافته و زمینه برای تشکیل تلماسه‌ها فراهم می‌گردد.

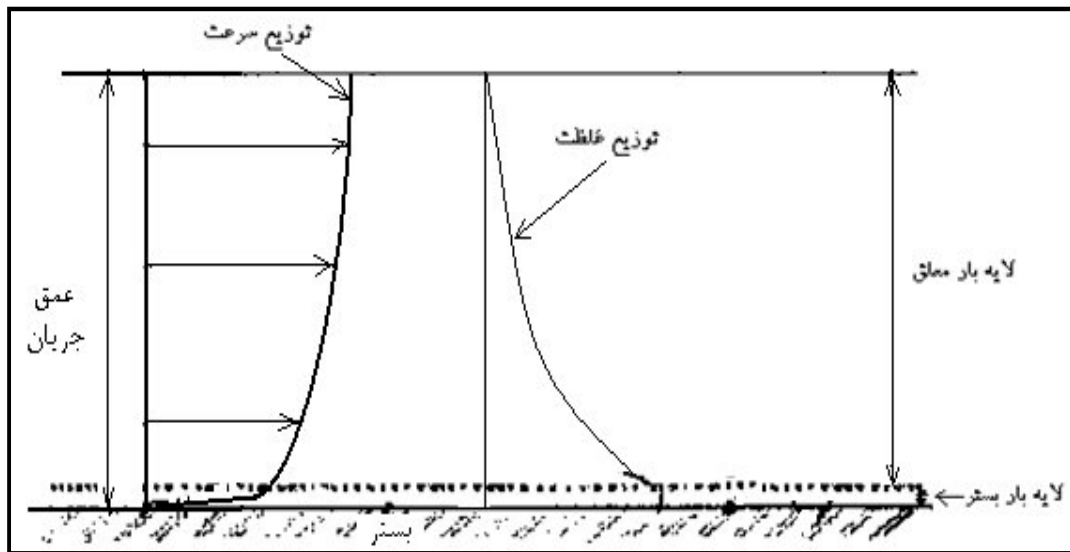
مواد رسوبی کناره‌ها نیز در اثر تماس مستقیم با جریان آب و یا ریزش توده‌ای^۱ ناشی از پنجه شویی^۲ و یا زیرکشی^۳ دستخوش فرسایش گردیده و همراه جریان آب حمل می‌گردد. از این‌رو لازم است برای تعیین نرخ رسوب حمل شده با نمونه‌برداری و انجام تجزیه آزمایشگاهی توزیع دانه‌بندی و لایه‌بندی کناره‌ها مشخص شود [۱۵].

۲-۶- هیدرولیک جریان

انتقال مواد رسوبی به صورت بار بستر و بار معلق تابع شرایط هیدرولیکی رودخانه بوده و از این‌رو بررسی مشخصه‌های هیدرولیک جریان گام مهمی در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها می‌باشد.

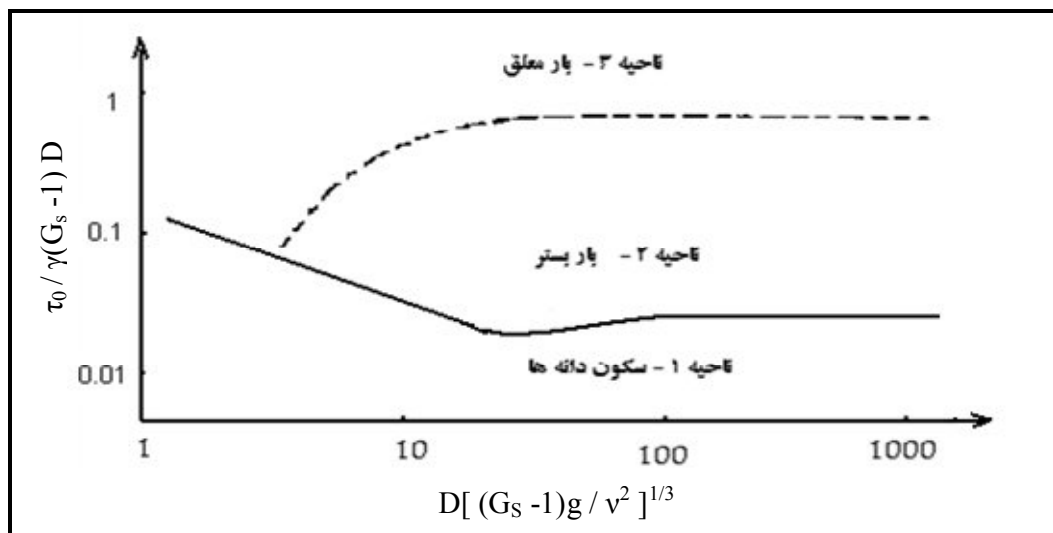
هریک از عوامل هیدرولیکی نظیر سرعت جریان، عمق آب، شیب خط انرژی، تنش برشی و بده جریان، در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها دخیل می‌باشند. در شکل (۲-۲) تاثیر توزیع سرعت بر انتقال بار معلق و باربستر نشان داده شده است. مطابق شکل در مجاورت بستر سرعت جریان کاهش یافته و انتقال مواد رسوبی به صورت بار بستر انجام می‌گیرد. در لایه‌های بالایی افزایش سرعت شرایط انتقال رسوب را به صورت بار معلق فراهم می‌آورد.

1- Mass Failure
2- Toe Erosion
3- Under Cutting



شکل ۲-۲- نحوه توزیع سرعت جریان و تاثیر آن در انتقال بار معلق و باریستر [۳]

چانسن^۱ با استناد به بررسی‌های شیلدز^۲ و براساس تحلیل مشخصات هیدرولیک جریان و خصوصیات دانه‌بندی مواد بستر سه ناحیه مشخص مطابق شکل (۳-۲) برای انتقال رسوب معرفی نموده است. در این نمودار τ_0 (تنش برشی بستر) شاخص هیدرولیک جریان (نیوتن بر مترمربع)، D قطر دانه رسوب (متر)، G_s چگالی دانه‌ها، γ وزن مخصوص آب (نیوتن بر مترمکعب) و ν ویسکوزیته سینماتیک آب (مترمربع بر ثانیه) می‌باشد.



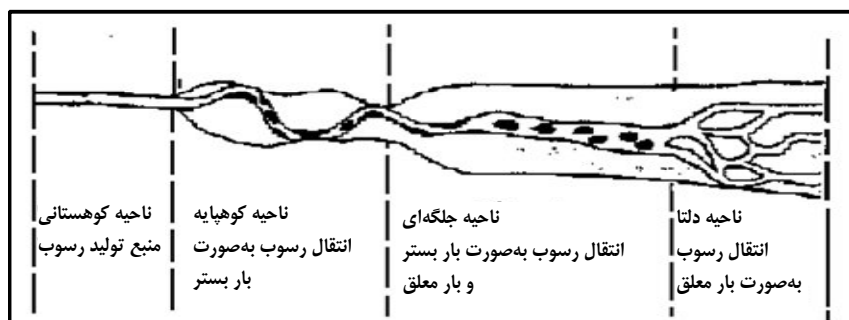
شکل ۳-۲- ناحیه‌بندی نحوه انتقال رسوب براساس مشخصه‌های هیدرولیک جریان و اندازه دانه [۳]

براساس شکل (۳-۲) با افزایش τ_0 دانه‌های رسوب موجود در بستر از حالت سکون (ناحیه ۱) خارج شده و به‌صورت بار بستر (ناحیه ۲) حرکت می‌کنند. چنانچه مقدار تنش برشی باز هم افزایش یابد علاوه بر بار بستر بخشی از مواد رسوبی به‌صورت بار معلق منتقل می‌شود (ناحیه ۳).

حیطه تاثیرگذاری هیدرولیک جریان بر نحوه انتقال رسوب گسترده بوده و جریان‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی هریک تاثیر خاص خود را در جابجایی مواد رسوبی به‌عهده دارند. در جریان‌های زیربحرانی فرآیند انتقال با تشکیل تلماسه‌ها و بارهای رسوبی همراه است و افزایش اصطکاک ناشی از تلماسه‌ها نرخ حمل رسوب را کاهش می‌دهد. در جریان‌های فوق بحرانی نیز شکل‌گیری پاد تلماسه‌ها بر کاهش شدت حمل مواد رسوبی تاثیرگذار می‌باشد. بیش‌ترین نرخ انتقال رسوب موقعی است که عدد فرود به مرز یک نزدیک شده و حالت بستر صاف پدیدار گردد. علت این امر کاهش اصطکاک بستر و افزایش سرعت جریان می‌باشد که در نتیجه آن بخش عمده‌ای از انرژی جریان آب صرف انتقال مواد رسوبی می‌شود [۹، ۶]. همچنین وجود سازه‌های عرضی و طولی نظیر پل‌ها، دیواره‌های سیل‌بند، خاکریزها، سدها، بندها و سرریزها هریک به‌گونه‌ای مشخصه‌های هیدرولیک جریان را متاثر نموده و لازم است در تعیین بار رسوبی چنین عوارضی مدنظر قرارگیرد. به‌علاوه در محل قوس‌ها، به‌خصوص در رودخانه‌های پیچانرودی شرایط هیدرولیکی خاصی حاکم می‌باشد که منجر به تشدید فرسایش کناره‌ها و انتقال مواد رسوبی از قوس‌خارجی به قوس‌داخلی و بازه‌های پایین‌دست می‌شود. وقوع سیلاب شرایطی را فراهم می‌آورد که در آن علاوه بر مجرای اصلی پدیده انتقال رسوب در سیلابدشت نیز برقرار می‌گردد.

۲-۷- زمین‌شناسی

خصوصیات زمین‌شناسی حوضه‌های آبریز عامل موثری در تغذیه رسوبی رودخانه‌ها می‌باشد. وجود سازندهای سخت و مقاوم نرخ فرسایش خاک را کاهش داده و بار رسوبی رودخانه را تقلیل می‌دهد. در صورتی که سطح حوضه آبریز از تشکیلات زمین‌شناسی فرسایش‌پذیر نظیر لایه‌های رس و سیلت پوشیده باشد فرسایش ناشی از بارندگی تشدید یافته و به تبع آن میزان رسوب حمل شده توسط رودخانه نیز رو به افزایش می‌گذارد. شکل دره و مسیر رودخانه نیز که مسیر انتقال رسوب تلقی می‌شوند تابعی از شرایط زمین‌شناسی بوده و به نوبه خود نحوه انتقال مواد رسوبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در شکل (۲-۴) وضعیت دره و مسیر رودخانه و حالت‌های مختلف انتقال رسوب برای یک حوضه آبریز فرضی نشان داده شده است. مطابق شکل ناحیه کوهستانی در سرشاخه‌ها به‌عنوان منبع اصلی تامین رسوب عمل می‌کند و مواد رسوبی حاصل شده به‌صورت باربستر در محدوده کوه‌پایه به پایین‌دست منتقل و در ناحیه جلگه‌ای انتقال مواد رسوبی به‌صورت ترکیبی از باربستر و معلق می‌باشد. در ناحیه پایین‌دست محدوده دلتا به‌علت افت محسوس شیب بستر و کاهش قطر دانه‌ها، انتقال رسوب به‌صورت بار معلق عمومیت دارد [۱۴].



شکل ۲-۴- شکل‌های مختلف انتقال رسوب در مسیر رودخانه‌ها [۶]

وقوع زمین لغزش و کوه ریزش نیز از جمله پدیده‌های زمین‌شناسی است که مواد رسوبی زیادی را وارد شبکه رودخانه نموده و منشای وقوع جریان‌های گلی و جریان‌های غلیظ می‌باشد [۲۱، ۳]. از دیدگاه زمین‌شناسی نوع لایه‌های تشکیل‌دهنده بستر و

کناره‌های رودخانه نیز نقش مهمی در انتقال رسوب به‌عهده دارد. تناوب لایه‌های فرسایش‌پذیر و مقاوم و وجود بیرون‌زدگی‌های سنگی و همچنین ضخامت و گستره لایه آبرفتی بستر، از عوامل موثر در تعیین کمیت بار رسوبی بوده و در حیطه بررسی‌های زمین‌شناسی قرار دارد. به‌علاوه از اطلاعات زمین‌شناسی سطحی که مشخص‌کننده سطح گسترش سازندهای با فرسایش‌پذیری کم یا زیاد می‌باشد در تعیین رسوب‌دهی حوضه‌ها استفاده می‌شود. برای تعیین اطلاعات دقیق‌تر در خصوص ویژگی‌های زمین‌شناسی در مسیر رودخانه‌ها اغلب حفر چاه‌های گمانه و بررسی‌های ژئوتکنیک ضرورت دارد.

۲-۸- کاربری اراضی، پوشش گیاهی و نوع خاک

یکی از عوامل موثر در فرسایش خاک و افزایش بار رسوبی رودخانه‌ها نحوه استفاده از اراضی و تغییر کاربری آنها می‌باشد. توسعه فعالیت‌های کشاورزی، گسترش شهرها، احداث راه‌ها و بسیاری دیگر از اقدامات عمرانی منجر به ناپایداری دانه‌های خاک و انتقال آن به شبکه آبراهه‌ها در حین وقوع بارندگی و برقراری رواناب سطحی می‌گردد. امروزه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، انواع کاربری‌ها در حوضه آبریز مورد بررسی قرار گرفته و نقشه کاربری اراضی تهیه می‌شود. پوشش گیاهی نیز به نوبه خود در تثبیت خاک حوضه موثر بوده و نقش مهمی در حفاظت خاک به‌خصوص در کناره‌ها و اراضی حاشیه رودخانه به‌عهده دارد. تهیه نقشه پوشش گیاهی و مشخص کردن نواحی جنگلی، مرتعی و مناطق بایر نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای امکان‌پذیر می‌باشد. این‌گونه نقشه‌ها مبنای تعیین نرخ فرسایش خاک و میزان رسوب ورودی از سطح حوضه آبریز به رودخانه می‌باشد. بدین منظور علاوه بر اطلاعات کاربری اراضی و پوشش گیاهی تعیین نوع خاک در قسمت‌های مختلف حوضه آبریز و از جمله کناره‌ها و حواشی رودخانه دارای اهمیت است. نقشه‌ها و گزارش‌های خاک‌شناسی موجود، بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری و انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی امکان تعیین مشخصات و توزیع مکانی آنها را فراهم می‌کند. در معادله جهانی $USLE^1$ که با هدف تعیین نرخ فرسایش خاک به‌کار گرفته می‌شود مجموعه‌ای از اطلاعات کاربری اراضی، پوشش گیاهی، و نوع خاک به‌همراه سایر عوامل حوضه‌ای کاربرد دارد. به‌علاوه در معادله $PSIAC^2$ نیز برای تعیین نرخ فرسایش خاک و ارزیابی رسوب ورودی به آبراهه‌ها نوع خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی در کنار سایر عوامل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹، ۲۲]. در استفاده از مدل‌های رایانه‌ای که با هدف شبیه‌سازی رسوب‌دهی حوضه آبریز انجام می‌شود اطلاعات پوشش گیاهی، کاربری اراضی و نوع خاک از جمله ورودی‌های اصلی مدل تلقی می‌شود [۲۰].

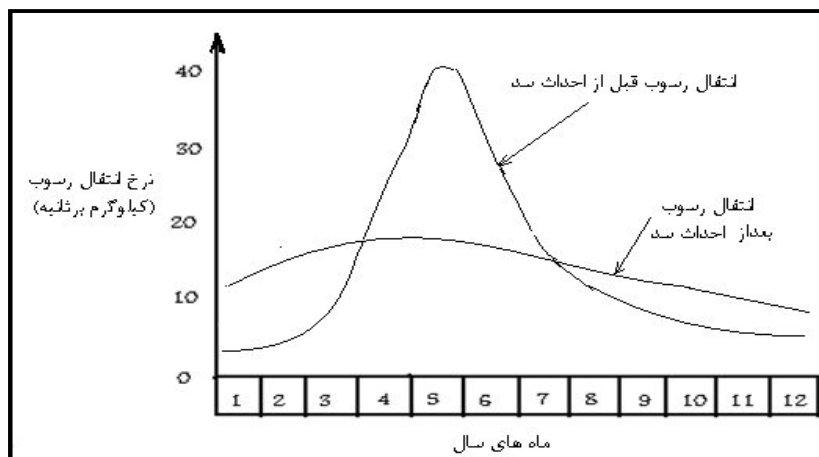
۲-۹- سازه‌های آبی و اقدامات حفاظتی

احداث سازه‌های آبی نظیر سدها، بندها، پل‌ها و سرریزها با تاثیرگذاری بر الگوی جریان و خصوصیات هیدرولیکی، فرآیند انتقال رسوب را دستخوش تغییر می‌نماید. از این‌رو در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها لازم است اثرهای این‌گونه سازه‌ها مورد توجه قرارگیرد. در مخازن سدها رسوب ورودی تله‌اندازی شده و بازه‌های پایین‌دست با کاهش تغذیه رسوبی مواجه می‌شوند. شکل (۲-۵) مواردی از تاثیر احداث سد را بر رژیم رسوبی رودخانه نشان می‌دهد. مطابق شکل افت شدید آورد رسوبی رودخانه در پایین‌دست سد کاملاً مشهود می‌باشد.

1- Universal Soil Loss Equation

2- Pacific Southwest Inter Agency Committee

در سدهای انحرافی نیز بخشی از رسوب حمل شده در بالادست سازه ترسیب نموده و بخشی نیز همراه با آب برداشتی از دسترس جریان رودخانه‌ای خارج می‌شود. پل‌ها از جمله سازه‌هایی می‌باشند که با تغییر الگوی جریان بر فرآیند انتقال رسوب تاثیرگذار بوده و به‌خصوص کاهش مقطع جریان در محدوده سازه موجب افزایش نرخ انتقال رسوب و وقوع فرسایش در اطراف پایه‌های پل می‌گردد. اقدامات حفاظتی و عملیات ساماندهی نیز به نوبه خود از عوامل تاثیرگذار بر پدیده انتقال رسوب می‌باشند. احداث خاکریزهای سیل‌بند یا گوره‌ها [۳۶] با محدودسازی پهنه سیلاب بر نرخ انتقال رسوب تاثیرگذار می‌باشد. آبشکن‌ها نیز از جمله سازه‌های عرضی می‌باشند که به دلیل کاهش مقطع جریان نرخ انتقال رسوب را افزایش می‌دهد.

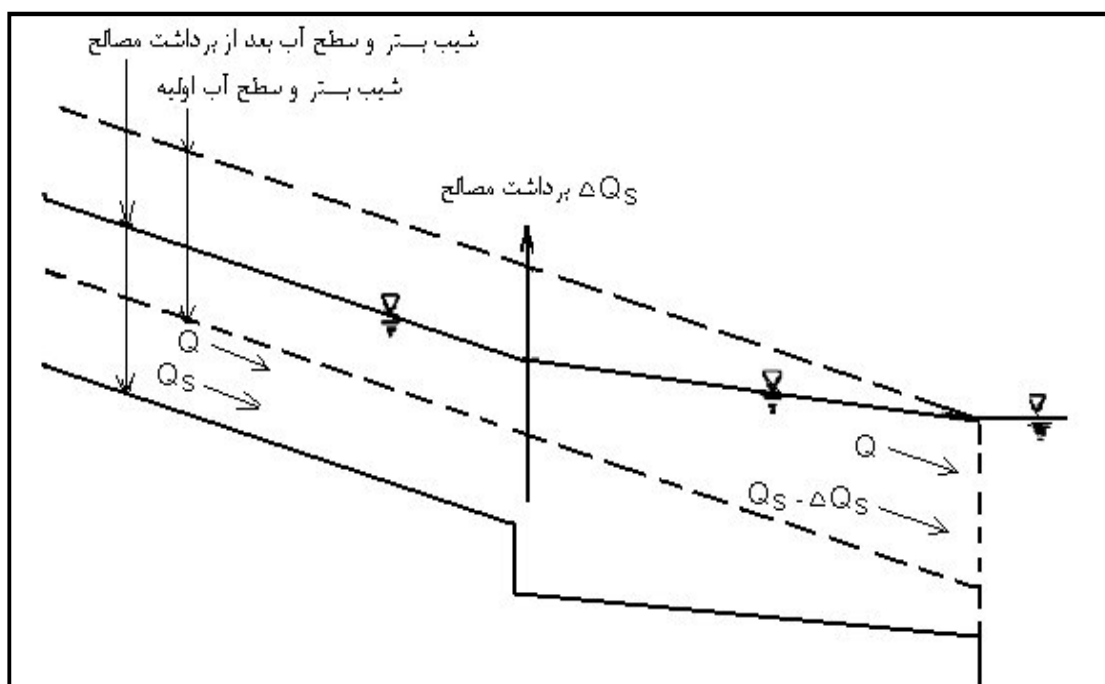


شکل ۲-۵- تاثیرپذیری رژیم رسوبی رودخانه از سد مخزنی [۱۷]

ایجاد پوشش‌های حفاظتی و تشکیل شدن لایه جوشنی موجب تثبیت بستر و کناره‌ها گردیده و از این طریق با کاهش تغذیه رسوبی رودخانه نرخ انتقال رسوب نیز رو به کاهش می‌گذارد. احداث سازه‌هایی نظیر شیب‌شکن، کف‌بند و سرریزها، راهکاری برای کاهش شیب بستر و در نتیجه کاهش ظرفیت حمل رسوب رودخانه تلقی می‌شود. از طرفی اقداماتی نظیر بهسازی و اصلاح مسیر که اغلب با احداث دیواره‌های حفاظتی و ایجاد میانبر و پاکسازی مسیر از انباشته‌های رسوبی همراه است منجر به افزایش مقدار رسوب حمل شده توسط رودخانه می‌گردد.

۲-۱۰- برداشت مصالح

رودخانه‌ها علاوه بر تامین منابع آب اغلب به عنوان منبع تامین مصالح مورد نیاز در طرح‌های مختلف عمرانی نیز تلقی می‌شوند. از این رو برداشت مصالح از دیرباز در رودخانه‌ها متداول بوده است. به‌علاوه در ترابری آبی لازم است برای تامین عمق مورد نیاز کشتیرانی بخشی از مصالح رودخانه‌ای لایروبی گردد. در ساماندهی رودخانه‌ها نیز اغلب پاکسازی مسیر از انباشته‌های رسوبی با هدف ایجاد راستای مناسب ضروری می‌باشد. از جمله تبعات به دست آمده از برداشت مصالح شکل‌گیری گودال برداشت و تغییر نرخ انتقال رسوب در بالادست و پایین دست گودال می‌باشد. در شکل (۲-۶) چگونگی بروز آثار برداشت مصالح رودخانه‌ای نشان داده شده است [۳۰].



شکل ۲-۶- چگونگی بروز آثار برداشت مصالح رودخانه‌ای از دیدگاه انتقال رسوب [۳۰]

مطابق شکل با برداشت بخشی از بار رسوبی رودخانه (ΔQ_s) فرسایش فراگیر بستر آغاز گردیده و شرایط جدیدی از نظر انتقال رسوب در بازه‌های بالادست و پایین‌دست گودال برداشت ظهور می‌کند. در این فرآیند نرخ انتقال رسوب در پایین‌دست کاهش یافته ($Q_s - \Delta Q_s$) و متناسب با آن شیب بستر نیز روبه کاهش می‌گذارد. در بالادست گودال برداشت، افزایش بار رسوبی در مراحل اولیه منجر به کف‌کنی و افت تراز بستر گردیده و در بلند مدت با برقراری شیب اولیه بار رسوبی نیز مجدداً میزان اولیه خود (Q_s) را باز می‌یابد. علاوه بر نرخ انتقال رسوب مشخصه‌های هندسی رودخانه از پدیده برداشت مصالح تأثیرپذیری زیادی دارد و از این‌رو لازم است نرخ آورد رسوب رودخانه برای بهره‌برداری بهینه پیشاپیش مشخص گردد [۱۷، ۳۰].

فصل ۳

طبقه‌بندی انواع فرسایش و انتقال

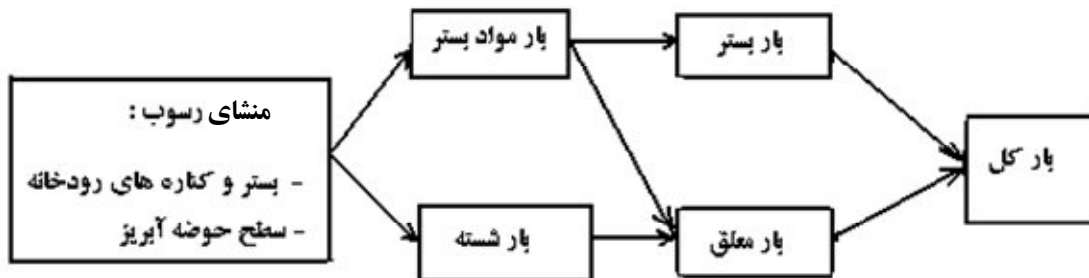
رسوب در رودخانه‌ها

۳-۱- کلیات

وقوع فرسایش از جمله پدیده‌های بارز انتقال رسوب در رودخانه‌ها می‌باشد. به لحاظ پیچیدگی‌های حاکم بر انتقال رسوب و با توجه به این که عوامل متعددی در این فرآیند تاثیرگذار می‌باشند فرسایش در رودخانه‌ها نیز دارای شکل‌های مختلفی است. در زیر به بررسی نحوه انتقال رسوب و انواع فرسایش حاصل از آن پرداخته شده است.

۳-۲- شکل‌های مختلف انتقال رسوب در رودخانه‌ها

مواد رسوبی در رودخانه‌ها عموماً به دو صورت بار بستر و بار معلق جابجا می‌شود. عواملی نظیر خصوصیات دانه‌بندی، چگالی دانه‌ها، دمای آب، هیدرولیک جریان و مشخصه‌های هندسی رودخانه در نحوه انتقال مواد رسوبی تاثیرگذار می‌باشند. بارکل مجموع باربستر و بار معلق است که به‌عنوان آورد رسوبی رودخانه قلمداد می‌شود. مطابق شکل (۳-۱) بار معلق خود شامل دو قسمت متمایز بار شسته^۱ و بار معلق بستری^۲ است. بار شسته مواد رسوبی ریزدانه است که در اثر بارندگی از سطح خاک حوضه آبریز فرسایش یافته و وارد شبکه آبراهه‌ها می‌شود. در خصوص بار معلق بستری نیز بخشی از دانه‌های رسوب موجود در بستر به حالت معلق در آمده و همراه جریان آب حمل می‌شود. مجموع باربستر و بار معلق بستری به‌عنوان بار مواد بستر^۳ بوده و معرف مواد رسوبی برخاسته از بستر رودخانه می‌باشد.



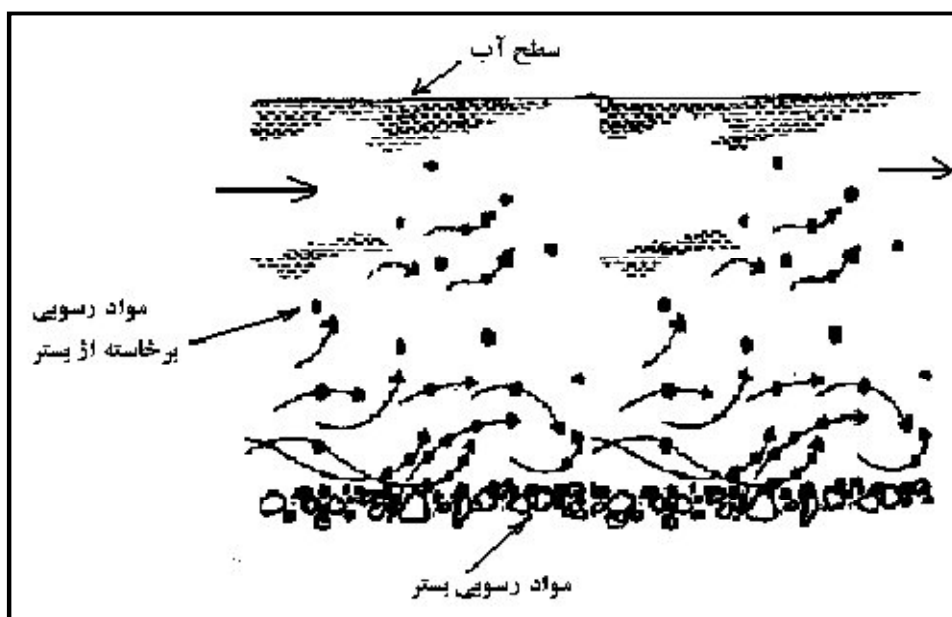
شکل ۳-۱- شکل‌های مختلف انتقال مواد رسوبی در رودخانه‌ها [۱۰]

به‌علاوه مطابق شکل (۳-۱) باربستر و بار معلق بستری همواره در تعامل با یکدیگر بوده و چنانچه در بازه‌ای از رودخانه تنش‌های هیدرولیکی افزایش یابد (به علت کاهش مقطع جریان و یا افزایش شیب بستر) بخشی از باربستر به‌حالت معلق در آمده و میزان بار معلق بستری افزایش می‌یابد. در صورت کاهش تنش هیدرولیکی (به‌علت کاهش بده جریان، افزایش مقطع و یا کاهش شیب رودخانه) بخشی از بار معلق ترسیب گردیده و به‌صورت باربستر جابجا می‌شود. در زیر جزییات بیش‌تری از شکل‌های مختلف انتقال رسوب ارائه شده است.

1- Wash Load
2- Bed Material Suspended Load
3- Bed Material Load

۳-۲-۱- بار معلق

بخش مهمی از بار رسوبی حمل شده توسط رودخانه‌ها به بار معلق اختصاص دارد. از جمله عوامل موثر در معلق شدن دانه‌های رسوب پدیده تلاطم است که در نتیجه آن مطابق شکل (۳-۲) دانه‌های رسوب از بستر جدا شده و ضمن اختلاط با آب همراه جریان منتقل می‌شود [۲]. معیارهای مختلفی توسط محققین برای معلق شدن دانه‌های رسوب ارائه شده است که بیش‌تر آنها نسبت سرعت برشی (V_*) به سرعت سقوط دانه‌ها (w_0) را مبنایی برای معلق شدن قرار داده‌اند. در جدول (۳-۱) دیدگاه محققین مختلف ارائه شده است [۳].



شکل ۳-۲- نحوه معلق شدن دانه‌های رسوب موجود در بستر در اثر پدیده تلاطم [۲]

در جدول (۳-۱): V_* : سرعت برشی جریان (متر بر ثانیه) که از رابطه $[V_* = (\tau_0 / \rho)^{0.5}]$ به دست می‌آید که در آن τ_0 : تنش برشی جریان (نیوتن بر مترمربع)، ρ : جرم مخصوص آب (کیلوگرم جرم بر مترمکعب)، می‌باشد، D_s : قطر دانه رسوب (متر)، W_0 : سرعت سقوط دانه (متر بر ثانیه)، G_s : چگالی دانه‌های رسوب، g : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، ν : لزجت سینماتیکی آب (مترمربع بر ثانیه) می‌باشد.

معیارهای مندرج در جدول (۳-۱) مربوط به بار معلق بستری (مواد رسوبی برخاسته از بستر) بوده و محدوده دانه‌های غیرچسبنده (ماسه و شن) را شامل می‌شود. مواد معلق حاصل شده از رسوبات چسبنده (سیلت و رس) در زمره‌ی بار شسته قرار دارد. اندازه دانه‌ها برای بار شسته کم‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر و در بعضی مراجع دانه‌های رسوب کوچک‌تر از ۰/۰۶۲ میلی‌متر به عنوان محدوده بارشسته تلقی می‌شود [۱، ۱۰، ۲۳].

جدول ۳-۱- معیار معلق شدن دانه‌های رسوب در رودخانه‌ها براساس نظریات محققین مختلف [۳]

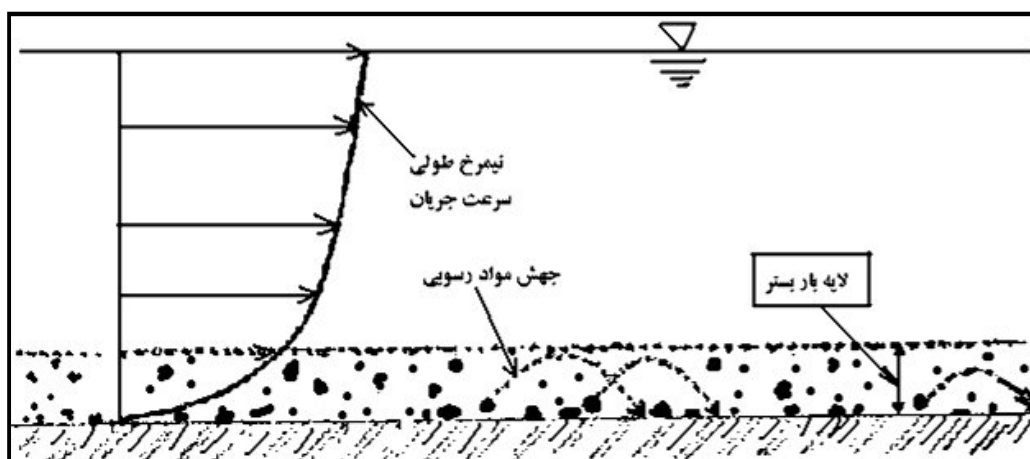
نام محقق	معیار معلق شدن دانه‌های رسوب	ملاحظات
باگنولد - ۱۹۶۶ (Bagnold)	$V^*/w_o > 1$	-
وان راین - ۱۹۸۴ (Van Rijn))	$V^*/w_o > 4/[(Gs-1)g Ds /v2]^{1/3}$	$1 < Ds [(Gs-1)g /v2]^{1/3} \leq 10$
	$V^*/w_o > 0.4$	$Ds [(Gs-1)g /v2]^{1/3} > 10$
راد کیوی - ۱۹۹۰ (Raudkivi)	$V^*/w_o > 0.5$	آغاز جهش دانه‌ها - Saltation
	$V^*/w_o > 1.2$	معلق شدن فراگیر دانه‌ها
ژولین - ۱۹۹۵ (Julien)	$V^*/w_o > 0.2$	آغاز معلق شدن دانه‌ها
	$V^*/w_o > 2.5$	معلق شدن فراگیر دانه‌ها
سومر و همکاران - ۱۹۹۶ (Sumer et al.)	$V^2/(Gs-1)gDs > 1$	$0.13 < Ds < 3 \text{ mm}$

درحالی‌که نرخ انتقال بار معلق بستری تابع شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد، بار شسته از این ویژگی مستثنا بوده و جریان آب قادر است بار شسته را به هر مقدار که وارد رودخانه شود به صورت معلق حمل نماید. علت این پدیده تشکیل پیوند یونی بین دانه‌های رسوب و ملکول‌های آب می‌باشد که در مقابل نیروی وزن دانه‌ها مقاومت نموده و از ترسیب آنها ممانعت می‌نماید. این ویژگی همچنین عامل اصلی وقوع جریان‌های با غلظت بالا^۱ و جریان‌های گلی در رودخانه‌ها می‌باشد. راهکار عملی برای تعیین بار شسته، نمونه‌برداری و تعیین غلظت در ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی می‌باشد. بدیهی است نمونه‌های تهیه شده علاوه بر بار شسته، بار معلق بستری را نیز شامل می‌شود. جزییات بیش‌تر در خصوص تعیین بار معلق در فصل ۴ ارائه خواهد شد.

۳-۲-۲- باربستر

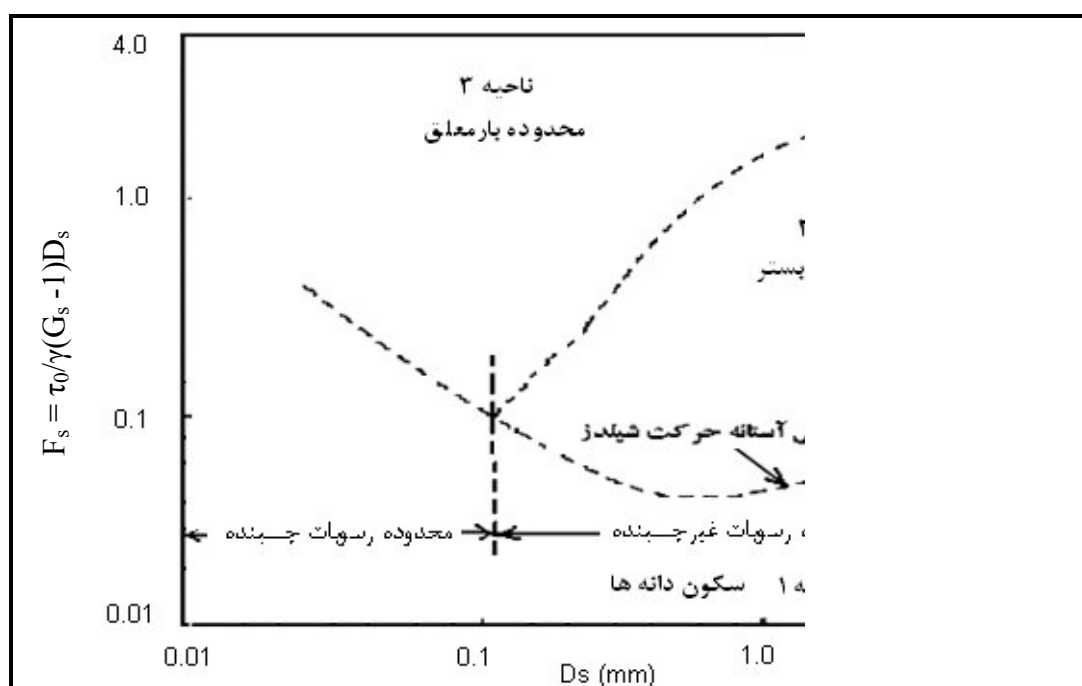
باربستر بخشی از بار رسوبی حمل شده توسط رودخانه است که به حالت لغزش^۲، غلطش^۳ و یا جهش^۴ در بستر (کف رودخانه) حرکت می‌کند [۱۷]. در شکل (۳-۳) نحوه جابجایی مواد رسوبی در بستر نشان داده شده است. مطابق شکل بار بستر در لایه‌ای در کف رودخانه جابجا می‌شود که اصطلاحاً عنوان لایه باربستر^۵ به آن اطلاق می‌گردد. مکانیسم تشکیل باربستر اولین بار در سال ۱۸۷۹ میلادی توسط دوبویز^۶ مورد بررسی قرار گرفت [۳]. مطابق نظریه دوبویز باربستر حاصل تنش برشی جریان آب بوده و با افزایش آن مقدار بار بستر نیز رو به افزایش می‌گذارد. جزییات مربوط به نقش تنش برشی در انتقال بار بستر در فصل ۵ ارائه خواهد شد. باگنولد^۷ معیار باربستر را براساس مطالعات شیلدز به‌صورت شکل (۳-۴) معرفی نموده است [۱۲]. مطابق شکل مزبور منحنی آستانه حرکت شیلدز به‌عنوان حد نهایی سکون دانه‌ها تلقی می‌شود (ناحیه یک).

- 1- Hper Coccentration
- 2- Sliding
- 3- Rolling
- 4- Saltation
- 5- Bed Load Layer
- 6- Du Boys
- 7- Bagnold



شکل ۳-۳ نحوه جابجایی مواد رسوبی در بستر رودخانه و مفهوم لایه باربستر [۳]

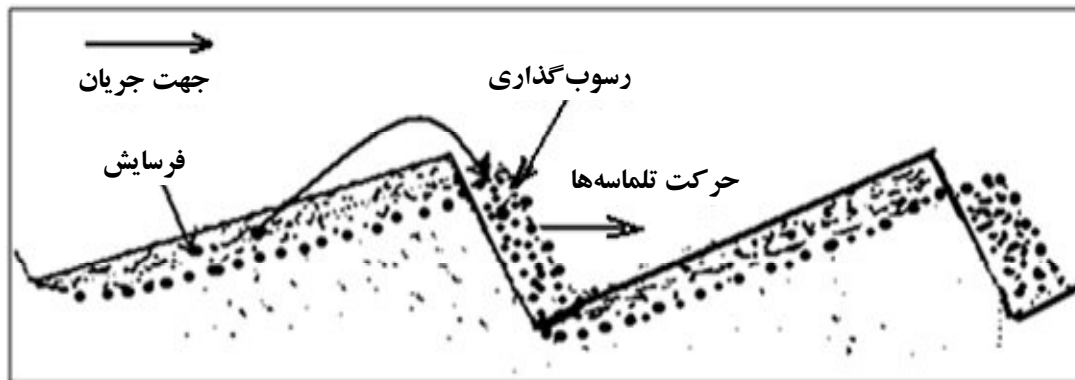
محدوده بار بستر از منحنی آستانه حرکت شروع شده و تا منحنی نظیر $F_s = 0.4(w_0^2 / gD_s)$ ادامه می‌یابد (ناحیه دو). برای حالتی که $F_s > 0.4(w_0^2 / gD_s)$ باشد حرکت دانه‌ها به صورت معلق خواهد بود (ناحیه سه). نکته مهم دیگر در شکل (۳-۴) وجود دو محدوده رسوبات چسبنده و غیرچسبنده می‌باشد. مطابق شکل مرزبندی بین باربستر و بار معلق در محدوده رسوبات غیرچسبنده صادق بوده و بیانگر آن است که برای رسوبات غیرچسبنده شرط معلق شدن گذر از مرحله بار بستر است.



شکل ۳-۴ محدوده بار بستر براساس ناحیه‌بندی باگنولد [۱۶]

برای رسوبات چسبنده یا ریزدانه‌ها این شرط صادق نبوده و چنانچه مقدار عدد شیلدز از حد آستانه حرکت تجاوز نماید مواد ریزدانه مستقیماً به حالت معلق در آمده و همراه جریان آب منتقل می‌شوند. حرکت دانه‌های رسوبی به صورت بار بستر موجب شکل‌گیری

تلماسه‌ها و پشته‌های رسوبی می‌گردد. در شکل (۳-۵) نمونه‌ای از نحوه جابجایی مواد رسوبی در بستر و تلماسه‌های حاصل از آن نشان داده شده است [۳، ۹].

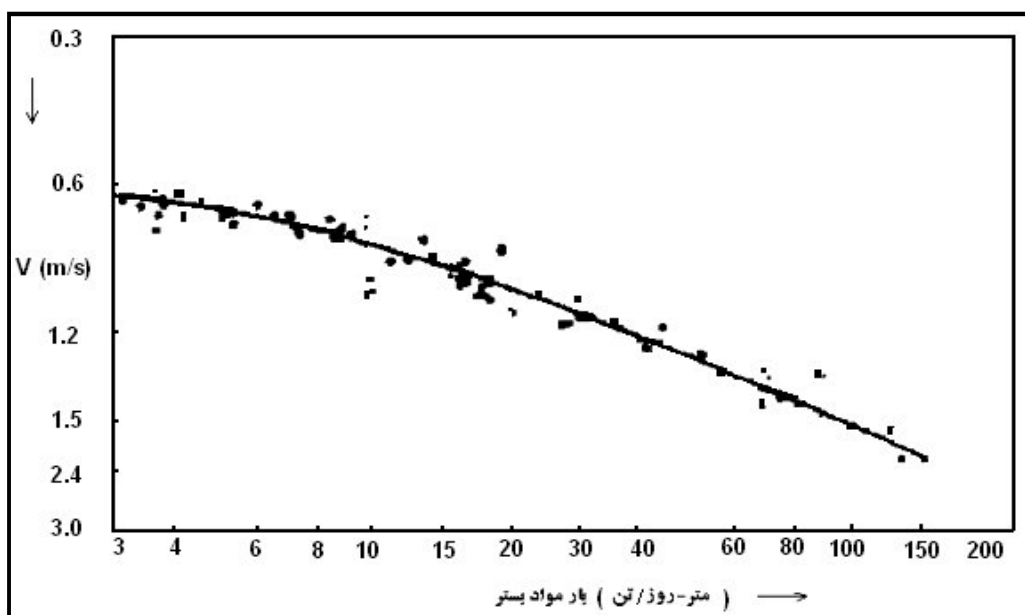


شکل ۳-۵- نمونه‌ای از شکل‌گیری تلماسه‌ها ناشی از پدیده باربستر در رودخانه‌ها [۳]

در تعیین باربستر آگاهی از خصوصیات هندسی و مکانیسم جابجایی این گونه امواج رسوبی بستر ضروری می‌باشد که در فصل مربوط به تعیین باربستر (فصل ۵) به آن پرداخته خواهد شد.

۳-۲-۳- بار مواد بستر

مجموع باربستر و بار معلق بستری اصطلاحاً بار مواد بستر نامیده می‌شود. هرچند محاسبه باربستر و بار معلق بستری به‌صورت مجزا و با استفاده از روابط موجود امکان‌پذیر می‌باشد، لیکن در بسیاری از موارد استفاده از رابطه‌ای که بتواند بار مواد بستر را مستقیماً محاسبه نماید ترجیح داده می‌شود. معادلاتی که بار مواد بستر را محاسبه می‌کنند اصطلاحاً به معادلات بارکل نیز شهرت دارند با این تاکید که این معادلات قادر به محاسبه بار شسته نیستند. در شکل (۳-۶) نمونه‌ای از نتایج اندازه‌گیری بارمواد بستر در رودخانه نشان داده شده است. تعیین بارمواد بستر از اوایل سال ۱۹۵۰ با بررسی‌های انشتین آغاز شد و تاکنون معادلات مختلفی توسط محققین ارائه شده است [۲۲، ۲۵]. محدوده دانه‌بندی مورد استفاده در تعیین بار مواد بستر رسوبات غیرچسبنده و یا به‌عبارتی ماسه و دانه‌های درشت‌تر موجود در بستر بوده و مواد رسوبی چسبنده نظیر رس و سیلت که منشأی بار شسته می‌باشند در تعیین بارمواد بستر منظور نمی‌شوند. از جمله خصوصیات شاخص بارمواد بستر آن است که به تبعیت از شرایط هیدرولیک جریان دارای ظرفیت حمل رسوب^۱ مشخصی می‌باشد. این ویژگی از شکل (۳-۶) به‌خوبی قابل استنتاج است. مطابق شکل مزبور با افزایش سرعت جریان (شاخص هیدرولیکی) مقدار بار موادبستر (شاخص ظرفیت حمل) نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۶- نمودار تغییرات بار موادبستر برحسب سرعت جریان [۲۱]

۳-۲-۴- بارکل

در مطالعه رسوب رودخانه‌ها تعیین بارکل از جنبه‌های مختلف دارای اهمیت است. بارکل حاصل عملکرد حوضه آبریز در تولید و انتقال رسوب بوده و شاخصی از وضعیت پایداری خاک، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و ملاحظات مربوط به حفاظت و بهره‌برداری از رودخانه‌ها می‌باشد. بخشی از بارکل متعلق به بارشسته است که حاصل فرسایش خاک حوضه بوده و از طریق شبکه آبراهه‌ها وارد رودخانه می‌شود. بار شسته همراه با بارمواد بستر به‌عنوان بارکل آوردرسوبی رودخانه را مشخص می‌نماید. معادلات موجود برای تعیین بارکل عموماً از محاسبه بارشسته صرف‌نظر نموده و فقط بارموادبستر را به‌عنوان بارکل قلمداد می‌کنند [۲۱، ۱۷]. از این‌رو در بسیاری از موارد بارکل مترادف با بار مواد بستر بوده و توجه اصلی به بار رسوبی حاصل از فرسایش بستر رودخانه‌ها معطوف می‌باشد. از طرفی در موارد عدیده‌ای سهم بار شسته در مقایسه با بار مواد بستر بسیار شاخص بوده و لازم است در تعیین بارکل به این مساله توجه شود. از دیدگاه تئوری تعیین بارمواد بستر با استفاده از معادلات انتقال امکان‌پذیر است لیکن تعیین بار شسته صرفاً با نمونه‌برداری و تعیین غلظت بار معلق انجام می‌گیرد. روش کلبی^۱ تنها روش موجود برای تعیین بارکل است که در آن بارشسته همراه با بارمواد بستر محاسبه می‌شود [۲، ۲۵]. سایر روش‌های موجود برای تعیین بارکل فاقد راهکار لازم برای محاسبه بار شسته می‌باشند و بارمواد بستر به‌عنوان بارکل در نظر گرفته می‌شود. جزییات بیش‌تر در خصوص محاسبه بارکل در فصل ۶ ارائه خواهد شد.

۳-۲-۵- جریان‌های باغلظت بالا^۲

فرسایش خاک در سطح حوضه آبریز اغلب منشا وقوع جریان‌های غلیظ در رودخانه‌ها می‌باشد. غلظت مواد معلق در جریان‌های با غلظت بالا عموماً بیش از ۳۰ گرم در لیتر بوده و بخش عمده‌ای از آن‌را بار شسته تشکیل می‌دهد [۳، ۲۱، ۲۵]. جریان گلی و جریان واریزه‌ای را نیز که حاصل زمین لغزش و حرکت انبوه گل و لای می‌باشد در زمره جریان‌های با غلظت بالا تقسیم‌بندی می‌کنند.

1- Colby

2- Hyperconcentrated Flows

بررسی‌های جدید موید آن است که در جریان با غلظت بالا نظیر جریان‌های گلی و واریزه‌ای به علت این که بخشی از انرژی جریان در اثر برخورد دانه‌های رسوب به هم تلف می‌شود باعث افزایش ضریب زبری جریان نیز می‌گردد. اثر غلظت جریان در غلظت‌های حجمی بالای ۵٪ برروی زبری جریان محسوس می‌شود [۳۱]. عدم حفاظت خاک و مدیریت نا صحیح آبخیزها باعث افزایش رسوبدهی حوضه‌های آبریز به‌ویژه هنگام سیلاب می‌گردد که نهایتاً به رخداد سیلاب‌های واریزه‌ای و گلی منجر می‌شود [۳۲، ۳۳]. در این خصوص می‌توان به رخداد سیلاب‌های واریزه‌ای در تجریش تهران (تابستان سال ۱۳۶۶)، ماسوله (تابستان ۱۳۷۷) و حوضه‌های گلستان (تابستان سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱) اشاره نمود. جریان‌های واریزه‌ای به‌خصوص دارای طیف وسیع دانه‌بندی بوده و بیش از ۵۰٪ آن‌را مواد درشت دانه شن و قلو و قطعات درشت سنگ تشکیل می‌دهد. برای روابط انتقال رسوب جریان‌های با غلظت بالا به راهنمای مطالعات رودخانه‌های مخروط‌افکنه‌ای، نشریه شماره ۳۶۳- الف طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور مراجعه شود.

۳-۳- انواع فرسایش

فرسایش^۱ پدیده‌ای تاثیرگذار در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها می‌باشد. چنانچه نرخ تغذیه رسوبی رودخانه کمتر از ظرفیت حمل آن باشد مواد رسوبی موجود در بستر فرسایش یافته و همراه جریان آب حمل می‌شود. مقدار رسوب فرسایش یافته از بستر براساس رابطه زیر معروف به معادله پیوستگی رسوب یا معادله بقای جرم مشخص می‌گردد [۳، ۲۷]:

$$Q_{sd} = Q_{sp} - Q_{si} \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه:

Q_{si} : تغذیه رسوبی رودخانه (از بازه بالادست و شاخه‌های متصل به رودخانه) در واحد زمان، Q_{sd} : بار رسوبی فرسایش یافته از بستر و کناره‌ها و Q_{sp} : رسوب حمل شده توسط رودخانه که برابر با ظرفیت انتقال بوده و با استفاده از معادلات رسوب تعیین می‌گردد. با توجه به ماهیت معادله (۱-۳) که مبتنی بر ظرفیت انتقال رودخانه است عوامل معادله معرف بار مواد بستر (بارکل منهای بار شسته) می‌باشد. عوامل مختلفی در فرسایش رودخانه‌ها تاثیرگذار می‌باشند که از آن جمله می‌توان احداث سدهای مخزنی و تله‌اندازی رسوب ورودی به مخزن، برداشت آب از رودخانه، برداشت مصالح، کاهش مقطع جریان ناشی از احداث پل و سازه‌های حفاظتی و ساماندهی را می‌توان نام برد. در زیر به انواع فرسایش در رودخانه‌ها پرداخته شده است.

۳-۳-۱- فرسایش موضعی^۲

فرسایش موضعی در اثر انحراف خطوط جریان و وقوع پدیده گردابه‌ای^۳ به‌وجود می‌آید. این‌گونه فرسایش را می‌توان در اطراف پایه‌های پل، دماغه آبشکن‌ها، خم رودخانه‌ها، برون‌زدگی‌های سنگی، پایین‌دست سرریزها و محدوده سازه‌های موجود در مسیر رودخانه‌ها مشاهده نمود. فرسایش موضعی منجر به تشکیل چاله فرسایشی^۴ و گودافتادگی موضعی بستر رودخانه می‌گردد. از دیدگاه انتقال رسوب معادله (۲-۳) را می‌توان برای وقوع فرسایش موضعی نیز صادق دانست. مطابق رابطه مزبور در فرآیند تشکیل چاله

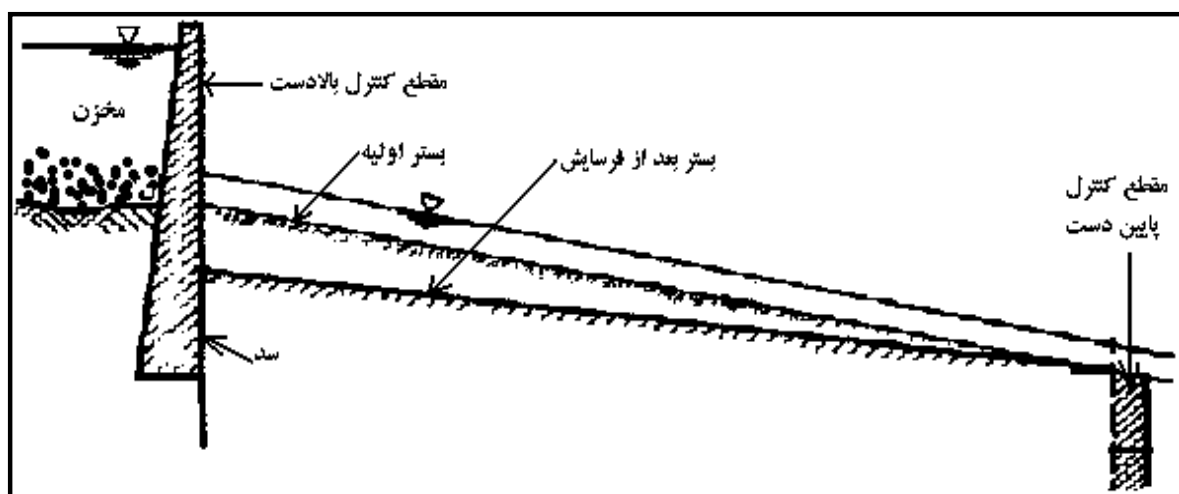
1- Degradation
2- Local Scour
3- Eddy Formation
4- Scour Hole

فرسایشی علاوه بر رسوب ورودی (Q_{si}) بخشی از مواد رسوبی موجود در بستر نیز فرسایش یافته (Q_{sd}) و به عنوان رسوب خروجی (Q_{sp}) به پایین دست چاله فرسایشی منتقل می شود. منابع رسوب حاصل شده از فرسایش موضعی در تعیین کمیت بار رسوبی دارای اهمیت است. به خصوص در مدل سازی رفتار رودخانه ها لحاظ کردن فرسایش های موضعی و پیش بینی پی آمدهای به دست آمده از آن درخور توجه می باشد. جزییات بیش تر در خصوص فرسایش موضعی و شکل گیری چاله فرسایشی در مراجع مختلف از جمله مرجع [۲۰] ارائه شده است.

۲-۳-۳- فرسایش عمومی^۱

کف کنی و افت فراگیر بستر در رودخانه ها به عنوان فرسایش عمومی شناخته می شود. عوامل متعدد طبیعی و انسانی در وقوع فرسایش عمومی دخالت دارند که از جمله می توان به مواردی نظیر احداث سد، کاهش مقطع رودخانه، برداشت مصالح، وقوع سیلاب، پایین افتادگی تراز آب در مصب دریاها و دریاچه ها، تغییر کاربری اراضی و کاهش تغذیه رسوبی رودخانه، اقدامات حفاظتی و تثبیت بستر و کناره های رودخانه اشاره نمود.

عامل اصلی فرسایش عمومی افزایش ظرفیت انتقال رودخانه ناشی از عوامل مذکور در فوق می باشد که در نتیجه آن رودخانه برای جبران کمبود بار رسوبی بستر خود را فرسایش داده و به تدریج پدیده کف کنی در بخش عمده ای از مسیر رودخانه پدیدار می گردد. در شکل (۷-۳) نمونه ای از فرسایش عمومی در پایین دست سد نشان داده شده است. مطابق شکل در اثر احداث سد موادرسوبی حمل شده توسط رودخانه در مخزن انباشته شده و خروج آب صاف و فاقد موادرسوبی (و یا رسوب خروجی کم) موجب افزایش ظرفیت انتقال در بازه پایین دست سد گردیده و در نتیجه آن بستر فرسایش یافته و حالت کف کنی پدیدار می گردد. در این فرآیند نیز معادله (۱-۳) صادق بوده و هریک از عوامل معادله در میزان گود افتادگی بستر تاثیر گذار می باشند. احداث پل و یا استفاده از سازه های حفاظتی نظیر آبشکن ها و دیواره های سیل بند و گورها (خاکریزها) منجر به کاهش مقطع جریان شده و بستر رودخانه در اثر تنگ شدگی دستخوش فرسایش می گردد. برداشت مصالح نیز رژیم رسوبی رودخانه را برهم زده و فرسایش عمومی را در بالادست و پایین دست نقطه برداشت به همراه دارد.



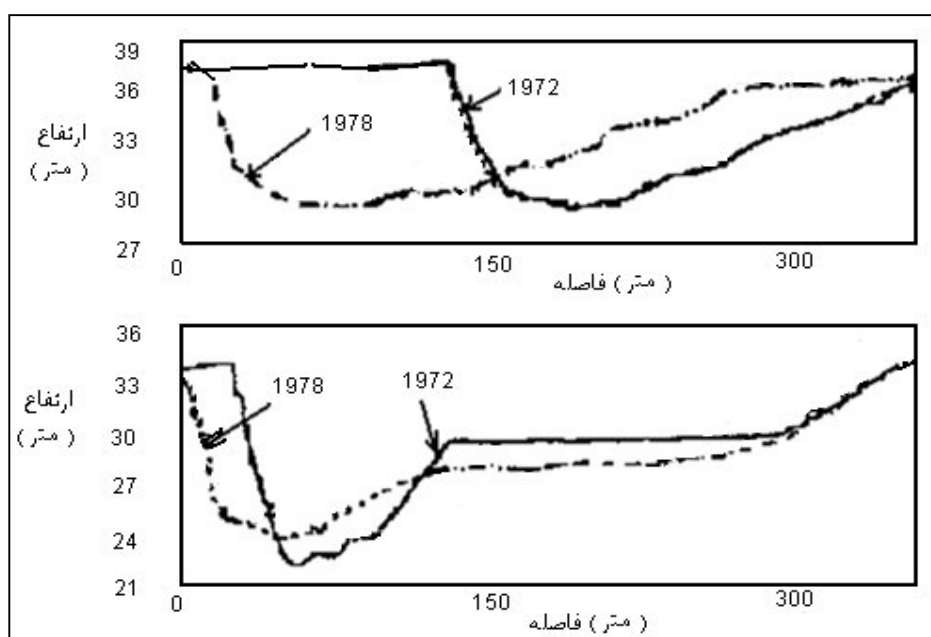
شکل ۷-۳- فرسایش عمومی در پایین دست سد مخزنی ناشی از تله اندازی رسوب در بالادست و افزایش ظرفیت انتقال در پایین دست [۲۰]

وقوع سیلاب نیز از جمله عوامل طبیعی است که منجر به فرسایش عمومی در رودخانه می‌گردد [۵].

۳-۳-۳- فرسایش کناره‌ای^۱

بخشی از بار رسوبی رودخانه‌ها حاصل فرسایش کناره‌ای است. ادگار^۲ در بررسی‌های خود بار رسوبی ناشی از فرسایش کناره‌ای رودخانه ساکرامنتو^۳ را معادل ۶۰٪ رسوب کل سالیانه رودخانه گزارش نموده است [۲۰]. در شکل (۳-۸) نمونه‌ای از فرسایش کناره‌ای و جابجایی عرضی رودخانه نشان داده شده است. مطابق شکل در یک دوره ۷ ساله (۱۹۷۲-۱۹۷۸) کناره‌های رودخانه بیش از یک‌صد متر دستخوش فرسایش و جابجایی عرضی شده است. از عوامل موثر در فرسایش کناره‌ها را می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۸، ۱۸]:

- فرسایش در قوس خارجی رودخانه‌ها
- فرسایش کناره‌ها و تعریض در رودخانه‌های شریانی
- فرسایش‌های خندقی در حاشیه رودخانه‌ها
- پنجه‌شویی و ریزش توده‌ای کناره‌ها
- فرسایش ناشی از تنش‌های هیدرولیکی (برخورد مستقیم جریان با کناره‌ها)
- شکل مقطع رودخانه
- از بین بردن پوشش گیاهی در کناره‌ها



شکل ۳-۸- نمونه‌ای از فرسایش کناره‌ای و جابجایی عرضی در رودخانه‌ها [۱۸]

در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها هر یک از عوامل فوق تاثیرگذار بوده و لازم است نقش آنها از دیدگاه کمی و کیفی مد نظر قرار گیرد. مقدار بار رسوبی به دست آمده از فرسایش کناره‌ها را می‌توان با در دست داشتن نرخ فرسایش سالیانه برآورد نمود.

1- Bank Erosion
2- Odgaard
3- Sacramento River

فصل ۴

روش‌های محاسبه بار معلق

۴-۱- کلیات

انتقال مواد رسوبی به صورت بار معلق تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان و خصوصیات فیزیکی دانه‌های رسوب می‌باشد. از دیدگاه هیدرولیکی دانه‌های رسوب در اثر نیروی برکنش^۱ ناشی از پدیده تلاطم (توربلانت) از بستر جدا شده و به حالت معلق حمل می‌شود. این بخش از مواد رسوبی موجود در جریان رودخانه‌ای اصطلاحاً بار معلق بستری نامیده می‌شود. نرخ بار معلق بستری تابع شرایط هیدرولیکی بوده و با افزایش بده جریان مقدار آن نیز رو به افزایش می‌گذارد و در بده‌های کم به طور محسوسی کاهش می‌یابد. خصوصیات فیزیکی دانه‌ها نیز نقش مهمی در کمیت بار معلق ایفا می‌کند. مواد رسوبی دانه‌ریز یا چسبنده به‌ویژه رس‌ها به علت دارا بودن خاصیت جاذبه مولکولی یا چسبندگی^۲ قادرند با مولکول‌های آب پیوند یونی تشکیل داده و به حالت معلق جابه‌جا شوند [۱۹].

این ویژگی عامل مهمی در فرسایش سطحی خاک حوضه‌های آبریز می‌باشد که طی آن رواناب ناشی از بارندگی ذرات رس و سیلت را همراه خود وارد شبکه آبراهه‌ها نموده و از طریق رودخانه به خارج از حوضه آبریز منتقل می‌نماید. غلظت بار معلق به دست آمده از رسوبات چسبنده (ریزدانه‌ها) یا بار شسته، همان‌طور که در مبحث فصل ۳ اشاره شد متأثر از شرایط هیدرولیکی جریان نبوده و مفهوم ظرفیت انتقال برای آنها مصداق ندارد. در شرایط طبیعی بار معلق حمل شده توسط رودخانه ترکیبی از بار معلق بستری و بار شسته می‌باشد که با توجه به متفاوت بودن مکانیسم حاکم بر انتقال آنها روش‌های موجود برای تعیین هر یک نیز متفاوت است. در زیر جزییات روش‌های تعیین بار معلق ارائه می‌شود.

۴-۲- محاسبه بار معلق در شرایط وجود آمار

از جمله راهکارهای مناسب برای تعیین بار معلق استفاده از آمار ثبت شده در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی می‌باشد. در این ایستگاه‌ها ضمن اندازه‌گیری بده جریان (Q) نمونه‌های آب نیز با هدف تعیین غلظت رسوب (C) تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه غلظت بار معلق مشخص می‌گردد. این گونه اطلاعات بخشی از آمار متداول رودخانه‌ها بوده و از طریق سازمان‌های ذیربط (نظیر سازمان‌های آب منطقه‌ای، دفتر مطالعات پایه منابع آب (شرکت مدیریت منابع آب) قابل دسترسی می‌باشد. نمونه‌برداری و تعیین غلظت با استفاده از روش نقطه‌ای و یا تجمع در عمق انجام می‌گیرد. جزییات مربوط به تجهیزات نمونه‌برداری، شیوه نمونه‌برداری و همچنین تعیین غلظت در نشریات استاندارد وزارت نیرو [۲۹، ۳۱ و ۳۹] قابل دسترسی است. پس از تعیین C مقدار بار رسوبی معلق رودخانه، Q_s ، با استفاده از رابطه زیر تعیین و به عنوان بخشی از آمار رسوب معلق رودخانه ثبت می‌گردد:

$$Q_s = 0.0864 C Q_d \quad (۱-۴)$$

که در این رابطه:

Q_s : بار رسوب معلق (تن در روز)، C : غلظت متوسط رسوب معلق (میلی گرم در لیتر) و Q_d بده جریان روزانه (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد.

این واقعیت که اندازه‌گیری بده جریان و غلظت بار معلق به صورت روزانه به دلایل مختلف از جمله هزینه‌های مالی، مسایل اداری، تعدد و تنوع رودخانه‌ها عملاً میسر نمی‌باشد، در عمل سالانه تعداد معدودی عملیات اندازه‌گیری و تعیین کمیت بده جریان و

غلظت انجام گرفته و به عنوان داده‌های آماری در اختیار کاربران و متخصصین مسایل رودخانه‌ای قرار می‌گیرد. این داده‌ها مبنای تعیین بار رسوبی روزانه، ماهانه و سالانه بوده و بدین منظور از روش‌های مختلفی می‌توان بهره جست که از جمله آنها روش منحنی سنج رسوب (SRC)^۱ و منحنی بده کلاسه^۲ موسوم به روش USBR^۳ متداول می‌باشد [۱۲، ۲۲].

۴-۲-۱- روش منحنی سنج رسوب

۴-۲-۱-۱- بررسی آمار آبدی و رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری در دوره آماری

منحنی سنج رسوب با استفاده از داده‌های آماری Q_d و Q_s ترسیم می‌شود. چنین اطلاعاتی بخشی از برنامه سنجش‌های رودخانه‌ای تلقی گردیده و در هر ایستگاه آب‌سنجی سالیانه در چند نوبت ضمن اندازه‌گیری بده جریان روزانه، مقدار غلظت مواد معلق و تناژ رسوب روزانه نیز محاسبه می‌شود. برای ترسیم منحنی سنج رسوب سری داده‌ها برای یک دوره آماری چند ساله مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول (۱-۴) نمونه‌ای از نحوه ثبت آمار ارائه شده است [۲۸]. مطابق جدول سالیانه در چند نوبت نمونه‌برداری و تعیین غلظت متوسط (C) هم‌زمان با اندازه‌گیری بده جریان روزانه (Q_d) انجام گرفته و با استفاده از معادله (۱-۴) تناژ رسوب روزانه (Q_s) نیز محاسبه می‌گردد. بررسی جدول (۱-۴) مبین آن است که به‌طور طبیعی غلظت مواد معلق در رودخانه‌ها دارای تغییرات زمانی زیادی بوده و به عنوان نمونه برای رودخانه مورد نظر در سه سال آماری حداقل آن ۱۵ و حداکثر آن ۲۲۰۷ میلی‌گرم در لیتر ثبت شده است و تناژ رسوب روزانه نیز از حداقل ۳۳۰ تا حداکثر ۷۸۵۷۹ متغیر بوده است. چنین دامنه تغییرات وسیعی به‌ویژه در رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه خشک نظیر ایران حاصل تغییرپذیری زیاد رژیم آبدی رودخانه، ناپایداری خاک و وضعیت تراکم پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز در فصول مختلف است.

۴-۲-۱-۲- تعیین رابطه نمایی و ترسیم منحنی سنج رسوب

ضرورت تعیین رابطه نمایی رسوب ناشی از محدود بودن آماری مشاهده‌ای است که در آن فقط برای تعداد اندکی از روزهای سال اندازه‌گیری هم‌زمان Q و Q_s محقق می‌گردد. مطابق جدول (۱-۴) تعداد داده‌های مشاهده‌ای برای سال ۱۳۵۱-۵۲ معادل ۱۵ مورد، سال ۱۳۵۲-۵۳ برابر با ۲۱ و در سال ۱۳۸۲-۸۳ به ۱۱ مورد محدود می‌باشد. به عبارتی در طول یک سال آبی چند نوبت به محل ایستگاه آب‌سنجی مراجعه و عملیات اندازه‌گیری بده جریان و نمونه‌برداری رسوب توسط تیم کارشناسی انجام می‌گیرد. برای مابقی روزهای سال لازم است با تعیین رابطه همبستگی بین Q و Q_s تناژ رسوب برای روزهای فاقد آمار محاسبه شود. در شکل (۱-۴) نمونه‌ای از منحنی سنج رسوب همراه داده‌های مشاهده‌ای برای یک دوره آماری ۲۰ ساله نشان داده شده است. برای منحنی سنج رسوب برازش معادله نمایی توسط متخصصین مختلف توصیه شده است [۱۲، ۲۲].

جدول ۴-۱- نمونه‌ای از ثبت هم‌زمان بده جریان روزانه (Q_d)، غلظت (C) و تناژ رسوب روزانه (Q_s) در یک ایستگاه آب‌سنجی (ایستگاه دزفول- رودخانه دز، تاب ۱۳۷۱)

سال آبی	ماه	روزه نمونه‌برداری	Q (m^3/s)	Cm (mg/l)	Q_s (ton/day)	تعداد نمونه‌ها (در سال)
۱۳۵۱-۱۳۵۲	مهر	۳	۲۶۱	۶۱/۷	۱۳۹۱	۱۵
	مهر	۱۵	۲۱۴	۴۵/۳	۸۳۸	
	مهر	۲۶	۲۵۸	۳۰	۶۶۹	
	آذر	۴	۲۴۳	۳۱/۳	۶۵۷	
	دی	۲۷	۲۵۵	۱۵	۳۳۰	
	اسفند	۱۲	۲۴۲	۲۵/۳	۷۳۸	
	فروردین	۹	۲۸۸	۲۵/۷	۱۱۹۷	
	فروردین	۱۲	۲۳۵	۳۷/۷	۷۶۵	
	اردیبهشت	۸	۱۰۸	۶۰	۵۶۰	
	اردیبهشت	۲۳	۱۵۲	۱۳۶/۷	۱۷۹۵	
	خرداد	۳	۱۶۰	۴۸/۷	۶۷۳	
	خرداد	۲۱	۱۷۰	۳۶/۳	۵۳۳	
	مرداد	۱	۱۶۸	۲۱/۳	۳۰۹	
	مرداد	۱۶	۱۷۰	۱۲۲	۱۷۹۲	
	شهریور	۲۴	۱۵۵	۵۷/۳	۷۶۷	
۱۳۵۲-۱۳۵۳	مهر	۱۸	۲۲۶	۵۷/۷	۱۱۲۷	۲۱
	آبان	۲۶	۱۰۸	۴۳	۴۰۱	
	آذر	۲۱	۱۳۹	۱۸	۲۱۶	
	دی	۲۴	۲۹۴	۱۸۹/۷	۴۸۱۹	
	بهمن	۴	۱۲۳	۱۸/۳	۱۹۴	
	بهمن	۱۰	۱۳۲	۶۱/۷	۷۰۴	
	بهمن	۱۸	۱۳۵	۲۲/۳	۲۶۰	
	بهمن	۲۳	۱۵۱	۴۱	۵۳۵	
	فروردین	۲۹	۸۸۶	۴۴/۷	۳۴۲۲	
	اردیبهشت	۲۳	۲۷۵	۱۱۱/۷	۲۶۵۴	
	خرداد	۸	۳۸۹	۲۲/۳	۷۴۹	
	خرداد	۲۶	۲۷۴	۴۳/۷	۱۰۳۵	
	تیر	۴	۱۶۳	۴۳/۷	۶۱۵	
	تیر	۱۲	۲۰۴	۴۴	۷۷۶	
	تیر	۲۲	۱۷۰	۵۲/۳	۷۶۸	
	مرداد	۹	۲۱۳	۶۱	۱۱۲۳	
	مرداد	۱۶	۲۵۲	۲۵/۵	۵۵۵	
	مرداد	۲۹	۲۰۶	۲۷/۳	۴۸۶	
	شهریور	۹	۲۰۶	۹۶/۳	۱۷۱۴	
	شهریور	۱۴	۱۹۰	۴۷	۷۷۲	
	شهریور	۲۶	۲۰۴	۲۴/۷	۴۳۵	
۱۳۸۲-۱۳۸۳	مهر	۲۶	۱۶۵	۲۱۳	۳۰۴۱	۱۱
	آبان	۲۷	۳۰۳	۱۳۱۳	۳۴۳۸۲	
	آذر	۲۶	۳۰۴	۱۲۷	۳۳۲۷	
	دی	۲۲	۲۰۷	۵۰۷	۹۰۶۲	
	بهمن	۱۴	۳۳۵	۱۹۴۰	۵۶۱۵۱	
	بهمن	۳۰	۴۲۹	۲۱۲۰	۷۸۵۷۹	
	اسفند	۳	۳۲۰	۱۹۲۰	۵۳۰۸۴	
	اردیبهشت	۱	۴۱۲	۲۲۰۷	۷۸۵۵۰	
	تیر	۲۴	۱۹۰	۵۳	۸۷۵	
	مرداد	۱۹	۲۶۱	۸۷	۱۹۵۴	
	مرداد	۲۰	۲۲۴	۵۳	۱۰۳۲	

حالت کلی معادله نمایی رسوب به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_s = a Q_d^b \quad (۲-۴)$$

در این معادله a و b به ترتیب ضریب و نمای معادله بوده و Q_s و Q_d قبلاً تعریف شده‌اند. معادله (۲-۴) بعضاً برحسب غلظت نیز بیان می‌شود. نظر به این که C نسبت Q_s / Q_d می‌باشد لذا رابطه بین C و Q_d را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$C = a Q_d^{b-1} \quad (۳-۴)$$

در شکل ۱-۴ نمونه‌ای از معادله نمایی و منحنی سنج رسوب نشان داده شده است. داده‌های مشاهده‌ای موجود بر روی نمودار معرف اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول ۲۰ سال دوره آماری (۶۶-۱۳۴۷) می‌باشد. مطابق شکل معادله نمایی برای بار رسوب معلق و بده جریان روزانه در رودخانه مذکور به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_s = 1.343 Q_d^{2.284} \quad (۴-۴)$$

به علاوه براساس رابطه (۳-۴) معادله نمایی غلظت را می‌توان به صورت زیر برای رودخانه مذکور بیان نمود:

$$C = 1.343 Q_d^{1.284} \quad (۵-۴)$$

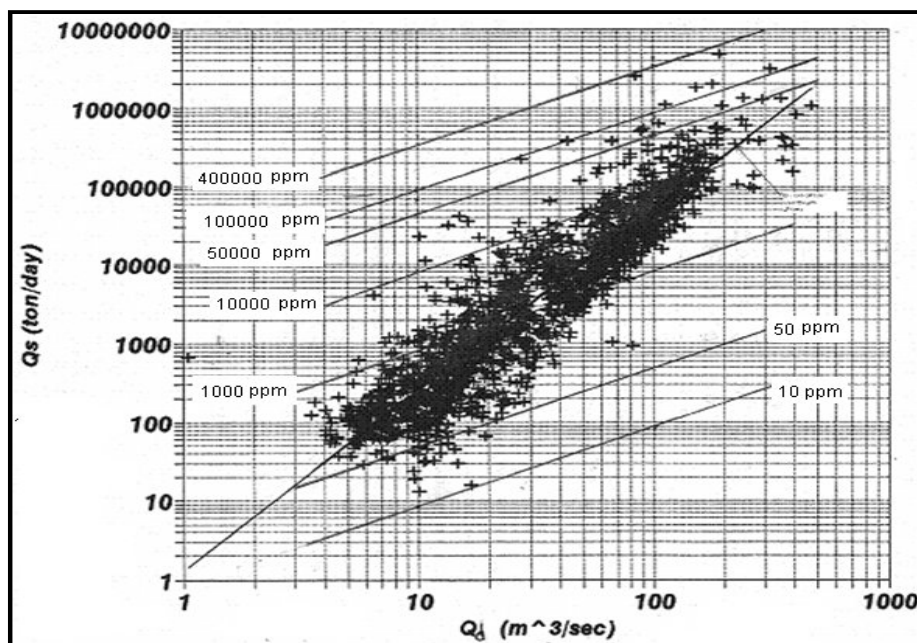
بررسی موقعیت نقاط مشاهده‌ای بر روی نمودار شکل (۱-۴) بیانگر دامنه وسیع تغییرات بده جریان روزانه (حداقل Q_d برابر با ۳/۵ و حداکثر آن ۶۰۰ مترمکعب در ثانیه) می‌باشد که انعکاسی از رژیم هیدرولوژیک پر نوسان مناطق خشک و نیمه خشک است. دامنه تغییرات بار رسوبی معلق نیز به تبعیت از رژیم هیدرولوژیک بسیار شاخص بوده و از مقدار جزیی ۱۲ تن در روز تا کمیت قریب ۵ میلیون تن در روز متغیر است. از جمله عوامل تأثیرگذار در تشدید دامنه تغییرات تناژ رسوب روزانه، ناپایداری خاک، توپوگرافی کوهستانی و کمبود پوشش گیاهی می‌باشد که نرخ فرسایش خاک را افزایش داده و در مواردی وقوع جریان‌های غلیظ را در پی دارد. به منظور بررسی روند تغییرات غلظت و تحلیل ویژگی‌های رفتاری انتقال رسوب معلق ترسیم نمودارهای هم‌غلظت مطابق آنچه که بر روی نمودار شکل (۱-۴) نشان داده شده متداول است [۲۲]. حد پایین غلظت در این نمودارها ۱۰ ppm (میلی گرم در لیتر) و حد بالای آن ۴۰۰۰۰۰ ppm می‌باشد. وجود غلظت‌های ۱۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰۰ (۱۰۰ تا ۴۰۰ گرم در لیتر) در سری داده‌های مشاهده‌ای موید وقوع جریان‌های غلیظ در رودخانه بوده و انعکاسی از گسترش لایه‌های فرسایش پذیر خاک نظیر رس و سیلت در سطح حوضه آبریز و ناپایداری خاک کناره‌های رودخانه قلمداد می‌شود. در مواردی وضعیت داده‌های مشاهده‌ای به گونه‌ای است که برازش بیش از یک معادله نمایی را برای ترسیم منحنی سنج رسوب طلب می‌کند [۲۲، ۲۵]. در شکل (۲-۴) نمودار تغییرات Q_s و Q_d برای چنین حالتی ترسیم گردیده و برازش منحنی‌های سنج رسوب برای دو محدوده بده جریان نشان داده شده است. مطابق نمودار مذکور روابط زیر بین بده جریان و بار معلق حاکم می‌باشد:

$$Q_s = 22.47 Q_d^{1.21} \quad Q_d \leq 12 \text{ m}^3/\text{s} \quad (۶-۴)$$

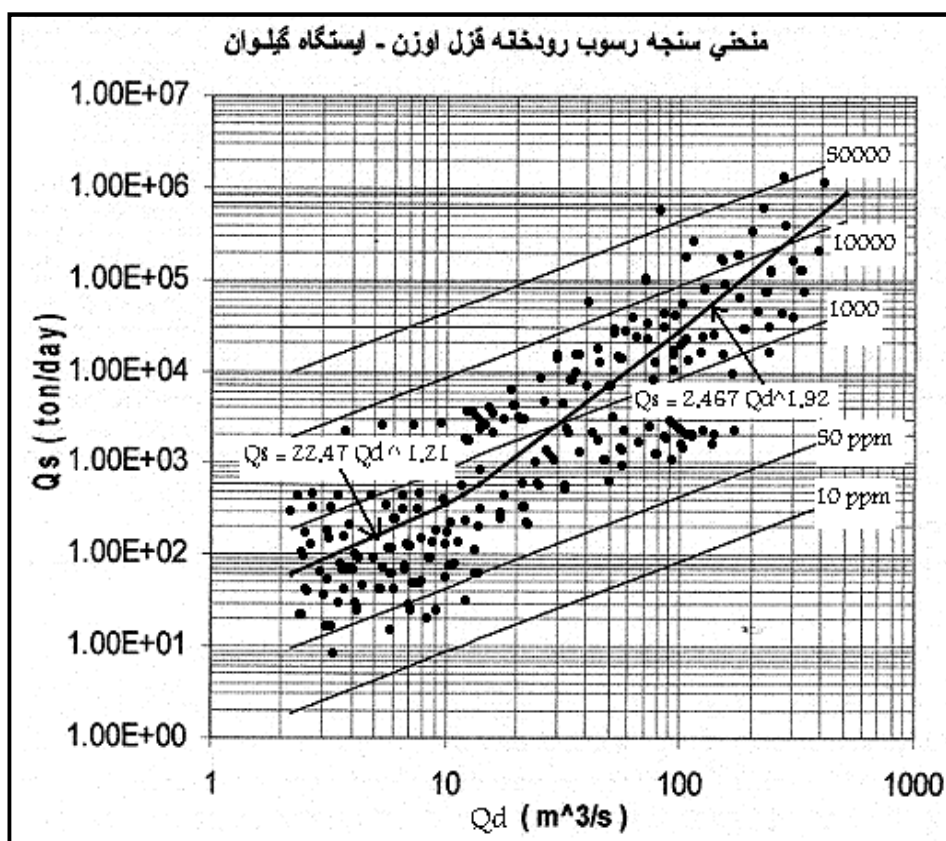
$$Q_s = 2.467 Q_d^{1.92} \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_d > 12 \text{ m}^3/\text{s} \quad (۷-۴)$$

در نمودار شکل (۲-۴) محدوده تغییرات غلظت نیز (۱۰ تا ۵۰۰۰۰ میلی گرم) نشان داده شده است. مقایسه نمودار منحنی سنج رسوب رودخانه‌ها (شاهرود و قزل اوزن که از شعبات اصلی سفیدرود و به مخزن سفیدرود تخلیه می‌شوند) موید آن است که غلظت‌های حد

بالا در رودخانه شاهرود به مراتب بیش‌تر از رودخانه قزل‌اوزن می‌باشد. این ویژگی تنوع عوامل زمین‌شناسی، خصوصیات حوضه‌ای و شرایط پوشش گیاهی را در فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه‌ها آشکار می‌نماید.

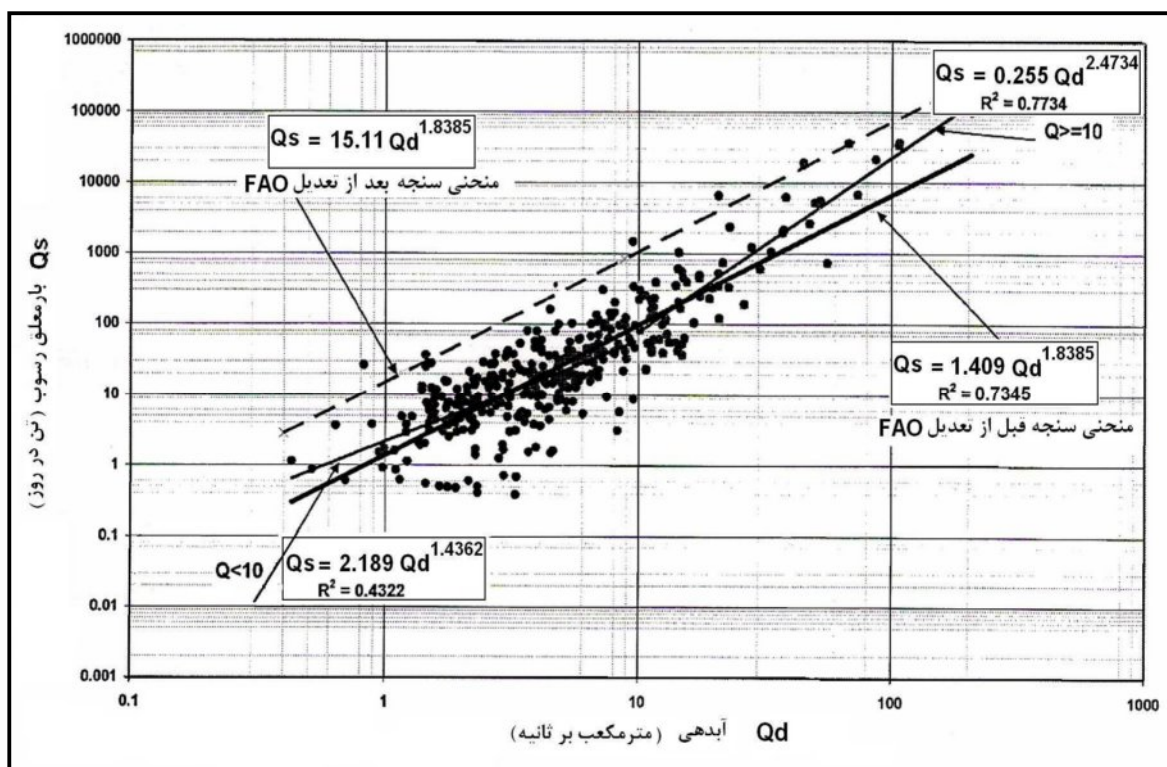


شکل ۴-۱- منحنی سنجه‌رسوب و معادله نمایی نظیر و خطوط معرف محدوده تغییرات غلظت (رودخانه شاهرود - ایستگاه لوشان)



شکل ۴-۲- نمونه‌ای از برازش منحنی سنجه رسوب برای دو محدوده بده جریان متفاوت (رودخانه قزل اوزن - ایستگاه گیلوان)

به منظور افزایش دقت نتایج حاصله از منحنی سنج رسوب روش تعدیل فائو^۱ پیشنهاد شده است. در این روش ضریب a در معادله (۴-۲) توسط $\bar{Q}_s a = \bar{Q}_d$ جایگزین می شود که در آن میانگین بار رسوبی روزانه اندازه گیری شده و $\bar{Q}_d$ میانگین بده روزانه اندازه گیری شده در دوره آماری می باشد. در روش FAO مطابق شکل ۴-۳ منحنی تعدیل شده دارای شیب مشابه و موازی با منحنی به دست آمده از برازش معادله نمایی داشته و از نقطه ای با مختصات میانگین کل آبدی ها $\bar{Q}_d$ و میانگین کل بار معلق نمونه های برداشتی ایستگاه مورد نظر $\bar{Q}_s$ عبور می نماید. در ادامه با استفاده از این رابطه به جای رابطه نمایی (مشابه معادلات یک منحنی یا دو منحنی در شکل ۴-۳) می توان بار رسوبی سالیانه را مطابق روش های ارائه شده در مباحث بعدی (روش بده روزانه یا منحنی بده کلاسه) محاسبه نمود. (برای جزییات بیش تر مراجعه به نشریه Arid Zone Hydrology for Agriculture Development (FAO (1981) توصیه می شود)



شکل ۴-۳- نمونه ای از برازش منحنی سنج رسوب با روش تعدیل FAO و مقایسه آن با روش معادله نمایی یک منحنی و دو منحنی (رودخانه ماربره ایستگاه دره تخت)

۴-۲-۱-۳- تعیین تناژ رسوب روزانه، ماهانه و سالانه

تعیین تغییرات زمانی بار رسوب معلق از جنبه های مختلف دارای اهمیت است. در طرح های برنامه ریزی و بهره برداری از منابع آب رودخانه ها لازم است غلظت و تناژ رسوب روزانه مشخص گردد. به علاوه تعیین آورد رسوب ماهانه و سالانه نیز برای ارزیابی عملکرد مخازن سدها، بهسازی مسیر رودخانه ها، برداشت شن و ماسه و موارد متعدد دیگر مورد نیاز می باشد.

- تعیین تناژ رسوب روزانه

بدین منظور پس از تعیین منحنی سنجه و معادله نمایی آن جدول رسوب‌دهی براساس آمار بده جریان روزانه (Q_d) تنظیم و برای هر سال آبی (۳۶۵ روز) تناژ رسوب از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_{si} = a Q_{di}^b \quad i = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (8-4)$$

که در این رابطه:

Q_{si} : تناژ رسوب روزانه، Q_{di} : بده جریان روزانه و i شاخص روز از ۱ تا ۳۶۵ برای یک سال آبی می‌باشد. در جدول (۲-۴) آمار آبدهی روزانه و در جدول (۳-۴) تناژ رسوب روزانه به عنوان نمونه درج شده است. مطابق این جداول برای تعیین تناژ رسوب روزانه لازم است نخست آمار آبدهی روزانه مشخص گردد. تنظیم جدول آبدهی و رسوب‌دهی روزانه برای هر سال آبی و برای دوره آماری چند ساله انجام می‌گیرد. چنین جداولی به عنوان داده‌های ورودی پایه در مطالعه رفتار رسوبی رودخانه‌ها و چگونگی تاثیرپذیری آنها از اقدامات مهندسی مورد نیاز است.

علاوه بر رسوب‌دهی روزانه مقادیر غلظت روزانه (C_i) را می‌توان براساس رابطه زیر با استفاده از Q_d و Q_s محاسبه نمود:

$$C_i = 11.5741 Q_{si} / Q_{di} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (9-4)$$

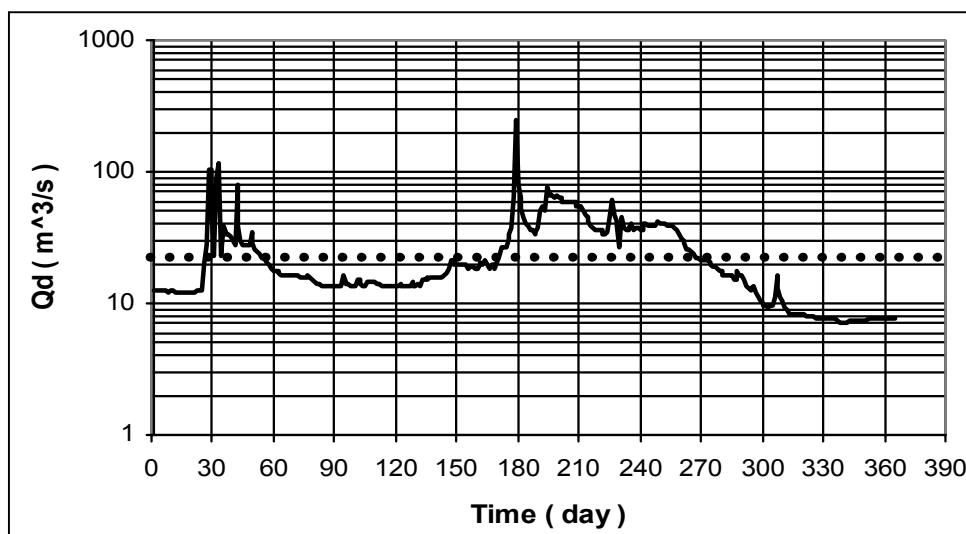
تشکیل جدول آبدهی و رسوب‌دهی روزانه برای هر سال آبی امکان بررسی هم‌زمان رژیم جریان (هیدروگراف جریان سالیانه) و رژیم رسوبی (هیدروگراف رسوب‌دهی سالانه) رودخانه را نیز فراهم می‌آورد. به عنوان نمونه در شکل ۴-۴ و شکل ۵-۴ به ترتیب رژیم آبدهی و رسوب‌دهی رودخانه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۴ در دو مقطع زمانی شامل اواسط پاییز و فصل بهار بده جریان روزانه افزایش محسوسی را نشان می‌دهد. به تبعیت از رژیم هیدرولوژیک بار رسوبی رودخانه نیز در اواسط پاییز افزایش یافته و پس از یک دوره نزولی مجدداً در اواخر اسفند ماه و آغاز فصل بهار که مصادف با فصل پرآبی رودخانه می‌باشد آورد رسوبی نیز دارای آهنگ صعودی است. دوره اوج بار رسوبی متعلق به فصل پرآبی و اوایل فروردین ماه است.

جدول ۴-۲. مقادیر آبدهی روزانه (Qd) بر حسب مترمکعب بر ثانیه برای یک سال آبی، مورد استفاده در تعیین تناژ رسوب روزانه (ایستگاه لوشان، سال آبی ۴۹-۱۳۴۸)

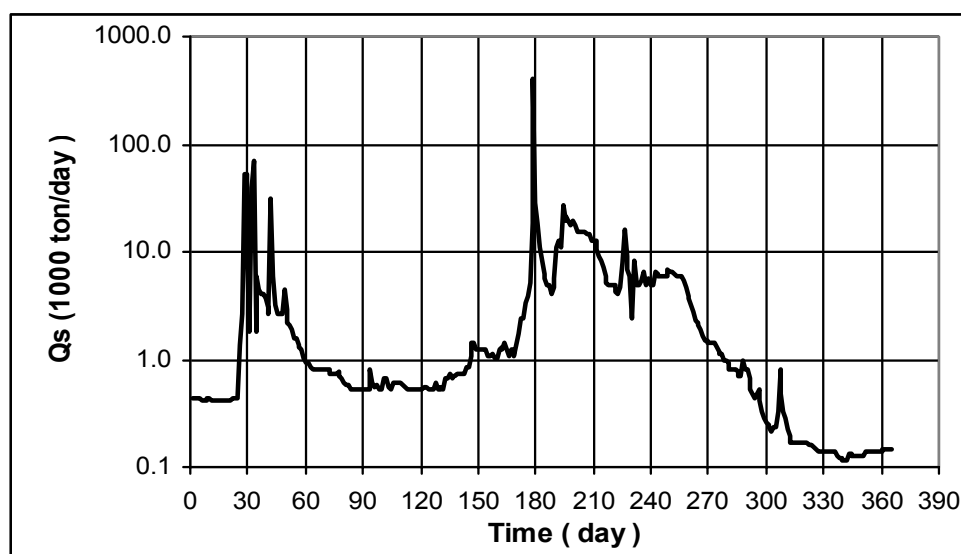
روز	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	متوسط سالانه
۱	۱۲/۵	۲۳/۲	۱۷/۵	۱۳/۵	۱۳/۷	۱۹/۶	۷۸/۶	۵۴/۶	۴۰/۸	۲۱	۹/۶	۷/۶	
۲	۱۲/۵	۹۰/۷۴	۱۷/۳	۱۳/۵	۱۳/۹	۱۹/۶	۶۴/۴	۵۰/۵	۳۹/۹	۲۰/۴	۹/۶	۷/۶	
۳	۱۲/۵	۱۱۶/۳	۱۶/۹	۱۳/۵	۱۳/۷۷	۱۹/۶	۵۱/۹	۴۷/۶	۳۹	۱۹/۵	۱۱	۷/۳	
۴	۱۲/۵	۲۳/۳۴	۱۶/۵	۱۶/۵	۱۳/۵	۱۹/۶	۴۵	۴۵	۳۹	۱۹	۱۶/۵	۷/۲	
۵	۱۲/۵۶	۳۹/۰۸	۱۶/۵	۱۴/۵	۱۳/۵	۱۸/۶۴	۳۹/۸	۴۲/۵	۳۹	۱۹	۱۳	۷/۲	
۶	۱۲/۴	۳۴/۳۶	۱۶/۵	۱۴	۱۳/۵	۱۸/۶۴	۳۸/۳	۳۹/۳	۳۹	۱۸	۱۱/۱	۷	
۷	۱۲/۴	۳۳/۵	۱۶/۵	۱۴/۱۸	۱۳/۶۳	۱۹/۱۲	۳۶	۳۷	۳۹	۱۷/۷	۱۰/۳	۷	
۸	۱۲/۳	۳۳/۵	۱۶/۵	۱۳/۷۴	۱۴/۳۷	۱۹/۱۲	۳۶	۳۶	۴۲/۲	۱۷/۵	۹/۴	۷	
۹	۱۲/۵	۳۱/۹	۱۶/۵	۱۳/۵	۱۳/۷	۱۸/۱۶	۳۳/۵	۳۶	۴۱/۱	۱۶/۴	۸/۸	۷/۵	
۱۰	۱۲/۵	۲۹/۴	۱۶/۵	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۸/۱۶	۳۵/۴	۳۶	۴۱/۱	۱۶/۴	۸/۳	۷/۴	
۱۱	۱۲/۴	۲۷/۴	۱۶/۵	۱۵	۱۳/۹	۱۹/۶	۳۸/۱	۳۶	۴۰	۱۶/۴	۸/۳	۷/۳	
۱۲	۱۲/۳	۸۰/۴	۱۶/۵	۱۵/۱۴	۱۳/۵	۲۰/۴	۵۱/۶	۳۴	۳۹	۱۶/۴	۸/۳	۷/۳	
۱۳	۱۲/۳	۳۹/۲۲	۱۵/۸	۱۴/۰۲	۱۵	۱۹/۶	۵۴/۸	۳۳/۲	۳۹	۱۶/۱	۸/۳	۷/۳	
۱۴	۱۲/۲	۳۰/۲۶	۱۵/۷	۱۳/۶	۱۵	۲۰/۹	۵۱/۲	۳۵/۴	۳۹	۱۵/۴	۸/۳	۷/۳	
۱۵	۱۲/۲	۲۷/۴	۱۵/۷	۱۳/۶۶	۱۵/۹	۱۹/۶	۷۷	۴۴/۶	۳۹	۱۵/۴	۸/۳	۷/۳	
۱۶	۱۲/۲	۲۷/۴	۱۵/۹	۱۴/۵	۱۵	۱۸/۶۳	۶۶/۶	۶۰/۴	۳۷/۹	۱۷/۷	۸/۳	۷/۳	
۱۷	۱۲/۲	۲۷/۴	۱۶/۱	۱۴/۵	۱۵/۴۴	۱۹/۶	۶۹/۴	۴۷/۶	۳۵/۵	۱۶/۴	۸/۳	۷/۳	
۱۸	۱۲/۲	۲۷/۴	۱۵/۵	۱۴/۵	۱۵/۴۴	۱۹/۶	۶۶/۶	۴۲/۱	۳۲/۹	۱۶/۴	۸/۲	۷/۶	
۱۹	۱۲/۲	۳۴/۴	۱۵	۱۴/۵	۱۵/۹	۱۸/۶۴	۶۲/۸	۳۹/۱	۳۱/۶	۱۵/۲	۸/۱	۷/۶	
۲۰	۱۲/۲	۲۹	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۵/۹	۲۰/۸	۶۶/۶	۲۶/۲	۳۰/۲	۱۳/۷	۸/۱	۷/۶	
۲۱	۱۲/۲	۲۵/۳۲	۱۴/۱	۱۴/۳	۱۵/۹	۲۲/۸	۶۳/۴	۴۵/۱	۲۸/۳	۱۳/۱	۸/۱	۷/۶	
۲۲	۱۲/۴۲	۲۵	۱۴/۱	۱۴/۰۲	۱۵/۹	۲۶/۴	۶۲/۸	۳۷/۲	۲۵/۹	۱۲/۶	۸	۷/۶	
۲۳	۱۲/۴۲	۲۴/۰۴	۱۴/۱	۱۳/۷۴	۱۵/۹	۲۶/۴	۵۹/۶	۳۶	۲۵/۶	۱۳	۷/۸	۷/۶	
۲۴	۱۲/۵	۲۲	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۶/۶۱	۲۶/۴	۵۹/۶	۳۶	۲۴/۷	۱۳/۵	۷/۶	۷/۶	
۲۵	۱۲/۵	۲۲	۱۳/۶	۱۳/۵	۱۶/۷	۳۰/۶۵	۵۹/۶	۳۷/۹	۲۴	۱۲/۳	۷/۶	۷/۶	
۲۶	۲۰/۴۲	۲۰/۴۴	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۸/۶۴	۳۲/۸۹	۵۹/۶	۴۰/۵	۲۲/۳	۱۱/۱	۷/۶	۷/۶	
۲۷	۲۷/۴	۲۰/۲	۱۳/۵	۱۳/۵	۲۰/۹	۳۷/۰۳	۵۹/۶	۳۶	۲۱/۷	۱۰/۳	۷/۶	۷/۸	
۲۸	۱۰۲/۱	۱۹/۷۲	۱۳/۵	۱۳/۵	۲۰/۹	۶۳/۹۹	۵۸/۸	۳۷/۷	۲۱/۷	۹/۹	۷/۶	۷/۸	
۲۹	۱۰۲/۶	۱۸/۲	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۹/۸۱	۲۴۷/۳	۵۸	۳۸/۱	۲۱	۹/۸	۷/۶	۷/۸	
۳۰	۵۳/۰۳	۱۷/۵	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۹۸		۵۴/۸	۳۶	۲۱	۹/۶	۷/۶	۷/۸	
۳۱							۵۴/۸	۳۶	۲۱	۹/۲	۷/۶	۷/۸	
متوسط	۲۰/۴۹	۳۴/۰۰	۱۵/۳۸	۱۴/۰۳	۱۵/۶۴	۳۱/۰۹	۵۵/۳۰	۳۹/۹۹	۳۲/۹۵	۱۱/۱۵	۸/۸۶	۷/۴۶	۲۴/۲
حداکثر	۱۰۲/۶	۱۱۶/۳	۱۷/۵	۱۶/۵	۲۰/۹	۲۴۷/۳	۷۸/۶	۶۰/۴	۴۲/۲	۲۱	۱۶/۵	۷/۸	۲۴۷/۳
حداقل	۱۲/۲	۱۷/۵	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۸/۱۶	۳۳/۵	۲۶/۲	۲۱	۹/۲	۷/۶	۷	۷

جدول ۴-۳- مقادیر بار رسوبی روزانه (1000 ton/day) برای یک سال آبی براساس معادله نمایی رسوب
(رودخانه شاهرود ایستگاه لوشان - سال آبی ۴۹-۱۳۴۸)

روز	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالیانه
۱	۰/۴۳	۱/۷۸	۰/۹۴	۰/۵۲	۰/۵۳	۱/۲۱	۲۹/۰۳	۱۲/۶۲	۶/۴۸	۱/۴۲	۰/۲۴	۰/۱۴	
۲	۰/۴۳	۴۰/۳۲	۰/۹۱	۰/۵۲	۰/۵۵	۱/۲۱	۱۸/۴۱	۱۰/۵۶	۶/۱۶	۱/۳۳	۰/۲۴	۰/۱۴	
۳	۰/۴۳	۷۱/۱۳	۰/۸۶	۰/۵۲	۰/۵۴	۱/۲۱	۱۱/۲۴	۹/۲۲	۵/۸۵	۱/۲۰	۰/۳۲	۰/۱۳	
۴	۰/۴۳	۱/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۵۲	۱/۲۱	۸/۱۱	۸/۱۱	۵/۸۵	۱/۱۳	۰/۸۲	۰/۱۲	
۵	۰/۴۴	۵/۸۷	۰/۸۲	۰/۶۱	۰/۵۲	۱/۰۸	۶/۱۲	۷/۱۲	۵/۸۵	۱/۱۳	۰/۴۷	۰/۱۲	
۶	۰/۴۳	۴/۳۸	۰/۸۲	۰/۵۶	۰/۵۲	۱/۰۸	۵/۶۱	۵/۹۵	۵/۸۵	۱/۰۰	۰/۳۳	۰/۱۲	
۷	۰/۴۳	۴/۱۳	۰/۸۲	۰/۵۸	۰/۵۳	۱/۱۵	۴/۸۷	۵/۱۸	۵/۸۵	۰/۹۶	۰/۲۸	۰/۱۲	
۸	۰/۴۲	۴/۱۳	۰/۸۲	۰/۵۴	۰/۶۰	۱/۱۵	۴/۸۷	۴/۸۷	۷/۰۰	۰/۹۴	۰/۲۳	۰/۱۲	
۹	۰/۴۳	۳/۶۹	۰/۸۲	۰/۵۲	۰/۵۳	۱/۰۲	۴/۱۳	۴/۸۷	۶/۵۹	۰/۸۱	۰/۱۹	۰/۱۳	
۱۰	۰/۴۳	۳/۰۶	۰/۸۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۰۲	۴/۶۸	۴/۸۷	۶/۵۹	۰/۸۱	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۱	۰/۴۳	۲/۶۱	۰/۸۲	۰/۶۶	۰/۵۵	۱/۲۱	۵/۵۴	۴/۸۷	۶/۱۹	۰/۸۱	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۲	۰/۴۲	۳۰/۵۸	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۵۲	۱/۳۳	۱۱/۰۹	۴/۲۷	۵/۸۵	۰/۷۷	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۳	۰/۴۲	۵/۹۲	۰/۷۴	۰/۵۶	۰/۶۶	۱/۲۱	۱۲/۷۳	۴/۰۵	۵/۸۵	۰/۷۰	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۴	۰/۴۱	۳/۲۷	۰/۷۳	۰/۵۳	۰/۶۶	۱/۴۰	۱۰/۸۹	۴/۶۸	۵/۸۵	۰/۷۰	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۵	۰/۴۱	۲/۶۱	۰/۷۳	۰/۵۳	۰/۷۵	۱/۲۱	۳۷/۷۰	۷/۹۵	۵/۸۵	۰/۹۶	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۶	۰/۴۱	۲/۶۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۶۶	۱/۰۸	۱۹/۸۸	۱۵/۹۰	۵/۴۸	۰/۸۱	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۷	۰/۴۱	۲/۶۱	۰/۷۷	۰/۶۱	۰/۷۰	۱/۲۱	۲۱/۸۴	۹/۲۲	۴/۷۱	۰/۸۱	۰/۱۷	۰/۱۳	
۱۸	۰/۴۱	۲/۶۱	۰/۷۰	۰/۶۱	۰/۷۰	۱/۲۱	۱۹/۸۸	۶/۹۶	۳/۹۶	۰/۶۸	۰/۱۷	۰/۱۴	
۱۹	۰/۴۱	۴/۳۹	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۷۵	۱/۰۸	۱۷/۳۸	۵/۸۸	۳/۶۱	۰/۵۳	۰/۱۶	۰/۱۴	
۲۰	۰/۴۱	۲/۹۷	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۷۵	۱/۳۹	۱۹/۸۸	۲/۳۵	۳/۲۶	۰/۴۸	۰/۱۶	۰/۱۴	
۲۱	۰/۴۱	۲/۱۸	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۷۵	۱/۷۱	۱۷/۷۶	۸/۱۵	۲/۸۱	۰/۴۴	۰/۱۶	۰/۱۴	
۲۲	۰/۴۳	۲/۱۱	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۷۵	۲/۴۰	۱۷/۳۸	۵/۲۵	۲/۲۹	۰/۴۷	۰/۱۶	۰/۱۴	
۲۳	۰/۴۳	۱/۹۳	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۷۵	۲/۴۰	۱۵/۴۲	۴/۸۷	۲/۲۳	۰/۵۲	۰/۱۵	۰/۱۴	
۲۴	۰/۴۳	۱/۵۸	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۸۳	۲/۴۰	۱۵/۴۲	۴/۸۷	۲/۰۶	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۱۴	
۲۵	۰/۴۳	۱/۵۸	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۸۴	۳/۳۷	۱۵/۴۲	۵/۴۸	۱/۹۳	۰/۳۳	۰/۱۴	۰/۱۴	
۲۶	۱/۳۳	۱/۳۳	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۰۸	۳/۹۶	۱۵/۴۲	۶/۳۷	۱/۶۳	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۴	
۲۷	۲/۶۱	۱/۳۰	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۴۰	۵/۱۹	۱۵/۴۲	۴/۸۷	۱/۵۳	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۱۵	
۲۸	۵۲/۸۱	۱/۲۳	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۴۰	۱۸/۱۴	۱۴/۹۵	۵/۴۱	۱/۵۳	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۱۵	
۲۹	۵۳/۴۰	۱/۰۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۲۴	۳۷	۱۴/۴۹	۵/۵۴	۱/۴۲	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۱۵	
۳۰	۱۱/۸۰	۰/۹۴	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۲۴		۱۲/۷۳	۴/۸۷	۱/۴۲	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۱۵	
۳۱							۱۲/۷۳	۴/۸۷	۱/۴۲	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۱۵	
متوسط	۴/۴۲	۷/۱۹	۰/۷۱	۰/۵۷	۰/۷۴	۱۵/۹۵	۱۳/۹۰	۶/۴۵	۴/۲۹	۰/۷۲	۰/۲۱	۰/۱۴	۱۶۶۸
حداکثر	۵۳/۴۰	۷۱/۱۳	۰/۹۴	۰/۸۲	۱/۴۰	۳۷	۲۹/۰۳	۱۵/۹۰	۷/۰۰	۱/۴۲	۰/۸۲	۰/۱۵	
حداقل	۰/۴۱	۰/۹۴	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۰۲	۴/۱۳	۲/۳۵	۱/۴۲	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۱۲	



شکل ۴-۴- نمونه‌ای از روند تغییرات آبدهی روزانه (Q_d) رودخانه‌ها یا هیدروگراف جریان سالیانه (شاهرود، ایستگاه لویشان - سال آبی ۱۳۴۸-۴۹)



شکل ۴-۵- نمونه‌ای از روند تغییرات رسوب‌دهی روزانه (Q_s) رودخانه‌ها یا هیدروگراف رسوب سالیانه (شاهرود، ایستگاه لویشان - سال آبی ۱۳۴۸-۴۹)

- تعیین تناژ رسوب ماهانه

مقدار رسوب ماهانه از حاصل جمع مقادیر رسوب‌دهی روزانه (Q_{si}) محاسبه می‌شود. رسوب ماهانه برای ماه‌های مهر تا شهریور و برای هر سال آبی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Q_{sm,j,y} = \sum_{i=1}^M Q_{si,j} \quad j=1,2,3,\dots,12 \quad M=30(29,31) \quad y=1,2,\dots,N \quad (4-10)$$

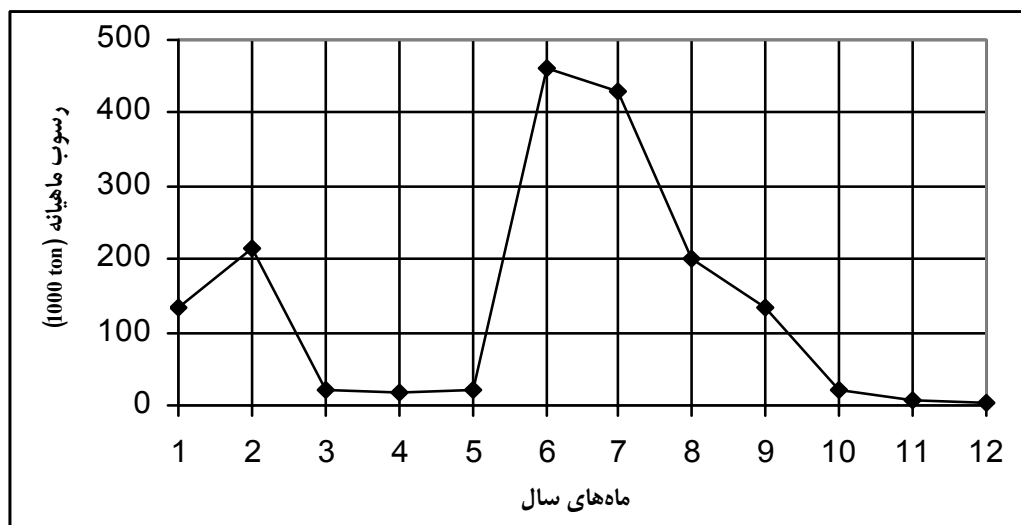
که در این رابطه:

$Q_{sm,j,y}$: رسوب ماهانه در ماه مورد نظر j و سال مورد نظر y (تن)، $Q_{si,j}$: تناژ رسوب روزانه در ماه مورد نظر j ، M : شاخص تعداد روزهای هر ماه می‌باشد و y شاخص تعداد سال‌های آبی (از یک سال تا N) می‌باشد.

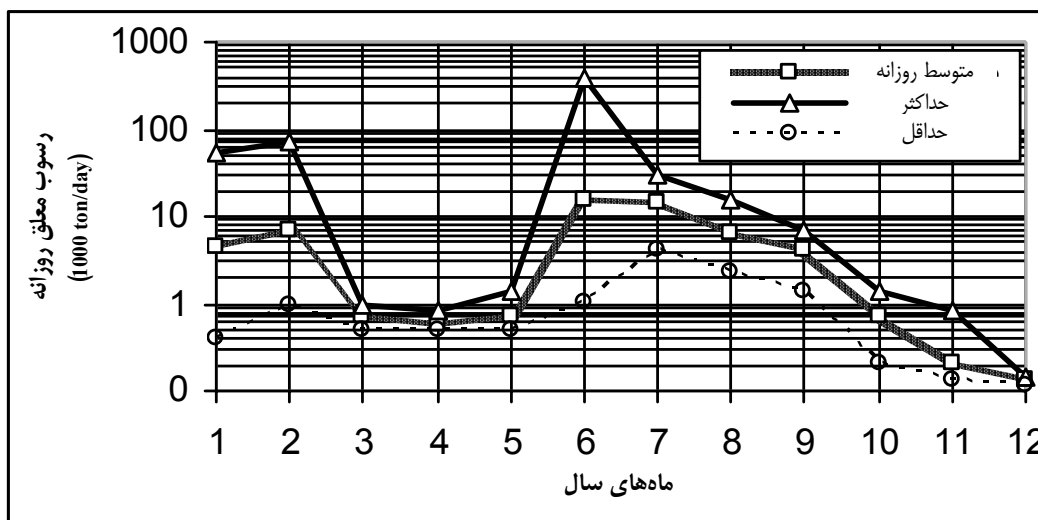
در جدول (۴-۴) نمونه‌ای از مقادیر رسوب ماهانه و همچنین متوسط رسوب روزانه در هر ماه، حداکثر و حداقل روزانه در ماه مورد نظر نیز به عنوان نمونه ارائه شده است. به علاوه در شکل (۴-۶) روند تغییرات رسوبدهی ماهانه و در شکل (۴-۷) متوسط، حداکثر و حداقل روزانه در ماه مورد نظر ارائه شده است. مطابق نمودارهای مذکور دو دوره افزایش رسوبدهی در فصل پاییز و بهار کاملاً مشهود بوده و بیش‌ترین رسوب ماهانه در این رودخانه متعلق به ماه اسفند که مصادف با آغاز فصل پرآبی است می‌باشد.

جدول ۴-۴- مقادیر بار رسوبی ماهانه (1000 ton) برای یک سال آبی براساس جمع بار رسوب روزانه
(رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان - سال آبی ۴۹-۱۳۴۸)

شهر یور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد
متوسط ماهانه	۵۲/۱۳۲	۲۱۵/۷	۲۱/۱۱	۱۶/۹۸	۲۲/۳۴	۶۱/۴۶۲	۴۳۱	۲۰۰/۰۲	۹۱/۱۳۲	۱۷/۲۲	۵۴/۴/۱۳
متوسط روزانه	۴/۴۱۷	۷/۱۸۹	۰/۷۰۴	۰/۵۶۶	۰/۷۴۵	۹۵۲/۱۵	۹۰۳/۱۳	۶/۴۵۲	۴/۲۸۷	۷/۱۵	۲۱۱/۰/۱۳۳
حداکثر روزانه	۵۳/۴	۷۱/۱۳	۰/۹۴	۰/۸۲	۱/۴	۳۷/۳۹۹	۲۹/۰۳	۱۵/۹	۷	۱/۴۲	۰/۸۲/۰/۱۵
حداقل روزانه	۰/۴۱	۰/۹۴	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۱/۰۲	۴/۱۳	۲/۳۵	۱/۴۲	۰/۲۱	۰/۱۴/۰/۱۲



شکل ۴-۶- روند تغییرات رسوبدهی ماهانه (شاهرود، ایستگاه لوشان - سال آبی ۴۹-۱۳۴۸)



شکل ۴-۷- نمونه‌ای از روند تغییرات زمانی بار رسوبی معلق در ماه‌های مختلف سال (شاهرود، ایستگاه لوشان - سال آبی ۱۳۴۸-۴۹)

- تعیین تناژ رسوب سالیانه

رسوب سالیانه معرف مقدار بار رسوبی حمل شده در یک سال آبی است و از مجموع رسوب روزانه مطابق رابطه زیر حاصل

می‌شود:

$$Q_{syk} = \sum_{i=1}^{365} Q_{s_{i,k}} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (11-4)$$

که در این رابطه:

Q_{syk} : بار رسوب سالیانه برای سال آبی k (تن)، $Q_{s_{i,k}}$: بار رسوب روزانه در سال آبی k (تن) و N تعداد سال‌های آبی می‌باشد. در جدول (۴-۵) نمونه‌ای از نحوه تعیین بار رسوب سالیانه برای درج شده است. مطابق جدول مذکور بار رسوبی رودخانه برابر با ۱/۶۶۸ میلیون تن در سال می‌باشد. در کارهای مهندسی علاوه بر کمیت رسوب برای یک سال مورد نظر لازم است متوسط آورد رسوب سالیانه دوره آماری نیز مشخص شود. همچنین متوسط آورد رسوب ماهانه دوره آماری از جمله داده‌های پایه‌ای برای اهداف مطالعاتی است. متوسط بار رسوبی ماهانه از میانگین‌گیری رسوب ماهانه در دوره آماری حاصل می‌شود.

$$\bar{Q}_{sm,j} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{sm,k} \right) / N \quad (12-4)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{sm,j}$: متوسط بار رسوب ماهانه برای ماه مورد نظر (تن)، $Q_{sm,k}$: بار رسوب ماهانه در سال آبی مورد نظر که از یک تا N تغییر می‌کند و j شاخص ماهانه می‌باشد که از ۱ تا ۱۲ متغیر است.

متوسط بار رسوبی سالیانه در دوره آماری نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{Q}_{sy} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{sy,k} \right) / N \quad (13-4)$$

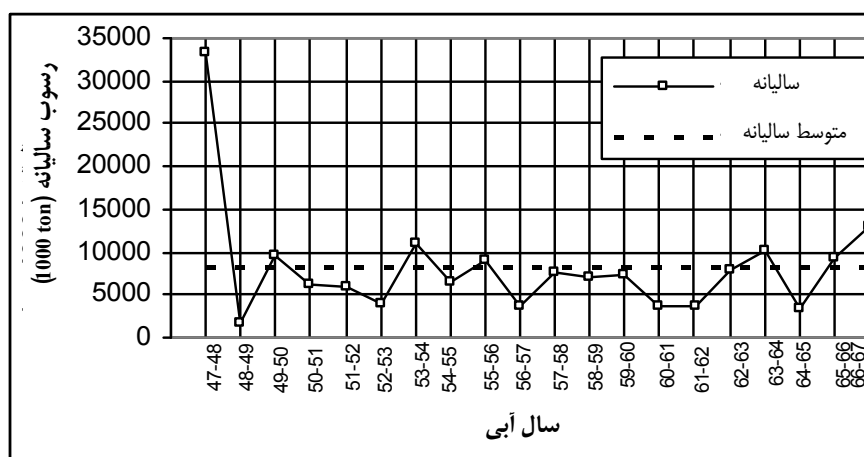
که در این رابطه $\bar{Q}_{sy}$ متوسط بار رسوب معلق سالیانه در دوره آماری مورد نظر (تن) و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. برای تعیین مقادیر بار رسوب متوسط ماهانه و سالیانه لازم است کمیت رسوب ماهانه و سالیانه برای سال‌های آبی مختلف در دوره آماری مطابق آنچه که در جدول (۴-۵) نشان داده شده است، محاسبه و از متوسط‌گیری آنها مطابق روابط ارائه شده مقادیر بار رسوبی مورد نظر تعیین گردد. مطابق جدول (۴-۵) و به عنوان نمونه برای رودخانه شاهرود متوسط بار رسوبی سالیانه معادل ۸/۱۹۸ میلیون تن و حداکثر آن ۳۳/۲۷ میلیون تن (سال آبی ۴۸-۴۷) و حداقل آن ۱/۶۶۸ میلیون تن (سال آبی ۴۹-۴۸) می‌باشد. ارائه تغییرات بار رسوبی سالیانه و ماهیانه به صورت نمودار نیز بخشی از تحلیل داده‌های آماری رسوب و معرفی رژیم رسوبی سالیانه و ماهیانه رودخانه‌ها می‌باشد.

جدول ۴-۵- نمونه‌ای از تنظیم جدول مقادیر رسوب ماهانه و سالیانه (۱۰۰۰ تن) برای دوره آماری مورد نظر (رودخانه شاهرود، ایستگاه لویشان دوره آماری ۲۰ ساله)

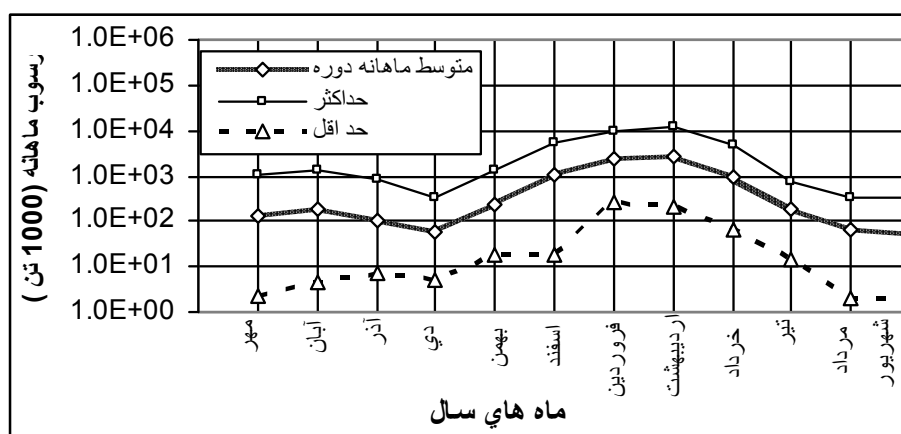
سال آبی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	رسوب سالیانه
۴۷-۴۸	۳	۷۲۳	۱۶۳	۷۸	۱۲۲	۵۳۷۷	۹۴۵۶	۱۲۲۲۸	۴۵۴۹	۴۸۷	۳۵	۶	۳۳۲۲۷
۴۸-۴۹	۱۳۳	۲۱۶	۲۱	۱۷	۲۲	۴۶۳	۴۳۱	۲۰۰	۱۳۳	۲۲	۷	۴	۱۶۶۸
۴۹-۵۰	۵	۵	۵۲	۲۰	۱۸	۵۷۲	۱۴۱۰	۶۴۴۸	۹۷۷	۴۱	۸	۳	۹۵۵۸
۵۰-۵۱	۷	۲۷	۲۳	۱۱	۲۳	۲۱۹	۱۶۱۵	۱۹۳۰	۱۹۶۷	۲۶۲	۳۶	۱۲	۶۱۳۳
۵۱-۵۲	۶	۱۸	۱۲	۱۲	۴۱	۳۲۶۶	۹۹۶	۱۲۸۱	۳۳۰	۴۷	۸	۸	۶۰۲۵
۵۲-۵۳	۵	۸	۱۱	۵	۲۳	۷۰۹	۱۴۹۱	۳۲۹	۱۱۸	۷۶۴	۱۵۲	۲۷۱	۳۸۸۶
۵۳-۵۴	۱۳	۷	۵۷	۳۶	۱۹	۴۲۳	۱۵۱۷	۷۱۱۳	۱۸۲۱	۵۳	۵	۶	۱۱۰۷۱
۵۴-۵۵	۴	۳	۱۹	۳۶	۵۶۷	۲۶	۲۸۷۲	۲۰۴۵	۷۸۶	۵۷	۸۰	۷	۶۵۰۲
۵۵-۵۶	۱۰۸۳	۱۸	۱۸	۱۵	۱۵۰	۲۹۹	۲۶۴	۲۹۴۲	۳۹۵۷	۱۶	۱۳۰	۴	۸۸۹۶
۵۶-۵۷	۱۹۷	۶۸۰	۱۰۲	۲۴	۱۶۴	۳۶۴	۹۲۵	۴۶۶	۱۶۵	۵۰۹	۳	۳	۳۶۰۳
۵۷-۵۸	۱	۱	۸۳۸	۸۴	۱۷۹	۱۷۹	۴۲۶۶	۱۳۱۴	۸۰۴	۶۱	۴	۲	۷۷۳۲
۵۸-۵۹	۳	۴۴	۱۰	۱۸	۲۷	۵۳۶	۶۰۱۶	۳۱۸	۶۹	۱۵	۳۰	۷	۷۰۹۲
۵۹-۶۰	۱۲	۳۱۶	۴۹	۵۹	۳۳۶	۷۳۴	۱۲۰۳	۳۳۲۳	۷۸۰	۵۵۶	۲۷	۲	۷۳۹۷
۶۰-۶۱	۱۶۰	۱۲	۷	۱۳	۴۹	۲۴۰	۲۱۶۷	۲۳۴	۲۵۱	۲۶	۳	۲	۳۷۶۳
۶۱-۶۲	۳۴۳	۴۲	۷۵	۴۴	۲۴	۱۹	۵۷۴	۱۸۱۴	۸۰۱	۲۰	۲	۲۴	۳۷۸۲
۶۲-۶۳	۳	۴۲	۱۱۲	۳۸	۱۰۱۹	۳۲۶	۱۷۳۵	۳۹۱۳	۴۱۹	۳۵	۱۳۳	۴	۷۷۸۰
۶۳-۶۴	۲۷	۴۱	۲۲۶	۱۵۳	۱۳۹۸	۵۱۹۰	۱۸۶۷	۹۶۰	۱۸۴	۲۶	۵	۵۴	۱۰۱۳۱
۶۴-۶۵	۴	۸	۹۸	۳۰	۴۴	۱۱۹	۶۶۴	۱۰۸۲	۶۱۹	۱۴	۳۱۳	۳۱۲	۳۳۰۶
۶۵-۶۶	۴۴	۹۹	۱۶۲	۸۲	۱۱۰	۱۶۳۱	۳۷۲۶	۲۸۲۱	۳۱۶	۲۳	۳۲۷	۴	۹۳۴۴
۶۶-۶۷	۵۱۲	۱۳۵۸	۸۱	۳۳۶	۳۱۱	۱۳۱۴	۲۹۱۸	۴۶۸۷	۴۳۳	۷۲۷	۷۳	۳۲۲	۱۳۰۷۲
متوسط	۱۲۸	۱۸۳	۱۰۷	۵۶	۲۳۲	۱۱۰۰	۲۳۳۶	۲۷۷۲	۹۷۴	۱۸۸	۶۹	۵۳	۸۱۹۸
حداکثر	۱۰۸۳	۱۳۵۸	۸۳۸	۳۳۶	۱۳۹۸	۵۳۷۷	۹۴۵۶	۱۲۲۲۸	۴۵۴۹	۷۶۴	۳۲۷	۳۲۲	۳۳۲۲۷

حد اقل	۱	۱	۷	۵	۱۸	۱۹	۲۶۴	۲۰۰	۶۹	۱۴	۲	۲	۱۶۶۸
--------	---	---	---	---	----	----	-----	-----	----	----	---	---	------

در شکل ۴-۸ رژیم رسوبدهی سالیانه و در شکل ۴-۹ رژیم رسوبدهی ماهیانه به عنوان نمونه‌ای از شاخص رفتاری رودخانه‌ها ترسیم گردیده است. مطابق شکل در سال آبی ۴۸-۴۷، ۳۳ میلیون تن رسوب توسط رودخانه شاهرود حمل گردیده است، که چهار برابر متوسط دوره بوده و از جمله سال‌های استثنایی از نظر پتانسیل رسوبدهی رودخانه قلمداد می‌شود. به‌علاوه اردیبهشت ماه سال ۴۸-۴۷ با دارا بودن رسوب ماهانه ۱۲/۲ میلیون تن (۱/۵ برابر متوسط دراز مدت سالیانه) شاخص‌ترین ماه در طول دوره‌های آماری ۲۰ ساله در رودخانه مورد نظر بوده است.



شکل ۴-۸- نمونه‌ای از نمودار تغییرات بار معلق سالیانه یا رژیم رسوبی و متوسط دوره آماری در رودخانه‌ها (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان دوره آماری ۲۰ ساله)



شکل ۴-۹- نحوه نمایش روند تغییرات متوسط بار معلق ماهانه یا رژیم رسوبدهی ماهیانه و مقادیر حداکثر و حداقل رودخانه در دوره آماری (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان دوره آماری ۲۰ ساله، ۱۳۴۷-۶۷)

۴-۲-۲- روش منحنی بده کلاسه

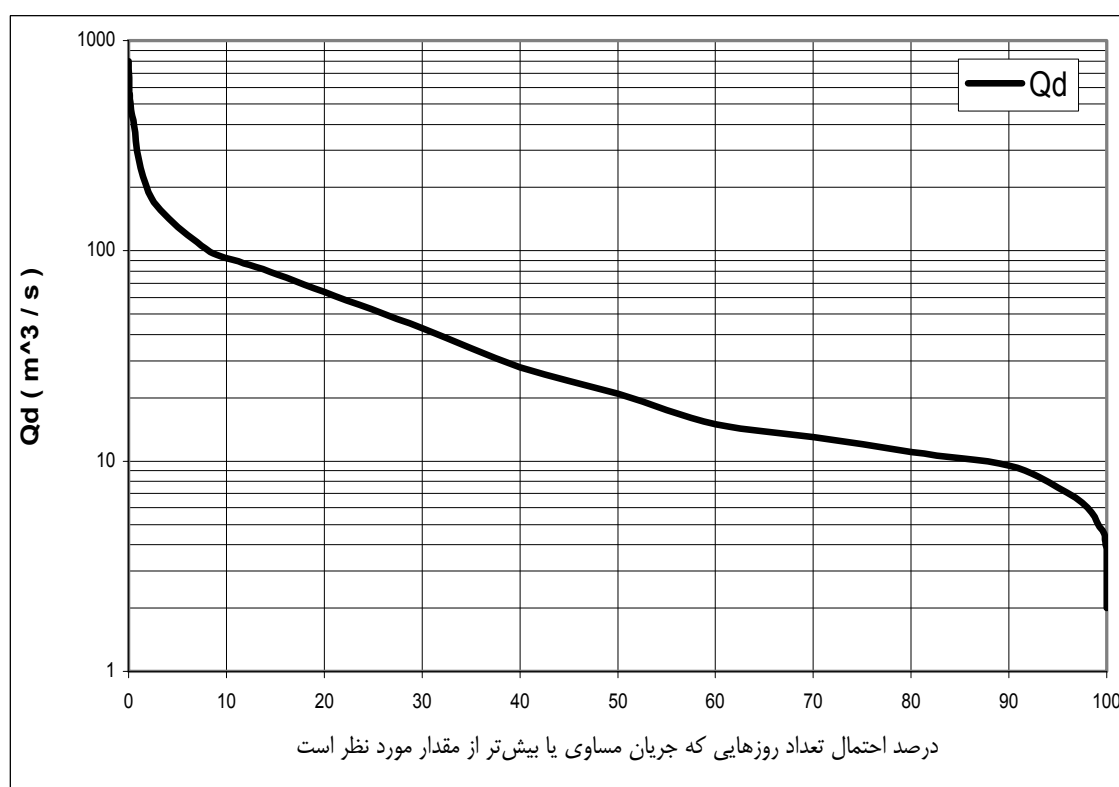
منحنی بده کلاسه یا منحنی دوام جریان^۱ اغلب به منظور تعیین مدت تداوم آبدهی رودخانه برای مقادیر بده جریان مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل (۴-۱۰) نمونه‌ای از منحنی دوام جریان ارائه شده است. برای ترسیم منحنی دوام جریان لازم است مطابق آنچه که در جدول (۴-۶) درج شده است، پس از انتخاب دوره آماری مقادیر بده جریان روزانه برای سال‌های متوالی به صورت نزولی مرتب و سپس با گروه‌بندی آنها در کلاس‌های مختلف (ستون ۱)، مقدار بده جریان (ستون ۲) و احتمال وقوع آن برای هر کلاس مشخص شود (ستون ۳). با استفاده از مندرجات ستون‌های ۱ و ۲ منحنی دوام جریان ترسیم می‌شود. جدول (۴-۶) براساس آمار ۲۰ ساله بده جریان روزانه (۶۷-۱۳۴۷) برای رودخانه شاهرود تنظیم گردیده و منحنی دوام جریان آن با استفاده از ستون‌های ۲ و ۳ به ترتیب احتمال تجمعی و بده در هر کلاس در شکل ۴-۱۰ ترسیم شده است.

برای تعیین متوسط رسوب سالیانه لازم است جدول محاسباتی مشابه جدول (۴-۷) تشکیل گردد. در این جدول ستون‌های ۱ تا ۳ همان مندرجات جدول منحنی دوام جریان بوده و ستون‌های ۴، ۵ و ۶ با هدف تعیین بار رسوبی تکمیل شده است [۲۵، ۱۸]. در جدول (۴-۷) ستون ۴ معرف احتمال وقوع جریان در هر کلاس و ستون ۵ مقدار بار رسوب معلق روزانه برای بده جریان مورد نظر (Q_d) در ستون ۳ می‌باشد که از معادله نمایی سنجه رسوب به دست می‌آید.

جدول ۴-۶- تنظیم جدول محاسباتی برای ترسیم منحنی دوام جریان
(رودخانه شاهرود، ایستگاه لویشان، دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷)

۱	۲	۳
شماره کلاس	احتمال تجمعی	بده در هر کلاس
Class No.	P%	$Q_d(m^3/s)$
۱	۰/۰۲	۸۰۰
۲	۰/۰۴	۵۸۰
۳	۰/۰۶۸	۵۶۰
۴	۰/۰۹۸	۵۵۵
۵	۰/۱۳۳	۵۴۰
۶	۰/۲۵۳	۴۷۰
۷	۰/۵۲۳	۳۹۵
۸	۱/۰۲۳	۲۷۲
۹	۲/۰۲۳	۱۸۹/۵
۱۰	۳/۲۲۳	۱۵۶
۱۱	۵/۰۲۳	۱۳۰
۱۲	۷/۰۲۳	۱۱۰
۱۳	۹/۰۲۳	۹۶
۱۴	۱۳/۰۲۳	۸۴
۱۵	۲۰/۰۲۳	۶۴
۱۶	۳۰/۰۲۳	۴۳
۱۷	۴۰/۰۲۳	۲۸
۱۸	۵۰/۲۳	۲۱

۱۵	۶۰/۰۲۳	۱۹
۱۳	۷۰/۰۲۳	۲۰
۱۱	۸۰/۰۲۳	۲۱
۹/۵	۹۰/۰۲۳	۲۲
۷/۵	۹۵/۰۲۳	۲۳
۶	۹۸/۰۲۳	۲۴
۵	۹۹/۱۱۳	۲۵
۴/۸	۹۹/۴۱۳	۲۶
۴/۵	۹۹/۷۶۳	۲۷
۴	۹۹/۸۸	۲۸
۳/۸	۹۹/۹۷	۲۹
۲	۱۰۰	۳۰



شکل ۴-۱۰- نمونه‌ای از منحنی دوام جریان (بده کلاسه) رودخانه مورد استفاده در تعیین متوسط بار رسوبی سالیانه (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان، دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷)

با استفاده از معادله فوق ستون ۵ در جدول (۴-۷) تکمیل می‌گردد. در ستون ۶ مقدار رسوب روزانه وزنی (Q_{sr}) بر حسب تن که از حاصل ضرب مقدار Q_s (ستون ۵) در کمیت احتمال هر کلاس (ستون ۴ مقدار Δp) به دست می‌آید درج شده است. از حاصل جمع مقادیر مندرج در ستون ۶ متوسط رسوب‌دهی روزانه رودخانه در دوره آماری مورد نظر به دست می‌آید (مطابق جدول (۴-۷) برای رودخانه شاهرود در دوره آماری ۲۰ ساله متوسط رسوب‌دهی روزانه برابر با ۲۲۷۳۱ تن می‌باشد):

$$\bar{Q}_s = \sum_{J=1}^M Q_{srj} \quad J = 1, 2, \dots, M \quad (14-4)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_s$: متوسط رسوب روزانه در دوره آماری (تن در روز)، $\bar{Q}_{srj}$: مقدار رسوب وزنی برای کلاس J و M : تعداد کلاس بده جریان می‌باشد. برای تعیین متوسط رسوب سالیانه ($\bar{Q}_{sy}$) مطابق رابطه زیر کمیت $\bar{Q}_s$ در تعداد روزهای سال ضرب می‌گردد:

$$\bar{Q}_{sy} = 365 \times \bar{Q}_s \quad (15-4)$$

مطابق جدول (۷-۴) برای رودخانه شاهرود مقدار $\bar{Q}_{sy}$ برابر با ۸۲۰۲۷۸۹ تن در سال یا ۸/۳ میلیون تن در سال به روش منحنی دوام جریان حاصل شده است.

جدول ۷-۴ - تشکیل جدول محاسباتی برای تعیین متوسط رسوب معلق سالیانه به روش منحنی دوام جریان (رودخانه شاهرود، ایستگاه لویشان، دوره آماری ۲۰ ساله، ۱۳۴۷-۶۷)

۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره کلاس	احتمال تجمعی	بده در هر کلاس	درصد احتمال در هر کلاس	تناژ رسوب روزانه	تناژ رسوب روزانه تعدیل شده
Class No.	P%	Qd(m ³ /s)	ΔP%	Qs(ton/day)	Qsr(ton/day)
۱	۰/۰۲	۸۰۰	۰/۰۰۹	۵۸۵۳۸۶۶	۵۲۷
۲	۰/۰۴	۵۸۰	۰/۰۲	۲۸۰۵۶۶۵	۵۶۱
۳	۰/۰۶۸	۵۶۰	۰/۰۲۸	۲۵۸۹۲۹۸	۷۲۵
۴	۰/۰۹۸	۵۵۵	۰/۰۳	۲۵۳۶۷۲۹	۷۶۱
۵	۰/۱۳۳	۵۴۰	۰/۰۳۵	۲۳۸۳۶۵۲	۸۳۴
۶	۰/۲۵۳	۴۷۰	۰/۱۲	۱۷۳۴۴۵۸	۲۰۸۱
۷	۰/۵۲۳	۳۹۵	۰/۲۷	۱۱۶۵۴۵۰	۳۱۴۷
۸	۱/۰۲۳	۲۷۲	۰/۵	۴۹۶۵۱۸	۲۴۸۳
۹	۲/۰۲۳	۱۸۹/۵	۱	۲۱۷۲۵۴	۲۱۷۳
۱۰	۳/۲۲۳	۱۵۶	۱/۲	۱۳۹۲۳۶	۱۶۷۱
۱۱	۵/۰۲۳	۱۳۰	۱/۸	۹۱۷۶۲	۱۶۵۲
۱۲	۷/۰۲۳	۱۱۰	۲	۶۲۶۲۴	۱۲۵۲
۱۳	۹/۰۲۳	۹۶	۲	۴۵۸۷۰	۹۱۷
۱۴	۱۳/۰۲۳	۸۴	۴	۳۳۷۹۹	۱۳۵۲
۱۵	۲۰/۰۲۳	۶۴	۷	۱۸۱۴۷	۱۲۷۰
۱۶	۳۰/۰۲۳	۴۳	۱۰	۷۳۰۸	۷۳۱
۱۷	۴۰/۰۲۳	۲۸	۱۰	۲۷۴۰	۲۷۴
۱۸	۵۰/۰۲۳	۲۱	۱۰	۱۴۱۹	۱۴۲
۱۹	۶۰/۰۲۳	۱۵	۱۰	۶۵۷	۶۶
۲۰	۷۰/۰۲۳	۱۳	۱۰	۴۷۴	۴۷
۲۱	۸۰/۰۲۳	۱۱	۱۰	۳۲۳	۳۲
۲۲	۹۰/۰۲۳	۹/۵	۱۰	۲۳۱	۲۳

۶/۷۳	۱۳۵	۵	۷/۵	۹۵/۰۲۳	۲۳
۲/۴۳	۸۱	۳	۶	۹۸/۰۲۳	۲۴
۰/۵۸	۵۳	۱/۰۹	۵	۹۹/۱۱۳	۲۵
۰/۱۵	۴۹	۰/۳	۴/۸	۹۹/۴۱۳	۲۶
۰/۱۵	۴۲	۰/۳۵	۴/۵	۹۹/۷۶۳	۲۷
۰/۰۴	۳۲	۰/۱۱۷	۴	۹۹/۸۸	۲۸
۰/۰۳	۲۹	۰/۰۹	۳/۸	۹۹/۹۷	۲۹
۰	۷	۰/۰۳	۲	۱۰۰	۳۰
۲۲۷۳۱ (ton)	$Q_s = \sum Q_{sr}$				متوسط تناژ رسوب روزانه
۸۲۹۶۸۱۵ (ton)	$\bar{Q}_{sy} = 22731 \times 365$				متوسط تناژ رسوب سالیانه
۳۶/۵ (m ³ /s)	$Q_d = \sum Q_d \times \Delta P / 100$				بده متوسط سالیانه

* تناژ رسوب روزانه از معادله نمایی $Q_s = 1.343 Q_d^{2.287}$ متعلق به رودخانه شاهرود محاسبه گردیده و جزییات تعیین معادله در مبحث ۴-۲-۱ ارائه شده است.

۴-۳- محاسبه بار معلق در شرایط عدم وجود آمار رسوب

۴-۳-۱- روش ایستگاه مبنا

در مواردی که ایستگاه آب‌سنجی فاقد آمار رسوب بوده و یا امکان تعیین منحنی سنج‌رسوب فراهم نباشد می‌توان از ایستگاه‌های دارای آمار واقع در محدوده مطالعاتی یا ایستگاه مبنا بهره جست. در این روش با مقایسه آبدهی ایستگاه مبنا و ایستگاه فاقد آمار رسوب (و دارای آمار آبدهی) و انجام مراحل که در زیر ارائه می‌شود متوسط بار رسوبی سالیانه محاسبه می‌گردد. شایسته ذکر است که در استفاده از این روش لازم است به تشابه عوامل موثر در فرسایش و تولید و انتقال رسوب در حوضه فاقد آمار و حوضه منتهی به ایستگاه معرف توجه شود.

۴-۳-۱-۱- بررسی آمار آبدهی و رسوب ایستگاه مبنا

در ایستگاه‌های آب‌سنجی بسته به درجه اهمیت، اهداف مورد نظر و امکانات موجود اندازه‌گیری بده جریان و بده رسوب به صورت سیستماتیک و طی دوره طولانی مدت انجام می‌پذیرد و در مواردی نیز تنها به اندازه‌گیری بده جریان اکتفا می‌شود. آن دسته از ایستگاه‌هایی که دارای آمار طولانی مدت آبدهی و غلظت رسوب می‌باشند به عنوان ایستگاه مبنا^۱ شناخته می‌شوند. از این ایستگاه‌ها می‌توان در تعیین رسوب سالیانه ایستگاه‌های فاقد آمار استفاده نمود. بدین منظور لازم است با بررسی مقادیر آبدهی و غلظت یک دوره مشاهداتی انتخاب و نسبت به تشکیل سری آماری Q_d و Q_s با استفاده از معادله (۴-۱) و تنظیم جدول داده‌ها (نظیر جدول ۴-۱) اقدام شود.

۴-۳-۱-۲- تعیین رابطه بده جریان و بده رسوب و ترسیم منحنی کلاسه رسوب

با استفاده از داده‌های آماری نخست نمودار بده سنج رسوب و معادله نمایی آن تعیین و سپس منحنی کلاسه رسوب ترسیم می‌گردد (در خصوص نحوه تعیین معادله نمایی و ترسیم منحنی سنج‌رسوب به مبحث ۴-۲ مراجعه شود). نمونه‌ای از منحنی کلاسه رسوب در شکل ۴-۱۱ ترسیم گردیده است. منحنی کلاسه رسوب بخشی از مراحل محاسباتی روش منحنی دوام جریان برای تعیین

متوسط بار رسوب سالیانه می‌باشد. به منظور تشریح جزئیات محاسبات مثال موردی درخصوص رودخانه شاهرود درج شده است. در این مثال ایستگاه لویشان واقع بر روی رودخانه شاهرود در خروجی حوضه آبریز با سطح زهکشی ۴۸۸۲ کیلومترمربع و در ورودی سد سفیدرود به عنوان ایستگاه مبنا و ایستگاه رجایی دشت (سپاهدشت) در بالادست آن با سطح زهکشی ۲۴۴۵ کیلومترمربع به عنوان ایستگاه فاقد آمار رسوب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای دوره آماری مشترک ۲۰ ساله براساس آمار بده جریان روزانه منحنی‌های دوام جریان برای دو ایستگاه مورد نظر در شکل ۴-۱۲ ترسیم شده است (در خصوص جزئیات ترسیم منحنی‌های دوام جریان به مبحث ۴-۲-۲ مراجعه شود). مبنای ترسیم منحنی‌ها در شکل ۴-۱۲، مقادیر مندرج در جدول (۵-۸) می‌باشد که در آن ستون ۱ معرف احتمال تجمعی ($P\%$ برحسب در صد)، ستون ۲ مقدار بده جریان در ایستگاه مبنا (لویشان Q_{d_L}) و ستون ۳ مقدار جریان در ایستگاه فاقد آمار رسوب (رجایی دشت) یا (Q_{d_R}) در هر کلاس می‌باشد. با مشخص شدن منحنی دوام جریان منحنی کلاسه رسوب را نیز می‌توان ترسیم کرد. برای ایستگاه لویشان این منحنی در شکل ۴-۱۲ با استفاده از مقادیر ستون ۱ و ستون Q_{s_L} در جدول (۴-۸) ترسیم شده است. مقادیر Q_{s_L} در جدول مزبور از معادله نمایی سنج رسوب رودخانه شاهرود در ایستگاه لویشان (معادله ۴-۴ در مبحث ۴-۲-۱) تعیین گردیده است.

۴-۳-۱-۳- استخراج منحنی کلاسه رسوب ایستگاه فاقد آمار

با مشخص شدن منحنی‌های دوام جریان و همچنین منحنی کلاسه رسوب ایستگاه مبنا امکان ترسیم منحنی کلاسه رسوب ایستگاه فاقد آمار و محاسبه متوسط رسوب سالیانه فراهم می‌شود. بدین منظور لازم است مطابق مقادیر k (نسبت بده ایستگاه فاقد آمار رسوب به بده ایستگاه مبنا) مطابق رابطه زیر مشخص گردد:

$$k = \frac{Q_{d_R}}{Q_{d_L}} \quad (۴-۱۶)$$

که در این رابطه:

k : نسبت بده‌های دو ایستگاه، Q_{d_R} : بده جریان روزانه در کلاس مورد نظر برای ایستگاه فاقد آمار (m^3/s) و Q_{d_L} : بده جریان روزانه در کلاس مورد نظر برای ایستگاه مبنا (m^3/s) می‌باشد. پس از مشخص شدن مقادیر k تناژ رسوب روزانه برای ایستگاه فاقد آمار مطابق ستون ۷ جدول (۴-۸) از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$Q_{s_R} = k * Q_{s_L} \quad (۴-۱۷)$$

که در این رابطه:

Q_{s_R} : بار رسوب معلق روزانه در کلاس مورد نظر در ایستگاه فاقد آمار (ton/day)، Q_{s_L} : بار رسوب روزانه در کلاس مورد نظر در ایستگاه مبنا و k نسبت بده‌ها می‌باشد که قبلاً معرفی شده است. با استفاده از مقادیر ستون ۷ و احتمال تجمعی (ستون ۱) در جدول (۴-۸)، منحنی کلاسه رسوب برای ایستگاه رجایی دشت که فاقد آمار رسوب‌دهی می‌باشد در شکل ۴-۱۲-۱۲ همراه با منحنی کلاسه رسوب لویشان ترسیم شده است. براساس منحنی کلاسه رسوب که مقادیر عددی آن در جدول (۴-۸) درج گردیده نخست متوسط تناژ رسوب روزانه براساس مقادیر مندرج در ستون ۸ و با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{Q}_{S_R} = \sum \Delta Q_{S_R} \quad (۴-۱۸)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{S_R}$: متوسط تناژ رسوب روزانه دوره آماری در ایستگاه فاقد آمار (ton/day) و ΔQ_{S_R} تناژ رسوب روزانه تعدیل شده در هر کلاس برای ایستگاه فاقد آمار می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta Q_{S_R} = (\Delta P \times Q_{S_R}) / 100 \quad (۱۹-۴)$$

که در این رابطه:

ΔP : احتمال فراوانی در هر کلاس (درصد) و Q_{S_R} و ΔQ_{S_R} قبلاً تعریف شده‌اند. برای ایستگاه رجایی دشت مقدار $\bar{Q}_{S_R}$ مطابق جدول (۸-۴) برابر ۹۸۶۳ تن در روز می‌باشد ($\bar{Q}_{S_R} = 9863 \text{ ton/day}$).

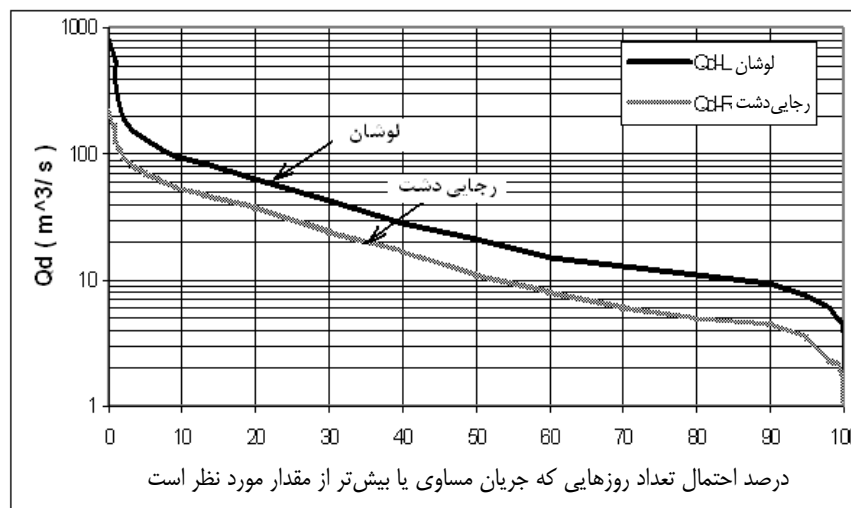
۴-۳-۴- تعیین تناژ رسوب سالیانه ایستگاه فاقد آمار رسوب

پس از مشخص شدن متوسط تناژ رسوب روزانه ($\bar{Q}_{S_R}$) مقدار تناژ رسوب سالیانه برای ایستگاه فاقد آمار از رابطه زیر به دست می‌آید:

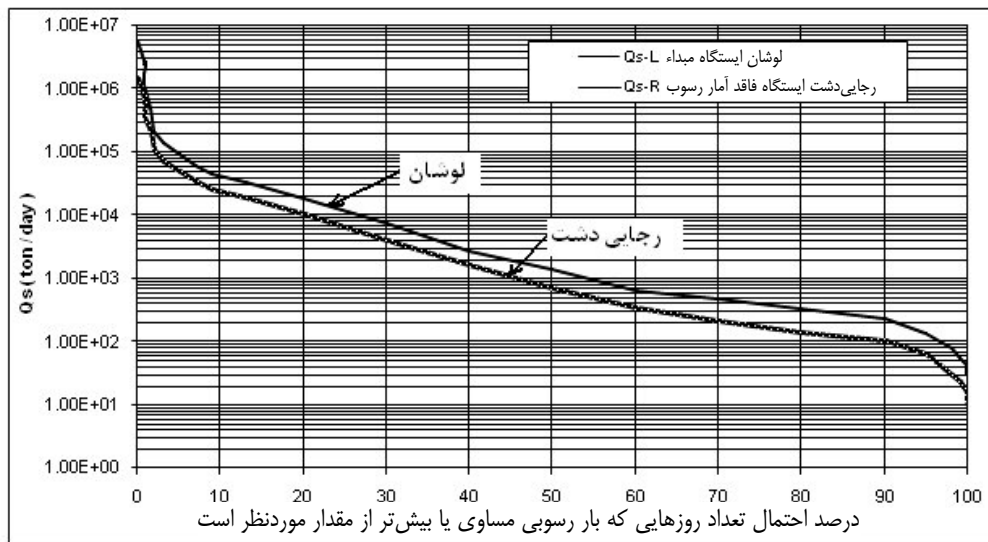
$$\bar{Q}_{sy_R} = \bar{Q}_{S_R} \times 365 \quad (۲۰-۴)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{sy_R}$: متوسط رسوب سالیانه دوره آماری در ایستگاه فاقد آمار رسوب (ton) می‌باشد که از حاصل ضرب $\bar{Q}_{S_R}$ در تعداد روزهای سال به دست می‌آید. مطابق جدول (۸-۴) مقدار $\bar{Q}_{sy_R}$ برای ایستگاه رجایی دشت برابر با ۳۵۹۹۹۹۵ تن (۳/۶ میلیون تن - MT) در سال تعیین شده است. بدین ترتیب برای تعیین متوسط رسوب معلق سالیانه در ایستگاه فاقد آمار براساس ایستگاه مبنا لازم است مراحل محاسباتی مشابه جدول (۸-۴) انجام گرفته و با توجه به کلاسه‌بندی بده و جریان مقدار k برای هر کلاس مشخص و براساس آن تناژ رسوب سالیانه تعیین گردد.



شکل ۴-۱۱- منحنی‌های دوام جریان ایستگاه مبنا و ایستگاه فاقد آمار رسوب برای تعیین متوسط رسوب سالیانه (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان (مبنا) و ایستگاه رجایی دشت (دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷))



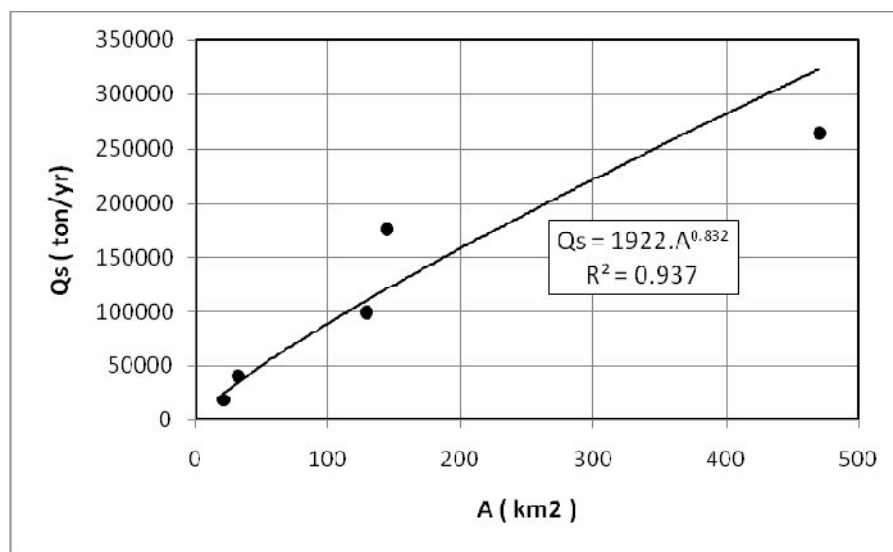
شکل ۴-۱۲ - منحنی‌های دوام جریان رسوب در ایستگاه مینا و بازسازی شده برای ایستگاه فاقد آمار (رودخانه شاهرود، ایستگاه لوشان (مینا) و ایستگاه رجایی دشت) (دوره آماری ۲۰ ساله، ۶۷-۱۳۴۷)

۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره کلاس
Col5*Col7 تناژ رسوب تعدیل شده	Col6*Col4 تناژ رسوب (ایستگاه فاقد آمار)	تناژ رسوب (ایستگاه مینا)	احتمال فراوانی	Col3/Col2	بده در هر کلاس (ایستگاه فاقد آمار)	بده در هر کلاس (ایستگاه مینا)	احتمال تجمعی	
ΔP%	Qs-R	Qs-L	در هر کلاس	K	Qd-R	Qd-L	در هر کلاس	
(ton/day)	(ton/day)	(ton/day)	ΔP%	نسبت بده‌ها	Qd(m^3/s)	Qd(m^3/s)	P%	Class No.
۱۴۱	۱۵۶۴۴۱۸/۰۸	۵۸۵۳۸۶۶/۵	۰/۰۰۹	۰/۲۶۷۲۵	۲۱۴	۸۰۰	۰	۱
۱۴۵	۷۲۵۶۰۳/۰۵	۲۸۰۵۶۶۵/۱	۰/۰۲	۰/۲۵۸۶۲	۱۵۰	۵۸۰	۰/۸۳	۲
۲۱۵	۷۶۷۳۵۱	۲۵۸۹۲۹۸	۰/۰۲۸	۰/۲۹۶۳۵	۱۶۶	۵۶۰	۰/۹۲	۳
۱۸۹	۶۳۰۷۵۴	۲۵۳۶۷۳۸/۹	۰/۰۳	۰/۲۴۸۶۵	۱۳۸	۵۵۵	۰/۸۵	۴
۲۰۱	۵۷۳۶۰۱	۲۳۸۲۶۵۱/۶	۰/۰۳۵	۰/۲۴۰۷۴	۱۳۰	۵۴۰	۱/۰۳	۵
۵۵۸	۴۶۴۹۸۲	۱۷۳۴۴۵۸/۱	۰/۱۲	۰/۲۶۸۰۹	۱۲۶	۴۷۰	۰/۸۳	۶
۹۸۸	۳۶۵۸۶۳	۱۱۶۵۴۴۹/۸	۰/۲۷	۰/۳۱۳۹۲	۱۲۴	۳۹۵	۰/۸۹	۷
۱۰۵۹	۲۱۱۸۰۴	۴۹۶۵۱۸/۱۱	۰/۵	۰/۴۲۶۵۸	۱۰۵	۲۴۵	۱/۵۱	۸
۱۰۵۹	۱۰۹۴۸۶	۲۱۷۲۵۴/۲۵	۱	۰/۵۰۳۹۵	۹۵	۱۸۹/۵	۲/۰۲	۹
۸۸۹	۷۴۰۸۱	۱۳۹۲۳۶/۱۴	۱/۲	۰/۵۳۲۰۵	۸۳	۱۵۶	۳/۲۲	۱۰
۸۸۹	۴۹۴۱۰	۹۱۷۶۲	۱/۸	۰/۵۳۸۶۴	۷۰	۱۳۰	۵/۰۲	۱۱
۷۰۶	۳۵۲۹۷	۶۲۶۲۴	۲	۰/۵۶۳۶۴	۶۲	۱۱۰	۷/۰۲	۱۲
۵۲۶	۲۶۲۸۰	۴۵۸۷۰	۲	۰/۵۷۲۹۲	۵۵	۹۶	۹/۰۲	۱۳
۷۷۳	۱۹۳۱۴	۳۳۷۹۹	۴	۰/۵۷۱۴۳	۴۸	۸۴	۱۳/۰۲	۱۴
۷۵۴	۱۰۷۷۵	۱۸۱۴۷	۷	۰/۵۹۳۷۵	۳۸	۶۴	۲۰/۰۲	۱۵
۴۰۸	۴۰۷۹	۷۳۰۸	۱۰	۰/۵۵۸۱۴	۲۴	۴۳	۳۰/۰۲	۱۶
۱۶۶	۱۶۶۳	۲۷۴۰	۱۰	۰/۶۰۷۱۴	۱۷	۲۸	۴۰/۰۲	۱۷
۷۴	۷۴۳	۱۴۱۹	۱۰	۰/۵۲۳۸۱	۱۱	۲۱	۵۰/۰۲	۱۸
۳۵	۳۵۱	۶۵۷	۱۰	۰/۵۳۳۳۳	۸	۱۵	۶۰/۰۲	۱۹
۲۲	۲۱۹	۴۷۴	۱۰	۰/۴۶۱۵۴	۶	۱۳	۷۰/۰۲	۲۰
۱۵	۱۴۷	۳۲۳	۱۰	۰/۴۵۴۵۵	۵	۱۱	۸۰/۰۲	۲۱
۱۱	۱۰۹	۲۳۱	۱۰	۰/۴۷۰۱۹	۴	۹/۵	۹۰/۰۲	۲۲
۳/۱۸۶	۶۴	۱۳۵	۵	۰/۴۷۳۰۸	۴	۷/۵	۹۵/۰۲	۲۳
۰/۹۳	۳۱	۸۱	۳	۰/۳۸۳۳۳	۲/۳	۶	۹۸/۰۲	۲۴
۰/۲۵۶	۲۳	۵۳	۱/۰۹	۰/۴۴	۲/۲	۵	۹۹/۱۱	۲۵
۰/۰۶۱	۲۰	۴۹	۰/۳	۰/۴۱۶۶۷	۲	۴/۸	۹۹/۴۱	۲۶
۰/۰۵۹	۱۷	۴۲	۰/۳۵	۰/۴	۱/۸	۴/۵	۹۹/۷۶	۲۷
۰/۰۱۴	۱۲	۳۲	۰/۱۱۷	۰/۳۷۵	۱/۵	۴	۹۹/۸۸	۲۸
۰/۰۰۸	۹	۲۹	۰/۰۹	۰/۳۱۴۵۵	۱/۲	۳/۸۱۵	۹۹/۹۷	۲۹
۰/۰۰۱	۴	۷	۰/۰۳	۰/۵۵	۱/۱	۲	۱۰۰	۳۰
۹۸۶۳ (ton/day)	$\bar{Q}_{s-R} = \sum \Delta Q_{sr-R}$						متوسط تناژ رسوب روزانه در ایستگاه فاقد آمار رسوب	
۳۵۹۹۹۹۵ (ton/year)	$\bar{Q}_{sy-R} = 983 \times 365$						متوسط تناژ رسوب سالیانه در ایستگاه فاقد آمار رسوب	
۱۹/۱۶								

در ایستگاه فاقد آمار رسوب

۴-۳-۲- روش منطقه‌ای محاسبه بار معلق رسوب

از جمله روش‌های متداول برای تعیین بار رسوبی رودخانه‌های فاقد آمار استفاده از روش منطقه‌ای است. در این روش با استفاده از آمار ایستگاه‌های موجود در یک منطقه که دارای تشابه هیدرولوژیکی است اقدام به ایجاد رابطه همبستگی بین مساحت حوضه آبریز و بار معلق سالیانه ایستگاه‌ها نموده و از رابطه به‌دست آمده در برآورد بار معلق رسوب در محل مورد نظر استفاده می‌شود [۲۱]. به‌عنوان مثال در شکل (۴-۱۳) نمودار همبستگی منطقه‌ای برای رودخانه‌های شاهرود واقع در استان سمنان نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- نمودار و رابطه همبستگی منطقه‌ای مساحت و تناژ رسوب سالیانه (رودخانه‌های منطقه شاهرود - استان سمنان)

مطابق شکل (۴-۱۳) رابطه همبستگی منطقه‌ای بار معلق رسوب عبارتست از:

$$Q_s = 1922A^{0.832} \quad R^2 = 0.937 \quad (۴-۲۱)$$

در این رابطه Q_s بار رسوب معلق سالیانه رودخانه در محل مورد نظر (تن)، A مساحت حوضه آبریز رودخانه در محل مورد نظر (کیلومتر مربع) می‌باشد. مطابق رابطه مزبور برای رودخانه‌ای با مساحت معادل ۲۰۰ کیلومتر مربع در منطقه Q_s برابر با ۱۵۷۸۳۷ تن در سال خواهد بود.

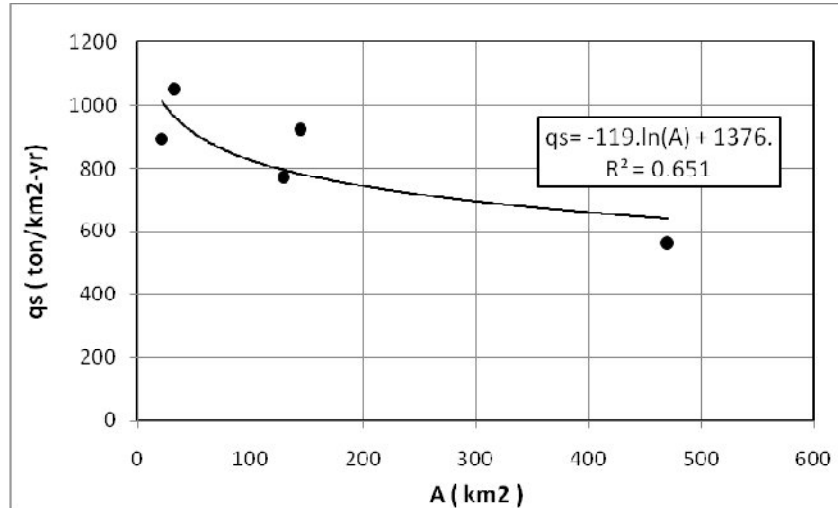
در مواردی نیز معادله همبستگی منطقه‌ای بین مساحت (A) و بده ویژه بار معلق (q_s) استخراج می‌شود. در شکل (۴-۱۴) به‌عنوان نمونه نمودار $A - q_s$ برای رودخانه‌های شاهرود واقع در استان سمنان نشان داده شده است. رابطه همبستگی منطقه‌ای به‌صورت زیر بوده و از حاصلضرب q_s در A مقدار تناژ رسوب سالیانه (Q_s) برای رودخانه فاقد آمار تعیین می‌شود:

$$q_s = -119 \ln(A) + 1376 \quad R^2 = 0.657 \quad (۴-۲۲)$$

$$Q_s = q_s A \quad (۴-۲۳)$$

در این روابط q_s رسوبدهی ویژه معلق سالیانه رودخانه در محل مورد نظر (تن در کیلومتر مربع در سال)، A مساحت حوضه آبریز رودخانه در محل مورد نظر (کیلومتر مربع) و Q_s بار رسوب معلق سالیانه رودخانه در محل مورد نظر (تن) می‌باشد. مطابق رابطه

مزبور برای رودخانه‌ای با مساحت معادل ۲۰۰ کیلومتر مربع در منطقه q_s برابر با ۷۴۵.۵ (تن در کیلومتر مربع در سال) و Q_s برابر با ۱۴۹۱۰۰ تن در سال خواهد بود.



شکل ۴-۱۴- نمودار و رابطه همبستگی منطقه‌ای مساحت و رسوبدهی ویژه سالیانه (رودخانه‌های منطقه شاهرود - استان سمنان)

۳-۳-۴- روش تجربی

در مواردی که به دلیل عدم وجود آمار رسوب امکان استفاده از روش ایستگاه مینا و یا روش منطقه‌ای میسر نباشد می‌توان با استفاده از روش‌های تجربی موجود بار رسوب معلق رودخانه را ارزیابی نمود. فلمینگ^۱ با بررسی داده‌های مشاهده‌ای بیش از ۲۵۰ حوضه آبریز در نقاط مختلف دنیا رابطه زیر را به همراه جدول (۴-۹) برای تعیین متوسط رسوب معلق سالیانه ارائه نموده است [۱۲]:

$$\bar{Q}_{sy} = a'(\bar{Q}_{dy})^n \quad (۴-۲۴)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{sy}$: متوسط بار رسوب معلق سالیانه (تن در سال، ton/yr)، $\bar{Q}_{dy}$: متوسط آبدی سالیانه رودخانه (مترمکعب بر ثانیه، m^3/s)

و a' و n به ترتیب ضریب و نمای معادله می‌باشد که با توجه به کلاس پوشش گیاهی از جدول (۴-۹) استخراج می‌شود.

جدول ۴-۹- مقادیر a' و n در معادله نمایی رسوب برای پوشش‌های گیاهی مختلف [۴] و مواردی از پارامترهای ارزیابی شده برای رودخانه‌های کشور

شماره کلاس	نوع پوشش گیاهی (نام رودخانه)	a'	n
I	پوشش جنگلی متراکم بادرختان پهن‌برگ و سوزنی‌برگ	۴۰۱۲	۱/۰۲
II	پوشش جنگلی با تراکم کم و درختان سوزنی‌برگ همراه با مراتع دارای پوشش متراکم	۵۹۳۳۰	۰/۸۲
III	مراتع با پوشش گیاهی کم و اراضی بایر	۱۷۷۰۰۹	۰/۶۵
IV	اراضی بایر و مناطق خشک و بیابانی	۴۴۴۹۷۵	۰/۷۲
	رودخانه کارون و شاخه‌های اصلی*	۱۴۷۰۰۸	۰/۷۷
	سفید رود (رودخانه‌های شاهرود و قزل‌اوزن)*	۸۵۵۷۳	۱/۲۷

۱/۳۲	۲۴۰۶۴	اهرچای (از شعبات رودخانه ارس)*	
------	-------	--------------------------------	--

* بررسی‌های انجام شده در خصوص رژیم رسوبی رودخانه‌های کشور (سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۶ - فیروز بهادری و همکاران)

تعیین $\bar{Q}_{sy}$ با انجام مراحل محاسباتی زیر محقق می‌شود:

۴-۳-۳-۱- تعیین نوع پوشش گیاهی حوضه آبریز

با استفاده از مندرجات جدول (۹-۴) نوع پوشش گیاهی که برای چهار حالت از اراضی جنگلی تا مناطق خشک و بیابانی کلاسه‌بندی گردیده انتخاب و براساس آن پارامترهای a' برای مناطق دارای پوشش جنگلی (کلاس I) کم‌تر بوده و برابر با ۴۰۱۲ می‌باشد و برای مناطق خشک و اراضی بایر (کلاس IV) این ضریب برابر با ۴۴۴۹۷۵ می‌باشد که بیانگر رسوب‌زایی بیش‌تر حوضه‌های آبریز فاقد پوشش گیاهی است. در عین حال با توجه به نقش بارش‌های جوی برای مناطق جنگلی که دارای متوسط بارش سالیانه بالایی می‌باشند مقدار n بیش‌ترین (۱/۰۲) و در نواحی خشک و بیابانی کاهش بارش موجب کاهش نرخ انتقال رسوب و کم شدن نمای معادله ($n=0/۷۲$) می‌گردد.

۴-۳-۳-۲- تعیین رابطه نمایی منحنی سنجه‌رسوب

با مشخص شدن نوع پوشش گیاهی رابطه نمایی منحنی سنجه‌رسوب براساس مقادیر a' و n تعریف گردیده و مقدار Q_{dy} (بده متوسط سالیانه) نیز برای ایستگاه مورد نظر براساس آمار آبدهی موجود محاسبه می‌شود.

۴-۳-۳-۳- تعیین بار رسوبی معلق

برای تعیین بار رسوبی معلق پس از استخراج a' و n از جدول (۹-۴) در مرحله بعد مقدار $\bar{Q}_{dy}$ از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\bar{Q}_{dy} = \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{dy,j} \quad (۲۵-۴)$$

$$\bar{Q}_{dy,j} = \left(\sum_{i=1}^{365} Q_{d,i} \right)_j \quad (۲۶-۴)$$

که در این روابط:

$\bar{Q}_{dy,j}$: متوسط آبدهی روزانه در سال مورد نظر (m^3/s)، $Q_{d,i}$: آبدهی روزانه در سال مورد نظر (m^3/s)، j : شاخص سال که با توجه به طول دوره آماری از یک تا N سال تغییر می‌کند (N تعداد سال‌های آماری دارای آبدهی روزانه) و i شاخص روز می‌باشد که برای هر سال از ۱ تا ۳۶۵ تغییر می‌نماید.

با قرار دادن $\bar{Q}_{dy}$ در معادله نمایی مقدار متوسط رسوب سالیانه رودخانه در ایستگاه مورد نظر تعیین می‌گردد. به‌عنوان مثال چنانچه برای یک ایستگاه آب‌سنجی مفروض حوضه آبریز دارای پوشش گیاهی از نوع کلاس III «مراتع با پوشش گیاهی کم و اراضی بایر» بوده و $\bar{Q}_{dy} = 30 m^3/s$ باشد مقدار $a' = 177009$ و $n = 0.65$ از جدول (۹-۵) قرائت و برای $\bar{Q}_{sy}$ داریم:

$$\bar{Q}_{sy} = 177009(30)^{0.65} = 1,6114,820 \text{ ton/yr}$$

یا مقدار $\bar{Q}_{sy}$ برابر با ۱/۶۱۴ میلیون تن در سال خواهد بود.

فلمینگ توصیه کرده است که با توجه به تعدد عوامل تاثیرگذار در تولید رسوب و حمل آن توسط رودخانه‌ها از جمله رژیم بارندگی، نوع خاک، سازندهای تشکیل‌دهنده سطح حوضه آبریز و عوامل متعدد فیزیوگرافی حوضه‌ها بهتر است پارامترهای a' و n در صورت وجود داده‌های آماری رسوب و بده جریان مورد ارزیابی قرار گرفته و به صورت ناحیه‌ای تدوین گردد.

به منظور بررسی نحوه انطباق ضرایب a' و n با مقادیر ارائه شده توسط فلمینگ بررسی‌هایی بر روی رودخانه‌های واقع در حوضه‌های آبریز کارون، سفیدرود و اهر چای انجام گرفت که نتایج آن در جدول (۴-۹) مندرج است. مطابق جدول مذکور مقادیر a' و n برای رودخانه کارون و شاخه‌های اصلی آن در شرایط عدم وجود سدهای ذخیره‌ای (حالت طبیعی عملکرد رودخانه) با محدوده مقادیر ارائه شده توسط فلمینگ انطباق دارد ($a' = 1470.08$, $n = 0.77$) و از نظر پوشش گیاهی در حد فاصل بین کلاس II و III قرار می‌گیرد که با شرایط طبیعی کارون که دارای مناطق با پوشش جنگلی با تراکم کم و مراتع طبیعی و در قسمت‌هایی نیز اراضی بایر می‌باشد هم‌خوانی مناسبی دارد. سفیدرود (رودخانه‌های شاهرود و قزل اوزن) نیز از نظر پارامتر a' در حد فاصل بین حوضه‌های آبریز دارای پوشش گیاهی کلاس II و III می‌باشد که با ویژگی‌های طبیعی آن دارای هماهنگی مطلوبی است لیکن پارامتر n با دارا بودن کمیت ($n = 1/27$) با محدوده معرفی شده توسط فلمینگ متفاوت می‌باشد که نقش عوامل ناحیه‌ای را در کمیت n آشکار می‌نماید. رودخانه اهر چای از نظر پارامتر a' متعلق به کلاس I و II است که ویژه مناطق جنگلی است و برای حوضه آبریز اهر چای مصداق چندان‌ی نداشتن و پوشش گیاهی آن را می‌توان متعلق به کلاس III در نظر گرفت. علت پایین بودن کمیت a' را می‌توان تا حدی ناشی از گسترش سازندهای سخت در سطح حوضه آبریز قلمداد نمود که به نوبه خود توان رسوب‌زایی را به مثابه پوشش گیاهی متراکم و جنگلی کاهش می‌دهد. در عین حال نمای n برای رودخانه اهر چای فراتر از محدوده فلمینگ بوده ($n = 1/32$) و تأکیدی بر ضرورت محک زنی ضرایب فلمینگ براساس داده‌های مشاهداتی است. نکته مهم در استفاده از روش فلمینگ در نظر گرفتن اثرهای سدهای ذخیره‌ای است که بخش عمده‌ای از آورد رسوبی رودخانه را تله‌اندازی کرده و مانع از رسیدن آن به بازه‌های پایین دست می‌شود. به عبارتی روش فلمینگ برای شرایط طبیعی (عدم وجود سدهای ذخیره‌ای) صادق بوده و در صورت وجود سدهای ذخیره‌ای مقادیر به دست آمده دور از واقعیت خواهد بود.

۴-۳-۴- استفاده از معادلات انتقال رسوب معلق (روش تئوریک)

یکی از روش‌های تعیین بار معلق در رودخانه‌ها استفاده از معادلات مبتنی بر تحلیل مکانیزم معلق شدن دانه‌های رسوب در جریان آب می‌باشد. اساس استفاده از این گونه معادلات در نظر گرفتن خصوصیات هیدرولیک جریان و ترکیب دانه‌بندی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها است. بار معلق به دست آمده از معادلات تحلیلی اصطلاحاً بار معلق بستری نامیده می‌شود (بار شسته در آن منظور نشده است)، که توصیف آن در بحث ۳-۱ ارائه شده و در زیر به معرفی معادلات مورد استفاده در تعیین غلظت بار معلق پرداخته می‌شود:

۴-۳-۴-۱- معادله راس^۱

نخستین بار راس در سال ۱۹۳۷ معادله زیر را ارائه کرد که براساس آن تعیین غلظت مواد معلق برای اندازه‌های مختلف دانه‌های رسوب غیرچسبنده میسر گردید [۲۲]:

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D-y}{y} * \frac{d}{D-a} \right)^Z \quad (27-4)$$

$$Z = \frac{w}{kU_*} \quad (28-4)$$

که در این روابط:

C : غلظت وزنی مواد معلق، C_a : غلظت مینا که نحوه تعیین آن در ادامه توضیح داده شده است، D : عمق جریان آب در رودخانه (متر - m)، y : عمق در نقطه مورد نظر در امتداد قائم که در آن غلظت برابر با C می‌باشد (m)، a : ارتفاع از سطح مینا یا فاصله‌ای از بستر که معادله راس در آن صادق بوده و پایین‌تر از آن صادق نمی‌باشد (m)، Z : پارامتر معلق شدن دانه‌های رسوب (بی‌بعد)، w : سرعت ترسیب دانه در آب (متر بر ثانیه، m/s)، k : عدد وون کارمن که اغلب برابر با 0.4 فرض می‌شود، U_* : سرعت برشی جریان $U_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_w}$ که در آن τ_0 : تنش برشی (نیوتن بر مترمربع، N/m^2) که از رابطه $\tau_0 = \gamma_w DS$ به دست می‌آید، ρ_w : جرم مخصوص آب (کیلوگرم جرم بر مترمکعب Kg_m/m^3)، γ_w : وزن مخصوص آب (نیوتن بر مترمکعب، N/m^3) و S شیب رودخانه است که برابر با شیب خط انرژی فرض می‌شود (بی‌بعد)، در معادله (۲۱-۵) کمیت $\frac{C}{C_a}$ غلظت نسبی بوده و مقدار آن برای ($y = a$) یا نزدیک کف بستر برابر با یک و برای ($y = D$) یا سطح آب برابر با صفر می‌باشد.

در رابطه راس برای یک عمق مشخص (D) مقدار $\frac{C}{C_a}$ توسط نمای Z کنترل می‌شود. هر چه اندازه دانه‌ها کوچک‌تر شود مقدار Z کاهش می‌یابد که در نتیجه آن مطابق شکل (۴-۱۵) توزیع غلظت حالت یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد (نظیر منحنی $Z=0.16$). با افزایش اندازه دانه‌ها (افزایش w) Z نیز افزایش یافته و منحنی غلظت دارای تغییرات وسیع‌تر شده و غلظت نسبی و به تبع آن مقدار غلظت رو به کاهش می‌گذارد (نظیر منحنی $Z=1/93$ در شکل ۴-۱۵). بررسی‌های انجام گرفته موید آن است که برای $Z \geq 5$ (دانه‌های درشت موجود در بستر که مقدار w بیش‌تر بوده و امکان معلق شدن آنها وجود ندارد) عملاً مقدار $\frac{C}{C_a}$ برابر با صفر می‌باشد [۱۰]. استفاده از معادله راس برای تعیین C مستلزم آن است که مقدار C_a و a با اندازه‌گیری میدانی تعیین گردند. بعضی از متخصصین مقدار a را معادل 5% عمق جریان ($a = 0.05D$) توصیه کرده‌اند [۲۲]. چانسن [۳] معادله‌ای را ارائه نموده است که براساس آن مقدار C_a و a را می‌توان به روش تحلیلی تعیین نمود:

$$C_a = \frac{2.457}{D} \left(\frac{v^2}{(G_{s-1})g} \right)^{1/3} (\tau_* - 0.047) \quad (29-4)$$

$$a = 1.375 \left(D_{50} \left(\frac{(G_s - 1)g}{v^2} \right)^{1/3} \right)^{0.7} \sqrt{\tau_* - 0.047} \quad (30-4)$$

$$\tau_* = \tau_0 / \gamma_w (G_{s-1})d \quad (31-4)$$

که در این روابط:

C_a : غلظت مینا (وزنی)، d : متوسط قطر دانه‌های بستر و معادل d_{50} یا قطر نظیر 50% درصد وزنی (m)، D : ویسکوزیته سینماتیکی آب (m^2/s)، g : شتاب ثقل زمین (m/s^2)، G_s : چگالی دانه‌های رسوب (اغلب معادل 2.65 فرض می‌شود) و τ_* تنش

برشی بی بعد در بستر می باشد، بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند. با مشخص شدن C_a و مقدار غلظت براساس رابطه زیر برای هر عمق دلخواه y قابل محاسبه می باشد:

$$C = C_a \left(\frac{D-y}{y} * \frac{a}{D-a} \right)^z \quad (32-4)$$

پس از تعیین مقادیر C برای عمق های مختلف بار رسوب معلق از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_s = 0.0864 \bar{C} Q_d \quad (33-4)$$

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^N C_i / N \quad (34-4)$$

که در این رابطه:

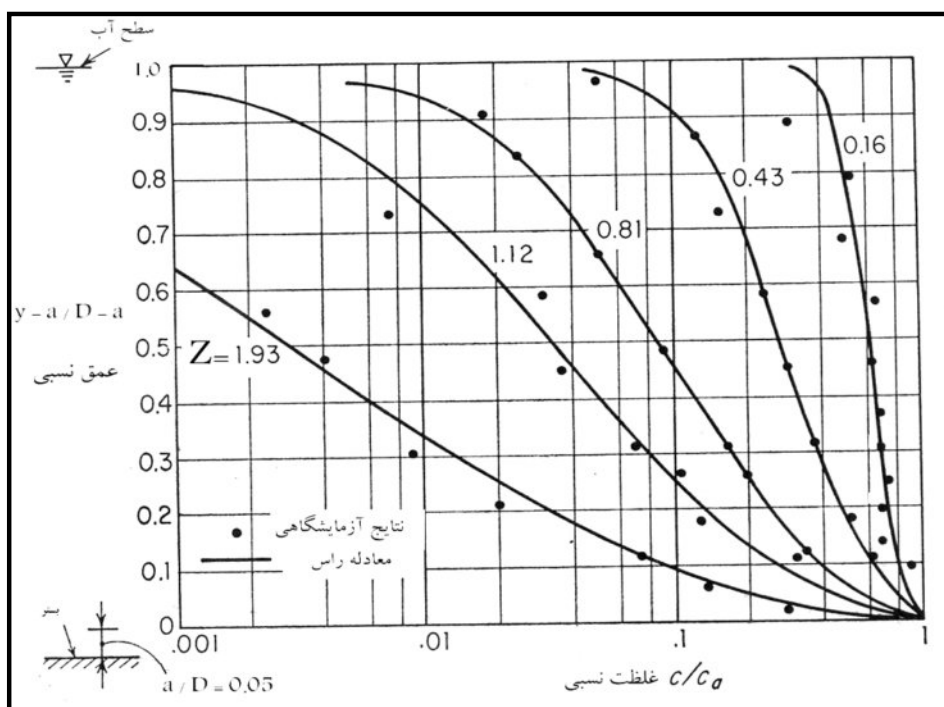
Q_s : بار رسوب معلق (ton/day)، $\bar{C}$: غلظت متوسط جریان رودخانه (میلی گرم در لیتر، mg/lit)، C_i : غلظت در عمق مورد نظر (mg/lit)، Q_d : بده جریان روزانه (m^3/s)، N : تعداد نقاط تعیین غلظت در امتداد قائم در داخل آب و i شاخص عمق می باشد (از یک تا N تغییر می کند). برای آشنایی با نحوه کاربرد معادله راس در تعیین Q_s یک مثال کاربردی در انتهای این بخش ارائه شده است. از جمله اطلاعات مورد نیاز برای تعیین C مشخص کردن سرعت سقوط دانه، w ، می باشد که بدین منظور می توان از رابطه رابی [۲۰] استفاده نمود:

$$w = F [Dg(G_s - 1)]^{1/2} \quad (35-4)$$

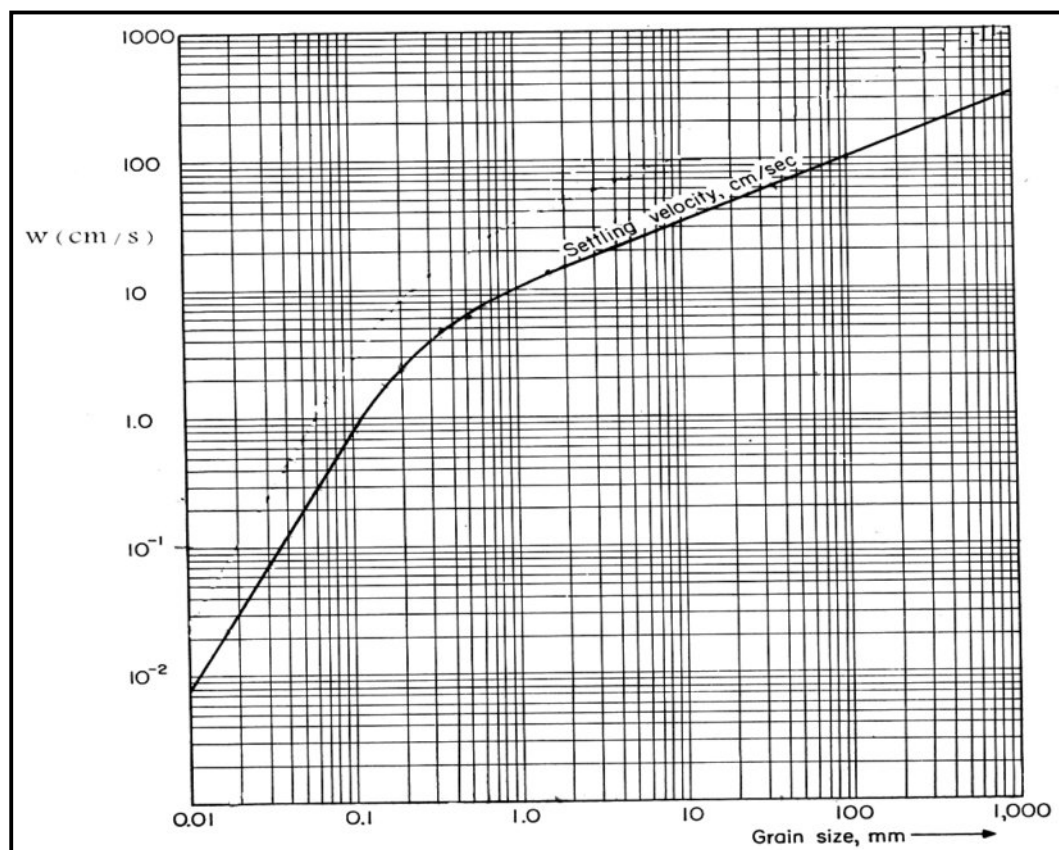
$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gD^3(G_s - 1)} \right]^{1/2} \quad (36-4)$$

روابط فوق در سامانه متریک بوده و پارامترهای مختلف آن قبلاً تعریف شده اند.

در شکل ۴-۱۶ نمودار رابی برای تعیین سرعت سقوط دانه ها براساس روابط فوق ارائه شده است. در این نمودار مقادیر w برای دانه هایی با قطر ۰/۱ تا ۱۰۰۰ میلی متر قابل استخراج می باشد.



شکل ۴-۱۵- نمودار تغییرات غلظت نسبی مواد معلق برحسب عمق نسبی در رودخانه‌ها براساس معادله راس و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی [۲۲]



شکل ۴-۱۶- نمودار رابی برای تعیین سرعت سقوط دانه‌های رسوب [۱۰]

۴-۳-۲- روش بروکس^۱

بروکس با بهره‌گیری از معادله توزیع غلظت راس رابطه زیر را برای تعیین بار معلق در رودخانه‌ها ارائه نمود [۲۰]:

$$\frac{q_s}{\gamma_w q C_{md}} = F\left(K \frac{V}{U_*}, Z_1\right) \quad (۳۷-۴)$$

که در این رابطه:

q_s : بار معلق در واحد عرض $(N/s - m)$ ، q بده جریان در واحد عرض $(m^3/s - m)$ ، F : تابع انتقال که بر حسب پارامتر

Z_1 و $K \frac{V}{U_*}$ از نمودار بروکس مطابق شکل ۴-۱۷ استخراج می‌شود، Z_1 : نمای تعدیل شده معادله توزیع غلظت که از نمودار شکل

۴-۱۸ بر حسب پارامتر $Z = \frac{w}{KU_*}$ مشخص می‌گردد و C_{md} غلظت وزنی در فاصله $0.5 D$ از بستر می‌باشد که براساس رابطه زیر

تعیین می‌گردد:

$$C_{md} = C_a \left(\frac{a}{D-a} \right)^{Z_1} \quad (۳۸-۴)$$

در رابطه (۳۷-۴) V معرف متوسط سرعت جریان (m/s) می‌باشد که از رابطه پیوستگی $V = Q/A$ و یا $V = q/D$ قابل

محاسبه است. همچنین در رودخانه‌هایی که عموماً شرایط جداره کاملاً زیر^۲ حاکم بوده و دارای عرض بیش‌تری می‌باشند مقدار V را

می‌توان از رابطه زیر ارزیابی نمود [۴، ۲۲]:

$$V = 6.261 U_* \text{Log} \left(\frac{R}{d_{65}} \right) \quad (۳۹-۴)$$

که در این رابطه:

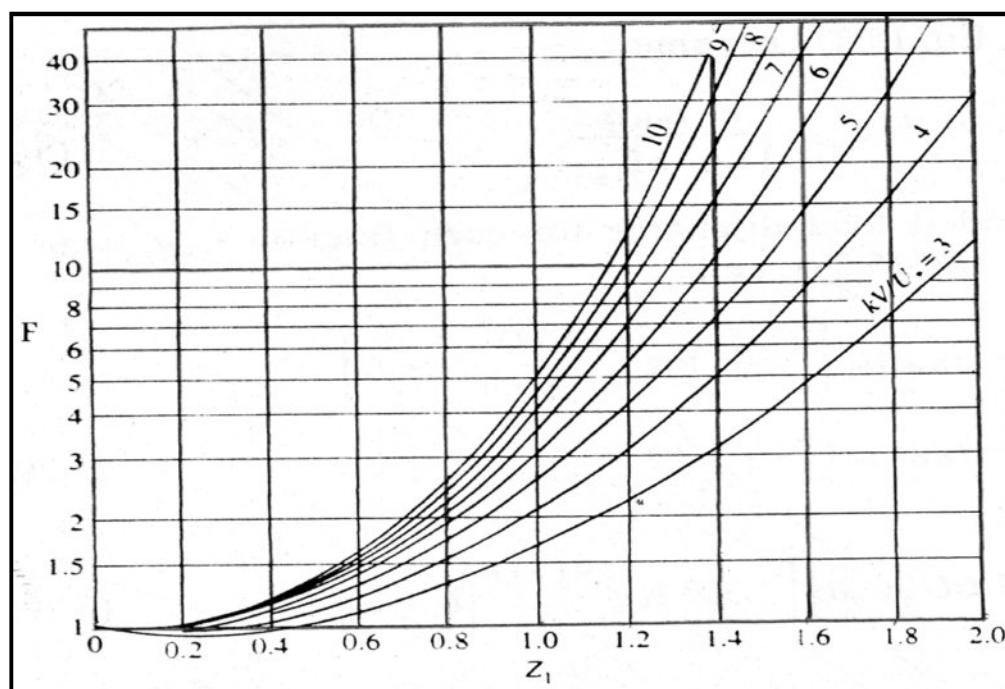
R : شعاع هیدرولیکی، $R = A/P$ ، A : سطح مقطع جریان، P محیط تر شده، d_{65} و (m) قطر نظیر ۶۵٪ وزنی دانه‌های رسوب

تشکیل‌دهنده بستر (m) می‌باشد و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

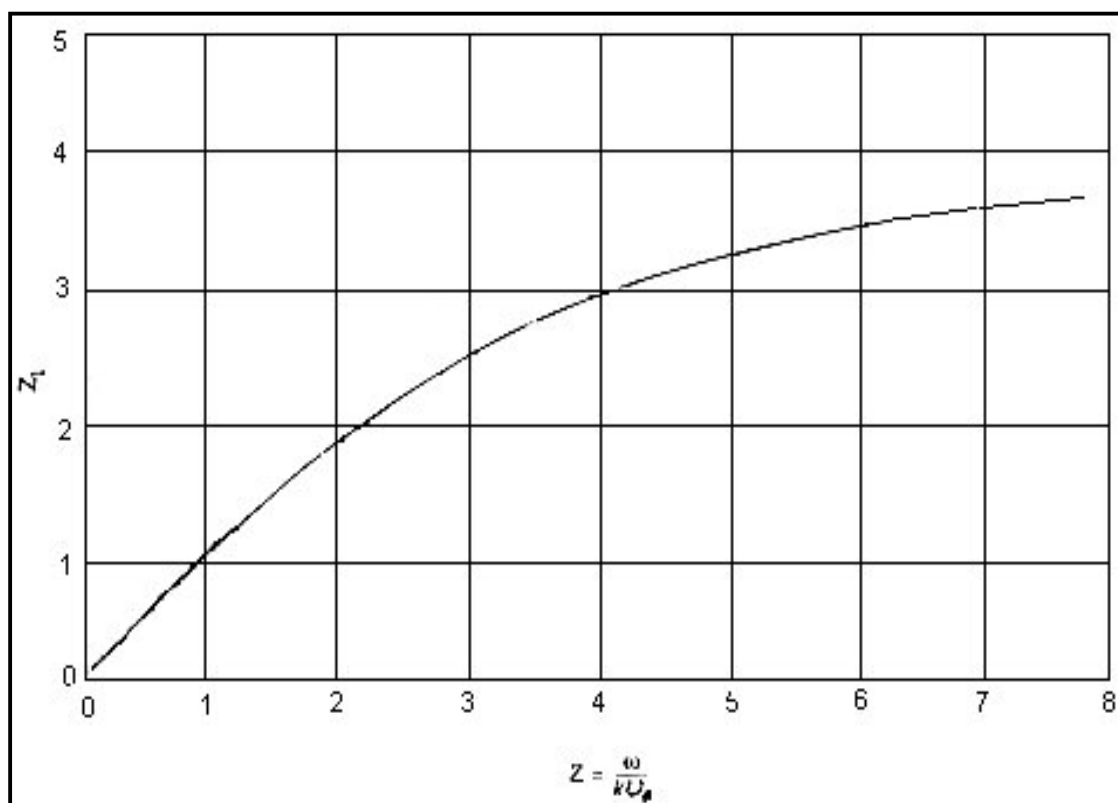
با معلوم شدن q_s بار معلق روزانه بر حسب تن (Q_s) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_s = 8.64 q_s B \quad (۴۰-۴)$$

روش بروکس با یک مثال کاربردی در پیوست معرفی شده است.



شکل ۴-۱۷ - منحنی‌های بروکس برای تعیین غلظت بار معلق در رودخانه‌ها [۲۰]



شکل ۴-۱۸ - نمودار تغییرات Z₁ بر حسب Z در روش بروکس [۲۲]

۳-۴-۳-۴- روش لین و کالینسک^۱

لین و کالینسک با بهره‌گیری از دیدگاه‌های ارائه شده توسط راس معادله‌ای را برای تعیین بار رسوبی معلق حمل شده توسط جریان آب در رودخانه‌ها به صورت زیر ارائه نمودند [۲۲]:

$$q_s = \gamma_w q C_a p_L \exp\left(\frac{15wa}{U \times D}\right) \quad (41-4)$$

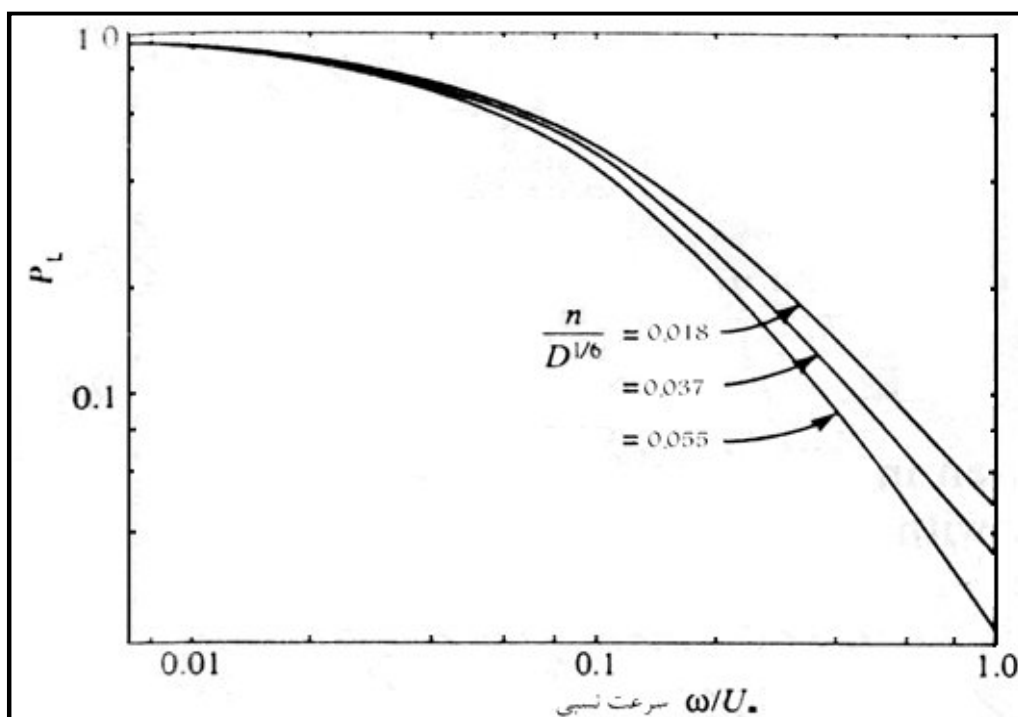
که در این رابطه:

q_s : بار معلق در واحد عرض ($N/s-m$)، q : بده جریان رودخانه در واحد عرض ($m^3/s-m$)، γ_w : وزن مخصوص آب (N/m^3) و P_L پارامتری که از شکل ۱۹-۴ استخراج می‌شود. برای استفاده از منحنی‌های ترسیم شده در شکل ۱۹-۴ لازم است نسبت ($n/D^{1/6}$) مشخص شود که در آن n ضریب مانینگ بوده و برای رودخانه مورد نظر ارزیابی می‌شود. بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. با مشخص شدن q_s مقدار بار رسوبی روزانه برحسب تن از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$Q_s = 8.64 q_s B \quad (42-4)$$

که در این رابطه:

Q_s : بار رسوب معلق روزانه (ton/day)، B : عرض رودخانه (m) و q_s مطابق رابطه (۴۱-۴) تعریف می‌شود. مثال کاربردی درخصوص روش لین و کالینسک در انتهای فصل ارائه شده است.



شکل ۱۹-۴ - منحنی‌های کالینسک برای تعیین پارامتر P_L در معادله غلظت [۲۲]

۴-۳-۴- روش چانگ، سیمونس و ریچارسون^۱

چانگ و همکارانش [۲۰] براساس مفهوم توزیع نمایی غلظت معادله زیر را برای تعیین بار معلق ارائه نمودند:

$$q_s = \gamma_w DC_a (VI_1 - K \frac{2U^*}{k} I_2) \quad (۴۳-۴)$$

که در این رابطه:

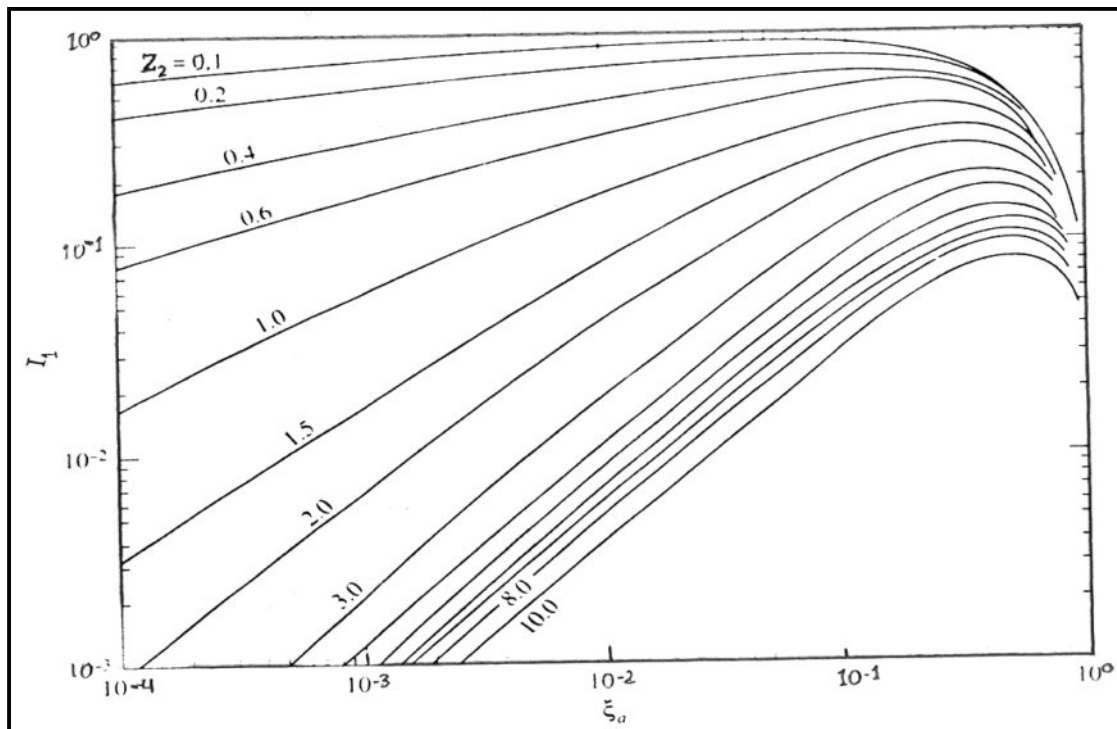
q_s : بار رسوبی معلق در واحد عرض $(N/s-m)$ ، I_1 و I_2 : پارامترهایی که از نمودارهای ترسیم شده در شکل ۴-۲۰ و شکل

۴-۲۱ استخراج می‌شود. در این نمودارها I_1 و I_2 تابعی از ξ_a و Z_2 می‌باشد. پارامتر Z_2 بر حسب Z تعیین و $\xi_a = \frac{a}{D}$ تعریف می‌شود. با مشخص شدن q_s بار رسوب معلق روزانه مطابق رابطه (۴۰-۴) بر حسب تن در روز تعیین می‌گردد.

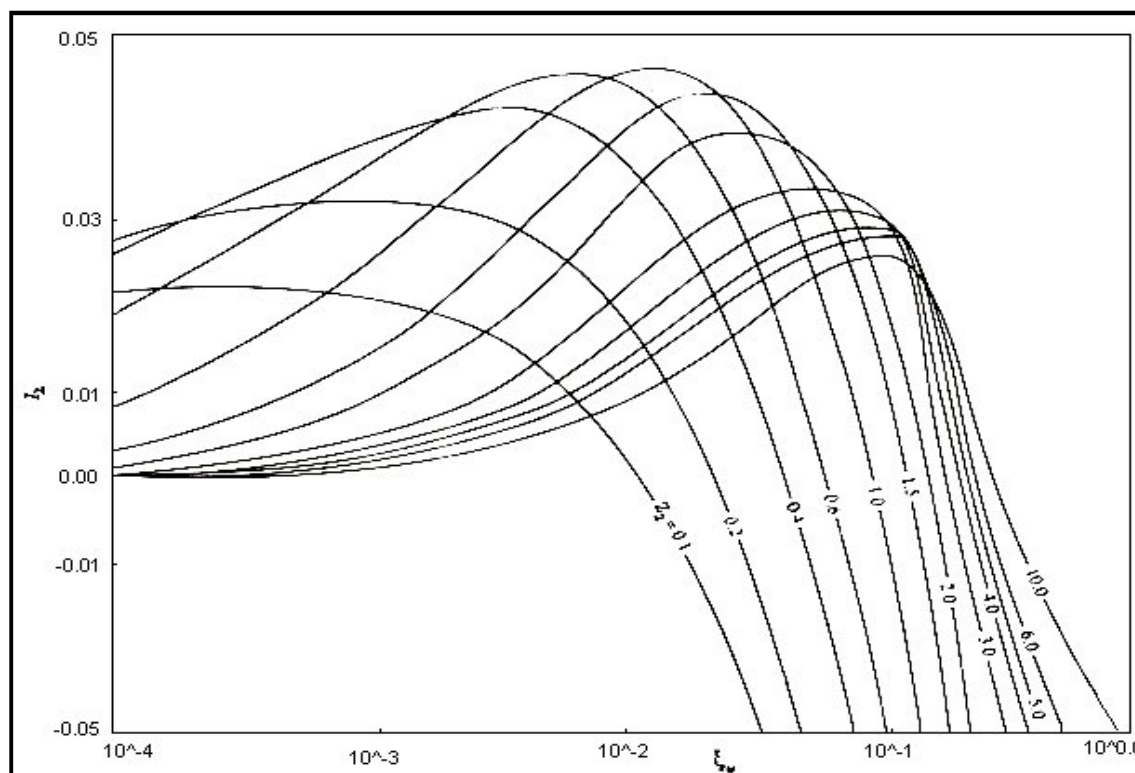
$$Z_2 = \frac{2W}{BU^*k} \quad (۴۴-۴)$$

$$B = Z/Z_1 \quad (۴۵-۴)$$

برای معرفی روش چانگ و همکاران مثال کاربردی ارائه شده است.



شکل ۴-۲۰- تابع I_1 بر حسب پارامتر ξ_a و مقادیر مختلف Z_2 [۲۰]



شکل ۴-۲۱- تابع I_2 بر حسب ξ_w مقادیر مختلف Z_2 [۲۰]

۴-۳-۴- روش انشتین^۱

انشتین با در نظر گرفتن توزیع سرعت و غلظت رابطه زیر را برای تعیین بار معلق در سال ۱۹۵۰ معرفی نمود [۲۵]:

$$q_s = \int_a^D C U dy \quad (4-46)$$

در رابطه انتگرالی فوق $C = C_a \left(\frac{D-y}{y} * \frac{a}{D-a} \right)$ معرف غلظت رسوب از معادله راس و U معرف سرعت جریان و بر حسب

تغییرات عمق (y) به صورت زیر می باشد:

$$u = 8.51 U \times \log(yx / d_{65}) \quad (4-47)$$

مطابق روابط فوق توزیع غلظت براساس رابطه نمایی راس و سرعت نیز مطابق قانون توزیع لگاریتمی برای جریان های کاملاً

متلاطم^۲ تعریف می گردد. با قراردادن مقادیر C و U بر حسب y در معادله (۴-۴۶) و انتگرال گیری انشتین رابطه زیر را برای تعیین

بار معلق معرفی نمود:

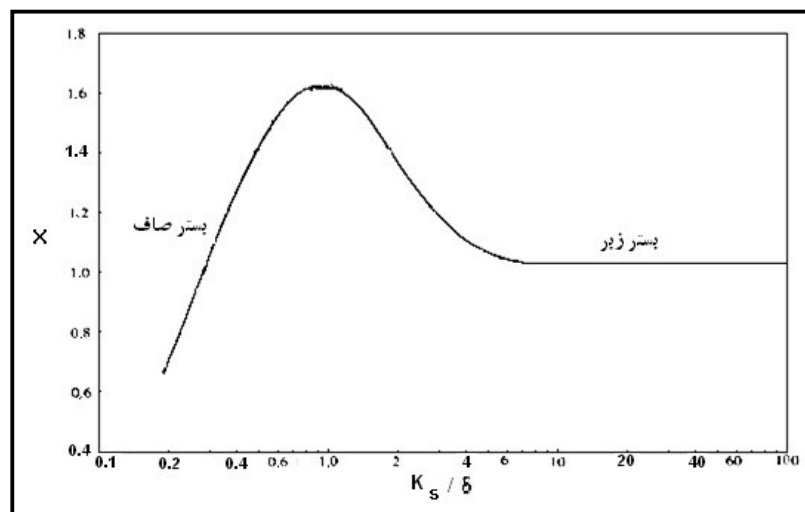
$$q_s = 11.6 U * \gamma_w C_a a \left[2.303 \log \frac{30.2 D X}{d b_5} \right] (I_1 + I_2) \quad (4-48)$$

1- Einstein

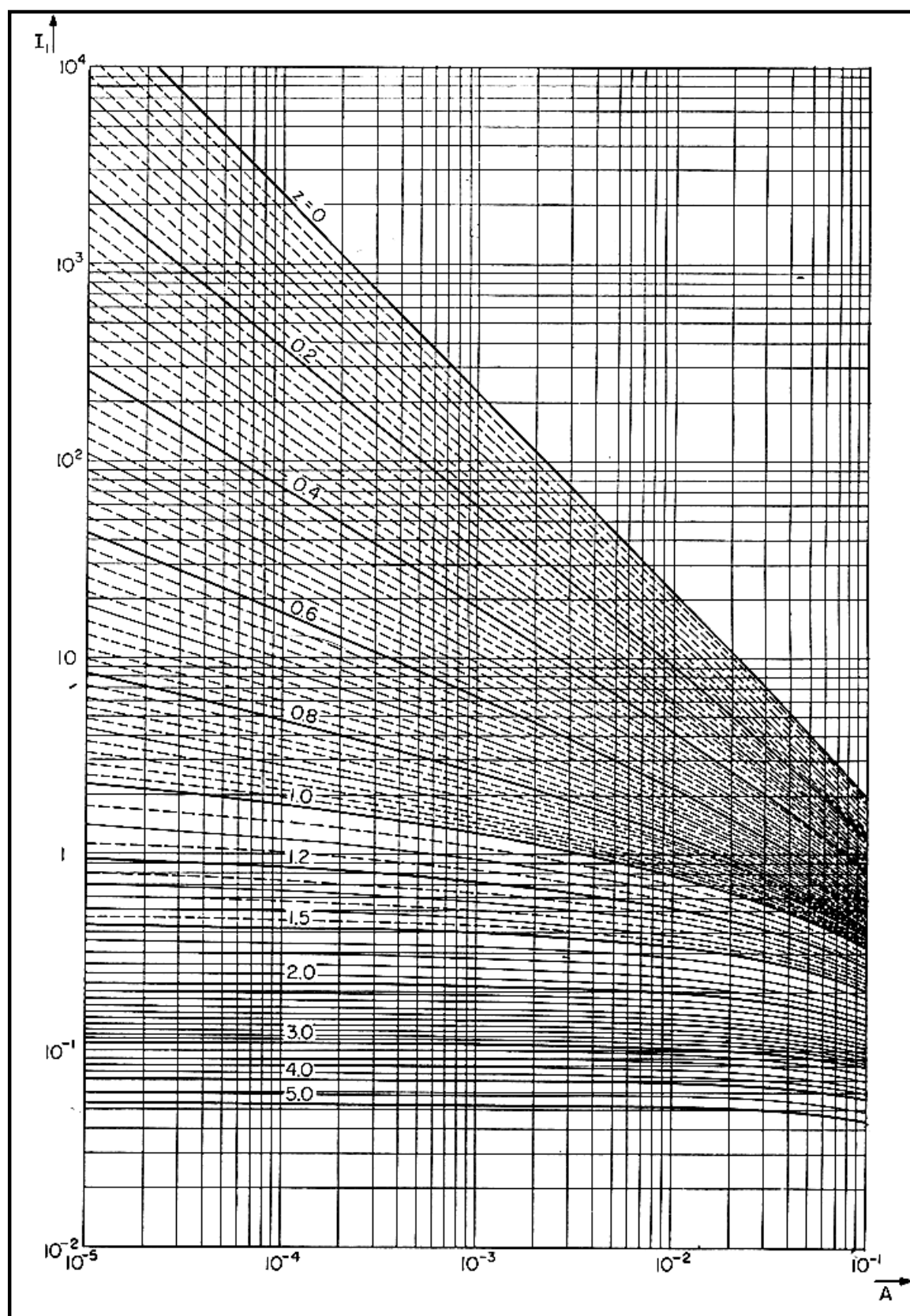
2- Fully Turbulent Flow

که در این رابطه:

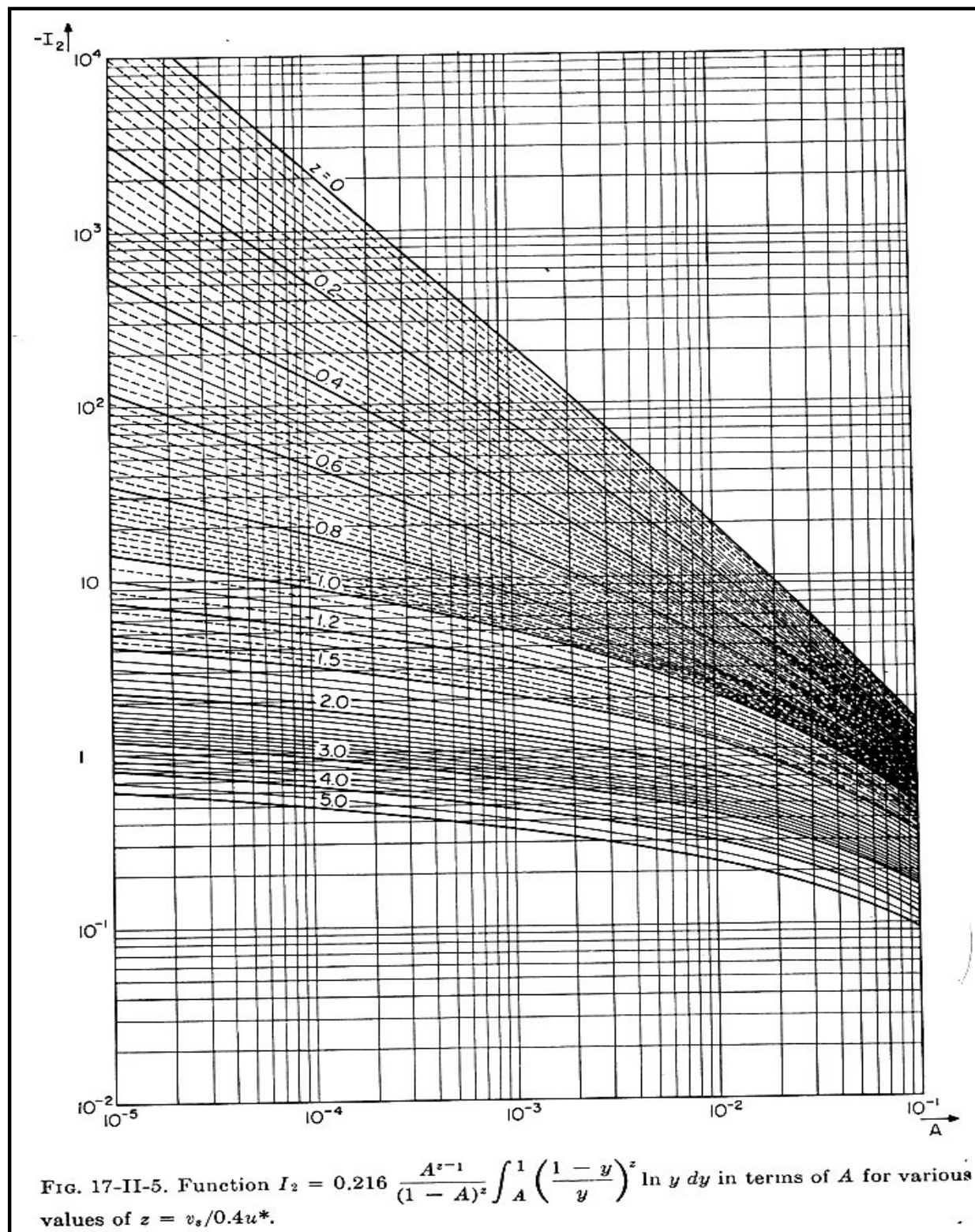
q_s : بار معلق در واحد عرض رودخانه ($N/s - m$)، x : پارامتر بی‌بعد که از نمودار شکل (۴-۲۲) به‌ازای مقادیر مختلف k_s / δ تعیین می‌شود، k_s : معرف زبری بستر بوده و معادل d_{65} (قطر نظیر ۶۵٪ وزنی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه) در نظر گرفته می‌شود، δ : ضخامت لایه ورقه‌ای $\delta = \frac{11.6V}{U_*}$ می‌باشد، v : ویسکوزیته سینماتیکی آب (m^2/s) و I_1 و I_2 پارامترهای بی‌بعد می‌باشند که از سری نمودارهای ارائه شده در شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴ برحسب مقادیر مختلف Z (نمای معادله توزیع غلظت راس)، و $A = \frac{a}{D}A$ تعیین می‌گردد. $a = 2d_{65}$ در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین بار رسوبی روزانه از معادله (۴-۴۸) می‌توان بهره جست.



شکل ۴-۲۲- فاکتور تصحیح x بر حسب زبری نسبی بستر k_s / δ در روش انشتین [۲۵]



شکل ۴-۲۳- منحنی‌های تابع I_1 بر حسب پارامتر A برای مقادیر مختلف Z در روش انشتین [۲۵]



شکل ۴-۲۴- منحنی‌های تابع I_2 بر حسب پارامتر A برای مقادیر مختلف z در روش انشتین [۲۵]

۴-۳-۵- کاربردی کردن معادلات تئوریک

استفاده از معادلات معرفی شده در مبحث پیشین برای تعیین بار معلق مستلزم آن است که علاوه بر آمار آبدهی روزانه بعضی اطلاعات میدانی نیز تهیه و در محاسبه پارامترهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در زیر مراحل تهیه اطلاعات معرفی شده است.

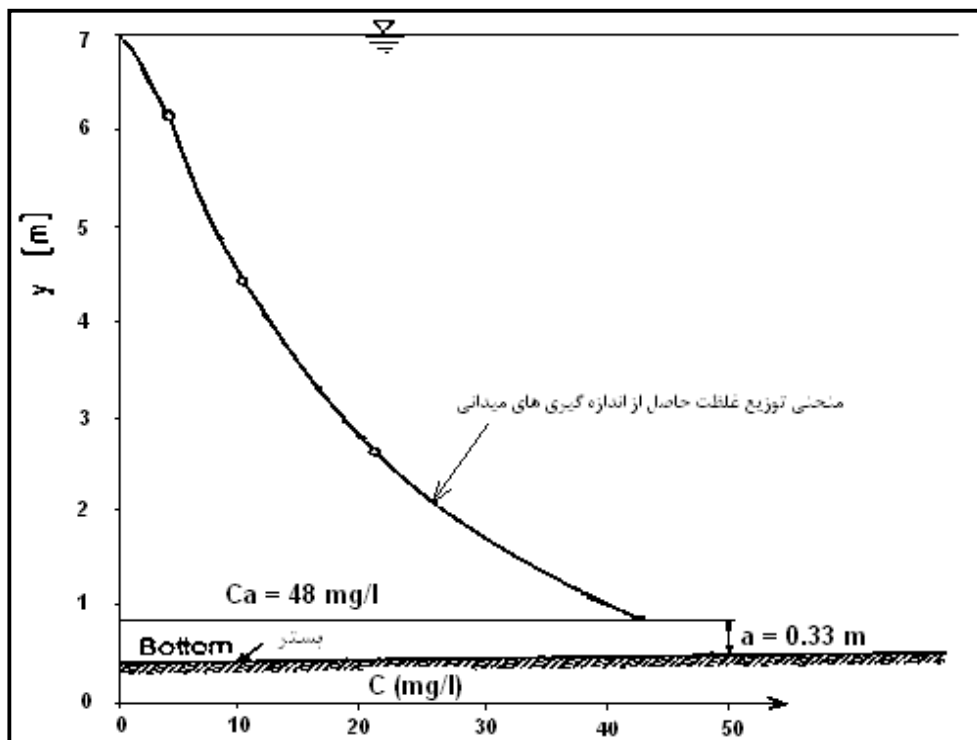
۴-۳-۵-۱- تهیه اطلاعات میدانی

از جمله اطلاعات میدانی مورد نیاز برای استفاده از معادلات تئوریک اندازه‌گیری و تعیین غلظت مبنا (C_a) می‌باشد. نمونه‌ای از این اندازه‌گیری از شکل ۴-۲۵ ارائه شده است. مطابق شکل با اندازه‌گیری غلظت در عمق‌های مختلف و مشخص شدن روند تغییرات آن امکان تعیین C_a فراهم می‌شود. در این مورد به‌خصوص مقدار $C_a = 43 \text{ mg/l}$ برای رودخانه تیزا از شعبات دانوب در فاصله $a = 0.33 \text{ m}$ از بستر مشخص شده است [۱]. به‌لحاظ محدودیت‌های عملی در تدارک این‌گونه اطلاعات معادلات تجربی توسط متخصصین ارائه شده است که در آنها نیازی به اندازه‌گیری مستقیم C_a نبوده و متکی به اطلاعات هیدرولیکی و اندازه دانه‌های بستر می‌باشد. در این خصوص معادله وان راین از اعتبار بیش‌تری برخوردار می‌باشد.

- روش وان راین [۲۳] برای تعیین C_a

$$C_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} * \frac{T^{1.5}}{D_*^3} \quad (۴-۴۹)$$

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(G_s - 1)g}{V^2} \right)^{1/3} \quad (۴-۵۰)$$



شکل ۴-۲۵- نمونه‌ای از اندازه‌گیری غلظت و تعیین غلظت مبنا (C_a) در رودخانه‌ها - رودخانه تیزا (Tisza River of Danube branch) از شعبات دانوب [۱]

$$T = \frac{\tau'_0 - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (۵۱-۴)$$

$$\tau'_0 = \gamma_w \left(\frac{U}{C'} \right)^2 \quad (۵۲-۴)$$

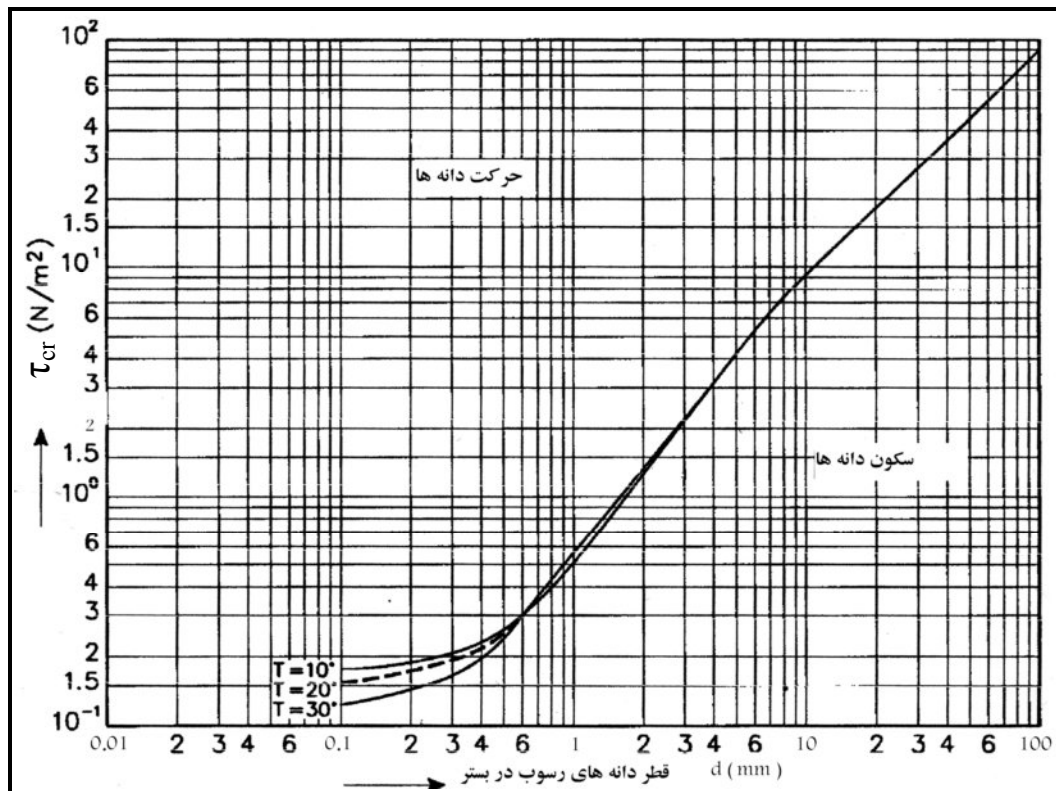
$$C' = 18 \log \left(\frac{12D}{3d_{90}} \right) \quad (۵۳-۴)$$

$$\tau_{cr} = f(d) \quad (۵۴-۴)$$

$$a = 0.3d_{50}D^{0.7}T^{0.5} \quad (۵۵-۴)$$

که در این روابط:

C_a : غلظت حجمی (مترمکعب رسوب در یک مترمکعب مخلوط آب و رسوب)، T : پارامتر بی‌بعد که از رابطه (۵۱-۴) تعیین می‌شود، τ'_0 : تنش برشی موثر (تنش برشی که موجب حرکت دانه‌ها می‌شود) از معادله (۵۲-۴) برحسب N/m^2 ، C' : ضریب شزی دانه‌ها که از رابطه (۵۳-۴) تعیین می‌شود، d_{90} : قطر نظیر ۹۰ درصد وزنی دانه‌های بستر (m) ، τ_{cr} : تنش برشی بحرانی یا تنش برشی آستانه حرکت (N/m^2) که تابعی از قطر دانه‌ها بوده (d) و از نمودار شیلدر در شکل ۲۶-۴ به دست می‌آید، d_{50} : قطر نظیر ۵۰ درصد وزن دانه‌ها (m) و a ارتفاع از سطح مبنا (m) می‌باشد. بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

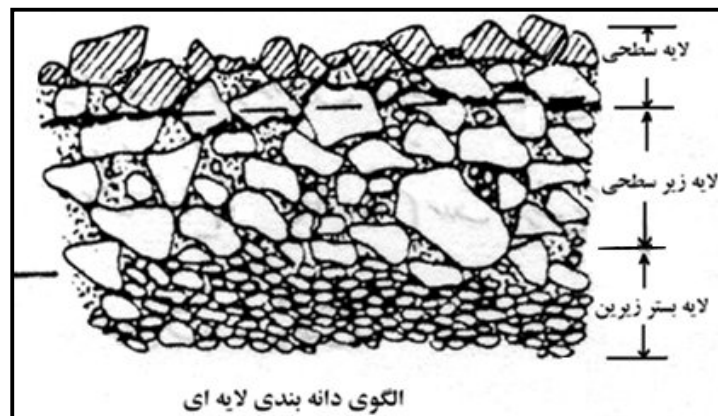


شکل ۲۶-۴- نمودار شیلدر برای تعیین τ_{cr} برحسب قطر دانه‌ها - d [۲۵]

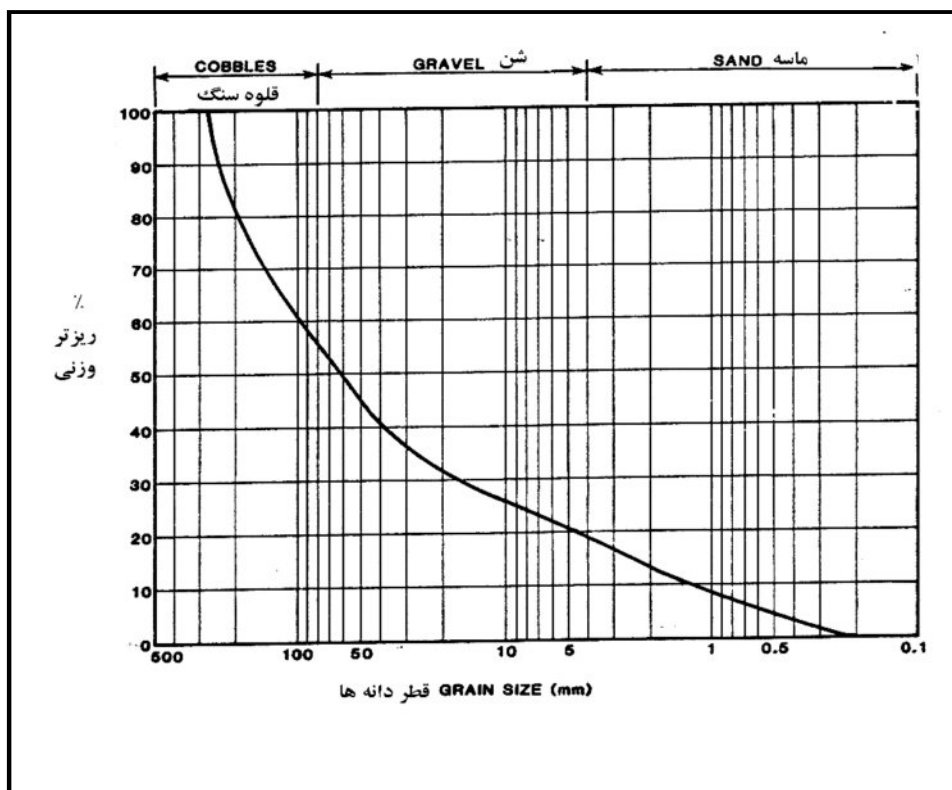
به‌منظور معرفی نحوه استفاده از معادلات تجربی مثال کاربردی ۱ ارائه می‌شود. (پیوست).

۴-۳-۵-۲- نمونه‌برداری از مواد بستر و تعیین دانه‌بندی

از جمله داده‌های میدانی مورد نیاز برای تعیین غلظت مواد رسوبی معلق انجام نمونه‌برداری از مواد بستر و تعیین منحنی دانه‌بندی در آزمایشگاه می‌باشد. برای تهیه نمونه مواد بستر از تجهیزات مختلفی استفاده می‌شود که از آن جمله نمونه‌برداری سطلی، نمونه‌برداری چنگکی و نمونه‌برداری به روش مغزه‌گیری متداول می‌باشد. در شکل (۴-۳۷) نمونه‌هایی از ترکیب دانه‌بندی مواد رسوبی بستر و توزیع دانه‌بندی آنها برای لایه‌سطحی و لایه‌زیرین نشان داده شده است. همچنین در شکل (۴-۲۸) منحنی توزیع دانه‌بندی و کلاسه‌بندی آن به محدوده‌های قلوه‌سنگ، شن و ماسه ترسیم گردیده است. این گونه اطلاعات میدانی برای تعیین قطرهای شاخص نظیر d_{90} ، d_{65} ، d_{50} و سایر مشخصه‌های دانه‌بندی مواد بستر ضروری می‌باشد.



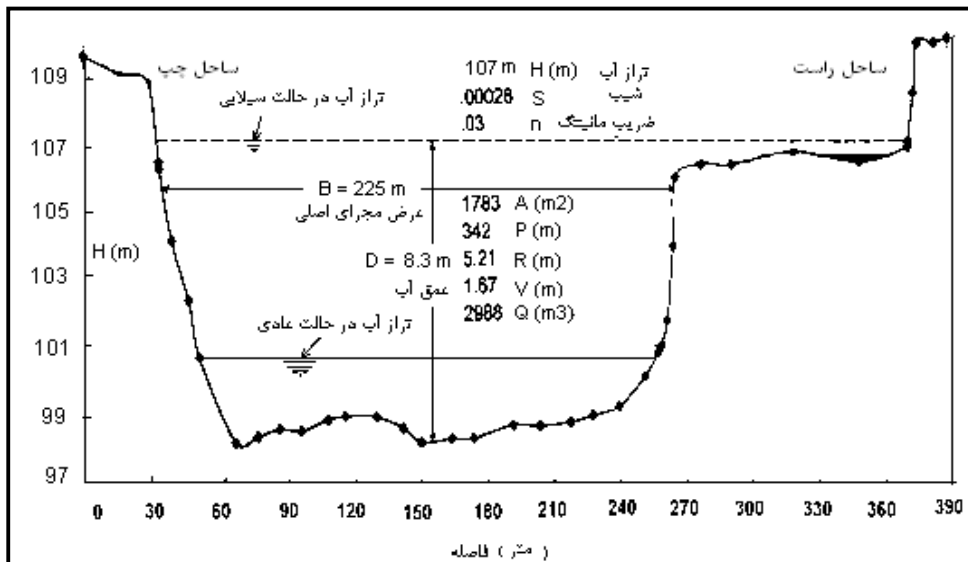
شکل ۴-۲۷- نمونه‌ای از الگوی دانه‌بندی مواد بستر در رودخانه‌ها [۲۱]



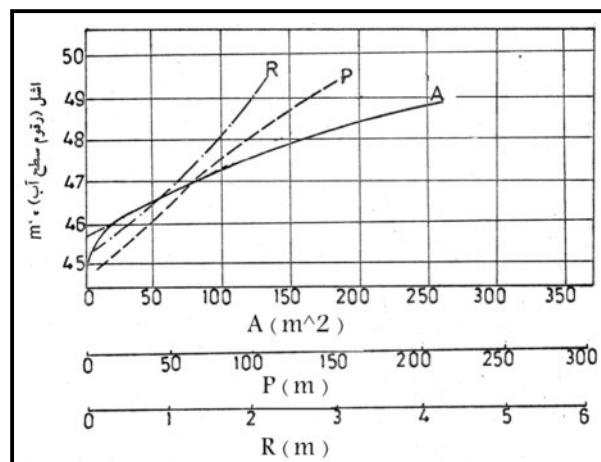
شکل ۴-۲۸- نمونه‌ای از توزیع دانه‌بندی مواد بستر و مشخص کردن کلاس‌های مختلف دانه‌بندی [۲۱]

۴-۳-۵-۳- مقطع برداری و تعیین مشخصات هندسی مقطع

مشخصات هندسی مقطع رودخانه از جمله اطلاعات مورد نیاز برای تعیین خصوصیات هیدرولیک جریان می‌باشد. در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی نقشه‌برداری و تعیین مقطع جریان به صورت سیستماتیک انجام می‌گیرد. از این گونه اطلاعات می‌توان برای محاسبه بار رسوبی معلق براساس معادلات مذکور در مباحث پیشین بهره گرفت. در شکل (۴-۲۹) نمونه‌ای از مقطع هندسی رودخانه معرفی شده است. مطابق شکل مشخصات هیدرولیکی نظیر A (سطح مقطع جریان، P (محیط تر شده)، R شعاع هیدرولیکی، V (سرعت متوسط جریان)، D (عمق جریان)، S (شیب)، n (ضریب زبری)، Q (بده جریان)، B (عرض مجرا) که در تعیین بار رسوبی معلق مورد نیاز می‌باشند برای مقطع مزبور تعیین شده است. اغلب برای امکان محاسبه رسوب در ترازهای مختلف (عمق‌های مختلف) نمودار تغییرات A ، P و R بر حسب تراز (اشل) و یا عمق ترسیم و در محاسبات هیدرولیکی و تعیین بده جریان مطابق آنچه که در شکل (۴-۳۰) نشان داده شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۲۹- نمونه‌ای از مقطع جریان در رودخانه و مشخصات هندسی آن مورد استفاده در تعیین بار رسوبی



شکل ۴-۳۰- نمونه‌ای از منحنی‌های A ، P ، R بر حسب تراز آب (اشل) در رودخانه، مورد استفاده در تعیین بار رسوبی [۳۸]

۴-۳-۵-۴- تعیین غلظت جریان (C)

با مشخص شدن خصوصیات دانه بندی مواد بستر و همچنین با انجام مقطع برداری و تعیین مشخصات هندسی و عوامل مورد نیاز از جمله ضریب مانینگ و شیب رودخانه در محدوده مطالعاتی امکان تعیین بار معلق برای یک بده جریان مشخص فراهم می شود. بدین منظور لازم است مقدار C_a (غلظت مینا) از روش وان راین برآورد گردیده و با استفاده از معادلات تئوریک نسبت به تعیین غلظت و محاسبه بار معلق براساس روابط ارائه شده در مباحث پیشین اقدام نمود. در این خصوص مثال های کاربردی ارائه شده می تواند به عنوان راهنمای محاسبات مورد استفاده قرار بگیرد.

۴-۳-۵-۵- تعیین تناژ بار معلق روزانه، ماهانه و سالانه

با مشخص شدن غلظت بار معلق براساس روش های معرفی شده بار رسوبی روزانه از معادلات ارائه شده نظیر معادله (۴-۲۷) و (۴-۳۴) می تواند تعیین گردد. با در دست داشتن آمار آبدی روزانه در ایستگاه مورد نظر امکان محاسبه بار رسوبی برای روزهای متوالی فراهم شده و با تشکیل جدول محاسباتی (نظیر جدول ۴-۳) و از جمله مقادیر روزانه بار رسوبی، ماهانه و همچنین سالانه برای هر سال آبی تعیین می گردد. در این محاسبات همان طوری که در مباحث قبلی نیز تاکید شده است مقادیر بار رسوبی معلق به دست آمده متعلق به بار مواد بستری بوده و بار شسته (رسوبات ریزدانه به دست آمده از فرسایش سطح حوضه آبریز) در آن منظور نمی گردد.

۴-۴- محاسبه بار معلق در شرایط عدم وجود آمار

در مواردی که محدوده مطالعاتی فاقد داده های آماری است با استفاده از روش هیدرولوژی و یا روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک می توان متوسط بار رسوب معلق سالیانه را بر آورد نمود. در زیر به معرفی جزییات بیش تر در خصوص روش های مزبور پرداخته شده است.

۴-۴-۱- روش هیدرولوژی

در این روش که توسط لانگبین و شوم^۱ [۱۵] ارائه گردیده، رسوب دهی ویژه (q_s) یا بار رسوبی به ازای واحد سطح حوضه آبریز از نمودار شکل (۴-۲۸) موسوم به نمودار لانگبین - شوم تعیین می گردد. در این نمودار محور قائم معرف بارش متوسط سالیانه حوضه آبریز (میلی متر) بوده و سه ناحیه معرف پوشش گیاهی از نوع جنگلی^۲ (متوسط بارش سالیانه حوضه بیش تر از ۷۵۰ میلی متر)، پوشش گیاهی مرتعی^۳ (متوسط بارش سالیانه حوضه بین ۲۶۰ تا ۷۵۰ میلی متر، مناطق خشک و بیابانی با بوته های گیاهی پراکنده^۴ (متوسط بارش سالیانه حوضه کم تر از ۲۶۰ میلی متر) مشخص شده است. با مشخص شدن مقدار q_s بار رسوب معلق سالیانه از رابطه زیر به دست می آید.

$$\bar{Q}_{sy} = q_s * A \quad (۴-۵۶)$$

1- Longbein and Schamm

2- Forest

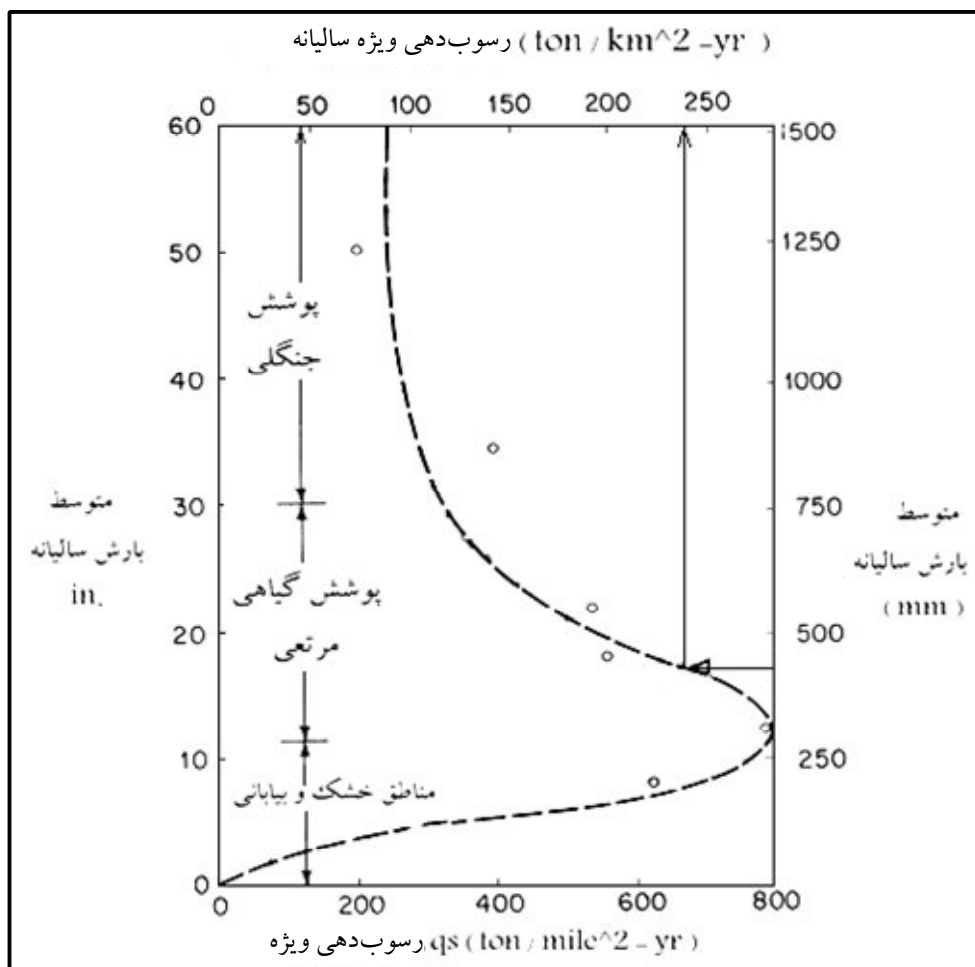
3- Grassland

4- Desert Shrub

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{sy}$: متوسط رسوب معلق سالیانه (ton), q_s : رسوب‌دهی ویژه ($\text{ton} / \text{Km}^2 - y_r$) تن در کیلومترمربع در سال) و A مساحت حوضه آبریز (Km^2) می‌باشد.

نظر به این که در این روش مولفه اصلی رسوب به دست آمده ناشی از فرسایش خاک سطح حوضه آبریز می‌باشد، کمیت حاصل شده از نمودار لانگبین مقدار بار معلق را مشخص می‌کند، در شکل (۴-۳۱) برای متوسط بارش سالیانه معادل ۴۲۲ میلی‌متر، که متعلق به ناحیه دارای پوشش گیاهی مرتعی می‌باشد مقدار $q_s = 240 \text{ ton} / \text{Km}^2 - y_r$ بوده و برای حوضه آبریز با مساحت برابر با $A = 50 \text{ km}^2$ مقدار $\bar{Q}_{sy} \text{ ton} / y_r = 12000$ حاصل می‌شود.



شکل ۴-۳۱ - نمودار لانگبین - شوم برای تعیین بار رسوبی معلق سالیانه [۲۵، ۱۲]

شایان ذکر است در روش لانگبین - شوم پارامترهای موثر در تعیین q_s شامل بارندگی و پوشش گیاهی می‌باشد، گسترش سازندهای زمین‌شناسی فرسایش‌پذیر (نظیر لایه‌های سیلتورس) در سطح حوضه می‌تواند کمیت q_s را تا حد زیادی تحت تاثیر خود قرار داده و مقادیر رسوب‌دهی ویژه را بعضاً تا بیش از ۵۰۰ تن در کیلومترمربع افزایش دهد.

۴-۴-۲- روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک

در این روش با توجه به عدم وجود داده‌های آماری بده جریان بار معلق با استفاده از شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب‌ها برای دوره برگشت‌های مختلف تعیین می‌گردد [۲۰]. مراحل محاسباتی به شرح زیر می‌باشد:

۴-۴-۱- استخراج پارامترهای هیدرولوژی

پارامترهای هیدرولوژی مورد نیاز برای محاسبه سیلاب‌ها شامل مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز، تیپ بارندگی و هیدروگراف واحد می‌باشد.

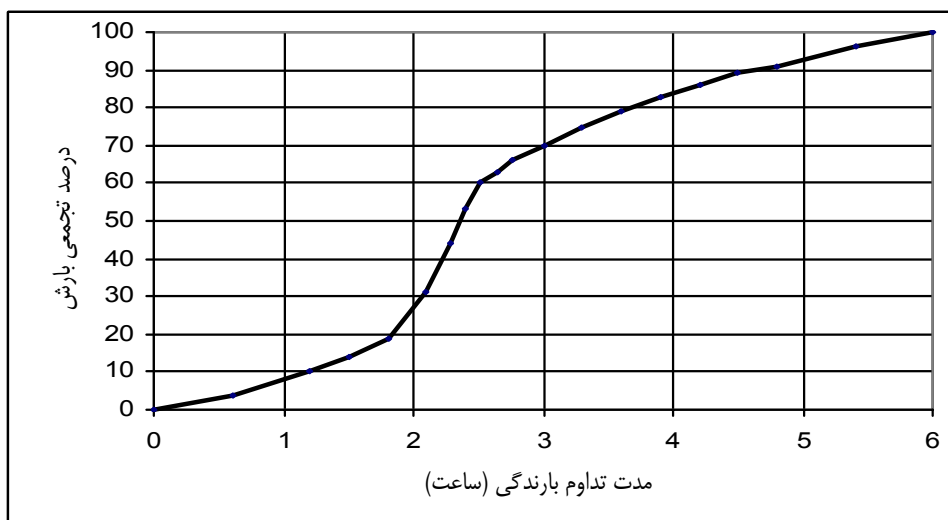
- مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز

با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی محدوده حوضه آبریز مشخص و خصوصیات فیزیوگرافی آن نظیر مساحت حوضه، طول رودخانه، زمان تمرکز، شیب و سایر اطلاعات هندسی استخراج می‌شود. استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تعیین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه‌ها متداول می‌باشد. بدین منظور از نقشه‌های توپوگرافی نظیر $\frac{1}{25000}$ یا $\frac{1}{50000}$ می‌توان بهره جست.

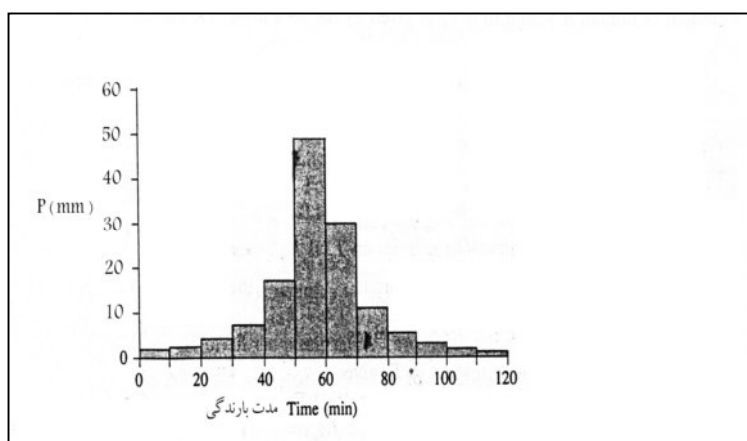
- تعیین تیپ بارندگی و هیدروگراف واحد حوضه آبریز

سیلاب حاصل وقوع بارش‌های متمرکز یا رگبارها می‌باشد. علاوه بر مشخصات فیزیوگرافی شدت و مدت بارندگی و توزیع مکانی آن نیز در کمیت سیلاب و شکل هیدروگراف سیل تاثیرگذار است. از این رو در تعیین سیلاب‌ها مشخص کردن تیپ یا الگوی بارندگی (توزیع بارندگی بر حسب زمان) برای حوضه آبریز مورد نظر ضروری است. براساس مطالعات انجام گرفته توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا^۱ (SCS) توزیع زمانی رگبارها از الگوی خاصی پیروی می‌کند که نمونه آن برای بارش شش ساعته در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده است [۱۴]؛ (شایسته ذکر است عنوان SCS در سال‌های اخیر به NRCS تغییر یافته است). با استفاده از منحنی تیپ شکل ۴-۳۲) هیتوگرام^۲ رگبار مورد استفاده در تعیین هیدروگراف سیلاب تعیین می‌گردد. در شکل ۴-۳۳) نمونه‌ای از هیتوگرام رگبار شش ساعته براساس الگوی توزیع SCS نشان داده شده است. در شکل ۴-۳۳) کمیت P (برحسب میلی‌متر) معرف مقدار بارش متوسط حوضه آبریز برای گام‌های زمانی مختلف می‌باشد. تعیین بارش متوسط حوضه آبریز با ترسیم منحنی‌های همباران و یا استفاده از روش تیسن^۳ انجام می‌گیرد [۱۳]. در شکل ۴-۳۴) نمونه‌ای از نحوه ترسیم منحنی‌های همباران در محدوده حوضه آبریز و تعیین بارش متوسط حوضه آبریز نشان داده شده است.

1- Soil Conservation Services-SCS
2- Hyetograph
3- Thiessen



شکل ۴-۳۲- نمونه‌ای از منحنی‌های تیپ SCS برای توزیع رگبارها [۱۴]



شکل ۴-۳۳- نمونه‌ای از هیتوگرام رگبار دو ساعته، الگوی توزیع بارندگی [۱۴]

برای تبدیل بارندگی به هیدروگراف سیلاب از هیدروگراف واحد حوضه آبریز می‌توان بهره جست. یکی از روش‌های متداول برای استخراج هیدروگراف واحد حوضه استفاده از هیدروگراف واحد بی‌بعد SCS می‌باشد (SCS, 1972). در شکل ۴-۳۵ هیدروگراف واحد بی‌بعد و در جدول (۴-۱۰) نسبت‌های مربوط به زمان t/T_p و بده جریان Q/Q_p معرفی شده است. در این نمودارها t : زمان، T_p : زمان وقوع بده حداکثر، Q : بده جریان در زمان‌های مورد نظر و Q_p بده حداکثر هیدروگراف واحد می‌باشد.

در روش SCS مقادیر T_p و Q_p از روابط زیر تعیین می‌شود:

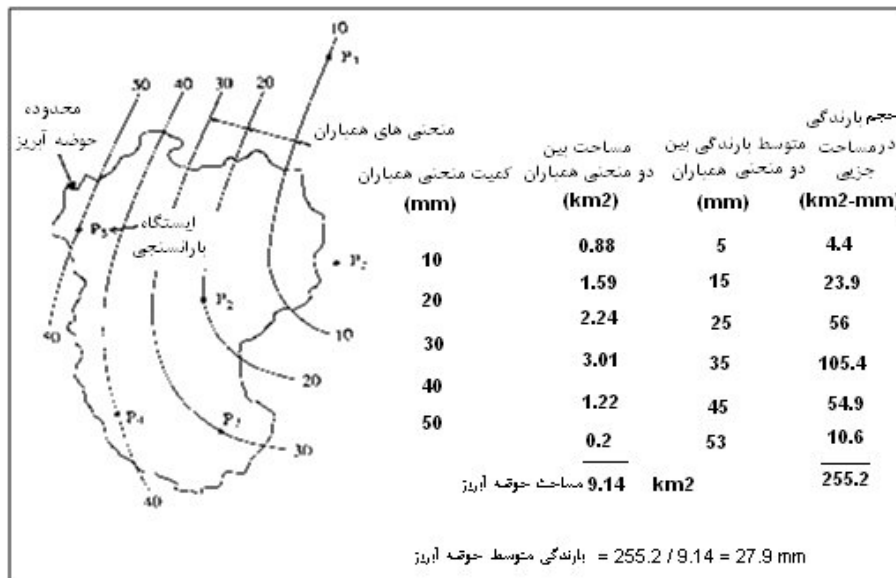
$$T_p = 0.5t_r + t_1 \quad (۵۷-۴)$$

$$t_1 = 0.6t_c \quad (۵۸-۴)$$

$$Q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad (۵۹-۴)$$

که در این روابط:

T_p : زمان وقوع بده حداکثر هیدروگراف واحد t_1 (hr): زمان تاخیر حوضه t_c (hr): زمان تمرکز حوضه آبریز Q_p (hr): بده حداکثر هیدروگراف واحد حاصل یک سانتی متر (۱۰ میلی متر) بارندگی خالص (m^3/s) و A مساحت حوضه آبریز (Km^2) می باشد.



شکل ۴-۳۴- نمونه ای از منحنی های همباران و تعیین بارش متوسط حوضه برای رگبارها [۱۴]

جدول ۴-۱۰- نسبت های هیدروگراف بدون بعد SCS

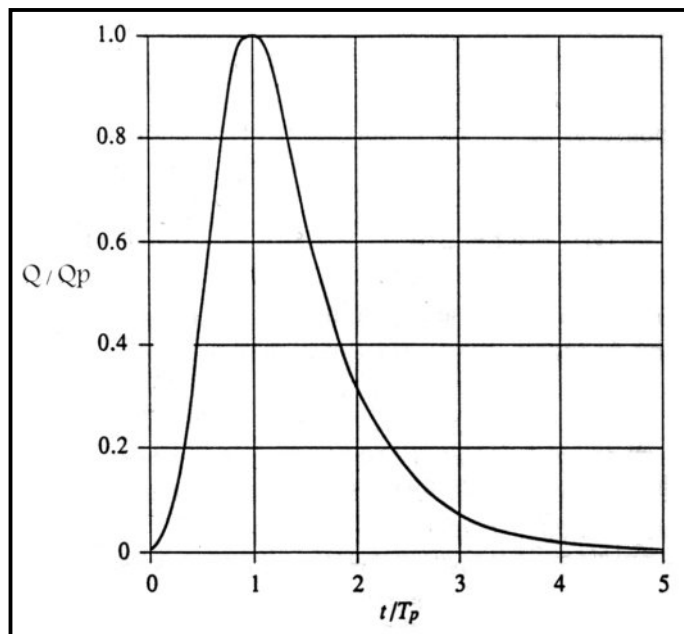
t/T_p	Q/Q_p
۰/۱	۰/۰۱۵
۰/۲	۰/۰۷۵
۰/۳	۰/۱۶
۰/۴	۰/۲۸
۰/۵	۰/۴۳
۰/۶	۰/۶۰
۰/۷	۰/۷۷
۰/۸	۰/۸۹
۰/۹	۰/۹۷
۱/۰	۱/۰۰
۱/۱	۰/۹۸
۱/۲	۰/۹۲
۱/۳	۰/۸۴
۱/۴	۰/۷۵
۱/۵	۰/۶۶
۱/۶	۰/۵۶
۱/۸	۰/۴۲
۲/۰	۰/۳۲
۲/۲	۰/۲۴
۲/۴	۰/۱۸
۲/۶	۰/۱۳
۲/۸	۰/۰۹۸
۳/۰	۰/۰۷۵
۳/۵	۰/۰۳۶
۴/۰	۰/۰۱۸
۴/۵	۰/۰۰۹
۵/۰	۰/۰۰۴
	۰

برای تعیین t_1 روابط مختلفی وجود دارد که در زیر رابطه کریپیچ به‌عنوان نمونه ارائه شده است:

$$t_1 = 0.949 \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0.385} \quad (۴-۶۰)$$

که در این رابطه:

t_1 : زمان تاخیر حوضه‌آبریز (hr)، L : طول رودخانه (Km) و ΔH اختلاف ارتفاع بلندترین و پایین‌ترین نقطه حوضه‌آبریز (m) می‌باشد.



شکل ۴-۳- هیدروگراف واحد بی‌بعد SCS - [۴، ۱۲]

- استخراج هیدروگراف سیلاب‌های دوره برگشتی

با استفاده از هیتوگرام بارندگی و هیدروگراف واحد آبریز هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف مشخص می‌گردد. در این روش سیلاب‌های با دوره بازگشت ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال ملاک تعیین بار رسوبی معلق می‌باشد [۲۰]. در مثال کاربردی ۳ نحوه تعیین هیدروگراف سیلاب‌ها ارائه شده است.

۴-۲-۲- استخراج پارامترهای هیدرولیکی

هیدروگراف سیلاب‌های به دست آمده از روش هیدرولوژیک امکان تعیین پارامترهای هیدرولیکی نظیر سرعت جریان، عمق، تنش برشی و نظایر آن‌را برای بده‌های مختلف فراهم می‌کند. بدین منظور لازم است اندازه‌گیری‌های میدانی مشابه آنچه در مبحث ۳-۳-۴ (تهیه اطلاعات میدانی و ...) بیان گردید از جمله نمونه‌برداری و تعیین دانه‌بندی مواد بستر، مقطع‌برداری و تعیین مشخصات هندسی و همچنین تعیین شیب رودخانه در محدوده مطالعاتی انجام می‌گیرد. در مثال کاربردی ۳ جزییات هیدرولیکی ارائه خواهد شد.

۴-۲-۳- محاسبه متوسط بار معلق سالیانه

برای تعیین بار معلق حمل شده توسط سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف با توجه به اطلاعات میدانی نظیر دانه‌بندی و مشخصات هندسی مقطع رودخانه و همچنین با بهره‌گیری از پارامترهای هیدرولیک جریان نخست غلظت مبنا (C_a) برای بده‌های مختلف تعیین و سپس مقدار بار معلق سیلاب براساس روابط ارائه شده در مبحث ۳-۳-۴ نظیر روش راس، بروکس، لین و کالینسک محاسبه می‌گردد. با مشخص شدن بار معلق برای سیلاب‌های مختلف بار معلق سالیانه از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۰]:

$$Q_{sy} = 0.4Q_{s2} + 0.06Q_{s10} + 0.02Q_{s25} + 0.01Q_{s50} + 0.01Q_{s100} \quad (۴-۶۱)$$

در رابطه فوق Q_{sy} : متوسط بار رسوبی معلق سالیانه (تن در سال) و Q_{s2} تا Q_{s100} به ترتیب بار رسوبی به دست آمده از سیلاب‌های ۲ تا ۱۰۰ سال (تن) می‌باشد. جزییات تعیین بار رسوبی معلق سالیانه به روش فوق در مثال کاربردی ۳ ارائه شده است. (پیوست)

فصل ۵

روش‌های محاسبه باربستر

۵-۱- کلیات

انتقال مواد رسوبی به صورت باربستر تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان و خصوصیات فیزیکی دانه‌های رسوب می‌باشد، از دیدگاه هیدرولیکی دانه‌های رسوب موجود در بستر را که در اثر تنش برشی ناشی از جریان آب به حالت لغزش، غلطش و جهش جابجا می‌شوند عنوان باربستر اطلاق می‌شود. نرخ باربستر تابع شرایط هیدرولیکی بوده و با افزایش بده جریان مقدار آن نیز رو به افزایش می‌گذارد و در بده‌های کم به طور محسوسی کاهش می‌یابد. خصوصیات فیزیکی دانه‌ها نیز نقش مهمی در کمیت باربستر ایفا می‌کند [۷، ۸]. معادلات مختلفی برای تعیین بار بستر توسط متخصصین ارائه گردیده که هریک متناسب با شرایط آزمایشگاهی و یا مطالعات میدانی دارای حوزه کاربرد مخصوص به خود می‌باشند. به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر انتقال مواد رسوبی تاکنون معرفی یک معادله واحد جهانی برای تعیین کمیت باربستر میسر نبوده است. در زیر جزییات روش‌های تعیین بار بستر ارائه می‌شود.

۵-۲- تعیین باربستر در شرایط وجود آمار

از جمله راهکارهای مناسب برای تعیین باربستر نظیر آنچه که در خصوص بار معلق بیان گردید استفاده از آمار ثبت شده در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی می‌باشد. در این ایستگاه‌ها ضمن اندازه‌گیری بده جریان (Q_d) و غلظت بار معلق مقدار باربستر نیز به صورت هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شود (Q_{sb}). چنین اطلاعاتی بخشی از آمار متداول رودخانه‌ها بوده و از طریق سازمان‌های ذیربط (نظیر سازمان‌های آب منطقه‌ای، دفتر مطالعات پایه منابع آب وزارت نیرو) قابل دسترسی می‌باشد. روش اندازه‌گیری باربستر و تجهیزات اندازه‌گیری، در نشریات استاندارد وزارت نیرو [۲۹، ۳۱ و ۳۵] قابل دسترسی است. در ثبت داده‌های آماری عموماً Q_d معرف بده جریان روزانه (مترمکعب بر ثانیه) و Q_{sb} مقدار باربستر (تن در روز) می‌باشد.

این واقعیت که اندازه‌گیری بده جریان و باربستر به صورت روزانه به دلایل مختلف از جمله هزینه‌های مالی و تعدد و تنوع رودخانه‌ها عملاً میسر نمی‌باشد، در عمل سالانه تعداد معدودی عملیات اندازه‌گیری و تعیین کمیت بده جریان و باربستر انجام گرفته و به عنوان داده‌های آماری در اختیار کاربران و متخصصین مسایل رودخانه‌ای قرار می‌گیرد. این داده‌ها مبنای تعیین بار بستر روزانه، ماهانه و سالانه بوده و بدین منظور از روش منحنی سنج رسوب (SRC) استفاده می‌شود [۱، ۲۲].

۵-۲-۱- بررسی آمار بده جریان و بده رسوب بستر

منحنی سنج رسوب مشابه آنچه که در خصوص بار معلق تشریح گردید (فصل ۴) با استفاده از داده‌های آماری Q_d و Q_{sb} ترسیم می‌گردد. چنین اطلاعاتی بخشی از برنامه سنجش‌های رودخانه‌ای تلقی گردیده و در هر ایستگاه آب‌سنجی سالیانه در چند نوبت ضمن اندازه‌گیری بده جریان روزانه، مقدار باربستر روزانه نیز اندازه‌گیری می‌شود. برای ترسیم منحنی سنج رسوب سری داده‌ها برای یک دوره آماری چند ساله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۲-۲- تعیین رابطه نمایی و ترسیم منحنی سنج رسوب

ضرورت تعیین رابطه نمایی رسوب ناشی از محدود بودن تعداد مشاهدات است که در آن فقط در هر سال برای چند نوبت اندازه‌گیری هم‌زمان Q_d و Q_{sb} محقق می‌گردد. برای مابقی روزهای سال لازم است با تعیین رابطه همبستگی بین Q_d و Q_{sb} تناژ

رسوب در روزهای فاقد آمار محاسبه شود. برای منحنی سنج رسوب برازش معادله نمایی توسط متخصصین مختلف توصیه شده است [۱۲، ۲۲].

حالت کلی معادله نمایی رسوب به صورت زیر می‌باشد:

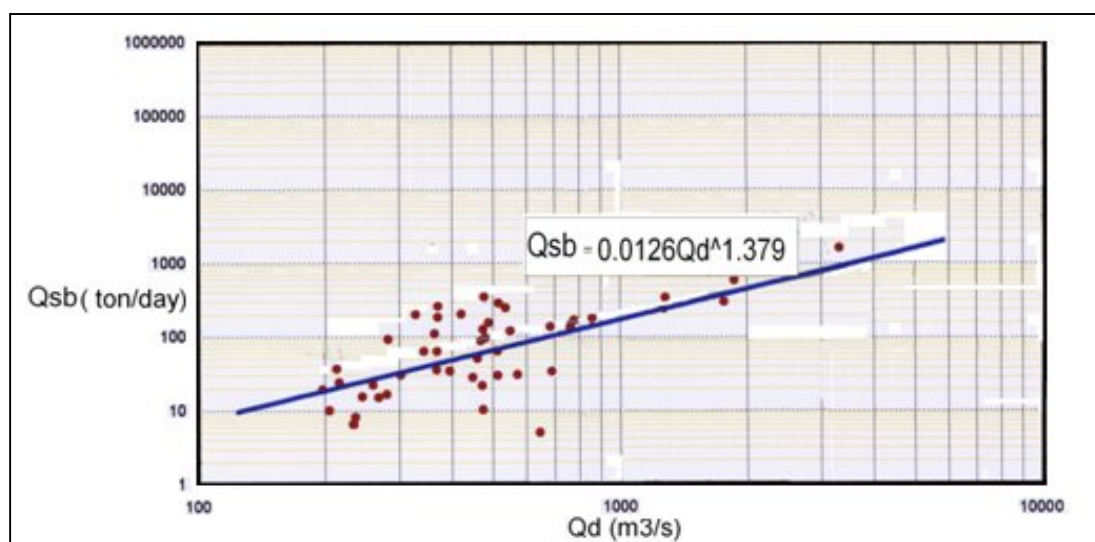
$$Q_{sb} = a Q_d^b \quad (۱-۵)$$

در این معادله a و b به ترتیب ضریب و نمای معادله بوده و Q_d و Q_{sb} قبلاً تعریف شده‌اند.

در شکل (۱-۵) نمونه‌ای از معادله نمایی و منحنی سنج رسوب نشان داده شده است. داده‌های مشاهده‌ای موجود بر روی نمودار معرف اندازه‌گیری‌های انجام شده در دوره آماری (۸۰-۱۳۷۷) می‌باشد [۲۸]. مطابق شکل معادله نمایی برای باربستر و بده جریان روزانه در رودخانه مذکور به صورت زیر است:

$$Q_{sb} = 0.0126 Q_d^{1.379} \quad (۲-۵)$$

بررسی موقعیت نقاط مشاهده‌ای بر روی نمودار شکل (۱-۵) بیانگر دامنه تغییرات زیاد باربستر در بده جریان‌های کمتر می‌باشد و با افزایش بده جریان پراکندگی نقاط کاهش یافته و باربستر دارای روند افزایشی است.



شکل ۱-۵- منحنی سنج رسوب باربستر (رودخانه کارون ایستگاه ملاثانی)

۵-۲-۳- تعیین باربستر روزانه، ماهانه و سالانه

تعیین تغییرات زمانی باربستر از جنبه‌های مختلف دارای اهمیت است. در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع آب رودخانه‌ها لازم است تناژ رسوب روزانه مشخص گردد. به‌علاوه تعیین آورد رسوب ماهانه و سالانه نیز برای ارزیابی عملکرد مخازن سدها، و بهسازی مسیر رودخانه‌ها، برداشت شن و ماسه و موارد متعدد دیگر مورد نیاز می‌باشد.

- تعیین تناژ رسوب روزانه

بدین منظور پس از تعیین منحنی سنج و معادله نمایی آن براساس آمار بده جریان روزانه (Q_d) برای هر سال آبی (۳۶۵ روز) تناژ رسوب روزانه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_{sbi} = a Q_{di}^b \quad i = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (3-5)$$

که در این رابطه:

Q_{sbi} : تناژ باربستر روزانه، Q_{di} : بده جریان روزانه و i شاخص روز از ۱ تا ۳۶۵ برای یک سال آبی می‌باشد. به عبارتی برای تعیین تناژ رسوب روزانه لازم است نخست آمار آبدهی روزانه مشخص گردد و سپس از معادله نمایی رسوبدهی روزانه برای هر سال آبی و برای دوره آماری چند سال تکمیل شود.

مشخص شدن آبدهی و رسوبدهی روزانه برای هر سال آبی امکان بررسی هم‌زمان رژیم جریان (هیدروگراف جریان سالیانه) و رژیم رسوبی (هیدروگراف رسوبدهی سالانه) رودخانه را نیز فراهم می‌آورد (درخصوص شیوه تعیین رسوبدهی روزانه به فصل ۴ روش‌های محاسبه بار معلق مراجعه شود).

- تعیین تناژ باربستر ماهانه

مقدار رسوب ماهانه از حاصل جمع مقادیر رسوبدهی روزانه (Q_{sbi}) حاصل می‌شود. رسوب ماهانه برای ماه‌های مهر تا شهریور و برای هر سال آبی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Q_{sbm_{j,y}} = \sum_{i=1}^M Q_{sbi,j} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad M = 30(29, 31) \quad y = 1, 2, \dots, N \quad (4-5)$$

که در این رابطه:

$Q_{sbm_{j,y}}$: رسوب ماهانه در ماه مورد نظر j و سال مورد نظر y (تن)، $Q_{sbi,j}$: تناژ رسوب روزانه در ماه مورد نظر j ، M : شاخص تعداد روزهای هر ماه، y : شاخص تعداد سال‌های آبی (از یک سال تا N) می‌باشد (در خصوص شیوه تعیین رسوبدهی ماهانه به فصل ۴ روش‌های محاسبه بار معلق مراجعه شود).

همچنین متوسط آورد رسوب ماهانه دوره آماری از جمله داده‌های پایه‌ای برای اهداف مطالعاتی است. متوسط بار رسوبی ماهانه از میانگین‌گیری رسوب ماهانه در دوره آماری حاصل می‌شود.

$$\bar{Q}_{sbm,j} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{sbm,k} / N \right) j \quad (5-5)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{sbm,j}$: متوسط بار رسوب بستر ماهانه برای ماه مورد نظر (تن)، $Q_{sbm,k}$: بار رسوب بستر ماهانه در سال آبی مورد نظر که از یک تا N تغییر می‌کند و j شاخص ماهانه می‌باشد که از ۱ تا ۱۲ متغیر است.

- تعیین تناژ باربستر سالیانه

رسوب سالیانه معرف مقدار بار رسوبی حمل شده در یک سال آبی است و از مجموع رسوب روزانه مطابق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$Q_{sbyk} = \sum_{i=1}^{365} Q_{sbi,k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (6-5)$$

که در این رابطه:

Q_{sbyk} : بار رسوب سالیانه برای سال آبی k (تن)، $Q_{sb_{i,k}}$: بار رسوب روزانه در سال آبی k (تن) و N تعداد سال‌های آبی می‌باشد. در کارهای مهندسی علاوه بر کمیت رسوب برای یک سال مورد نظر لازم است متوسط آورد رسوب سالیانه دوره آماری نیز مشخص شود.

متوسط بار رسوب بستر سالیانه در دوره آماری نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{Q}_{sby} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{sby,k} \right) / N \quad (۷-۵)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{sby}$ متوسط بار رسوب بستر سالیانه در دوره آماری مورد نظر (تن) و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. برای تعیین مقادیر بار رسوب متوسط ماهانه و سالیانه لازم است کمیت رسوب ماهانه و سالیانه برای سال‌های آبی مختلف در دوره آماری محاسبه و از متوسط‌گیری آنها مقادیر بار رسوبی مورد نظر تعیین گردد.

۵-۳- تعیین باربستر از بار معلق

در صورت عدم وجود آمار اندازه‌گیری باربستر می‌توان با استفاده از آمار بار معلق مقدار باربستر سالانه را تعیین نمود. مراحل محاسبه باربستر به صورت زیر می‌باشد.

- تعیین بار معلق براساس روش‌های موجود

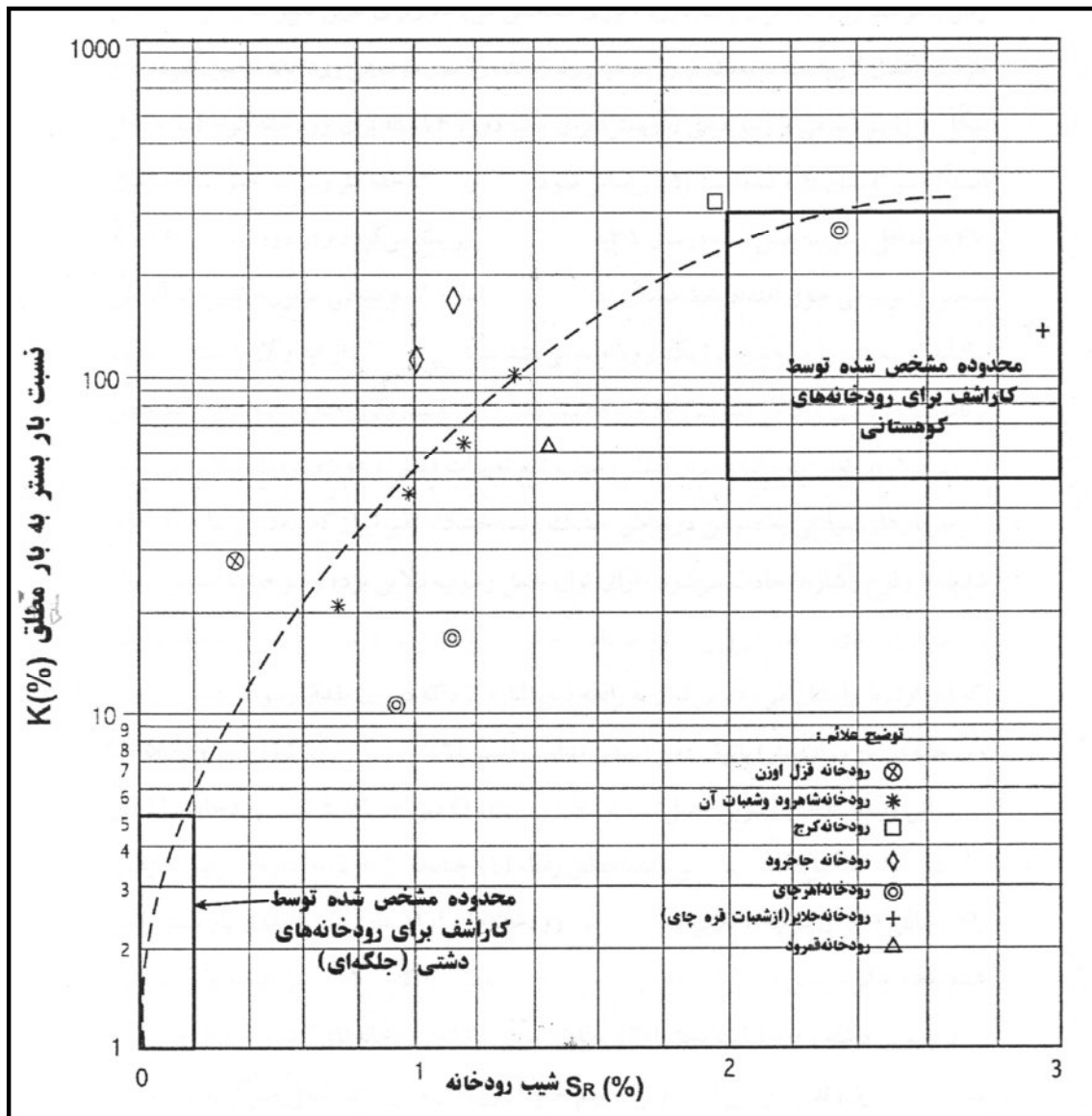
با استفاده از روش‌های موجود نظیر منحنی سنج‌رسوب و یا روش منحنی بده کلاسه متوسط بار معلق سالانه در دوره آماری تعیین می‌گردد (در خصوص جزئیات مربوط به روش‌های تعیین بار معلق به مبحث ۴-۱ مراجعه شود).

- تعیین شیب طولی رودخانه از مشخصات فیزیوگرافی حوضه

با استفاده از نیمرخ طولی رودخانه که از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبریز استخراج می‌شود شیب طولی رودخانه (S_R) را در محل ایستگاه آب‌سنجی می‌توان تعیین نمود.

- تعیین نسبت بار بستر به بار معلق از روش‌های تجربی

با مشخص شدن شیب طولی رودخانه (S_R) نسبت بار بستر به بار معلق (k) را می‌توان با استفاده از نمودار تجربی که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است تعیین نمود [۳۰].



شکل ۵-۲- نمودار تجربی نسبت باریستر به بار معلق در رودخانه‌ها [۳۰]

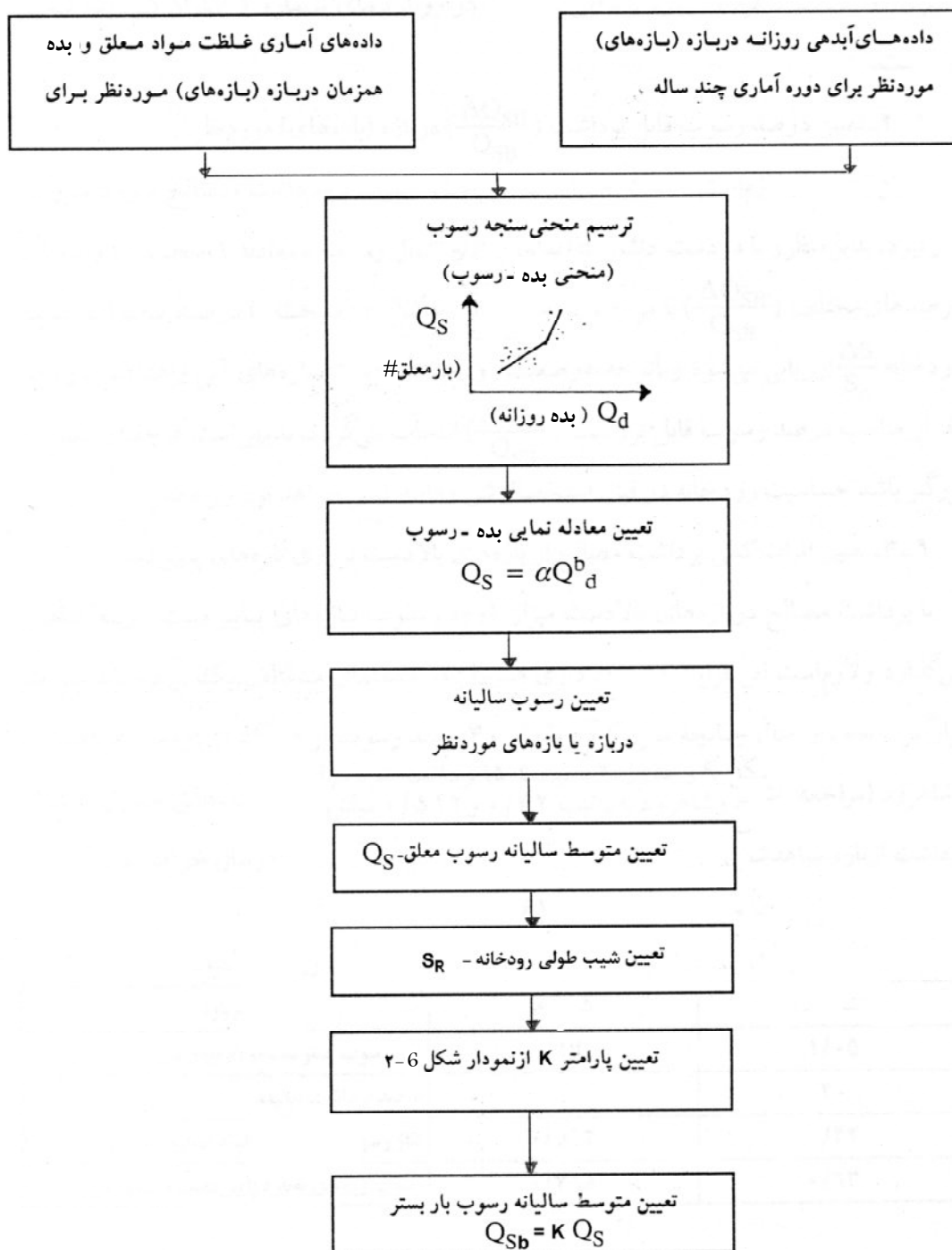
- تعیین تناژ باریستر سالیانه

با مشخص شدن k از نمودار شکل (۵-۲) برای شیب مشخص (به‌طور مثال در نمودار برای شیب برابر ۰/۳۵ درصد مقدار k برابر ۱۰ درصد است) مقدار باریستر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{sb} = k Q_s \quad (۸-۶)$$

که در این رابطه:

Q_{sb} : متوسط باریستر سالیانه (تن)، k : نسبت باریستر به بار معلق (شکل ۵-۲) و Q_s : متوسط بار معلق سالیانه (تن) می‌باشد. در روندنمای شکل (۵-۳) مراحل مختلف تعیین باریستر از بار معلق نشان داده شده است.



شکل ۵-۳- روند نمای مراحل مختلف تعیین باربستر سالیانه از بار معلق سالیانه

۵-۴- تعیین باربستر از معادلات تئوریک (با فرض وجود آمار آبدی)

یکی از روش‌های تعیین باربستر در رودخانه‌ها استفاده از معادلات مبتنی بر تحلیل مکانیزم جابجایی دانه‌های رسوب توسط جریان آب در بستر می‌باشد. اساس استفاده از این گونه معادلات در نظر گرفتن خصوصیات هیدرولیک جریان و ترکیب دانه‌بندی مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه‌ها است. در زیر به معرفی معادلات مورد استفاده در تعیین باربستر پرداخته می‌شود.

۵-۴-۱- بررسی معادلات بار بستر و انتخاب معادلات مناسب

معادلات متعددی برای تعیین بار بستر توسط متخصصین ارائه شده که ضمن معرفی آنها در خصوص انتخاب معادلات مناسب نیز بحث خواهد شد.

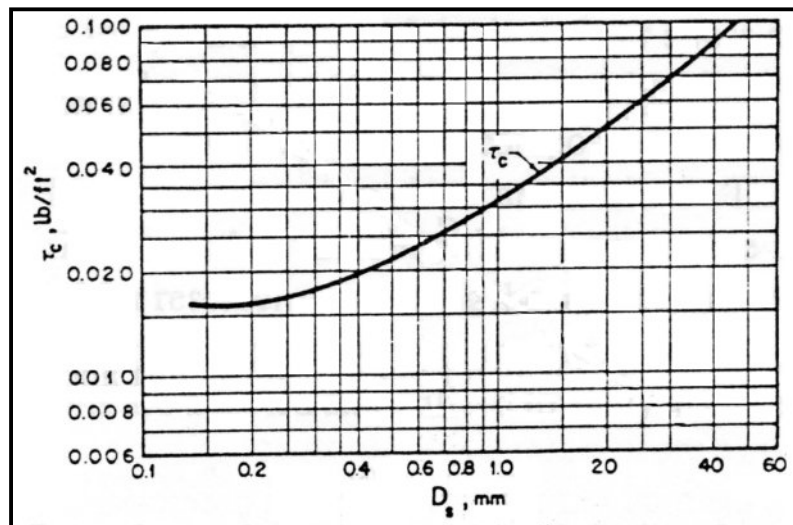
- روش دوبویز

دوبویز در سال ۱۸۷۹ معادله زیر را برای تعیین باریستر ارائه نمود [۲۲]:

$$q_b = \frac{0.173}{d^{3/4}} \tau (\tau - \tau_c) \quad (۸-۵)$$

که در این رابطه:

q_b : باریستر در واحد عرض (فوت مکعب در ثانیه در فوت)، τ : تنش برشی جریان (پوند بر فوت مربع) که از رابطه $\tau = \gamma RS$ تعیین می‌شود (γ : وزن مخصوص آب (پوند بر فوت مکعب)، R : شعاع هیدرولیکی (فوت) و S : شیب رودخانه یا شیب خط انرژی می‌باشد)، τ_c : تنش برشی بحرانی که از نمودار شکل (۵-۴) (پوند بر فوت مربع) تعیین می‌شود، و d قطر دانه‌های مواد بستر (میلی‌متر) می‌باشد.



شکل ۵-۴- نمودار تغییرات τ_c بر حسب d در رابطه دوبویز [۲۲]

- روش شیلدز

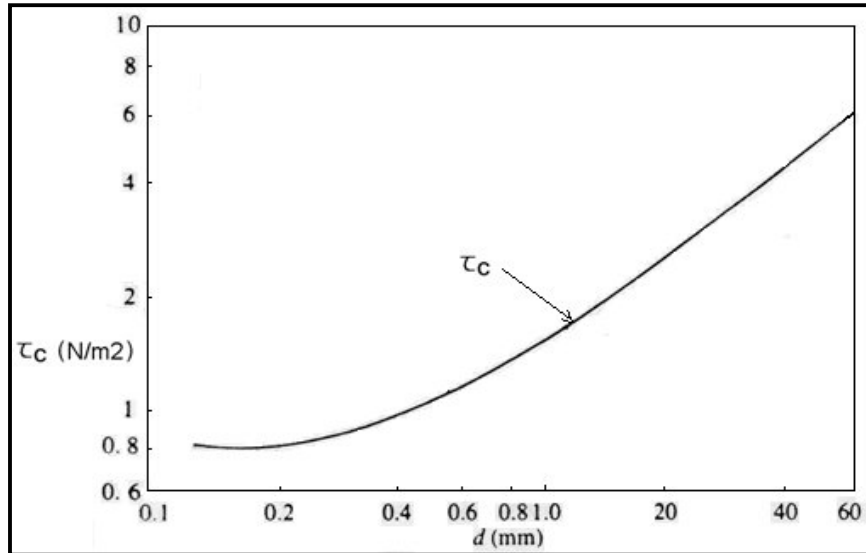
شیلدز در ۱۹۳۶ رابطه زیر را برای تعیین باریستر براساس بررسی‌های آزمایشگاهی معرفی نمود [۲۵]:

$$q_b = \frac{qS}{G_s} \left[10 \frac{(\tau - \tau_c)}{\gamma(G_s - 1)d} \right] \quad (۹-۵)$$

که در این رابطه:

q_b : باریستر در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر)، τ : تنش برشی جریان (نیوتن بر مترمربع) که از رابطه $\tau = \gamma RS$ تعیین می‌شود (γ : وزن مخصوص آب (نیوتن بر مترمکعب)، R : شعاع هیدرولیکی (متر) و S شیب رودخانه یا شیب خط انرژی می‌باشد)، τ_c :

: تنش برشی بحرانی از نمودار شکل (۵-۵) (نیوتن بر مترمربع)، d : قطر دانه‌های بستر (متر)، q : بده جریان در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر) و G_s چگالی دانه‌های رسوب (معمولاً برابر با ۲/۶۵) می‌باشد.



شکل ۵-۵- نمودار تعیین τ_c بر حسب d در روش شیلدز [۲۵]

- روش کالینسک^۱

رابطه ارائه شده توسط کالینسک برای تعیین باربستر به صورت زیر می‌باشد [۲۰]:

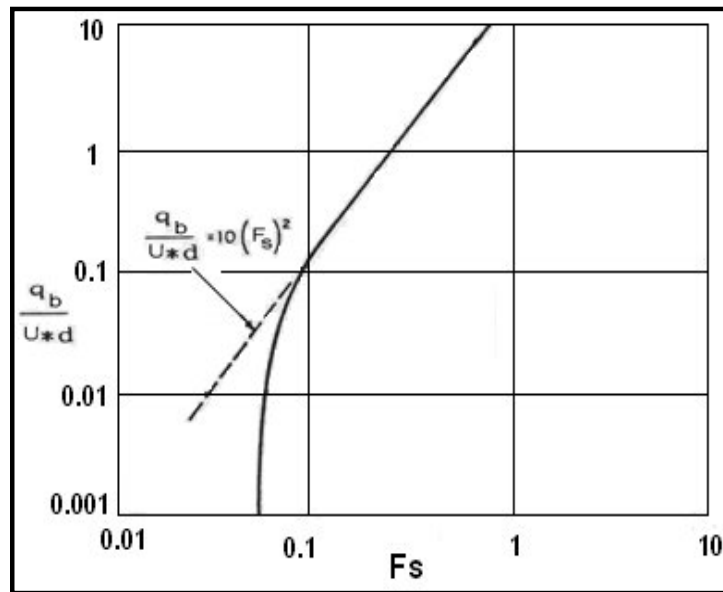
$$\frac{q_b}{U_* d} = 10(F_s)^2 \quad (۱۰-۵)$$

که در این رابطه q_b : باربستر در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر) و U_* سرعت برشی (متردرثانیه) که از رابطه

$U_* = \left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{0.5}$ تعیین می‌شود که در آن ρ جرم مخصوص آب (کیلوگرم جرم بر مترمکعب) و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. در

روش کالینسک برای تعیین q_b لازم است نسبت $\frac{q_b}{U_* d}$ بر حسب F_s از گراف شکل (۵-۶) استخراج و سپس از حاصل ضرب عدد به

دست آمده در $U_* d$ مقدار q_b تعیین شود.



شکل ۵-۶- نمودار کالینسک برای تعیین بار بستر [۲۰]

- روش مایر - پیتر مولر^۱

معادله مایر - پیتر - مولر براساس بررسی های آزمایشگاهی و مطالعات میدانی به صورت زیر ارائه شده است [۳۹، ۲۲]:

$$\frac{q_b}{[g(G_s - 1)d^3]^{0.5}} = 8 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{1.5} F_s - 0.047 \right]^{1.5} \quad (۱۱-۵)$$

که در این رابطه:

q_b : باریستر در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر)، g : شتاب ثقل (متر در مجذور ثانیه)، F_s : عدد شیلدز که از رابطه

$$F_s = \frac{\tau}{\gamma(G_s - 1)d}$$

تعیین می شود، n'/n فاکتور رپل نامیده می شود که در آن n' : ضریب مانینگ دانه های بستر و n ضریب

مانینگ بستر می باشد. مقدار n' از رابطه زیر به دست می آید:

$$n' = 0.034(d_{90})^{\frac{1}{6}} \quad (۱۲-۵)$$

مقدار n نیز از معادله مانینگ و یا به روش تخمینی کارشناسی با استفاده از شکل ها و جداول ارائه شده در مراجع مختلف تعیین

می گردد. d_{90} در رابطه بالا قطر نظیر ۹۰ درصد ریزتر وزنی مواد رسوبی بستر می باشد (بر حسب متر) بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

- روش شوکلیچ^۲

در روش شوکلیچ مقدار باریستر براساس بده جریان در عرض واحد به صورت زیر تعیین می شود [۲۱]:

$$q_b = \frac{2.5}{G_s} S^{1.5} (q - q_c) \quad (۱۳-۵)$$

1- Meyer-Peter-Muller

2- Schoklitsch

$$q_c = 0.26(G_s - 1)^{5/3} \frac{d_{40}^{1.5}}{S^{7/6}} \quad (۱۴-۵)$$

که در این رابطه:

q_b : بار بستر در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر)، q : بده جریان در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر)، q_c : بده جریان بحرانی در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر) و d_{40} قطر نظیر ۴۰ درصد ریزتر وزنی مواد رسوبی بستر می‌باشد (متر)، بقیه عوامل قبلاً تعریف شده‌اند.

- روش انشتین - براون^۱

در این روش مقدار باربستر با در نظر گرفتن سرعت سقوط دانه‌ها و سایر ویژگی‌های فیزیکی آب و مواد رسوبی به صورت زیر تعیین می‌شود [۲۵]:

$$\frac{q_b}{wd} = \varphi \quad (۱۵-۵)$$

که در این رابطه:

q_b : بار بستر در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر)، w : سرعت سقوط دانه‌ها (متر در ثانیه) که از روابط زیر به دست می‌آید و φ تابع باربستر انشتین - براون که از گراف شکل (۷-۵) بر حسب عدد شیلدز F_S تعیین می‌شود، در روابط زیر نیز v ویسکوزیته سینماتیکی آب (مترمربع در ثانیه) و بقیه عوامل قبلاً تعریف شده است.

$$w = G\sqrt{gd(G_s - 1)} \quad (۱۶-۵)$$

$$G = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3(G_s - 1)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3(G_s - 1)}} \quad (۱۷-۵)$$

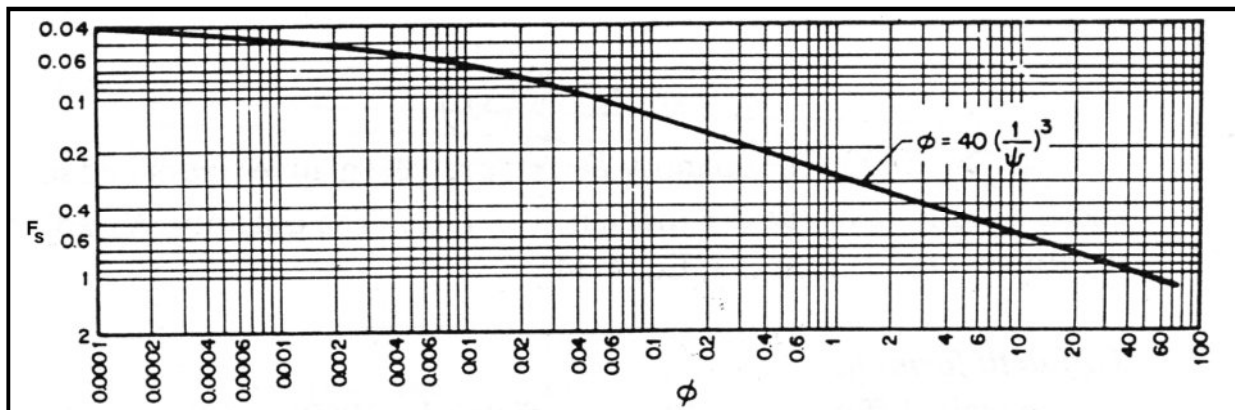
- روش روتنر^۲

معادله روتنر با در نظر گرفتن زبری نسبی (d_{50}/h) و سرعت جریان مقدار باربستر را براساس رابطه زیر تعیین می‌کند [۲۵]:

$$\frac{q_b}{[g(G_s - 1)h^3]^{0.5}} = \left[\frac{V}{(g(G_s - 1)h)^{0.5}} \left(0.667 \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{2/3} + 0.14 \right) - 0.778 \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{2/3} \right]^3 \quad (۱۸-۵)$$

که در این رابطه:

q_b : بار بستر در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر)، V : متوسط سرعت جریان (متر در ثانیه)، h : متوسط عمق جریان (متر)، d_{50} : قطر نظیر ۵۰ درصد ریزتر وزنی دانه‌های بستر و (d_{50}/h) زبری نسبی می‌باشد. بقیه عوامل قبلاً تعریف شده‌اند. در زیر با ارائه مثال کاربردی نحوه تعیین باربستر با استفاده از معادلات مذکور نشان داده شده است.



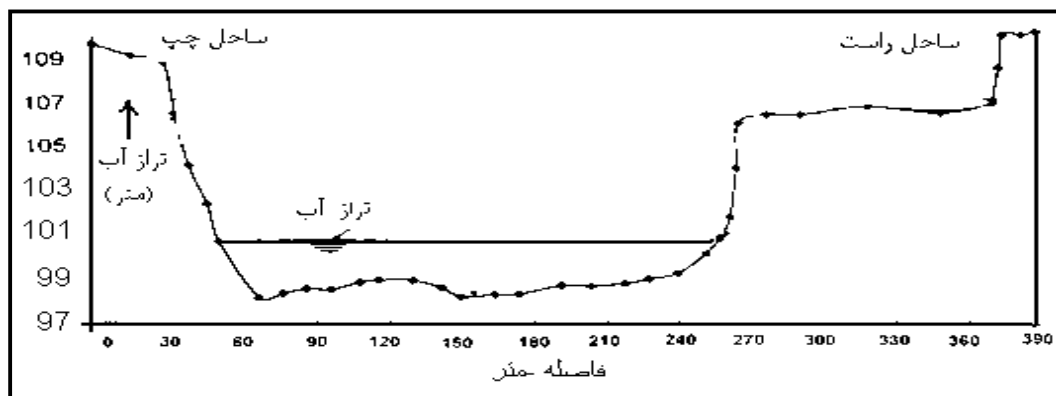
شکل ۵-۷- نمودار تابع بار بستر انشتین - براون برحسب عدد شیلدز [۲۵]

• اندازه‌گیری‌های میدانی

در صورت عدم وجود داده‌های آماری امکان تعیین باریستر با استفاده از سری داده‌های آبدی و انجام اندازه‌گیری‌های میدانی به شرح زیر فراهم می‌شود:

• مقطع برداری و تعیین مشخصات هندسی مقطع

مشخصات هندسی مقطع رودخانه از جمله اطلاعات مورد نیاز برای تعیین خصوصیات هیدرولیک جریان می‌باشد. در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی نقشه‌برداری و تعیین مقطع جریان به صورت سیستماتیک انجام می‌گیرد. از این گونه اطلاعات می‌توان برای محاسبه باریستر براساس معادلات مذکور در مباحث پیشین مشابه مثال کاربردی ۱ بهره گرفت. در شکل (۵-۸) نمونه‌ای از مقطع هندسی رودخانه در محل ایستگاه آب‌سنجی (هیدرومتری) معرفی شده است.



شکل ۵-۸- نمونه‌ای از مقطع جریان رودخانه در ایستگاه آب‌سنجی مورد استفاده در تعیین بار رسوبی [۴۱]

• نمونه‌برداری مواد بستر و تعیین دانه‌بندی

از جمله داده‌های میدانی مورد نیاز برای تعیین بار رسوبی بستر انجام نمونه‌برداری از مواد بستر و تعیین منحنی دانه‌بندی در آزمایشگاه می‌باشد. در مبحث ۳-۴-۵-۲ نمونه‌هایی از ترکیب دانه‌بندی مواد رسوبی بستر و توزیع دانه‌بندی آنها به همراه منحنی توزیع دانه‌بندی نشان داده شده است.

- تعیین مشخصات هیدرولیک جریان

با استفاده از مقطع هندسی رودخانه در محل ایستگاه آب‌سنجی می‌توان مشخصات هیدرولیک جریان را برای مقدار آبدی مشخص (Q) تعیین نمود. مطابق آنچه که در مبحث ۴-۳-۴ با عنوان کاربردی کردن معادلات تئوریک تشریح گردید مشخصات هیدرولیکی نظیر A (سطح مقطع جریان)، P (محیط تر شده)، R شعاع هیدرولیکی، V (سرعت متوسط جریان)، D (عمق جریان)، S (شیب رودخانه)، n (ضریب مانینگ)، B (عرض مجرا) که در تعیین بار رسوبی معلق مورد نیاز می‌باشند با استفاده از مقطع هندسی جریان (نظیر شکل ۵-۸) تعیین می‌شود.

- تعیین بار بستر

با مشخص شدن خصوصیات دانه‌بندی مواد بستر و همچنین با انجام مقطع‌برداری و تعیین مشخصات هندسی و هیدرولیکی مورد نیاز امکان تعیین بار بستر فراهم می‌شود. بدین منظور لازم است با استفاده از معادلات تئوریک براساس روابط ارائه شده در مباحث پیشین نسبت به تعیین بار بستر اقدام نمود. در این خصوص مثال کاربردی ۱ می‌تواند به عنوان راهنمای محاسبات مورد استفاده قرار بگیرد.

- تعیین بار بستر روزانه، ماهانه و سالانه

با در دست داشتن آمار آبدی روزانه در ایستگاه مورد نظر امکان محاسبه بار رسوبی بستر با استفاده از معادلات مختلف ارائه شده برای روزهای متوالی مطابق آنچه که در رابطه زیر مشخص شده است فراهم می‌گردد. و با استفاده از مقادیر بار بستر روزانه بار رسوبی ماهانه و همچنین سالانه برای هر سال آبی تعیین می‌گردد:

$$Q_{bi} = 86400(q_{bi}B)10^{-4} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (۱۹-۵)$$

که در این رابطه:

Q_{bi} : تناژ باربستر روزانه، q_{bi} : بار بستر در واحد عرض (نیوتن در ثانیه در متر)، i شاخص روز از ۱ تا ۳۶۵ برای یک سال آبی می‌باشد. به عبارتی برای تعیین تناژ رسوب بستر روزانه لازم است نخست آمار آبدی روزانه مشخص گردد و سپس از معادله (معادلات باربستر) رسوب‌دهی روزانه برای هر سال آبی و برای دوره آماری چند ساله تکمیل شود.

• تعیین تناژ باربستر ماهانه

مقدار رسوب ماهانه از حاصل جمع مقادیر رسوب‌دهی روزانه (Q_{bi}) حاصل می‌شود. رسوب ماهانه برای ماه‌های مهر تا شهریور و برای هر سال آبی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Q_{bm,j,y} = \sum_{i=1}^M Q_{bi,j} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad M = 30(29, 31) \quad y = 1, 2, \dots, N \quad (۲۰-۵)$$

که در این رابطه:

$Q_{bm,j,y}$: رسوب ماهانه در ماه مورد نظر j و سال مورد نظر y (تن)، $Q_{bi,j}$: تناژ رسوب روزانه در ماه مورد نظر j ، M : شاخص تعداد روزهای هر ماه و y شاخص تعداد سال‌های آبی (از یک سال تا N) می‌باشد (در خصوص شیوه تعیین رسوب‌دهی ماهانه به فصل ۴ روش‌های محاسبه بار معلق مراجعه شود).

• تعیین تناژ باربستر سالیانه

رسوب سالیانه معرف مقدار بار رسوبی حمل شده در یک سال آبی است و از مجموع رسوب روزانه مطابق رابطه زیر حاصل می شود:

$$Q_{byk} = \sum_{i=1}^{365} Q_{bi,k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (21-5)$$

که در این رابطه:

Q_{byk} : بار رسوب سالیانه برای سال آبی k (تن)، $Q_{bi,k}$: بار رسوب روزانه در سال آبی k (تن) و N تعداد سال های آبی می باشد. در کارهای مهندسی علاوه بر کمیت رسوب برای یک سال مورد نظر لازم است متوسط آورد رسوب سالیانه دوره آماری نیز مشخص شود. همچنین متوسط آورد رسوب ماهانه دوره آماری از جمله داده های پایه ای برای اهداف مطالعاتی است. متوسط بار رسوبی ماهانه از میانگین گیری رسوب ماهانه در دوره آماری حاصل می شود.

$$\bar{Q}_{bm,j} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{bm,k} \right) / N \quad (22-5)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{bm,j}$: متوسط بار رسوب بستر ماهانه برای ماه مورد نظر (تن)، $Q_{bm,k}$: بار رسوب بستر ماهانه در سال آبی مورد نظر که از یک تا N تغییر می کند و j شاخص ماهانه می باشد که از ۱ تا ۱۲ متغیر است. متوسط بار رسوب بستر سالیانه در دوره آماری نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{Q}_{by} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{by,k} \right) / N \quad (23-5)$$

که در این رابطه $\bar{Q}_{by}$ متوسط بار رسوب بستر سالیانه در دوره آماری مورد نظر (تن) و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

۵-۵- تعیین بار بستر در شرایط عدم وجود آمار (روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک)

در مواردی که محدوده مطالعاتی فاقد داده های آماری است با استفاده از روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک می توان متوسط بار بستر سالیانه را بر آورد نمود. در این روش با توجه به عدم وجود داده های آماری بده جریان باربستر با استفاده از شبیه سازی هیدروگراف سیلاب ها برای دوره برگشت های مختلف تعیین می گردد. از این روش در تعیین بار معلق نیز در مبحث ۵-۳ استفاده شده و جزییات آن به تفصیل تشریح گردیده است. عناوین مراحل محاسباتی شامل موارد زیر می باشد:

الف- استخراج پارامترهای هیدرولوژی (مشابه جزییات تشریح شده در مبحث ۴-۵)

— مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز

— تعیین تیپ بارندگی و هیدروگراف واحد حوضه آبریز

— استخراج هیدروگراف سیلاب های دوره برگشتی

ب- استخراج پارامترهای هیدرولیکی (مشابه جزییات تشریح شده در مبحث ۴-۵)

ج- محاسبه بار بستر سالیانه

مقدار باربستر حمل شده توسط سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف با توجه به اطلاعات میدانی نظیر دانه‌بندی و مشخصات هندسی مقطع رودخانه و همچنین بهره‌گیری از پارامترهای هیدرولیک جریان و استفاده از روابط ارائه شده در مبحث ۳-۵ نظیر روش مایر-پیتر - مولر، شوکلیچ، روتنر و ... محاسبه می‌گردد. با مشخص شدن باربستر حمل شده برای سیلاب‌های مختلف متوسط باربستر سالیانه از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۰]:

$$Q_{byr} = 0.4Q_{b2} + 0.06Q_{b10} + 0.02Q_{b25} + 0.01Q_{b50} + 0.01Q_{b100} \quad (۲۴-۵)$$

که در رابطه فوق:

Q_{by} متوسط بار بستر سالیانه (تن) و Q_{b2} تا Q_{b100} به ترتیب باربستر حاصل از سیلاب‌های ۲ تا ۱۰۰ سال می‌باشد.

فصل ۶

تعیین بار کل رسوب یا بار مواد بستر در

رودخانه‌ها

۶-۱- کلیات

بارکل مجموع باربستر و بار معلق حمل شده توسط رودخانه می‌باشد. بار معلق همان طوری که در مباحث قبل عنوان گردید شامل بارشسته (یا بار معلق به دست آمده از فرسایش خاک حوضه که از نوع ریزدانه نظیر سیلت و رس^۱) و بار معلق بستری است. بعضی از روش‌های تعیین بارکل بارشسته را نیز شامل می‌شود (نظیر روش ۲-۶ و ۳-۶). معادلاتی نیز برای تعیین بارکل ارائه شده‌اند که مقدار باربستر و بار معلق برخاسته از بستر را که اصطلاحاً بار مواد بستر گفته می‌شود به صورت یک‌جا محاسبه می‌کنند. در این معادلات تعیین بارشسته منظور نشده است. بارشسته معمولاً با نمونه برداری از مواد معلق رودخانه تعیین می‌شود. در زیر به روش‌های تعیین بارکل پرداخته شده است.

۶-۲- تعیین بارکل براساس آمار موجود

استفاده از داده‌های آماری موجود شامل بار معلق و باربستر اطلاعات مناسبی برای تعیین بارکل حمل شده توسط رودخانه تلقی می‌شود. مراحل تعیین بارکل در زیر معرفی شده است (شایان ذکر است این روش بارشسته را نیز شامل می‌شود).

- تعیین بار معلق به روش تحلیل آماری

با استفاده از داده‌های آماری موجود در ایستگاه‌های آب‌سنجی که به صورت بده روزانه (Q_d) و رسوب معلق روزانه (Q_s) می‌باشد مطابق آنچه که در مبحث ۲-۴ تشریح شده است (محاسبه بار معلق در شرایط وجود آمار) مقدار بار معلق با استفاده از منحنی سنج رسوب و معادله نمایی آن ($Q_s = a Q_d^b$) به صورت روزانه ماهانه و سالانه تعیین می‌شود (درخصوص جزئیات مربوط به روش منحنی سنج رسوب برای تعیین بار معلق به مبحث ۲-۴-۱ مراجعه شود)

- تعیین بار بستر به روش تحلیل آماری

مقدار بار بستر روزانه نیز مشابه بار معلق در صورت وجود داده‌های آماری ثبت شده در ایستگاه‌ها به صورت بده روزانه (Q_d) و باربستر روزانه (Q_b) با استفاده از منحنی سنج رسوب و معادله نمایی آن ($Q_{sb} = a Q_d^b$) به صورت روزانه، ماهانه و سالانه تعیین می‌شود (درخصوص جزئیات مربوط به روش منحنی سنج رسوب برای تعیین باربستر به مبحث ۲-۴ مراجعه شود)

- تعیین بارکل رسوب حمل شده

با مشخص شدن مقدار باربستر و بار معلق مقدار بارکل از حاصل جمع مقادیر روزانه براساس روابط زیر مشخص می‌گردد.

بارکل رسوب روزانه

$$Q_{sti} = Q_{si} + Q_{bi} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (1-6)$$

بارکل رسوب ماهانه

۱- در خصوص جزئیات مربوط به تعیین بار رسوبی حوضه‌های آبریز به نشریه شماره ۹۳ طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور با عنوان فرسایش رسوب در آبخیزها مراجعه شود.

$$Q_{stm_{j,y}} = \sum_{i=1}^M Q_{sti,j} \quad j=1,2,3,\dots,12 \quad M=30(29,31) \quad y=1,2,\dots,N \quad (۲-۶)$$

بار کل رسوب سالانه

$$Q_{styk} = \sum_{i=1}^{365} Q_{sti,k} \quad k=1,2,\dots,N \quad (۳-۶)$$

که در این روابط:

Q_{sti} : بار کل روزانه (تن) Q_{si} : بار معلق روزانه (تن)، Q_{bi} : بار بستر روزانه (تن)، i : شاخص روز از ۱ تا ۳۶۵ برای یک سال آبی،
 $Q_{stm_{j,y}}$: بار کل رسوب ماهانه در ماه مورد نظر j و سال مورد نظر y (تن)، $Q_{sti,j}$: تناژ رسوب کل روزانه در ماه مورد نظر j ، M :
 شاخص تعداد روزهای هر ماه، y : شاخص تعداد سال‌های آبی (از یک سال تا N)، Q_{styk} : بار کل رسوب سالیانه برای سال آبی k
 (تن)، $Q_{sti,k}$: بار رسوب روزانه در سال آبی k (تن) و N تعداد سال‌های آبی می‌باشد.

۳-۶- تعیین بار کل براساس آمار رسوب معلق

در شرایطی که ایستگاه آب‌سنجی فاقد آمار باربستر اندازه‌گیری شده باشد می‌توان با استفاده از روش‌های تجربی بار کل را (که شامل بار شسته نیز می‌باشد) با استفاده از آمار بار معلق موجود تعیین نمود.

- تعیین بار معلق براساس روش تحلیل آماری

براساس داده‌های آماری موجود همانگونه که قبلاً نیز توضیح داده شد مقدار بار معلق به‌صورت روزانه تعیین و سپس متوسط بار معلق سالیانه برای دوره آماری از رابطه زیر مشخص می‌گردد.

$$Q_{syk} = \sum_{i=1}^{365} Q_{si,k} \quad k=1,2,\dots,N \quad (۴-۶)$$

$$\bar{Q}_{sy} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{sy,k} / N \right) \dots \dots k=1,2,\dots,N \quad (۵-۶)$$

که در این روابط:

Q_{syk} : بار رسوب سالیانه برای سال آبی k (تن)، $Q_{si,k}$: بار رسوب روزانه در سال آبی k (تن)، N : تعداد سال‌های آبی و $\bar{Q}_{sy}$ متوسط بار رسوب معلق سالیانه در دوره آماری مورد نظر (تن) می‌باشد.

- تعیین بار بستر از بار معلق

در شرایط عدم وجود آمار باربستر به‌صورت نسبتی از بار معلق در نظر گرفته می‌شود. در مبحث ۳-۵ نحوه تعیین باربستر از بار معلق به تفصیل تشریح گردیده و در این خصوص استفاده از نمودار تجربی (نمودار شکل ۳-۵) نیز ارائه شده است. با استفاده از نمودار مذکور متوسط بار بستر سالیانه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{Q}_{sby} = k \bar{Q}_{sy} \quad (۶-۶)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{sby}$: متوسط باربستر سالیانه (تن)، $\bar{Q}_{sy}$: متوسط بار معلق سالیانه (تن) و k نسبت باربستر به بار معلق می‌باشد که از نمودار شکل (۶-۲) به‌ازای شیب رودخانه به‌دست می‌آید.

- تعیین بارکل

متوسط بارکل سالانه از حاصل جمع باربستر و بار معلق مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{Q}_{sty} = \bar{Q}_{sy} + \bar{Q}_{sby} \quad (۶-۷)$$

که در این رابطه $\bar{Q}_{sty}$ متوسط بارکل سالیانه (تن) می‌باشد.

۶-۴ - تعیین بارکل با استفاده از معادلات تئوریک (با وجود آمار آبدهی)

برای تعیین بارکل در شرایطی که داده‌های آماری آبدهی وجود دارد می‌توان از معادلات تئوریک استفاده کرد. مراحل محاسباتی در زیر ارائه شده است (در این روش‌ها بارشسته منظور نشده است).

۶-۴-۱ - بررسی آمار آبدهی و انتخاب دوره آماری

تعیین بارکل برای اهداف مهندسی مستلزم بهره‌گیری از داده‌های بده جریان روزانه در یک دوره آماری چندساله می‌باشد. بدین منظور با بررسی مقادیر آبدهی روزانه دوره آماری مناسب انتخاب و مبنای تعیین بارکل قرار می‌گیرد. دوره آماری انتخابی شامل سال‌هایی است که در آن سری داده‌ها کامل بوده و برای روزهای متوالی مقادیر آبدهی روزانه ثبت شده است.

۶-۴-۲ - بررسی معادلات انتقال رسوب و انتخاب معادله مناسب

تاکنون معادلات مختلفی برای تعیین بارکل توسط محققین و متخصصین مسایل رسوب ارائه شده است که در زیر به معرفی معادلات متداول پرداخته می‌شود. به‌علاوه جزییات مربوط به محاسبه بارکل با استفاده از روش کلبی، روش انشتین و روش اصلاح شده انشتین همراه با مثال‌های کاربردی در قالب (راهنمای تعیین بارکل رسوب رودخانه‌ها به روش انشتین و کلبی نشریه شماره ۲۷۳ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور) منتشر گردیده و در این نوشتار از ذکر مجدد آنها خوداری می‌شود.

- روش انگلند-هانسن^۱

معادله انگلند-هانسن برای تعیین بارکل به‌صورت زیر ارائه شده است [۲۵]:

$$\frac{q_{st}}{[g(G_s - 1)d^3]^{0.5}} = \frac{0.13\gamma V^2}{Sh} F_s^{2.5} \quad (۶-۸)$$

$$Q_{st} = 8.64bq_{st} \quad (۶-۹)$$

که در این رابطه:

q_{st} : بارکل در واحد عرض (نیوتن در ثانیه در متر)، b : عرض مجرا (متر) و Q_{st} بارکل (تن در روز) می باشد. بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

– روش ایکرز – وایت^۱

روش ایکرز – وایت برای تعیین بارکل به صورت زیر ارائه شده است [۲۵،۲۰]:

$$C_{st} = \frac{G_s d}{h} \left(\frac{V}{U_*} \right)^n G_{gr} \quad (۱۰-۶)$$

$$G_{gr} = k \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (۱۱-۶)$$

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{[g(G_s - 1)d]^{0.5}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log \frac{10h}{d}} \right]^{1-n} \quad (۱۲-۶)$$

$$d_{gr} = d \left[\frac{g(G_s - 1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (۱۳-۶)$$

در صورتی که محدوده $1 < d_{gr} \leq 60$ باشد مقادیر A ، n ، k عبارتند از:

$$n = 1.00 - 0.56 \log d_{gr}$$

$$A = 0.23 d_{gr}^{-0.5} + 0.14$$

$$m = \frac{9.66}{d_{gr}} + 1.34$$

$$\log k = 2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53$$

برای حالتی که $d_{gr} > 60$ باشد مقادیر پارامترهای معادلات عبارتند از:

$$n = 0 \quad \text{و} \quad A = 0.17 \quad \text{و} \quad m = 1.5 \quad \text{و} \quad k = 0.025$$

در روابط فوق C_{st} غلظت وزنی بارکل و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

بارکل (Q_{st}) برحسب تن در روز از رابطه زیر به دست می آید:

$$Q_{st} = 8.64 * 10^4 Q_d C_{st} \quad (۱۴-۶)$$

که در این رابطه γ وزن مخصوص آب (نیوتن بر مترمکعب) و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

– روش یانگ^۲

یانگ دو رابطه، یکی برای نرخ انتقال ماسه و دیگری برای نرخ انتقال شن به صورت زیر ارائه نموده که از جمع مقادیر حاصل از دو رابطه می توان بارکل (بارمواد بستر) جریان رودخانه را تعیین نمود [۲۵،۲۰].

- رابطه نرخ انتقال ماسه (برای اندازه دانه های ۰.۰۶۲ تا ۲ میلی متر):

1 - Ackers – White

2 - Yang

$$\log C_{tss} = 5.435 - 0.286 \log \frac{wd}{v} - 0.457 \log \frac{U_*}{w} \quad (۱۵-۶)$$

$$+ ((1.799 - 0.409 \log \frac{wd}{v} - 0.314 \log \frac{U_*}{w}) \log (\frac{V \cdot S}{w} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w}))$$

در صورتی که محدوده $0 < 1.2 < \frac{U_* d}{v}$ باشد مقدار $\frac{V_{cr}}{w}$ از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{V_{cr}}{w} = \frac{2.5}{\log(U_* d / v) - 0.06} + 0.06$$

و برای $\frac{U_* d}{v} \geq 70$ مقدار $\frac{V_{cr}}{w} = 2.05$ خواهد بود.

که در روابط فوق:

C_{tss} : غلظت ماسه (باربستر و بار معلق) بر حسب میلی گرم در لیتر، V_{cr} : سرعت آستانه حرکت مواد رسوبی (متر در ثانیه) و بقیه عوامل قبلاً تعریف شده‌اند.

• رابطه نرخ انتقال شن (اندازه دانه‌های ۲ تا ۶۴ میلی متر):

$$\log C_{tsg} = (6.681 - 0.633 \log \frac{wd}{v} - 4.816 \log \frac{U_*}{w}) \quad (۱۶-۶)$$

$$+ ((2.784 - 0.305 \log \frac{wd}{v} - 0.282 \log \frac{U_*}{w}) \log (\frac{VS}{w} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w}))$$

که در این رابطه C_{tsg} غلظت شن (میلی گرم در لیتر) می‌باشد، بقیه عوامل قبلاً تعریف شده‌اند.

با مشخص شدن غلظت ماسه و شن غلظت بارکل (C_{st}) از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C_{st} = C_{tss} + C_{tsg} \quad (۱۷-۶)$$

براساس کمیت C_{st} مقدار بارکل بر حسب تن در روز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_{st} = 0.0864 Q_d C_{st} \quad (۱۸-۶)$$

پارامترهای معادله قبلاً تعریف شده‌اند.

- روش لارسن^۱

معادله لارسن برای تعیین بارکل به صورت زیر می‌باشد [۲۵، ۲۰]:

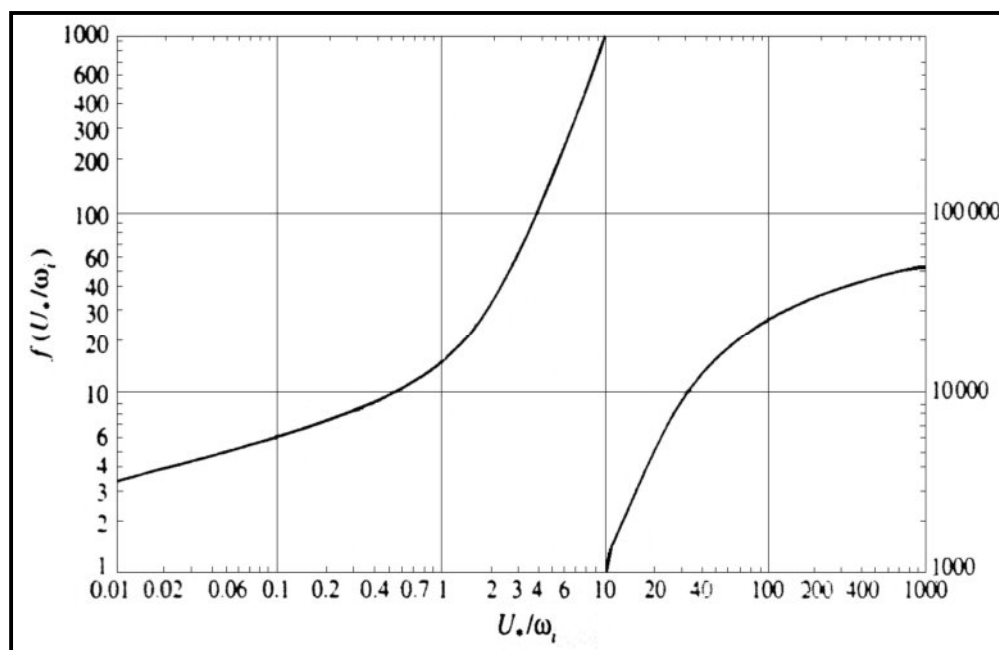
$$C_{st} = 0.01 \gamma \sum_i P_i \left(\frac{d_i}{h} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{cr}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{w_i} \right) \quad (۱۹-۶)$$

$$\tau' = 18 V^2 \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1/3} \quad (۲۰-۶)$$

$$Q_{st} = 8.64 Q_d C_{st} \quad (۲۱-۶)$$

که در روابط فوق:

C_{st} : غلظت بارکل (نیوتن بر مترمکعب)، d_i : اندازه دانه‌های بستر در کلاس i (متر)، p_i : درصد دانه‌های بستر در کلاس i ، τ : تنش برشی موثر (نیوتن بر مترمربع)، w_i : سرعت سقوط دانه‌ها در کلاس i (متر در ثانیه)، Q_{st} : بارکل رسوب (تن در روز) و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. تابع $f(\frac{U_*}{w_i})$ با استفاده از گراف ارائه شده در شکل (۱-۶) تعیین می‌شود.



شکل ۱-۶- نمودار لارسن برای تعیین تابع $f(\frac{U_*}{w_i})$ [۲۵]

– روش باگنولد^۱

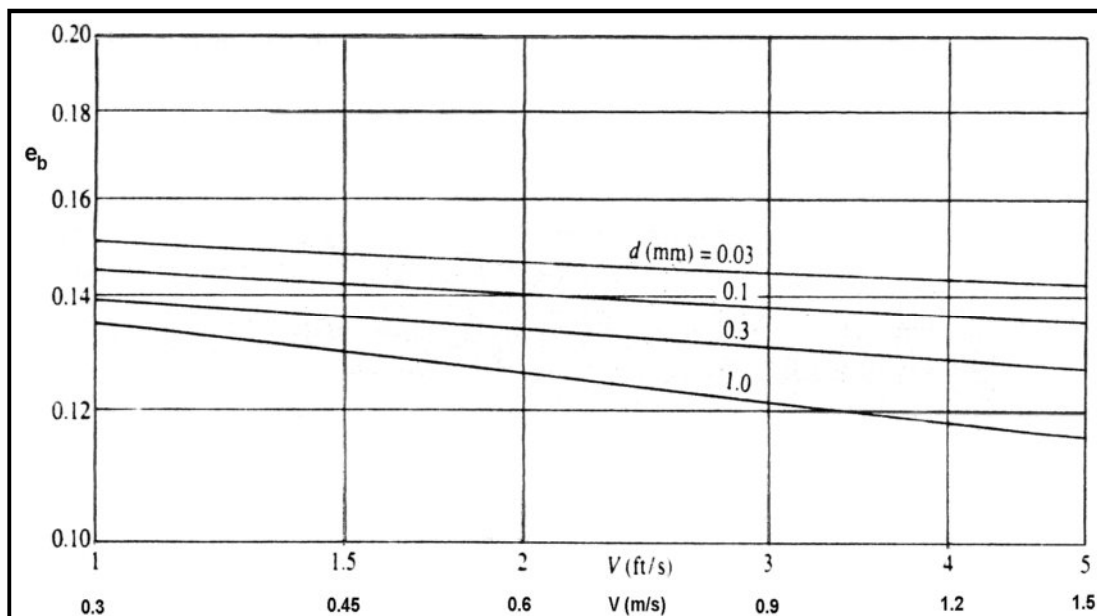
معادله باگنولد برای تعیین بارکل به صورت زیر ارائه شده است [۲۵، ۲۰]:

$$q_{st} = \frac{1}{(G_s - 1)} \tau V \left(\frac{e_b}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{V}{w} \right) \quad (۲۲-۶)$$

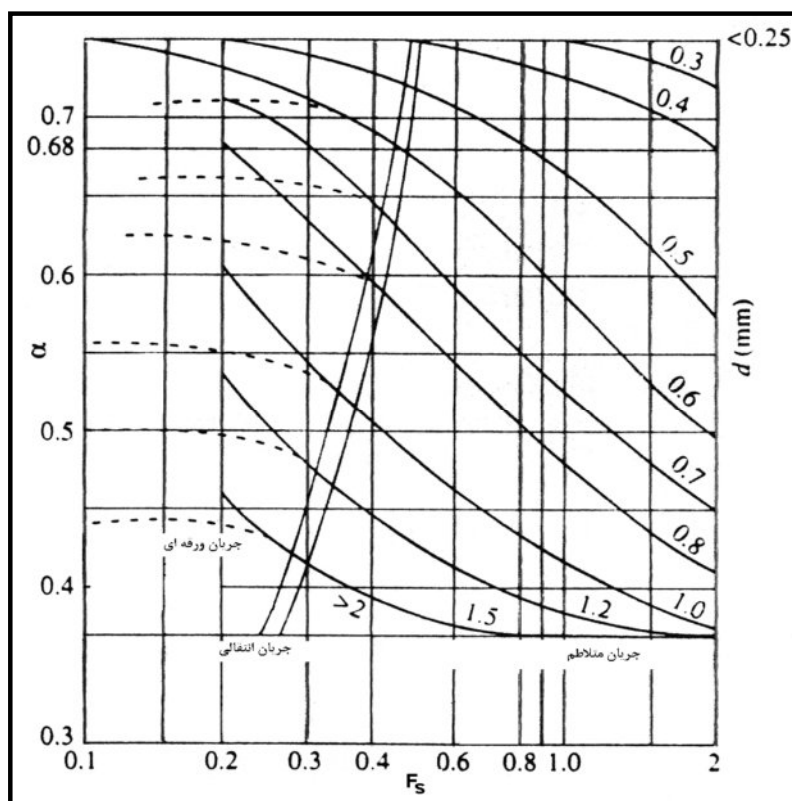
$$Q_{st} = 8.64 b q_{st} \quad (۲۳-۶)$$

که در این روابط:

q_{st} : بارکل در واحد عرض (نیوتن در ثانیه در متر)، Q_{st} : بارکل (تن در روز)، b : عرض رودخانه، e_b : ضریب تصحیح که از نمودار شکل (۲-۷) نمودار تعیین ضریب تصحیح e_b در روش باگنولد تعیین می‌شود، α : پارامتری که از نمودار شکل (۳-۶) نمودار تعیین پارامتر α در روش باگنولد تعیین می‌شود، بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.



شکل ۶-۲- نمودار تعیین ضریب تصحیح e_b در روش باگنولد [۲۵]



شکل ۶-۳- نمودار تعیین پارامتر α در روش باگنولد [۲۵]

به‌منظور معرفی نحوه استفاده از معادلات بارکل مثال کاربردی ارائه می‌شود (پیوست).

۳-۴-۶- اندازه‌گیری‌های میدانی

در صورت عدم وجود داده‌های آماری همان‌طوری‌که در مبحث ۴-۵ تشریح شده است (۴-۵) تعیین باریستر از معادلات تئوریک با فرض وجود آمار آبدی (امکان تعیین بارکل با استفاده از سری داده‌های آبدی و انجام اندازه‌گیری‌های میدانی فراهم می‌شود. نظر به این‌که جزییات تهیه این‌گونه اطلاعات قبلاً در مبحث ۴-۵ توضیح داده شده در این‌جا به ذکر عناوین اکتفا می‌شود:

- مقطع‌برداری و تعیین مشخصات هندسی مقطع
- نمونه‌برداری مواد بستر و تعیین توزیع دانه‌بندی
- تعیین مشخصات هیدرولیک جریان
- تعیین بارکل

با مشخص شدن خصوصیات دانه‌بندی مواد بستر و همچنین با انجام مقطع‌برداری و تعیین مشخصات هندسی و هیدرولیکی مورد نیاز امکان تعیین بارکل فراهم می‌شود. بدین منظور لازم است با استفاده از معادلات تئوریک براساس روابط ارائه شده نسبت به تعیین بارکل اقدام نمود. در این خصوص مثال کاربردی ۶ می‌تواند به‌عنوان راهنمای محاسبات مورد استفاده قرار بگیرد.

- تعیین بارکل روزانه، ماهانه و سالانه

که با در دست داشتن آمار آبدی روزانه در ایستگاه مورد نظر امکان محاسبه بارکل با استفاده از معادلات مختلف ارائه شده برای روزهای متوالی مطابق آنچه که در رابطه زیر مشخص شده است فراهم می‌گردد. براساس مقادیر بارکل روزانه، بار رسوبی ماهانه و همچنین سالانه نیز برای هر سال آبی مطابق روابط ارائه شده در زیر تعیین می‌شود:

$$Q_{sti} = 8.64bq_{sti} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (24-6)$$

که در این رابطه:

Q_{sti} : تناژ بارکل روزانه، q_{sti} : بارکل در واحد عرض (نیوتن در ثانیه در متر) و i شاخص روز از ۱ تا ۳۶۵ برای یک سال آبی می‌باشد. به عبارتی برای تعیین تناژ بارکل روزانه لازم است نخست آمار آبدی روزانه مشخص گردد و سپس از معادله (معادلات بارکل) رسوب‌دهی روزانه برای هر سال آبی و برای دوره آماری چند ساله تکمیل شود.

- تعیین تناژ بارکل ماهانه

مقدار رسوب ماهانه از حاصل جمع مقادیر رسوب‌دهی روزانه (Q_{sti}) حاصل می‌شود. رسوب ماهانه برای ماه‌های مهر تا شهریور و برای هر سال آبی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Q_{stmj,y} = \sum_{i=1}^M Q_{sti,j} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad M = 30(29, 31) \quad y = 1, 2, \dots, N \quad (25-6)$$

که در این رابطه $Q_{stmj,y}$: بارکل ماهانه در ماه مورد نظر j و سال مورد نظر y (تن)، $Q_{sti,j}$: تناژ رسوب روزانه در ماه مورد نظر j ؛ M : شاخص تعداد روزهای هر ماه و y شاخص تعداد سال‌های آبی (از یک سال تا N) می‌باشد (در خصوص شیوه تعیین رسوب‌دهی ماهانه به فصل ۴ روش‌های محاسبه بار معلق مراجعه شود).

- تعیین تناژ بارکل سالیانه

رسوب سالیانه معرف مقدار بار رسوبی حمل شده در یک سال آبی است و از مجموع رسوب روزانه مطابق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$Q_{styk} = \sum_{i=1}^{365} Q_{sti,k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (26-6)$$

که در رابطه فوق:

Q_{styk} : بارکل رسوب سالیانه برای سال آبی k (تن)، $Q_{sti,k}$: بارکل رسوب روزانه در سال آبی k (تن) و N تعداد سال‌های آبی می‌باشد. در کارهای مهندسی علاوه بر کمیت رسوب برای یک سال مورد نظر لازم است متوسط آورد رسوب سالیانه دوره آماری نیز مشخص شود. همچنین متوسط آورد رسوب ماهانه دوره آماری از جمله داده‌های پایه‌ای برای اهداف مطالعاتی است. متوسط بار رسوبی ماهانه از میانگین‌گیری رسوب ماهانه در دوره آماری حاصل می‌شود.

$$\bar{Q}_{stm,j} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{stm,k} / N \right) j \quad (27-6)$$

که در این رابطه:

$\bar{Q}_{stm,j}$: متوسط بار رسوب کل ماهانه برای ماه مورد نظر (تن)، $Q_{stm,k}$: بار رسوب کل ماهانه در سال آبی مورد نظر که از یک تا N تغییر می‌کند و j شاخص ماهانه می‌باشد که از ۱ تا ۱۲ متغیر است. متوسط بار رسوب کل سالیانه در دوره آماری نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{Q}_{sty} = \left(\sum_{k=1}^N Q_{sty,k} / N \right) \quad (28-6)$$

که در این رابطه $\bar{Q}_{sty}$ متوسط بار رسوب کل سالیانه در دوره آماری مورد نظر (تن) و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

۵-۶- تعیین بارکل (بارمواد بستر) با استفاده از مدل ریاضی فرسایش و رسوب

استفاده از مدل‌های ریاضی برای تعیین بارکل از جمله راهکارهای متداولی است که امروزه در عرصه مهندسی رسوب از جایگاه مهمی برخوردار می‌باشد. مدل‌های ریاضی مورد استفاده در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها دارای تنوع و قابلیت‌های گوناگونی هستند که بررسی و ارائه ویژگی‌ها و دامنه کاربرد هریک از آنها مستلزم تدوین نشریه راهنمای مستقلی است، از این‌رو در این راهنما از پرداختن به مدل‌های ریاضی خودداری شده است. در عین حال برای آشنایی کلی عناوین و مشخصات عمومی بعضی از مدل‌های ریاضی مورد استفاده در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها درج می‌شود. شایسته ذکر است کاربرد اصلی این‌گونه مدل‌ها شبیه‌سازی فرآیند فرسایش و رسوب‌گذاری در مسیر رودخانه‌ها و یا داخل مخازن سدها می‌باشد و از این‌رو لازم است مقدار بارکل حمل شده توسط جریان (شامل باریستر و بار معلق) توسط مدل شبیه‌سازی شود.

جدول ۶-۱- مواردی از مدل‌های ریاضی متداول در تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها [۴۲]

ویژگی‌ها	نام مدل				
	SEFLOW	MIKE-11	MOBED	GSTARS	HEC-6
نوع مدل	یک‌بعدی	یک‌بعدی	یک‌بعدی	شبه دوبعدی	یک‌بعدی
نوع جریان	غیر ماندگار	ماندگار و غیرماندگار	غیرماندگار	ماندگار	ماندگار
نوع رسوب	درشت دانه و ریزدانه	درشت دانه و ریزدانه	درشت دانه	درشت دانه و ریزدانه	درشت دانه و ریزدانه

۶-۶- تعیین بار کل در شرایط عدم وجود آمار (روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک)

در مواردی که محدوده مطالعاتی فاقد داده‌های آماری است با استفاده از روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک می‌توان متوسط بار کل سالیانه را بر آورد نمود. در این روش نیز که جزییات آن در مبحث ۵-۵ تشریح شده است (۵-۵ تعیین بار بستر در شرایط عدم وجود آمار) بار کل با استفاده از شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب‌ها برای دوره برگشت‌های مختلف تعیین می‌گردد. نظر به این که جزییات تهیه این‌گونه اطلاعات قبلاً در مبحث ۵-۵ توضیح داده شده در اینجا به ذکر عناوین اکتفا شده است (شایان ذکر است از این روش در تعیین بار معلق نیز در مبحث ۴-۴ استفاده شده از این رو با توجه به مشابهت کامل الگوی محاسباتی برای توضیح مبانی به این مبحث ارجاع داده می‌شود)

الف- استخراج پارامترهای هیدرولوژی (عینا مشابه مبحث ۵-۵)

- مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز
- تعیین تیپ بارندگی و هیدروگراف واحد حوضه آبریز
- استخراج هیدروگراف سیلاب‌های دوره برگشتی

ب- استخراج پارامترهای هیدرولیکی (عینا مشابه مبحث ۵-۵)

هیدروگراف سیلاب‌های به دست آمده از روش هیدرولوژیک امکان تعیین پارامترهای هیدرولیکی نظیر سرعت جریان، عمق، تنش برشی و نظایر آن را برای بده‌های مختلف فراهم می‌کند. بدین منظور لازم است اندازه‌گیری‌های میدانی مشابه آنچه در مبحث ۴-۵ بیان گردید از جمله نمونه‌برداری و تعیین دانه‌بندی مواد بستر، مقطع‌برداری و تعیین مشخصات هندسی و همچنین تعیین شیب رودخانه در محدوده مطالعاتی انجام گیرد.

ج- محاسبه بار کل سالیانه

مقدار بار کل حمل شده توسط سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف با توجه به اطلاعات میدانی نظیر دانه‌بندی و مشخصات هندسی مقطع رودخانه و همچنین بهره‌گیری از پارامترهای هیدرولیک جریان و استفاده از روابط ارائه شده در مبحث ۴-۶ نظیر روش انگلند- هانسن، یانگ و... محاسبه می‌گردد. با مشخص شدن بار کل حمل شده برای سیلاب‌های مختلف متوسط بار کل سالیانه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{Q}_{\text{styr}} = 0.4Q_{\text{st}2} + 0.06Q_{\text{st}10} + 0.02Q_{\text{st}25} + 0.01Q_{\text{st}50} + 0.01Q_{\text{st}100} \quad (۲۹-۶)$$

که در رابطه فوق Q_{styr} : متوسط بار کل سالیانه (تن) و $Q_{\text{st}2}$ تا $Q_{\text{st}100}$ به ترتیب بار کل حاصل از سیلاب‌های ۲ تا ۱۰۰ سال (تن) می‌باشد.

فصل ۷

روش‌های برآورد رسوب‌گذاری در

مخازن سدها

۷-۱- کلیات

تعیین رسوب ورودی به مخزن سد و نحوه توزیع آن و همچنین میزان رسوب تله‌اندازی شده و رسوب خروجی از مخزن، از جمله مباحث مهم در مطالعات رسوب رودخانه‌ها می‌باشد. به دلیل نقش و اهمیت پدیده رسوب‌گذاری در بهره‌برداری از مخازن و تاثیر آن در عمر مفید سد، تعیین میزان رسوب ورودی به مخزن از اهمیت و حساسیت زیادی برخوردار می‌باشد. در این راستا برای تشریح جنبه‌های مختلف این مساله و فراهم آوردن زمینه لازم برای پرداختن به مباحث گسترده موضوع رسوب‌گذاری در مخازن، نشریات مستقلى توسط دفتر طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو تهیه شده است. از این رو در نشریه حاضر از پرداختن به مقوله برآورد رسوب‌گذاری در مخازن سدها خودداری شده است. در این رابطه تاکنون نشریات زیر تدوین شده است:

- ۱- تعیین حجم رسوبات و توزیع آن در مخازن سدها، نشریه شماره ۲۲۱، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، ۱۳۸۰.
- ۲- پیش‌نویس استاندارد راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها، نشریه شماره ۳۰۹-الف، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو.
- ۳- راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها، نشریه شماره ۳۲۸-الف، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو.

فصل ۸

**توصیه روش‌های محاسبه باربستر و
بار معلق و بار کل برای انواع
رودخانه‌ها**

۸-۱- کلیات

۸-۱-۱- بررسی انواع رودخانه‌ها از دیدگاه انتقال رسوب

انتقال رسوب در رودخانه‌ها به تبعیت از ترکیب دانه‌بندی بستر، مشخصه‌های هندسی، شرایط توپوگرافی و ویژگی‌های هیدرولیک جریان متفاوت است. در رودخانه‌های کوهستانی که عرض مجرا کم‌تر و شیب طولی نیز بیش‌تر است ترکیب دانه‌بندی عموماً از نوع شن درشت و قلوه‌سنگ بوده و مواد رسوبی به‌صورت باربستر انتقال می‌یابد. در رودخانه‌های شریانی که حدفاصل بین ناحیه کوهستانی پرسیب و محدوده دشتی کم شیب قرار دارند عرض رودخانه افزایش یافته و دانه‌بندی بستر نیز دارای بافت شن و ماسه‌ای است. انتقال رسوب در این رودخانه‌ها به‌صورت ترکیبی از باربستر و بار معلق بوده و با توجه به غالب بودن مواد درشت دانه سهم باربستر بیش‌تر از بار معلق است. رودخانه‌های شریانی در ادامه مسیر خود در ناحیه دشتی کم‌شیب حالت پیچانرودی (ماندری) به‌خود گرفته و در ترکیب دانه‌بندی بستر آنها سیلت و ماسه ریز عمومیت پیدا می‌کند. در این رودخانه‌ها به‌دلیل ریزدانه بودن بستر سهم بار معلق به‌مراتب بیش‌تر از باربستر می‌باشد [۶، ۱۶، ۲۵].

۸-۱-۲- روش‌های مناسب محاسبه بار بستر و بارکل در رودخانه‌های مختلف

تعیین باربستر و بارکل در رودخانه‌های مختلف تابعی از شرایط انتقال رسوب و داده‌های آماری موجود در ایستگاه‌های آب‌سنجی می‌باشد. در رودخانه‌های کوهستانی استفاده از معادلات باربستر روش مناسبی برای محاسبه بار رسوبی تلقی می‌شود. اندازه‌گیری بار بستر در بازه‌های کوهستانی به‌خصوص در شرایط سیلابی که بخش عمده‌ای از مواد رسوبی را منتقل می‌کند به‌دلیل سرعت زیاد جریان و جابجا شدن قطعات درشت سنگ و لاشه سنگ و همچنین حاکم بودن حالت فوق بحرانی به آسانی میسر نمی‌باشد. از این‌رو برای چنین رودخانه‌هایی استفاده از روش‌های محاسباتی را می‌توان راهکار مناسب و به بیانی از جمله روش‌های عملی و ممکن برای تعیین باربستر عنوان نمود. در جدول (۸-۱) روش‌های مناسب برای تعیین بار بستر در رودخانه‌های کوهستانی درج شده است. در این جدول استفاده از نسبت بار بستر به بار معلق نیز به‌عنوان راهکاری برای تعیین بار بستر معرفی شده است. شایان ذکر است در رودخانه‌های کوهستانی هرچند اندازه‌گیری باربستر مشکل است ولی امکان اندازه‌گیری بار معلق به دست آمده از فرسایش خاک حوضه و کناره‌های رودخانه که عموماً متعلق به کلاس ریزدانه‌ها می‌باشد میسر می‌باشد [۱۱، ۳۰، ۴۲].

جدول ۸-۱- روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین باربستر در رودخانه‌های کوهستانی

نام معادله یا روش	مرجع
مایر- پیتر- مولر، شوکلیچ، اسمارت	۱۱، ۲۶، ۲۱
استفاده از نسبت باربستر به بار معلق (مبحث ۶-۳) و روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک (مبحث ۵-۵)	۳۰، ۱۲

برای رودخانه‌های شریانی که دارای ترکیب دانه‌بندی شن و ماسه هستند با توجه به امکان انتقال بخشی از ماسه به‌حالت معلق استفاده از معادلاتی که بار مواد بستر یا بارکل را محاسبه می‌کند مناسب‌تر است. ضمن آن‌که در این رودخانه‌ها اندازه‌گیری مستقیم بار بستر نیز امکان‌پذیر بوده و به‌عنوان یک راهکار عملی در اولویت می‌باشد. در جدول (۸-۲) روش‌های مناسب تعیین بار بستر با استفاده از معادلات انتقال و سایر روش‌های مبتنی بر داده‌های آماری برای رودخانه‌های شریانی ارائه شده است.

جدول ۸-۲- روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین باریستر در رودخانه‌های شریانی

نام معادله یا روش	مرجع	ملاحظات
مایر- پیتز- مولر، شوکلیچ، اسمارت، یانگ (انتقال شن) در صورتی که درصد ماسه در مقایسه با شن کمتر باشد	۱۱، ۲۶	- در صورت وجود داده‌های اندازه‌گیری شده بارمواد بستر بهتر است نتایج به دست آمده از معادلات مختلف با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه و معادله مناسب انتخاب شود. - در صورت عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری شده بهتر است از میانگین مقادیر حاصل از معادلات تئوریک استفاده شود
روتز، کالینسک، انشتین براون، یانگ، در صورتی که درصد ماسه در مقایسه با شن بیش‌تر باشد		
ایکرز- وایت، یانگ، انشتین، برای بسترهای ماسه‌ای		
استفاده از نسبت باریستر به بار معلق (مبحث ۵-۳) و روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک (مبحث ۵-۵ و ۶-۶)	۳۰، ۱۱	

در رودخانه‌هایی که ترکیب دانه‌بندی بستر ریزدانه بوده و مقدار بار معلق بیش‌تر از باریستر می‌باشد (عموما رودخانه‌های پیچان‌رودی)، لازم است از معادلات بارمواد بستر یا بارکل و سایر روش‌های مناسب با توجه به وضعیت داده‌های آماری موجود مطابق جدول (۸-۳) استفاده شود.

جدول ۸-۳- روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین بار مواد بستر یا بارکل در رودخانه‌ها

نام معادله یا روش	مرجع	ملاحظات
انگلند- هانسن، لارسن، انشتین، باگنول، برای بسترهای با دانه‌بندی ماسه و سیلت	۱۰، ۲۶	- در صورت وجود داده‌های اندازه‌گیری شده بارمواد بستر بهتر است نتایج به دست آمده از معادلات مختلف با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه و معادله مناسب انتخاب شود. - در صورت عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری شده بهتر است از میانگین مقادیر حاصل از معادلات تئوریک استفاده شود
روش اصلاح شده انشتین، روش کلبی، تافلتی برای بسترهای با دانه‌بندی ماسه‌ریز، سیلت و رس		
استفاده از نسبت باریستر به بار معلق (مبحث ۵-۳) و روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک (مبحث ۶-۶)	۳۰، ۱۲	

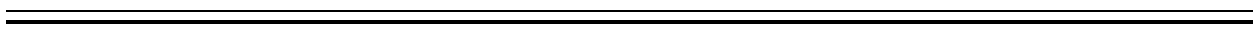
۸-۱-۳- روش‌های مناسب محاسبه بار معلق در رودخانه‌های مختلف

فرآیند انتقال بار معلق در رودخانه‌های مختلف همان‌طوری که در مبحث ۳-۲ تشریح گردیده است دارای دو مشخصه اصلی می‌باشد. بخشی از بار معلق حاصل اختلاط مواد رسوبی موجود در بستر با جریان آب است که اصطلاحاً بار معلق بستری به آن اطلاق می‌شود. بخش دیگری نیز در اثر فرسایش خاک حوضه همراه با رواناب سطحی از طریق شبکه آبراهه‌ها وارد رودخانه می‌شود. این بخش از بار معلق که ترکیبی از رس و سیلت ریز می‌باشد به‌عنوان بارشسته شناخته می‌شود. در مناطق خشک و نیمه خشک نظیر ایران کاهش پوشش گیاهی و عوامل متعدد دیگر ناپایداری و فرسایش خاک حوضه‌ها را تشدید نموده و از این‌رو بارشسته سهم عمده‌ای از بار معلق رودخانه را به‌خود اختصاص می‌دهد [۲۲]. تعیین مقدار بارشسته صرفاً با نمونه‌برداری و اندازه‌گیری غلظت مواد معلق امکان‌پذیر بوده و استفاده از روش‌های هیدرولیکی به‌دلیل چسبندگی بین ذرات رسوب و ملکول‌های آب و تشکیل مخلوط همگن امکان‌پذیر نمی‌باشد. با عنایت به موارد مذکور روش‌های مناسب برای تعیین بار معلق در رودخانه‌های مختلف در جدول (۸-۴) درج شده است [۲۲، ۳۰، ۳۶].

جدول ۸-۴ - روش‌های مناسب توصیه شده برای تعیین بار معلق در رودخانه‌ها

نام معادله یا روش	مرجع	ملاحظات
روش منحنی سنج رسوب و معادله نمایی یا روش منحنی بده کلاسه (مبحث ۴-۲) در صورت وجود آمار آبدهی و رسوب معلق. این روش برای انواع رودخانه‌های کوهستانی، شریانی و پیچانرودی راهکار مناسبی تلقی می‌شود.	۲۲، ۱۲	
روش ایستگاه مینا و یا روش فلمینگ در صورت وجود آمار آبدهی (مبحث ۴-۳ و ۴-۳-۱) برای انواع رودخانه‌ها		
استفاده از معادلات تثوریک نظیر معادله راس، روش انشتین و ... برای رودخانه‌های شریانی با بستر ماسه‌ای و پیچانرودی با بستر ماسه‌ای و سیلت در صورت وجود آمار آبدهی (مبحث ۴-۳-۳)	۲۵، ۲۲، ۳	بهتر است از میانگین مقادیر به دست آمده از معادلات تثوریک استفاده شود
استفاده از روش هیدرولوژی و نمودار لانگبین و شوم (مبحث ۴-۴-۱) برای انواع رودخانه‌ها در صورت عدم وجود آمار	۱۲	
استفاده از روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک (مبحث ۴-۴-۲) برای رودخانه‌های شریانی با بستر ماسه‌ای و پیچانرودی با بستر ماسه‌ای و سیلت در صورت عدم وجود آمار آبدهی	۲۰	

پیوست



پ.۱- مثال کاربردی ۱ تعیین بار معلق روزانه با استفاده از معادلات تئوریک

بار رسوب معلق روزانه را برای رودخانه مفروض براساس روش راس، لین و کالینسک، بروکس، چانگ و انشتین تعیین نمایید. داده‌های مورد نیاز در جدول (پ.۱) ارائه شده است.

جدول پ.۱- داده‌های مورد نیاز برای تعیین بار معلق رودخانه

ویسکوزیته سینماتیک	وزن مخصوص آب	غلظت مینا	قطر نظیر ۶۵ درصد	* سرعت سقوط دانه	قطر نظیر ۵۰ درصد	شتاب ثقل	شیب رودخانه	ضریب مانینگ	فاصله تا سطح مینا	عمق	بده جریان در واحد عرض	عرض رودخانه
ν	γ_w	C_a	D_{65}	w	D_{50}	g	S	n	a	D	q	B
m^2/s	N/m^3	ppm	mm	m/s	mm	m/s^2	-	$m^{-1/3}s$	m	m	$m^3/s-m$	m
۰/۰۰۰۰۱	۱۰۴	۱۰۰	۰/۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۶	۹۸۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲۴	۰/۲۵	۵	۵	۲۰۰

* براساس نمودار رابی - شکل (۴-۱۳) برای D_{50}

ppm معرف غلظت وزنی بوده و مخفف (part per million) یا مقدار وزن رسوب در یک میلیون واحد وزن آب می‌باشد. برای آب ppm معادل میلی گرم در لیتر (mg/l) نیز تلقی می‌شود. چنانچه C_a به صورت وزن نسبی معرفی شود در این صورت: $C_a = 100/10^6$ و یا $C_a = 0.0001$ خواهد بود (مقدار وزن رسوب در واحد وزن آب) که با عنوان غلظت وزنی (concentration by weight) و یا غلظت وزنی خشک (concentration by dry weight) نیز نامیده می‌شود.

- روش راس

در این روش لازم است تغییرات غلظت (C) نسبت به عمق (y) مشخص و غلظت متوسط ($\bar{C}$) محاسبه شود.

$$C_i = C_a \left(\frac{D-y}{y} \times \frac{a}{D-a} \right)^z$$

$$C_i = 100 \left(\frac{5-y}{y} \times \frac{0.25}{5-0.25} \right)^{0.321}$$

پارامتر Z به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} \quad \text{و} \quad \tau_0 = \gamma_w Ds = 10^4 \times 5 \times 10^{-4} = 5 \text{ N/m}^2$$

$$w = \gamma_w / g = 10^4 / 9.81 = 1019.4, \quad U_* = \sqrt{5/019.4} = 0.07 \text{ m/sp}$$

$$Z = \frac{w}{kU_*} = \frac{0.009}{0.4 \times 0.07} = 0.321$$

برای تعیین غلظت نسبت به عمق لازم است جدول (پ.۲) محاسباتی تشکیل شود:

جدول پ.۲- تعیین غلظت متوسط در روش راس

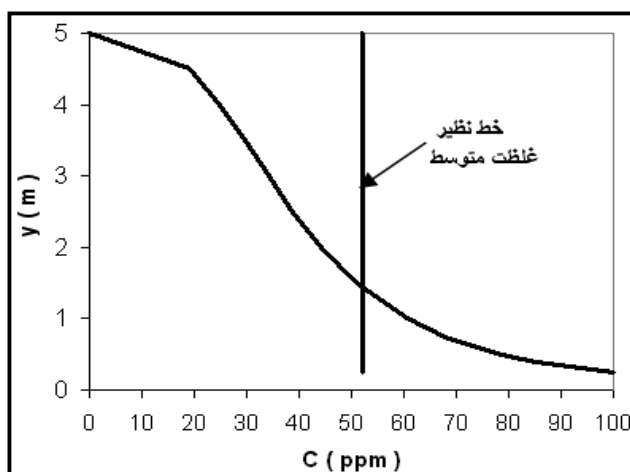
Ci (PPm)	y (m)
0	y=D=5
19.2	4.5
24.9	4
29.61	3.5
34.12	3
38.86	2.5
44.26	2
51.01	1.5
60.64	1
67.82	0.75
78.67	0.5
85.11	0.4
94	C (ppm)
100	y = a = 0.25

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^N C_i / N = 728.2032 / 14 = 52.01 \text{ ppm}$$

مطابق جدول فوق پس از مشخص کردن مقادیر y که دارای دامنه تغییرات از a تا D می باشد مقدار C برای عمق های مورد نظر از رابطه راس محاسبه می شود. مطابق جدول غلظت مواد معلق در سطح آب (y = D = 5 m) برابر با صفر و در ارتفاع از مبنا (a = 0.25 m) دارای حداکثر برابر با C_a بوده و مقدار $\bar{C}$ برابر با $\bar{C} = 52.01 \text{ ppm}$ می باشد. با معلوم شدن $\bar{C}$ بار رسوب معلق روزانه از رابطه زیر تعیین می شود:

$$Q_s = 0.0864 \bar{C} Q_d = 0.0864 \times 52.02 \times (5 \times 200) = 4495 \text{ ton / day}$$

همراه با جدول محاسباتی نمودار توزیع غلظت نیز به منظور نمایش ترسیمی روند تغییرات C بر حسب عمق نشان داده شده است. مطابق شکل غلظت در نزدیکی بستر حداکثر بوده و در نزدیکی سطح آب کاهش می یابد.



شکل پ.۱- نمودار توزیع عمقی غلظت و غلظت متوسط در روش راس

- روش بروکس

$$\frac{q_s}{\gamma_w q C_{md}} = F(k \frac{V}{U_*}, Z_1)$$

$$Z = 0.321 A = B \times D = 200 \times 5 = 1000 \text{ m}^2 \quad Q = q \times B = 5 \times 200 = 1000 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{و} \quad Z_1 = 0.321 \quad (\text{از شکل ۴-۱۸})$$

$$V = Q / A = 1000 / 1000 = 1 \text{ m/s} \quad (\text{سرعت متوسط جریان آب})$$

$$K \frac{V}{U_*} = 0.4 \times 1 / 0.07 = 5.71$$

$$C_{md} = C_a \left(\frac{a}{D-a} \right)^{Z_1} = 100 \left(\frac{0.25}{5-0.25} \right)^{0.321} = 38.86 \text{ ppm}$$

$$(C_{md}) = 38.86 / 10^6 = 3.886 \times 10^{-5} \quad (\text{غلظت وزنی})$$

$$F = 1.1 \quad \text{مقدار } F \text{ از نمودار شکل (۴-۱۷) بر حسب } k \frac{V}{U_*} \text{ و } Z_1 \text{ برابر است با } 1.1$$

$$q_s = 10^4 \times 5 \times 3.886 \times 10^{-5} = 1.943 \text{ N/s-m} \quad \frac{q_s}{\gamma_w q C_{md}} = 1.1$$

$$Q_s = 8.64 q_s B = 8.64 \times 1.943 \times 200 = 335 \text{ ton/day}$$

- روش لین و کالینسک

$$q_s = \gamma_w q C_a P_L \text{Exp} \left(\frac{15 w a}{U_* D} \right)$$

$$\frac{n}{D^{1/6}} = \frac{0.024}{5^{1/6}} = 0.018$$

$$\frac{w}{U_*} = \frac{0.009}{0.07} = 0.128$$

$$\text{از شکل (۴-۱۹) برای } \frac{n}{D^{1/6}} \text{ و } \frac{w}{U_*} \text{ مقدار } P_L = 0.33 \text{ به دست می آید.}$$

$$q_s = 10^4 \times 5 \times 0.0001 \times 0.33 \times \text{EXP} \left(\frac{15 \times 0.009 \times 0.25}{0.07 \times 5} \right) = 1.817 \text{ N/s-m}$$

$$Q_s = 8.64 q_s B = 8.64 \times 1.817 \times 200 = 3140 \text{ ton/day}$$

- روش چانگ، سیمونس و ریچاردسون

$$q_s = \gamma_w D C_a \left(V I_1 - \frac{2 U_*}{k} I_2 \right)$$

$$\xi_s = \frac{a}{D} = \frac{0.25}{5} = 0.05$$

$$\beta = Z / Z_1 = \frac{0.321}{0.321} = 1$$

$$Z_2 = \frac{2W}{\beta U \times K} = \frac{2 \times 0.09}{1 \times 0.07 \times 0.4} = 6.43$$

براساس ξ_a و Z_2 مقادیر I_1 و I_2 از شکل (۲۰-۴) و شکل (۲۱-۴) برابر است با:

$$I_1 = 0.031 \quad \text{و} \quad I_2 = 0.021$$

$$q_s = 10^4 \times 5 \times 0.0001(1 \times 0.031 - \frac{2 \times 0.07}{0.4} \times 0.021) = 0.12 \text{ N/s-m}$$

$$Q_s = 8.64 q_s B = 8.64 \times 0.12 \times 200 = 207 \text{ ton/day}$$

- روش انشتین

$$q_s = 11.6 U_* \gamma_w C_a \left[(2.303 \log \frac{30.2 D x}{d_{65}}) I_1 + I_2 \right]$$

برای تعیین x لازم است K_S / δ یا (db_5 / δ) مشخص شود:

$$\delta = 11.6 V / U_* = 11.6 \times 10^{-6} / 0.07 = 1.66 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$K_S / \delta = \frac{d_{65}}{\delta} = 0.11 \times 10^{-3} / 1.66 \times 10^{-4} = 0.662$$

$$x = 1.55$$

(از شکل ۲۲-۵)

$$A = \frac{2d_{65}}{D} = \frac{2 \times 0.11 \times 10^{-3}}{5} = 4.4 \times 10^{-5}$$

از نمودار شکل (۲۳-۴) و شکل (۲۴-۴) برای مقادیر A و Z پارامتر I_1 و I_2 برابر است با:

$$I_1 = 2.5 \times 10^2 \quad \text{و} \quad I_2 = -3.3 \times 10^2$$

$$a = 2d_{65} = 2 \times 0.11 \times 10^{-3} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$q_s = 11.6 \times 0.07 \times 10^4 \times 0.0001 \times 2.2 \times 10^{-4} \left[(2.303 \log \frac{30.2 \times 5 \times 1.55}{0.11 \times 10^{-3}}) 2.5 \times 10^2 - 3.3 \times 10^2 \right]$$

$$q_s = 0.592 \text{ N/s-m}$$

$$Q_s = 8.64 \times q_s B = 8.64 \times 0.592 \times 200 = 1023 \text{ ton/day}$$

در جدول (پ.۳) مقادیر به دست آمده از روش های مختلف به همراه غلظت متوسط جریان ($\bar{C}$) درج شده است:

جدول پ.۳- مقایسه مقادیر بار معلق روزانه به دست آمده از روش های مختلف

نام روش	راس	بروکس	لین و کالینسک	چانگ و همکاران	انشتین
Q_s (ton/day)	4495	3358	3140	207	1023
q_s (N/s-m)	22.475	16.79	15.7	1.035	5.115
$\bar{C}$ (ppm)	52.025	38.86	36.34	2.4	11.84

مقدار $\bar{C}$ از رابطه $\bar{C} = 11.577 Q_s / Q_d$ تعیین می شود که در آن $\bar{C}$ بر حسب ppm و Q_s ، Q_d (Ton/day) و Q_d بده روزانه)

می باشد. (m^3/s)

مطابق مندرجات جدول مقادیر ارزیابی شده از روش‌های راس، بروکس و لین و کالینسک هم‌خوانی بیش‌تری نسبت به روش انشتین و چانگ دارند. در روش انشتین و چانگ مقدار بار معلق به‌طور محسوس کمتر از روش‌های دیگر است. انشتین نیز ارزیابی دست‌پایینی را نشان می‌دهد. در عمل دقت روش‌های محاسبه بار معلق از مقایسه با اندازه‌گیرهای میدانی مشخص می‌شود.

پ.۲- مثال کاربردی ۲ تعیین غلظت مبنا

برای رودخانه مفروض مشخصات هیدرولیک جریان، خصوصیات دانه‌بندی و ویژگی‌های فیزیکی آب در جدول (پ.۴) ارائه شده است. غلظت مبنا را براساس روش وان‌راین تعیین نمایید.

جدول پ.۴- خصوصیات هیدرولیک جریان، دانه‌بندی و مشخصه‌های فیزیکی آب در مثال کاربردی ۲

خصوصیات هیدرولیک جریان						خصوصیات دانه‌بندی				خصوصیات فیزیکی آب		
عرض رودخانه	بده جریان در واحد عرض	عمق	فاصله تا سطح مبنا	سرعت متوسط جریان	شیب رودخانه	شتاب ثقل	قطر نظیر 50 در صد	سرعت سقوط دانه رسوب	قطر نظیر 90 در صد	چگالی دانه‌ها	وزن مخصوص آب	ویسکوزیته سینماتیکی
B	q	D	a	V	S	g	D ₅₀	w	D ₉₀	G _s	w _γ	ν
m	m ³ /s-m	m	m	m/s	-	m/s ²	mm	m/s	mm	-	N/m ³	m ² /s
400	18.6	12	.21	1.55	7.6*10 ⁻⁵	9.81	0.4	.05	1.5	2.65	10 ⁴	10 ⁻⁶

حل:

$$C_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \times \frac{T^{1.5}}{D_*}$$

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(G_s - 1)g}{V^2} \right)^{1/3} = 0.4 \times 10^{-3} \left(\frac{(2.65 - 1)9.81}{(10^{-6})^2} \right)^{1/3} = 10.1$$

$$C' = 18 \log \left(\frac{12D}{3d_{90}} \right) = 18 \log \left(\frac{12 \times 12}{3 \times 1.5 \times 10^{-3}} \right) = 81$$

$$\tau'_0 = \gamma_w \left(\frac{U}{C'} \right)^2 = 10^4 \left(\frac{1.55}{81} \right)^2 = 3.66 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{cr} = 0.23 \text{ N/m}^2$$

(از نمودار شکل (۴-۲۶) برای دمای 20⁰ T)

$$T = \frac{\tau'_0 - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} = \frac{3.66 - 0.23}{0.23} = 14.91$$

$$a = 0.3d_{50}D_*^{0.7}T^{0.5} = 0.3 \times 0.4 \times 10^{-3} \times (10.1)^{0.7} \times 14.9^{0.5} = 2.33/10^{-4} \text{ m}$$

$$C_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^3} = 0.015 \times \frac{0.4 \times 10^{-3}}{2.33 \times 10^{-4}} \times \frac{14.9^{1.5}}{10.1^3} = 0.0014$$

مقادیر محاسبه شده برای C_a از روش فوق به‌صورت حجمی بوده (مترمکعب مواد رسوبی در یک مترمکعب حجم آب) و برای تبدیل آن به غلظت وزنی نظیر (mg/l) لازم است ضریب تبدیل به‌صورت زیر اعمال شود:

$$C_a = 0.00014 \times 2.65 \times 10^6 = 3710 (\text{mg/l})$$

پ.۳- مثال کاربردی ۳ تعیین متوسط بار معلق سالیانه رودخانه با روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک

برای رودخانه‌ای با مشخصات داده شده در جدول (پ.۵) و جدول (پ.۶) متوسط بار معلق سالیانه را با استفاده از روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک تعیین نمایید.

جدول پ.۵- داده‌های مورد نیاز برای تعیین بار معلق رودخانه در شرایط عدم وجود داده‌های آماری بده جریان

ویسکوزیته سینماتیکی	وزن مخصوص آب	چگالی دانه‌ها	قطر نظیر 90 در صد	سرعت سقوط دانه رسوب	قطر نظیر 50 در صد	شتاب ثقل	شیب رودخانه
ν	$\frac{w}{\gamma}$	G_s	D_{90}	w	D_{50}	g	S
m^2/s	N/m^3	-	mm	m/s	mm	m/s^2	-
10^{-6}	10^4	2.65	2.5	.065	0.5	9.81	0.002

جدول پ.۶- مشخصات فیزیوگرافی و پارامترهای هیدروگراف واحد حوضه آبریز مورد نظر

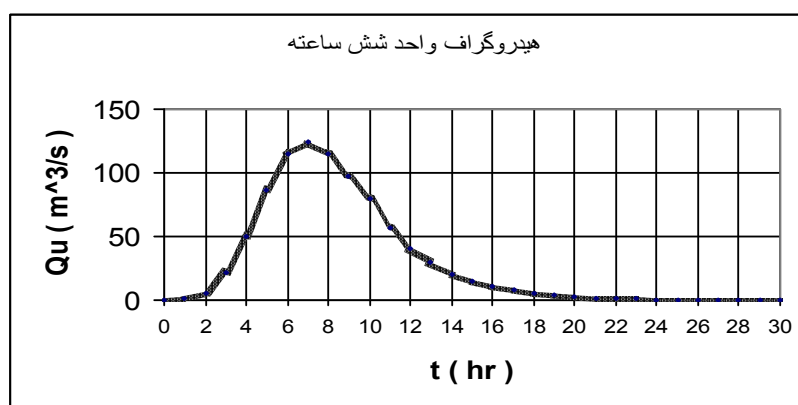
پارامترهای هیدروگراف واحد SCS				مشخصات فیزیوگرافی			
بده حداکثر	زمان وقوع بده حداکثر	مدت بارش واحد	زمان تاخیر	زمان تمرکز	اختلاف ارتفاع بلندترین و پایین‌ترین نقطه حوضه آبریز	طول رودخانه	مساحت حوضه آبریز
Q_p	T_p	t_r	t_l	t_c	ΔH	L	A
(m^3/s)	(hr)	(hr)	(hr)	(hr)	(m)	(Km)	(Km^2)
200	4.1	1	3.6	6	555	45	394

پ.۳-۱- گام‌های محاسباتی

پ.۳-۱-۱- بررسی‌های هیدرولوژی

- تعیین شکل هیدروگراف واحد

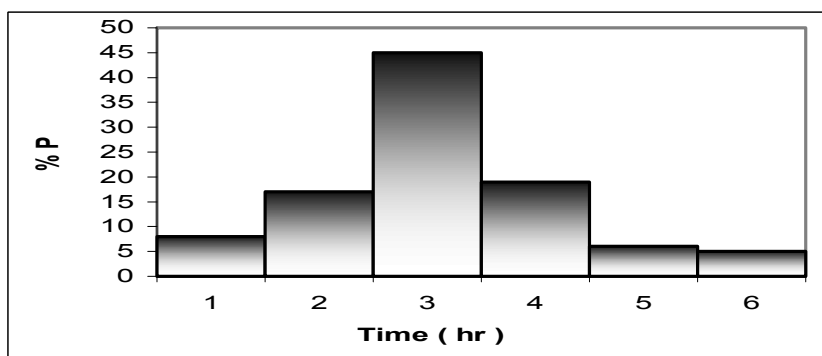
با در نظر گرفتن مشخصات مندرج در جدول (پ.۶) و با استفاده از نسبت‌های مندرج در جدول (پ.۱۰)، شکل هیدروگراف واحد حوضه آبریز تعیین و در زیر ارائه شده است. این هیدروگراف واحد به تبعیت از طول مدت زمان تمرکز ($t_c = 6 \text{ hr}$) شش ساعته می‌باشد.



شکل پ.۲- هیدروگراف واحد شش ساعته برای حوضه آبریز مورد نظر

– تعیین مدت بارندگی و الگوی توزیع بارش

مدت بارندگی برای محاسبه سیلاب و استخراج هیدروگراف‌ها برابر با زمان تمرکز حوضه آبریز و معادل شش ساعت انتخاب و توزیع زمانی آن یا هیتوگرام رگبار براساس الگوی SCS (منحنی شکل (۴-۳۲)) مشخص و در شکل (پ.۳) ارائه شده است.



شکل پ.۳- الگوی توزیع بارش شش ساعته یا هیتوگرام رگبار در حوضه آبریز مورد نظر

– تعیین بارندگی متوسط حوضه آبریز (P) و بارندگی موثر (P_e) برای دوره بازگشت‌های مختلف

کمیت سیلاب با مقدار بارندگی رابطه مستقیم دارد. مقدار بارندگی برای دوره بازگشت‌های مختلف به روش تحلیل آماری تعیین می‌شود (جزئیات مربوط به تحلیل آماری داده‌های بارندگی و رگبارها در منابع مختلف از جمله [۲۹] و [۲۷] تشریح شده است). در جدول (پ.۷) مقادیر بارندگی برای دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال که مورد نیاز محاسبه بار معلق سالیانه رودخانه می‌باشد درج شده است. مطابق این جدول برای تعیین P_e (بارش موثر) لازم است ضریب جریان سطحی حوضه آبریز (C) مشخص شود. مقدار C با توجه به نوع کاربری اراضی و شیب حوضه آبریز برای دوره بازگشت‌های مختلف از جدول (پ.۸) تعیین می‌شود [۲۹]. برای حوضه آبریز مورد نظر با فرض مناطق مرتعی و پوشش گیاهی پراکنده و شیب متوسط ۲ تا ۷ درصد مقادیر C از جدول (پ.۸) انتخاب و سپس مقدار P_e برای هر دوره بازگشت محاسبه شده است ($P_e = CP$).

جدول پ.۷- مقادیر بارندگی برای دوره بازگشت‌های مختلف برای بارش شش ساعته

مقدار بارندگی موثر در هر گام زمانی (میلی‌متر)						بارندگی موثر حوضه (mm)	ضریب جریان سطحی	بارندگی متوسط حوضه (mm)	دوره بازگشت (yr)
P_{e6}	P_{e5}	P_{e4}	P_{e3}	P_{e2}	P_{e1}	P_e	C	P	
0.35	0.42	1.33	3.15	1.19	0.56	7.00	0.33	21.2	2
0.69	0.83	2.64	6.24	2.36	1.11	13.9	0.38	36.5	10
0.96	1.15	3.65	8.64	3.26	1.54	19.2	0.42	45.7	25
1.17	1.40	4.43	10.49	3.96	1.86	23.3	0.45	51.8	50
1.38	1.66	5.24	12.42	4.69	2.21	27.6	0.49	56.33	100

جدول پ.۸- ضریب جریان برای سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف [۲۹]

نوع کاربری	2	5	10	25	50	100	500
اراضی مزروعی							
0-2% شیب کم	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
2-7% شیب متوسط	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
7% بیش‌تر از شیب زیاد	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
مناطق مرتعی و پوشش گیاهی پراکنده							
0-2% شیب کم	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
2-7% شیب متوسط	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
7% بیش‌تر از شیب زیاد	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
اراضی با پوشش جنگلی							
0-2% شیب کم	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
2-7% شیب متوسط	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
7% بیش‌تر از شیب زیاد	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

- توزیع بارندگی موثر برای گام‌های زمانی مختلف

پس از مشخص شدن P_e مقدار بارندگی موثر در هر گام زمانی یک ساعته نیز (P_{e1} تا P_{e6} مندرج در جدول (پ.۷)) براساس الگوی توزیع بارش شکل (پ.۳) تعیین می‌شود.
به‌عنوان مثال برای دوره بازگشت دو سال داریم:

$$P_{e1} = \%P \times P_e = (8/100) \times 7 = 0.56 \text{ mm}$$

$$P_{e2} = \%P \times P_e = (17/100) \times 7 = 1.19 \text{ mm}$$

$$P_{e3} = \%P \times P_e (45/100) \times 7 = 3.15 \text{ mm}$$

$$P_{e4} = \%P \times P_e (19/100) \times 7 = 1.33 \text{ mm}$$

$$P_{e5} = \%P \times P_e (6/100) \times 7 = 0.42 \text{ mm}$$

$$P_{e6} = \%P \times P_e (5/100) \times 7 = 0.35 \text{ mm}$$

در روابط فوق $\%P$ مشخص‌کننده درصد بارش موثر در گام زمانی مورد نظر است که از شکل (پ.۳) استخراج می‌شود. مقادیر بارندگی (P_{e1} تا P_{e6}) با استفاده از الگوی فوق محاسبه و در جدول (پ.۷) درج شده است.

- نحوه استخراج هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف

با استفاده از هیدروگراف واحد حوضه آبریز که مقادیر Q_u (بده جریان هیدروگراف واحد) آن بر حسب زمان در جدول (پ.۹) ارائه شده است و با در نظر گرفتن بارش موثر در هر گام زمانی (از جدول پ.۷ مقادیر بارندگی)، مقادیر سیلاب حاصل از بارندگی موثر برای هر گام زمانی (شامل Q_1 تا Q_6 مندرج در جدول (پ.۹)) محاسبه و از جمع مقادیر شش‌گانه بده سیلاب و تغییرات زمانی آن (از ۱ تا ۲۷ ساعت) و به‌عبارتی هیدروگراف سیلاب برای هر یک از دوره بازگشت‌ها تعیین می‌شود. در جدول (پ.۹) مراحل محاسباتی به‌عنوان نمونه برای سیل دو سال درج شده است.

جدول پ.۹- نحوه استخراج هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف (دو سال) برای حوضه آبریز موردنظر

تجمعی (m ³ /s) بده سیلاب	بده سیلاب در هر گام زمانی (m ³ /s)						Q _u	t
Q	Q6	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	(m ³ /s)	(hr)
0						0	0	0
1.03					0	1.03	18.4	1
5.81				0	2.19	3.62	64.6	2
21.22			0	5.80	7.69	7.74	138.2	3
49.87		0	2.45	20.35	16.45	10.63	189.8	4
86.68	0	0.77	8.59	43.53	22.59	11.20	200	5
114.77	0.64	2.71	18.38	59.79	23.80	9.44	168.6	6
123.75	2.26	5.80	25.24	63.00	20.06	7.38	131.8	7
114.75	4.84	7.97	26.60	53.11	15.68	6.55	117	8
96.73	6.64	8.40	22.42	41.52	13.92	3.82	68.2	9
79.43	7.00	7.08	17.53	36.86	8.12	2.84	50.8	10
56.59	5.90	5.54	15.56	21.48	6.05	2.06	36.8	11
40.42	4.61	4.91	9.07	16.00	4.38	1.44	25.8	12
29.41	4.10	2.86	6.76	11.59	3.07	1.03	18.4	13
20.61	2.39	2.13	4.89	8.13	2.19	0.87	15.6	14
14.98	1.78	1.55	3.43	5.80	1.86	0.57	10.2	15
11.36	1.29	1.08	2.45	4.91	1.21	0.41	7.4	16
8.20	0.90	0.77	2.07	3.21	0.88	0.36	6.4	17
5.95	0.64	0.66	1.36	2.33	0.76	0.20	3.6	18
4.54	0.55	0.43	0.98	2.02	0.43	0.13	2.4	19
3.02	0.36	0.31	0.85	1.13	0.29	0.08	1.4	20
1.99	0.26	0.27	0.48	0.76	0.17	0.06	1	21
1.28	0.22	0.15	0.32	0.44	0.12	0.02	0.4	22
0.79	0.13	0.10	0.19	0.32	0.05	0.01	0.2	23
0.43	0.08	0.06	0.13	0.13	0.02	0.01	0.1	24
0.22	0.05	0.04	0.05	0.06	0.01	0	0	25
0.11	0.04	0.02	0.03	0.03	0			26
0.04	0.01	0.01	0.01	0				27

با استفاده از الگوی جدول فوق مقادیر بده جریان سیلاب برای دوره بازگشت‌های مختلف ۲ تا سال تعیین و در جدول (پ.۱۰) درج شده است.

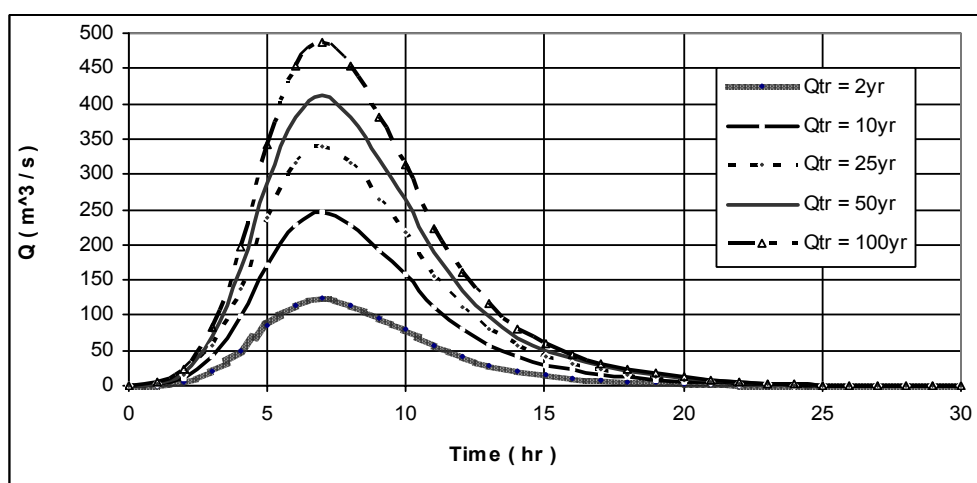
جدول پ.۱۰- مقادیر بده جریان سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف برای تعیین بار رسوبی (m³/s)

دوره بازگشت (سال)					t (hr)
100	50	25	10	2	
4.06	3.43	2.83	2.04	1.03	1
22.90	19.33	15.93	11.50	5.81	2
83.68	70.64	58.21	42.02	21.22	3
196.63	166.00	136.80	98.74	49.87	4
341.78	288.54	237.77	171.63	86.68	5
452.50	382.01	314.80	227.24	114.77	6
487.93	411.92	339.45	245.03	123.75	7
452.45	381.97	314.77	227.21	114.75	8
381.37	321.96	265.32	191.52	96.73	9
313.16	264.38	217.87	157.26	79.43	10
223.11	188.35	155.22	112.04	56.59	11
159.38	134.55	110.88	80.04	40.42	12

جدول پ.۱۰- مقادیر بده جریان سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف برای تعیین بار رسوبی ()

دوره بازگشت (سال)					t (hr)
100	50	25	10	2	
115.95	97.89	80.67	58.23	29.41	13
81.24	68.59	56.52	40.80	20.61	14
59.06	49.86	41.09	29.66	14.98	15
44.79	37.82	31.16	22.49	11.36	16
32.34	27.30	22.50	16.24	8.20	17
23.46	19.81	16.32	11.78	5.95	18
17.89	15.10	12.45	8.98	4.54	19
11.90	10.04	8.28	5.97	3.02	20
7.83	6.61	5.45	3.93	1.99	21
5.03	4.25	3.50	2.53	1.28	22
3.10	2.62	2.16	1.56	0.79	23
1.70	1.44	1.18	0.85	0.43	24
0.86	0.73	0.60	0.43	0.22	25
0.43	0.37	0.30	0.22	0.11	26
0.14	0.12	0.10	0.07	0.04	27

همچنین در شکل (پ.۴) هیدروگراف سیل با دوره‌های بازگشت‌های مختلف مورد استفاده در تعیین بار رسوبی معلق (مستخرج از جدول (پ.۱۰)) نمایش داده شده‌اند.



شکل پ.۴- هیدروگراف سیلاب به دست آمده از روش هیدروگراف واحد برای دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه آبریز مورد نظر

پ.۳-۱-۲- محاسبات هیدرولیک جریان

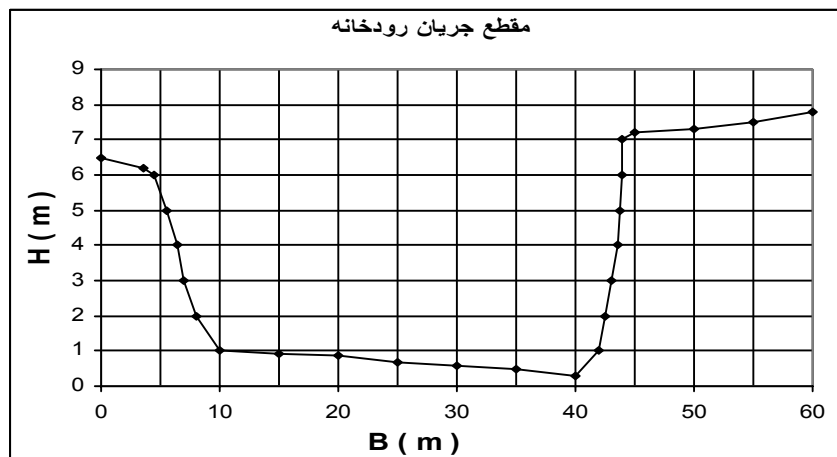
تعیین مشخصه‌های هیدرولیک جریان در شرایط عدم وجود داده‌های آماری آبدهی با استفاده از مقطع هندسی رودخانه و با بهره‌گیری از معادله مانینگ انجام می‌گیرد. در شکل (پ.۵) مقطع هندسی رودخانه مورد نظر نشان داده شده است. معادله مانینگ برای تعیین بده جریان به صورت زیر می‌باشد:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{پ.۱})$$

که در این رابطه:

Q: بده جریان، A: سطح مقطع جریان به ازای عمق مورد نظر (m^2)، R: شعاع هیدرولیکی یا نسبت مساحت سطح مقطع جریان به محیط تر شده (m)، S: شیب رودخانه (شیب خط انرژی) در محدوده مورد نظر و، n ضریب مانینگ می‌باشد که برای مثال

کاربردی $n = 0.035$ در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادله مانینگ و برای عمق‌های مختلف، مقادیر Q و سایر مشخصه‌های هیدرولیک جریان محاسبه و در جدول (پ.۱۱) درج شده است.



شکل پ.۵- مقطع جریان رودخانه برای تعیین بار رسوبی معلق

جدول پ.۱۱- مشخصات هیدرولیکی رودخانه برای محاسبه رسوب معلق

عمق	عرض	سطح مقطع	محیط تر شده	شعاع هیدرولیکی	بده جریان	بده در واحد عرض	سرعت جریان	ضریب شزی
D	B	A	P	R	Q	q	V	C'
(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	m ³ /s	m ³ /s-m	m/s	-
0.7	32	11.2	30.7	0.34	7	0.218	0.62	-
1.7	34.5	44.5	35	1.3	68	1.963	1.52	-
2.7	36	79.9	38	2.11	168	4.663	2.10	-
3.7	37	116	40.2	2.88	300	8.103	2.58	-
4.7	38.2	153.5	42.3	3.63	463	12.117	3.02	-
5.7	39.4	192.3	45	4.3	649	16.475	3.38	-

پ.۳-۱-۳- محاسبه بار رسوبی معلق

- تعیین غلظت مینا

با استفاده از مشخصات هیدرولیک جریان مندرج در جدول (پ.۱۱) و همچنین اندازه دانه‌های مواد بستر و خصوصیات فیزیکی آب (مندرج در جدول پ.۵) غلظت مینا (C_a) با بهره‌گیری از روش وان راین براساس (معادلات ۴-۴۹ تا ۴-۵۵ در مبحث ۴-۳-۵) برای بده‌های مختلف جریان تعیین و در جدول (پ.۱۲) درج شده است.

در جدول (پ.۱۲) مقادیر C_a به صورت حجمی (مترمکعب رسوب در یک مترمکعب حجم آب)، به صورت وزنی (mg/lit) یا ppm و همچنین N/m^3 معرفی شده است.

جدول پ.۱۲- محاسبه غلظت مینا، C_a ، به روش وان راین

C_a			a	T	τ_{cr}	τ'_0	D^*	Q
N/m^3	mg/l	m^3/m^3	m	-	N/m^2	N/m^2	-	m^3/s
0.46	46	1.717E-05	0.0017	4.0	0.26	1.3	12.52	7
2.57	257	9.687E-05	0.0042	22.3	0.26	6.1	12.52	68
4.45	445	1.679E-04	0.0055	38.6	0.26	10.3	12.52	168
6.30	630	2.377E-04	0.0065	54.7	0.26	14.5	12.52	300
8.15	815	3.077E-04	0.0074	70.8	0.26	18.7	12.52	463
9.81	981	3.703E-04	0.0081	85.3	0.26	22.4	12.52	649

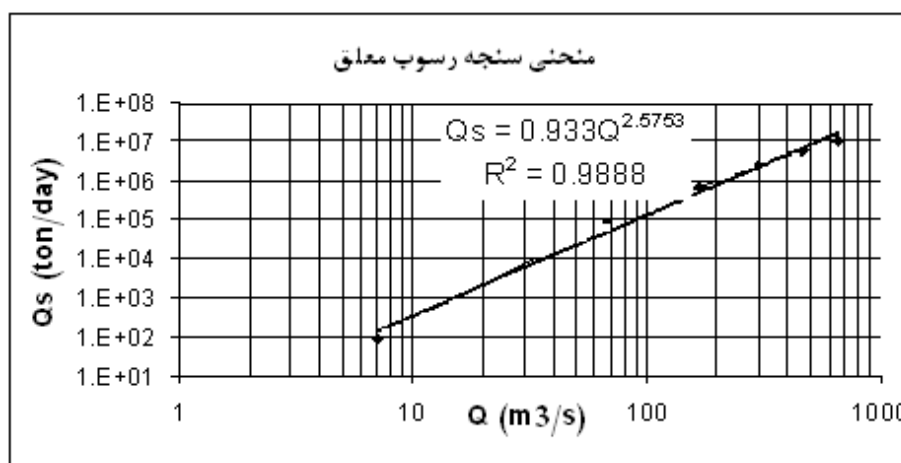
- تعیین منحنی سنجه رسوب و معادله نمایی آن

تعیین بار معلق به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف مستلزم تعیین بار رسوبی معلق روزانه برای مقادیر Q تعیین شده در محاسبات هیدرولیک جریان (جدول پ.۱۱) و ترسیم منحنی سنجه رسوب و تعیین معادله نمایی آن می‌باشد. در جدول (پ.۱۳) روند محاسبه Q_s با استفاده از روش بروکس (معادلات ۴-۳۷ تا ۴-۴۰ و نمودارهای شکل ۴-۱۷) و شکل ۴-۱۸)) برای Q های مختلف درج شده است. در شکل (پ.۶) منحنی سنجه رسوب و معادله نمایی آن با استفاده از مقادیر Q و Q_s نظیر از جدول (پ.۱۳) ترسیم و درج شده است. مطابق شکل معادله نمایی Q (m^3/s) و Q_s (ton/day) برای رودخانه مورد نظر به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_s = 0.933Q^{2.5753} \quad (\text{پ.۲})$$

جدول پ.۱۳- محاسبه رسوب معلق روزانه رودخانه به روش بروکس برای بده‌های مختلف جریان

بده جریان	تنش برشی	سرعت برشی	پارامتر	پارامتر	پارامتر	غلظت وزنی نظیر $0.5D$	پارامتر	بار رسوب در واحد عرض	بار معلق روزانه
Q	τ_0	U_*	kV/U^*	$Z = w/kU^*$	$Z1$	Cmd	F	qs	Qs
m^3/s	N/m^2	m/s				N/m^3		$N/s-m$	(ton/day)
7	6.8	0.082	3.05	1.99	1.80	9.5E-06	7.5	3.2E-01	8.93E+01
68	26	0.160	3.81	1.02	1.02	5.7E-03	2.2	3.2E+02	9.53E+04
168	42.2	0.203	4.13	0.80	0.80	3.1E-02	1.6	2.2E+03	6.96E+05
300	57.6	0.238	4.35	0.68	0.68	8.3E-02	1.5	7.8E+03	2.49E+06
463	72.6	0.267	4.52	0.61	0.61	1.6E-01	1.3	1.7E+04	5.61E+06
649	86	0.290	4.65	0.56	0.56	2.5E-01	1.2	3.0E+04	1.01E+07



شکل پ.۶- منحنی سنجه رسوب و معادله نمایی آن برای تعیین بار معلق به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌ها

– تعیین بار رسوبی معلق سالیانه

با تعیین C_a محاسبه بار رسوبی معلق با استفاده از معادلات مختلف مذکور در مبحث ۳-۳-۴ میسر می‌گردد. در این مثال کاربردی روش بروکس به عنوان نمونه برای تعیین Q_s به کار گرفته شده است. سایر روش‌ها نظیر روش راس، لین و کالینسک می‌تواند مبنای تعیین بار رسوبی معلق قرار گیرد.

برای تعیین بار رسوبی سالیانه لازم است نخست بار رسوبی حمل شده توسط هر یک از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف با استفاده از معادله نمایی (پ.۲) مطابق رابطه زیر تعیین شود:

$$Q_{str} = \Delta t \times \sum_{i=1}^n Q_{si} \quad (\text{پ.۳})$$

که در این رابطه:

Q_{si} : بار رسوبی در هر گام زمانی (ton/day) که با قراردادن بده جریان سیلاب از جدول (پ.۱۰) در معادله (پ.۲) سنجه رسوب حاصل می‌شود، Q_{str} : بار رسوبی حمل شده توسط هیدروگراف سیلاب برای دوره بازگشت مورد نظر (ton) و ΔT گام زمانی (day) می‌باشد. در جدول (پ.۱۴) نحوه محاسبه بار رسوبی معلق حمل شده توسط سیلاب‌های مختلف درج شده است در این جدول Q_{s2} الی Q_{s100} معرف مقدار بار رسوبی در گام زمانی و دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال می‌باشد. با مشخص شدن Q_{str} ، متوسط بار معلق سالیانه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$Q_{syr} = 0.4Q_{s2} + 0.06Q_{s10} + 0.02Q_{s25} + 0.01Q_{s50} + 0.01Q_{s100}$$

$$Q_{syr} = 0.4 \times (40319) + 0.06 \times (234162) + 0.02 \times (542097) + 0.01 \times (892267) + 0.01 \times (1380036)$$

$$Q_{syr} = 63743 (\text{ton/yr})$$

ذکر این نکته ضروری است که مقدار Q_{syr} به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌ها مشخص کننده بار رسوبی معلق برخواسته از بستر رودخانه می‌باشد (بار معلق بستری - در خصوص جزییات مربوط به بار معلق بستری به مبحث ۳-۲ مراجعه شود) و به عبارتی معادلات بار معلق ارائه شده در مبحث ۳-۳-۴ فقط بار معلق بستری را ارزیابی می‌کنند. با توجه به این واقعیت که بخش مهمی از بار معلق رودخانه به بار شسته تعلق دارد (در خصوص بار شسته به مبحث ۳-۲ مراجعه شود) لذا در ارزیابی بار معلق سالیانه رودخانه لازم است کمیت بار شسته نیز مد نظر قرار گیرد.

جدول پ.۱۴- تعیین بار رسوبی معلق به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف و متوسط بار رسوبی سالیانه رودخانه در حوضه آبریز مورد نظر

دوره برگشت (سال)					t
100	50	25	10	2	
$Q_{si} (\text{ton/day})$					(hr)
Q_{s100}	Q_{s50}	Q_{s25}	Q_{s10}	Q_{s2}	
34	22.3	13.5	5.9	1.0	1
2963	1915.6	1163.8	502.7	86.6	2
83399	53922.0	32760.4	14151.0	2436.6	3
752872	486772.0	295738.7	127746.0	21996.1	4
3126289	2021312.9	1228050.3	530463.0	91338.4	5

ادامه جدول پ. ۱۴- تعیین بار رسوبی معلق به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف و متوسط بار رسوبی سالیانه رودخانه در حوضه آبریز مورد نظر

دوره برگشت (سال)					t
100	50	25	10	2	
Q _{si} (ton/day)					(hr)
Q _{s100}	Q _{s50}	Q _{s25}	Q _{s10}	Q _{s2}	
6440188	4163925.1	2529796.1	1092759.2	188158.0	6
7820174	5056159.3	3071873.7	1326912.5	228475.9	7
6438367	4162747.9	2529080.9	1092450.2	188104.8	8
4145979	2680596.5	1628598.5	703482.0	121129.8	9
2495941	1613759.1	980440.6	423506.7	72922.0	10
1042368	673946.3	409456.6	176867.0	30454.0	11
438354	283419.1	172191.5	74379.0	12807.0	12
193202	124915.5	75892.5	32782.2	5644.6	13
77293	49974.3	30361.9	13115.0	2258.2	14
33998	21981.3	13354.7	5768.7	993.3	15
16683	10786.4	6553.3	2830.7	487.4	16
7210	4661.9	2832.3	1223.4	210.7	17
3154	2039.3	1239.0	535.2	92.1	18
1569	1014.7	616.5	266.3	45.9	19
549	354.7	215.5	93.1	16.0	20
187	120.7	73.3	31.7	5.5	21
60	38.7	23.5	10.2	1.8	22
17	11.1	6.8	2.9	0.5	23
4	2.4	1.4	0.6	0.1	24
1	0.4	0.3	0.1	0.1	25
1380036	892267	542097	234162	40319	Q _{Str} = ΔT * ΣQ _{si} (ton)
(ton/yr)	63743	Q _{sy} = 0.4*Q _{s2} + 0.06Q _{s10} + 0.02Q _{s25} + 0.01Q _{s50} + 0.01 Q _{s100}			
(ton/yr)	159358	Q _{st} = 0.6 Q _{st} + Q _{sy} , Q _{st} = (63743 / 0.4			

در مناطق خشک و نیمه‌خشک (نظیر ایران) براساس تجارب موجود مقدار بار شسته عموماً بیش از ۶۰ در صد بار معلق را به‌خود اختصاص می‌دهد. در این مثال کاربردی با فرض ۶۰ درصد، کمیت بار رسوبی معلق (شامل بار معلق بستری و بار شسته) از رابطه زیر تعیین شده است:

$$Q_{\text{styr}} = 0.6Q_{\text{styr}} + Q_{\text{sy}} = 0.6Q_{\text{styr}} + 63743$$

$$Q_{\text{styr}} = 159354(\text{ton / day})$$

متوسط بار رسوبی سالیانه رودخانه مورد نظر

Q_{sy}: بار معلق حاصل از مواد بستر رودخانه (بار معلق بستری)

0.6Q_{st}: بار شسته برای شرایط اقلیمایی خشک نظیر ایران معادل ۶۰ در صد (و بعضاً بیش‌تر) بار معلق کل فرض می‌شود.

Q_{styr}: بار معلق کل رودخانه شامل بار معلق بستری و بار شسته

پ.۴- مثال کاربردی ۴ تعیین باربستر از معادلات مختلف

باربستر حمل شده توسط رودخانه مفروض برابر با ۱۳۱۵ تن در روز اندازه‌گیری شده است. بده جریان روزانه (Q_d) برابر با ۹/۳ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. مقدار باربستر روزانه را با استفاده از معادلات دوبویز، شیلدز، کالینسک، مایر - پیتر - مولر (MPM)، شوکلیچ، انشتین - براون و روتنر تعیین و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه نمایید. اطلاعات هیدرولیک جریان و دانه‌بندی در جدول (پ.۱۵) داده شده است.

جدول پ.۱۵- جدول داده‌های مورد نیاز برای تعیین بار معلق رودخانه

ویسکوزیته سینماتیکی	وزن مخصوص آب	ضریب مانینگ	قطر نظیر 90 در صد	قطر نظیر 40 در صد	قطر نظیر 50 در صد	شتاب ثقل	شیب رودخانه	سرعت جریان	عمق	بده جریان در واحد عرض	عرض رودخانه
ν	γ_w	n	d_{90}	d_{40}	d_{50}	g	S	V	h	q	B
m^2/s	N/m^3	$m^{-1/3}/s$	Mm	mm	mm	m/s^2	-	m/s	m	$m^3/s-m$	m
10^{-6}	10^4	0.022	0.6	.25	.0283	9.81	1.44×10^{-3}	0.98	0.44	0.43	21.65

حل:

- معادله دوبویز

$$q_b = \frac{0.173}{d_{50}^{3/4}} \tau (\tau - \tau_c)$$

$$\tau = \gamma RS = (62.41 \text{ b/ft}^3)(21.65 \times 3.278 \times 0.44 \times 3.278 / (21.65 + 0.88) \times 3.278)(1.44 \times 10^{-3})$$

$$\tau = 0.1251 \text{ b/ft}^2$$

از نمودار شکل (۴-۶) برای $d_{50} = 0.283 \text{ mm}$ ، مقدار $\tau_c = 0.0181 \text{ b/ft}^2$ و

$$q_b = (0.173 / 0.283^{3/4}) 0.125 (0.125 - 0.018) = 1.061 \text{ b/s-ft} = 15.45 \text{ N/s-m}$$

مقدار باربستر برحسب تن در روز برابر است با:

$$Q_b = (86400)(15.45 \times 21.65)(10^{-4}) = 2890 \text{ ton/day}$$

- معادله شیلدز

$$q_b = \frac{q_s}{G_s} \left[10 \frac{(\tau - \tau_c)}{\gamma(G_s - 1)d_{50}} \right]$$

$$\tau = \gamma RS = (10^4 \text{ N/m}^3)(21.65 \times 0.44 / (21.65 + 0.888))(1.44 \times 10^{-3}) = 6.088 \text{ N/m}^2$$

از نمودار شکل (۵-۵) برای $d_{50} = 0.283 \text{ mm}$ ، مقدار $\tau_c = 0.89 \text{ N/m}^2$ و

$$q_b = (0.43(1.44 \times 10^{-3}) / (2.65)) [10(6.088 - 0.86) / 10^4 (2.65 - 1) 0.283 \times 10^{-3}] = 0.0026 \text{ m}^3/\text{s-m}$$

$$q_b = 68.9 \text{ N/s-m}$$

$$Q_b = 86400(68.9 \times 21.65)(10^{-4}) = 12888 \text{ ton/day}$$

- معادله کالینسک

$$\frac{q_b}{U \times d_{50}} = 10(F_s)^2$$

$$U_* = (\tau / \rho)^{0.5} = (6.088 / 1000)^{0.5} = 0.078 \text{ m/s}$$

$$F_s = \tau / \gamma(G_s - 1)d_{50} = 6.088 / 10^4 (2.65 - 1)0.283 \times 10^{-3} = 1.3$$

$$q_b = (0.078)(0.283 \times 10^{-3})(10 \times 1.3^2) = 3.73 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} - \text{m} = 9.88 \text{ N/m} - \text{s}$$

$$Q_b = 86400(9.88 \times 21.65)(10^{-4}) = 1848 \text{ ton/day}$$

- معادله MPM (مایر - پیتر - مولر)

$$\frac{q_b}{[g(G_s - 1)d_{50}^3]^{0.5}} = 8 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{1.5} F_s - 0.047 \right]^{1.5}$$

$$n' = 0.034(d_{90})^{1/6} = 0.034(0.6 \times 10^{-3})^{1/6} = 0.00987$$

$$q_b = (9.81(2.65 - 1)0.283^3)^{0.5} (8)[(0.00987 / 0.022)^{1.5} (1.3) - 0.047]^{1.5} = 4.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} - \text{m}$$

$$q_b = 1.25 \text{ N/s} - \text{m}$$

$$Q_b = 86400(1.25 \times 21.65)(10^{-4}) = 237 \text{ ton/day}$$

- معادله شوکلیچ

$$q_b = \frac{2.5}{G_s} S^{1.5} (q - q_c)$$

$$q_c = 0.26(G_s - 1)^{5/3} \frac{d_{40}^{1.5}}{S^{7/6}}$$

$$q_c = 0.26(2.65 - 1)^{1.667} (0.25 \times 10^{-3})^{1.5} / (1.44 \times 10^{-3})^{1.667} = 0.129 \text{ m}^3 / \text{s} - \text{m}$$

$$q_b = (2.5 / 2.65)(1.447 \times 10^{-3})^{1.5} (0.43 - 0.129) = 1.55 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} - \text{m} = 0.41 \text{ N/s} - \text{m}$$

$$Q_b = 86400(0.41 \times 21.65)(10^{-4}) = 77 \text{ ton/day}$$

- معادله انشتین - براون

$$\frac{q_b}{wd_{50}} = \varphi$$

برای تعیین سرعت سقوط دانه‌ها (w) از روابط (۶-۱۶) و (۶-۱۷) داریم،

$$w = G \sqrt{gd_{50}(G_s - 1)}$$

$$G = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd_{50}^3(G_s - 1)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd_{50}^3(G_s - 1)}}$$

$$G = [2/3 + 3.6 \times (10^{-6})^2 / 9.81 \times 0.000283^3 (2.65 - 1)]^{0.5}$$

$$- [36 \times (10^{-6})^2 / 9.81 \times 0.000283^3 (2.65 - 1)]^{0.5} = 0.5615$$

$$w = 0.5615 [9.81 \times 0.000283 (2.65 - 1)]^{0.5} = 0.038 \text{ m/s}$$

با توجه به مقدار $F_s = 1.3$ از نمودار شکل (۵-۶) مقدار Φ برابر با ۷۰ بوده و مقدار بار بستر برابر است با:

$$q_b = 0.038 \times 0.0003283 \times 70 = 0.00075 \text{ m}^3/\text{s} - \text{m} = 20 \text{ N/s} - \text{m}$$

$$Q_b = 86400(20 \times 21.65)(10^{-4}) = 3732 \text{ ton/day}$$

– معادله روتنر

$$\frac{q_b}{[g(G_s - 1)h^3]^{0.5}} = \left[\frac{V}{(g(G_s - 1)h)^{0.5}} (0.667(\frac{d_{50}}{h})^{2/3} + 0.14) - 0.778(\frac{d_{50}}{h})^{2/3} \right]^3$$

$$q_b = (9.81(2.65 - 1)0.447^3)^{0.5} [0.98/(9/81(2.65 - 1)0.44)^{0.5} (0.667(0.000283/0.44)^{2/3} + 0.14) - 0.778(0.000283/0.44)^{2/3}]^3$$

$$q_b = 1.251 \times 10^{-4} = 3.315 \text{ N/s} - \text{m}$$

$$Q_b = 86400(3.31 \times 21.65)(10^{-4}) = 619 \text{ ton/day}$$

– مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف

نتایج حاصل از معادلات مختلف در جدول (پ.۱۶) با بار بستر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند:

جدول پ.۱۶ – مقایسه مقادیر باربستر محاسبه شده از معادلات مختلف با مقدار مشاهده شده

میانگین *	روتنر	انشتین – براون	شوکلچ	MPM	کالینسک	شیلدز	دوبویز	معادله
۱۸۶۵	۶۱۹	۳۷۳۲	۷۷	۲۳۷	۱۸۴۸	۱۲۸۸۸	۲۸۹۰	بار بستر (تن در روز)
۱/۴۲	۰/۴۷	۲/۸۴	۰/۰۶	۰/۱۸	۱/۴	۹/۸	۲/۲	نسبت باربستر محاسبه شده به مشاهده شده

* در تعیین میانگین بار بستر شیلدز و شوکلچ به دلیل غیرمتعارف بودن (خیلی زیاد و خیلی کم) منظور نشده است.

مطابق مندرجات جدول (پ.۱۶) معادله کالینسک با داشتن نسبت ۱.۴ بیش‌ترین انطباق را با باربستر مشاهده شده دارا می‌باشد. معادله شیلدز مقدار بار بستر را حدود ۱۰ برابر مشاهده شده پیش‌بینی می‌کند. همچنین باربستر محاسبه شده از معادله دوبویز و انشتین – براون نیز بیش از دوبرابر اندازه‌گیری شده می‌باشد. از طرفی مقادیر حاصل از معادلات MPM و شوکلچ به‌طور محسوسی کم‌تر از مقدار مشاهده‌ای است. برای روتنر نیز مقدار پیش‌بینی حدود ۵۰ درصد مشاهده‌ای می‌باشد.

بررسی نتایج حاصل از معادلات مختلف مبین آن است که انتخاب معادله مناسب برای تعیین باربستر بدون داشتن نمونه مشاهده‌ای چندان آسان نمی‌باشد. در این مثال می‌توان معادله کالینسک را برای تعیین باربستر رودخانه مفروض (رودخانه نیوبرارا در آمریکا) مناسب‌تر از بقیه معادلات قلمداد نمود. دلیل این‌گونه تفاوت‌های فاحش در نتایج معادلات مختلف متفاوت بودن شیوه بررسی‌های آزمایشگاهی و سنجش‌های میدانی و تنوع رودخانه‌های مورد استفاده توسط محققین و ارائه دهندگان معادلات می‌باشد. از طرفی در بسیاری از موارد داده‌های آماری باربستر قلیل بوده و یا در محدوده مطالعاتی آمار اندازه‌گیری شده موجود نمی‌باشد. در

چنین شرایطی می‌توان با میانگین‌گیری از نتایج معادلات مختلف مقدار باربستر رودخانه را ارزیابی نمود. در جدول (پ.۱۶) میانگین باربستر محاسبه شده از معادلات برابر با ۱۸۶۵ تن در روز می‌باشد که نسبت به مقدار مشاهده‌ای ۴۲ درصد بیش‌تر است ضمن آنکه این کمیت با بار بستر به دست آمده از روش کالینسک (به‌عنوان معادله مناسب) همخوانی دارد (بهتر است در تعیین میانگین مقادیر غیرمتعارف که مقدار بار بستر را در مقایسه با سایر معادلات به‌طور محسوس بیش‌تر (نظیر معادله شیلدز در این مثال) و یا کم‌تر (نظیر معادله شوکلیچ در این مثال) ارزیابی می‌کند منظور نشود).

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان با استناد به منابع موجود معادلات مناسب برای تعیین بار بستر را به‌صورت جدول (۵-۱) معرفی نمود. مطابق این جدول معادلات دوبریز و شیلدز و سایر معادلاتی که صرفاً به نتایج آزمایشگاهی متکی هستند برای استفاده عملی در تعیین بار بستر چندان مناسب نمی‌باشند. معادلات مندرج در جدول (پ.۱۷) علاوه بر تحقیقات آزمایشگاهی در کاربردهای میدانی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

جدول پ.۱۷- معادلات مناسب توصیه شده برای تعیین باربستر

اندازه d_{50} دانه‌های بستر (mm)	نام معادله	مرجع
۰/۰۶۲۵ - ۲	روتتر، کالینسک، انشتین - براون	۲۱
۲ - ۵۰	شوکلچ، مایر- پیتر- مولر	۷/۲۱

پ.۵- مثال کاربردی ۵ تعیین متوسط باربستر سالیانه با روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک

برای رودخانه‌ای با مشخصات داده شده در جدول (پ.۱۸) و جدول (پ.۱۹) متوسط باربستر سالیانه را با استفاده از روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک تعیین نمایید.

جدول پ.۱۸- داده‌های مورد نیاز برای تعیین باربستر رودخانه در شرایط عدم وجود آمار آبدهی

ویسکوزیته سینماتیکی	وزن مخصوص آب	چگالی دانه‌ها	قطر نظیر 90 در صد	قطر نظیر 50 در صد	شتاب ثقل	شیب رودخانه
ν	$w\gamma$	G_s	D_{90}	D_{50}	g	S
m^2/s	N/m^3	-	mm	mm	m/s^2	-
10^{-6}	10^4	2.65	10	02.5	9.81	0.002

جدول پ.۱۹- مشخصات فیزیوگرافی و پارامترهای هیدروگراف واحد حوضه آبریز مورد نظر

پارامترهای هیدروگراف واحد SCS				مشخصات فیزیوگرافی			
بده حداکثر	زمان وقوع بده حداکثر	مدت بارش واحد	زمان تاخیر	زمان تمرکز	اختلاف ارتفاع بلندترین و پایین‌ترین نقطه حوضه آبریز	طول رودخانه	مساحت حوضه آبریز
Q_p	T_p	t_r	t_l	t_c	ΔH	L	A
(m^3/s)	(hr)	(hr)	(hr)	(hr)	(m)	(Km)	(Km^2)
200	4.1	1	3.6	6	555	45	394

پ.۵-۱- گام‌های محاسباتی

پ.۵-۱-۱- بررسی‌های هیدرولوژی

رودخانه مورد نظر در مثال کاربردی ۵ عینا مشابه مثال کاربردی ۳ می‌باشد. از این‌رو تمامی گام‌های محاسباتی زیر مربوط به بررسی‌های هیدرولوژی در این مثال نیز صادق است.

پ.۵-۱-۲- محاسبات هیدرولیک جریان

مقطع هندسی و جزییات محاسبات هیدرولیک جریان عینا مشابه مثال کاربردی ۳ می‌باشد که در زیر جدول محاسباتی مربوط مجددا معرفی می‌شود.

جدول پ.۲۰- مشخصات هیدرولیکی رودخانه برای محاسبه باریستر (برگرفته از مثال کاربردی ۳)

عمق	عرض	سطح مقطع	محیط تر شده	شعاع هیدرولیکی	بده جریان	بده در واحد عرض	سرعت جریان
D	B	A	P	R	Q	q	V
(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	m ³ /s	m ³ /s-m	m/s
0.7	32	11.2	30.7	0.34	7	0.218	0.62
1.7	34.5	44.5	35	1.3	68	1.963	1.52
2.7	36	79.9	38	2.11	168	4.663	2.10
3.7	37	116	40.2	2.88	300	8.103	2.58
4.7	38.2	153.5	42.3	3.63	463	12.117	3.02
5.7	39.4	192.3	45	4.3	649	16.475	3.38

پ.۵-۱-۳- محاسبه باریستر

- محاسبه باریستر روزانه به‌ازای بده‌های مختلف جریان

با استفاده از مشخصات هیدرولیک جریان مندرج در جدول (پ.۲۰) و همچنین اندازه دانه‌های مواد بستر و خصوصیات فیزیکی آب (مندرج در جدول پ.۱۸) مقدار باریستر روزانه برای بده‌های جریان با بهره‌گیری از معادلات مختلف ارائه شده در مبحث ۴-۵ نظیر روش مایر - پیتز - مولر، شوکلیچ، کالینسک و غیره قابل محاسبه می‌باشد. در این مثال کاربردی به‌عنوان نمونه باریستر از روش مایر- پیتز - مولر تعیین گردیده که مراحل محاسباتی آن در جدول (پ.۲۱) درج شده است.

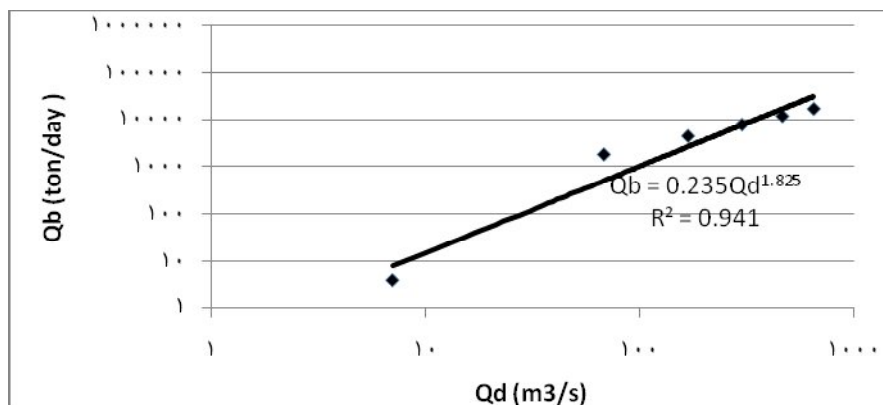
جدول پ.۲۱- محاسبه باریستر روزانه رودخانه به روش MPM برای بده‌های مختلف جریان

بده جریان روزانه	تنش برشی	عدد شیلدز	فاکتور ریل	بده جریان در واحد عرض	باریستر در واحد عرض	عرض رودخانه	باریستر روزانه
Q _d	τ	F _s	n'/n	q	q _b	B	Q _b
m ³ /s	N/m ²	-		m ³ /s-m	N/s-m	(m)	(ton/day)
7	6.8	0.165	0.45	5.3*10 ⁻⁷	0.014	32	3.9
68	26	0.63	0.45	2.3*10 ⁻⁴	6.1	34.5	1818
168	42.2	1	0.45	5.4*10 ⁻⁴	14.31	36	4451
300	57.6	1.36	0.45	9.2*10 ⁻⁴	24.4	37	7800
463	72.6	1.72	0.45	1.36*10 ⁻³	36	38.2	11882
649	86	2.1	0.45	1.9*10 ⁻³	50	39.4	17021

- تعیین منحنی سنجه رسوب و معادله نمایی آن

تعیین بار بستر به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف مستلزم ترسیم منحنی سنجه رسوب بستر و تعیین معادله نمایی آن می‌باشد. این معادله نمایی با استفاده از مقادیر Q_d و Q_b مندرج در جدول (پ.۲۱) تعیین می‌گردد. در شکل (پ.۷) منحنی سنجه و معادله نمایی آن نشان داده شده است. مطابق شکل معادله نمایی به صورت زیر است:

$$Q_b = 0.235 Q_d^{1.845} \quad (\text{پ.۴})$$



شکل پ.۷- منحنی سنجه رسوب و معادله نمایی آن برای تعیین باربستر به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌ها

- تعیین باربستر سالیانه

برای تعیین بار رسوبی سالیانه لازم است نخست بار رسوبی حمل شده توسط هر یک از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف با استفاده از معادله نمایی (پ.۴) مطابق رابطه زیر تعیین شود:

$$Q_{btr} = \Delta T \times \sum_{i=1}^n Q_{bi} \quad (\text{پ.۵})$$

که در این رابطه Q_{bi} : باربستر در هر گام زمانی (ton/day)، Q_{btr} : باربستر حمل شده توسط هیدروگراف سیلاب (ton) و ΔT گام زمانی (day) می‌باشد. در جدول (پ.۲۲) نحوه محاسبه باربستر حمل شده توسط سیلاب‌های مختلف درج شده است. در این جدول Q_{b2} الی Q_{b100} معرف مقدار باربستر در گام زمانی و دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال می‌باشد.

جدول پ.۲۲- تعیین باربستر به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف

دوره برگشت (سال)					t
100	50	25	10	2	
Q_{bi} (ton/day)					(hr)
Q_{b100}	Q_{b50}	Q_{b25}	Q_{b10}	Q_{b2}	
30	22	16	9	2.5	1
712	523	367	203	58.3	2
7583	5567	3910	2157	620.0	3
36056	26471	18596	10257	2948.7	4
98891	72601	50998	28132	8086.7	5
165033	121159	85110	46952	13497.5	6
189374	139028	97664	53876	15486.8	7
165000	121135	85095	46941	13493.2	8
120788	88676	62294	34364	9879.1	9
84303	61892	43479	23983	6895.1	10

ادامه جدول پ.۲۲- تعیین باریستر به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف

دوره برگشت (سال)					t
100	50	25	10	2	
Q_{bi} (ton/day)					(hr)
Q_{b100}	Q_{b50}	Q_{b25}	Q_{b10}	Q_{b2}	
45406	33333	23418	12917	3713.8	11
24576	18042	12674	6992	2009.6	12
13752	10096	7093	3913	1124.8	13
7185	5275	3705	2044	587.8	14
4015	2948	2071	1142	328.4	15
2424	1780	1250	689	198.2	16
1338	982	690	381	109.3	17
745	547	384	212	60.9	18
454	333	234	129	37.2	19
216	158	111	61	17.7	20
101	74	52	29	8.3	21
45	33	23	13	3.7	22
19	14	10	5	1.5	23
6	5	3	2	0.5	24
6	5	3	2	0.5	25
40336	29612	20802	11475	3300	$Q_{btr} = \Delta T * \Sigma Q_{bi}$ (ton)
(ton/yr)	3124	$Q_{byr} = 0.4 * Q_{b2} + 0.06 Q_{b10} + 0.02 Q_{b25} + 0.01 Q_{b50} + 0.01 Q_{b100}$			

متوسط بار رسوبی سالیانه رودخانه در حوضه آبریز مورد نظر با مشخص شدن Q_{btr} ، متوسط بار بستر سالیانه از رابطه (۲۳-۵) تعیین می‌شود:

$$Q_{byr} = 0.4 \times (3300) + 0.06 \times (11475) + 0.02 \times (20802) + 0.01 \times (29612) + 0.01 \times (40336)$$

$$Q_{byr} = 3124 \text{ (ton / yr)}$$

با توجه به محاسبات فوق متوسط بار بستر سالیانه رودخانه مورد نظر به روش MPM برابر با ۳۱۲۴ تن می‌باشد.

پ.۶- مثال کاربردی ۶ تعیین بار کل از معادلات مختلف

بار کل حمل شده توسط رودخانه‌ای برابر با ۱۵۲۴ تن در روز اندازه‌گیری شده است. بده جریان روزانه (Q_d) برابر با ۹/۳ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. مقدار بار کل را با استفاده از معادلات انگلند - هانسن، ایکرز - وایت، یانگ، لارسن و باگنولد تعیین و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه نمایید. اطلاعات هیدرولیک جریان و دانه‌بندی در جدول زیر داده شده است (توزیع دانه‌بندی بستر نسبتاً یکنواخت فرض می‌شود).

جدول پ.۲۳- جدول داده‌های مورد نیاز برای تعیین بار کل رودخانه

تنش برشی بحرانی	تنش برشی	سرعت برشی	ویسکوزیته سینماتیکی	وزن مخصوص آب	سرعت سقوط دانه‌ها	عدد شیلدز	قطر نظیر ۵۰ در صد	شتاب ثقل	شیب رودخانه	سرعت جریان	عمق رودخانه	عرض رودخانه
τ_{cr}	τ	U_*	ν	γ	w	F_s	d_{50}	g	S	V	h	B
N/m ²	N/m ²	m/s	M ² /s	N/m ³	m/s	mm	mm	m/s ²	-	m/s	m	m
0.153	6.088	0.078	10 ⁻⁶	10 ⁴	0.038	.25	.0283	9.81	1.44*10 ⁻³	0.98	0.44	21.65

حل:

- روش انگلند - هانسن

$$\frac{q_{st}}{[g(G_s - 1)d^3]^{0.5}} = \frac{0.01351\gamma V^2}{Sh} F_s^{2.5}$$

$$q_{st} = [9.81(2.65 - 1)(0.283 \times 10^{-3})^3]^{0.5} (0.01351 \times 10^4 \times 0.98^2 / 0.00144 \times 0.44) 1.3^{2.5}$$

$$q_{st} = 9.63 \text{ N/s-m}$$

مقدار بار کل برحسب تن در روز برابر است با:

$$Q_{st} = (8.64)(9.63 \times 21.65) = 1801 \text{ ton/day}$$

- روش ایکرز - وایت

$$C_{st} = \frac{G_s d_{50}}{h} \left(\frac{V}{U_*} \right)^n G_{gr}$$

$$G_{gr} = k \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m$$

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{[g(G_s - 1)d_{50}]^{0.5}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log \frac{10h}{d_{50}}} \right]^{1-n}$$

$$d_{gr} = d_{50} \left[\frac{g(G_s - 1)}{v^2} \right]^{1/3}$$

$$d_{gr} = 0.2583 \times 10^{-3} [9.81 \times 10^4 (2.65 - 1) / (10^{-6})]^{1/3} = 7.15$$

در صورتی که محدوده $1 < d_{gr} \leq 60$ باشد مقادیر n , A , m , k عبارتند از:

$$n = 1.00 - 0.56 \log d_{gr}$$

$$A = 0.23 d_{gr}^{-0.5} + 0.14$$

$$m = \frac{9.66}{d_{gr}} + 1.34$$

$$\log k = 2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53$$

براساس روابط فوق مقادیر پارامترهای معادلات عبارتند از:

$$n = 0.52, \quad A = 0.23, \quad m = 2.69, \quad k = 0.015$$

$$F_{gr} = (0.078^{0.52} / [9.81(2.65 - 1)0.283 \times 10^{-3}]^{0.5}) [0.98 / 32^{0.5} \log(10 \times 0.44 / 0.283 \times 10^{-3})]^{1-0.52}$$

$$F_{gr} = 0.85$$

$$G_{gr} = 0.015 [(0.85 / 0.23) - 1]^{2.69} = 0.22$$

$$C_{st} = (2.65 \times 0.283 \times 10^{-3} / 0.44) (0.98 / 0.078)^{0.52} \times 0.22 = 2.398 \times 10^{-3}$$

$$Q_{st} = (8.64)(10^4)(2.398 \times 10^{-3})(9.3) = 1927 \text{ ton/day}$$

- روش یانگ

با توجه به اندازه دانه‌های بستر که در کلاس ماسه می‌باشد برای تعیین بار کل از معادله مربوط به نرخ انتقال ماسه استفاده می‌شود:

$$\log C_{tss} = 5.435 - 0.286 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0.457 \log \frac{U_*}{w} + ((1.799 - 0.409 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0.314 \log \frac{U_*}{w}) \log(\frac{V.S}{w} - \frac{V_{cr}.S}{w}))$$

$$U_* d_{50} / v = 0.078 \times 0.000283 / 10^{-6} = 22.077$$

در صورتی که محدوده $70 \frac{U_* d}{v} > 0 > 1.2$ باشد مقدار $\frac{V_{cr}}{w}$ از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{V_{cr}}{w} = \left\{ \frac{2.5}{\log(U_* d / v) - 0.06} \right\} + 0.66$$

$$V_{cr} / w = (2.5 / \log(22.077) - 0.06) + 0.66 = 2.6$$

پارامترهای معادله یانگ عبارتند از:

$$\log \frac{wd_{50}}{v} = \log \frac{0.038 \times 0.000283}{10^{-6}} = 1.03$$

$$\log \frac{U_*}{w} = \log \frac{0.078}{0.038} = 0.312$$

$$\log(\frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w}) = \log(\frac{0.98 \times 0.00144}{0.038} - 2.6 \times 0.00144) = -1.47$$

با قرار دادن مقادیر فوق در معادله،

$$\log C_{tss} = 5.435 - 0.286 \times 1.03 - 0.457 \times 0.312 + ((1.799 - 0.409 \times 1.03 - 0.314 \times 0.312) \times (-1.47)) = 3.29$$

$$C_{tss} = 10^{3.29} = 1950 \dots \text{mg/l}$$

$$G_{st} = (0.0864)(1950)(9.3) = 1567 \text{ ton/day}$$

- روش لارسن

$$C_{st} = 0.01 \gamma \sum_i P_i \left(\frac{d_i}{h} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{cr}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{w_i} \right)$$

با فرض یکنواخت بودن اندازه دانه‌های بستر معادله لارسن به صورت زیر ساده می‌شود:

$$C_{st} = \gamma \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{cr}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{w} \right)$$

$$\tau' = 18 V^2 \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1/3} = 18 (0.93^2) \left(\frac{0.000283}{0.44} \right)^{1/3} = 1.49 \text{ N/m}^2$$

$$\frac{U_*}{w} = \frac{0.078}{0.038} = 2$$

از نمودار شکل (۷-۱) تابع $f(\frac{U_*}{w})$ برابر است با:

$$f(\frac{U_*}{w}) = 30$$

با قراردادن مقادیر در معادله غلظت،

$$C_{st} = 10^4 \left(\frac{0.000283}{0.44} \right)^{7/6} \left(\frac{1.49}{0.153} - 1 \right) (30) = 49.5 \text{ N/m}^3$$

$$Q_{st} = 8.64(49.5)(9.3) = 3977 \text{ ton/day}$$

- روش باگنولدز

$$q_{st} = \frac{1}{(G_s - 1)} \tau V \left(\frac{e_b}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{V}{w} \right)$$

از گراف شکل (۷-۲) برای $V = 0.98 \text{ m/s}$ داریم:

$$e_b = 0.013$$

از گراف شکل (۷-۳) برای $F_s = 1.3$ داریم:

$$\tan \alpha = 0.75$$

با قراردادن مقادیر فوق در معادله،

$$q_{st} = \frac{1}{(2.65 - 1)} 6.088 \times 0.98 \left(\frac{0.13}{0.75} + 0.01 \frac{0.98}{0.038} \right) = 2.56 \dots \text{ N/s-m}$$

$$Q_{st} = (86400)(2.586 \times 21.65)(10^{-4}) = 479 \text{ ton/day}$$

- مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف با مقادیر مشاهده‌ای

نتایج حاصل از معادلات مختلف در جدول (پ.۲۴) با بارکل اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند:

جدول پ.۲۴- مقایسه مقادیر بارکل محاسبه شده از معادلات مختلف با مقدار مشاهده شده

میانگین*	باگنولد*	لارسن	یانگ	ایکرز- وایت	انگلند- هانسن	اندازه‌گیری شده	معادله
۱۷۶۵	۴۷۹	۳۹۷۷	۱۵۶۷	۱۹۲۷	۱۸۰۱	۱۵۲۴	بارکل (تن در روز)
۱/۱۵	۰/۳۱	۲/۶۱	۱/۰۳	۱/۲۶	۱/۱۸	۱	تسبیت بارکل محاسبه شده به مشاهده شده

* در تعیین میانگین بارکل رقم حاصل از معادله باگنولد و لارسن به دلیل غیرمتعارف بودن (خیلی کم و خیلی زیاد در مقایسه با بار مشاهده‌ای) منظور نشده است.

مطابق مندرجات جدول معادله یانگ با داشتن نسبت ۱/۰۳ بیش‌ترین انطباق را با بارکل مشاهده شده دارا می‌باشد. معادلات انگلند - هانسن و ایکرز - وایت نیز به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌باشند. معادله باگنولد ۷۰ درصد کم‌تر از مشاهده‌ای پیش‌بینی می‌کند و بارکل به دست آمده از معادله لارسن نیز بیش از دوبرابر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

بررسی نتایج به دست آمده از معادلات مختلف مبین آن است که در انتخاب معادله مناسب داشتن نمونه مشاهده‌ای حایز اهمیت زیادی است. در این مثال می‌توان معادله یانگ را برای تعیین بارکل رودخانه (رودخانه نیوبرارا در آمریکا) مناسب‌تر از بقیه معادلات قلمداد نمود. ضمن آن که معادلات انگلند - هانسن و ایکرز - وایت نیز از هماهنگی خوبی با مقدار مشاهده‌ای برخوردارند. دو معادله

دیگر (لارسن و باگنولد) دارای تفاوت زیادی با مقدار مشاهده‌ای می‌باشند. دلیل این گونه تفاوت‌های محسوس در نتایج معادلات مختلف همان‌طوری که قبلاً نیز اشاره شد متفاوت بودن شیوه بررسی‌های آزمایشگاهی و سنجش‌های میدانی و تنوع رودخانه‌های مورد استفاده توسط محققین و ارائه‌دهندگان معادلات می‌باشد. از طرفی در بسیاری از موارد داده‌های آماری بارکل قلیل بوده و یا در محدوده مطالعاتی آمار اندازه‌گیری شده موجود نمی‌باشد. در چنین شرایطی می‌توان با میانگین‌گیری از نتایج معادلات مختلف مقدار باربستر رودخانه را ارزیابی نمود. در جدول (پ.۲۴) میانگین بارکل محاسبه شده از معادلات برابر با ۱۷۶۵ تن در روز می‌باشد که نسبت به مقدار مشاهده‌ای حدود ۱۵ درصد بیش‌تر است ضمن آن‌که این کمیت با بار بستر به دست آمده از روش یانگ (به‌عنوان معادله مناسب) هم‌خوانی خوبی دارد (بهتر است در تعیین میانگین مقادیر غیرمتمعارف که مقدار بارکل را در مقایسه با سایر معادلات به‌طور محسوس بیش‌تر و یا کم‌تر (نظیر معادلات باگنولد و لارسن در این مثال) ارزیابی می‌کند منظور نشود) در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان با استناد به منابع موجود معادلات مناسب برای تعیین بارکل را به‌صورت جدول (پ.۲۵) معرفی نمود.

جدول پ. ۲۵- معادلات مناسب توصیه شده برای تعیین بارکل

اندازه d_{50} دانه‌های بستر (mm)	نام معادله	مرجع
۰/۰۶۲۵-۲	انگلد-هانسن، ایکرز-وایت، لارسن، یانگ، انشتین،	۲۱، ۷
۲-۵۰	یانگ، انشتین مایر - پیتر - مولر - انشتین*	

* باربستر از مایر - پیتر - مولر و بار معلق از روش انشتین

پ.۷- مثال کاربردی ۷ تعیین متوسط بارکل سالیانه رودخانه با روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک

برای رودخانه‌ای با مشخصات داده شده در جدول (پ.۲۶) و جدول (پ.۲۷) متوسط بارکل سالیانه را با استفاده از روش تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک تعیین نمایید.

جدول پ.۲۶- داده‌های مورد نیاز برای تعیین بارکل رودخانه در شرایط عدم وجود آمار آبدهی

ویسکوزیته سینماتیکی	وزن مخصوص آب	چگالی دانه‌ها	قطر نظیر ۹۰ در صد	قطر نظیر ۵۰ در صد	شتاب ثقل	شیب رودخانه
ν	$w\gamma$	G_s	D_{90}	D_{50}	g	S
m^2/s	N/m^3	-	mm	mm	m/s^2	-
10^{-6}	10^4	2.65	10	02.5	9.81	0.002

جدول پ.۲۷- مشخصات فیزیوگرافی و پارامترهای هیدروگراف واحد حوضه آبریز مورد نظر

پارامترهای هیدروگراف واحد SCS				مشخصات فیزیوگرافی			
بده حداکثر	زمان وقوع بده حداکثر	مدت بارش واحد	زمان تاخیر	زمان تمرکز	اختلاف ارتفاع بلندترین و پایین‌ترین نقطه حوضه آبریز	طول رودخانه	مساحت حوضه آبریز
Q_p	T_p	t_r	t_l	t_c	ΔH	L	A
(m^3/s)	(hr)	(hr)	(hr)	(hr)	(m)	(Km)	(Km^2)
200	4.1	1	3.6	6	555	45	394

پ.۷-۱- گام‌های محاسباتی

پ.۷-۱-۱- بررسی‌های هیدرولوژی

رودخانه مورد نظر در مثال کاربردی ۷ عینا مشابه مثال کاربردی ۳ می‌باشد. از این‌رو تمامی گام‌های محاسباتی زیر مربوط به بررسی‌های هیدرولوژی در این مثال نیز صادق است.

پ.۷-۱-۲- محاسبات هیدرولیک جریان

مقطع هندسی و جزییات محاسبات هیدرولیک جریان عینا مشابه مثال کاربردی ۳ می‌باشد که در زیر جدول محاسباتی مربوط مجددا معرفی می‌شود.

جدول پ.۲۸- مشخصات هیدرولیکی رودخانه برای محاسبه بارکل (برگرفته از مثال کاربردی ۳)

عمق	عرض	سطح مقطع	محیط تر شده	شعاع هیدرولیکی	ضریب مانینگ	بده جریان	بده در واحد عرض	سرعت جریان
D	B	A	P	R	n	Q	q	V
(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	m ^{-1/3}	m ³ /s	m ³ /s-m	m/s
0.7	32	11.2	30.7	0.34	0.035	7	0.218	0.62
1.7	34.5	44.5	35	1.3	0.035	68	1.963	1.52
2.7	36	79.9	38	2.11	0.035	168	4.663	2.10
3.7	37	116	40.2	2.88	0.035	300	8.103	2.58
4.7	38.2	153.5	42.3	3.63	0.035	463	12.117	3.02
5.7	39.4	192.3	45	4.3	0.035	649	16.475	3.38

پ.۷-۱-۳- محاسبه بارکل

- تعیین بارکل به‌ازای بده‌های مختلف

با استفاده از مشخصات هیدرولیک جریان مندرج در جدول (پ.۲۸) و همچنین اندازه دانه‌های مواد بستر و خصوصیات فیزیکی آب (مندرج در جدول پ.۲۶) مقدار بارکل روزانه با بهره‌گیری از معادلات مختلف ارائه شده در مبحث ۴-۶ نظیر روش انگلند-هانس، ایکرز-وایت، یانگ و ... محاسبه می‌شود. در این مثال کاربردی به‌عنوان نمونه بارکل از روش انگلند - هانس تعیین گردیده که مراحل محاسباتی آن در جدول (پ.۲۹) درج شده است.

• معادله انگلند- هانس:

$$\frac{q_{st}}{[g(G_s - 1)d_{50}^3]^{0.5}} = \frac{0.01351\gamma V^2}{Sh} F_s^{2.5}$$

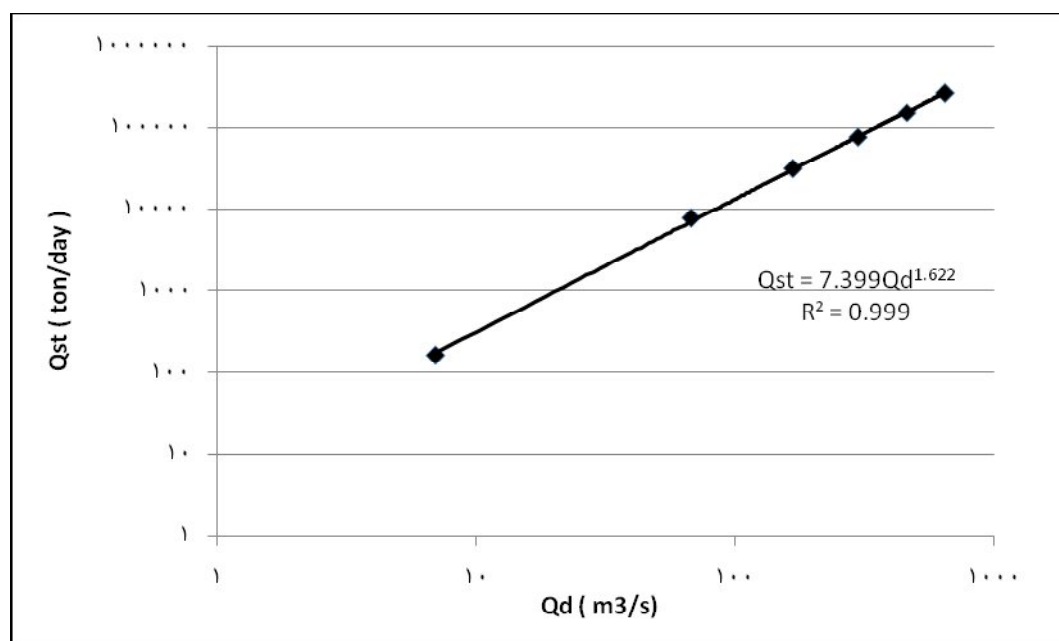
جدول پ.۲۹- محاسبه بار کل روزانه رودخانه به روش انگلند- هانسن برای بدهای مختلف جریان

بده جریان	تنش برشی	عددشیلدز	عمق جریان	سرعت جریان	بار کل در واحد عرض	عرض رودخانه	بار کل روزانه
Q_d	τ	F_s	h	V	q_{st}	B	Q_{st}
m^3/s	N/m^2	-	(m)	m/s	N/s-m	(m)	(ton/day)
7	6.8	0.2	0.7	0.62	0.6	32	165
68	26	0.63	1.7	1.52	26	34.5	7750
168	42.2	1	2.7	2.10	99.6	36	30990
300	57.6	1.36	3.7	2.58	237	37	75671
463	72.6	1.72	4.7	3.02	459	38.2	151581
649	86	2.1	5.7	3.38	781	39.4	265979

- تعیین منحنی سنج رسوب و معادله نمایی آن

تعیین بار کل به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف مستلزم ترسیم منحنی سنج رسوب بار کل و تعیین معادله نمایی آن می‌باشد. این معادله نمایی با استفاده از مقادیر Q_{st} و Q_d مندرج در جدول (پ.۲۹) تعیین می‌گردد. در شکل زیر منحنی سنج و معادله نمایی آن نشان داده شده است. مطابق شکل (پ.۸) معادله نمایی بار کل به صورت زیر است:

$$Q_{st} = 7.399 Q_d^{1.522} \quad (\text{پ.۶})$$



شکل پ.۸- منحنی سنج رسوب و معادله نمایی آن برای تعیین بار کل به دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌ها

- تعیین بار کل سالیانه

در این مثال کاربردی روش انگلند - هانسن به عنوان نمونه برای تعیین Q_{st} به کار گرفته شده است. سایر روش‌ها نظیر روش یانگ، ایکرز - وایت و غیره می‌تواند مبنای تعیین بار رسوبی کل قرار گیرد.

برای تعیین بار کل سالیانه لازم است نخست بار کل حمل شده توسط هر یک از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف با استفاده از معادله نمایی ارائه شده مطابق رابطه زیر تعیین شود:

$$Q_{str} = \Delta T \times \sum_{i=1}^n Q_{sti} \quad (\text{پ.۷})$$

که در این رابطه:

Q_{sti} : بار رسوبی کل در هر گام زمانی (ton/day) و Q_{str} : بار رسوبی کل حمل شده توسط هیدروگراف سیلاب (ton) و ΔT گام زمانی (day) می‌باشد. در جدول (پ.۳۰) نحوه محاسبه بار رسوبی کل حمل شده توسط سیلاب‌های مختلف درج شده است. با مشخص شدن Q_{btr} ، متوسط بار بستر سالیانه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{Q}_{styr} = 0.4Q_{st2} + 0.06Q_{st10} + 0.02Q_{st25} + 0.01Q_{st50} + 0.01Q_{st100}$$

$$\bar{Q}_{styr} = 0.4 * (64102) + 0.06 * (181300) + 0.02 * (297753) + 0.01 * (399722) + 0.01 * (517237)$$

$$\bar{Q}_{styr} = 51643 (\text{ton / yr})$$

متوسط بار کل سالیانه رودخانه مورد نظر به روش انگلند - هانسن برابر با ۵۱۶۴۳ تن می‌باشد.

جدول پ.۳۰- تعیین بار رسوبی کل به‌دست آمده از هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف

و متوسط بار رسوبی کل سالیانه رودخانه در حوضه آبریز مورد نظر

دوره برگشت (سال)					t
100	50	25	10	2	
$Q_{st} \text{ (ton)}$					(hr)
Q_{st100}	Q_{st50}	Q_{st25}	Q_{st10}	Q_{st2}	
62	48	36	22	8	1
869	671	500	304	108	2
6243	4824	3593	2188	774	3
22914	17708	13192	8031	2840	4
53154	41078	30597	18630	6587	5
81475	62964	46901	28559	10098	6
91380	70618	52603	32031	11325	7
81461	62954	46894	28553	10095	8
62803	48534	36154	22014	7784	9
46530	35959	26786	16309	5767	10
27773	21462	15988	9735	3442	11
16645	12863	9582	5835	2063	12
10256	7926	5905	3595	1271	13
5968	4613	3436	2092	740	14
3674	2839	2115	1288	455	15
2411	1864	1388	845	299	16
1469	1135	846	515	182	17
901	697	519	316	112	18
597	461	344	209	74	19
321	248	185	112	40	20
170	131	98	59	21	21
86	67	50	30	11	22
41	32	24	15	5	23
17	13	10	6	2	24
17	13	10	6	1	25
517237	399722	297753	181300	64101.9	$Q_{str} = \Delta T * \sum Q_{sti} \text{ (ton)}$
(ton/yr)	51643	$\bar{Q}_{styr} = 0.4Q_{st2} + 0.06Q_{st10} + 0.02Q_{st25} + 0.01Q_{st50} + 0.01Q_{st100}$			

منابع و مراجع

- ۱- بانک آمار و اطلاعات ایستگاه‌های آب و هواشناسی کشور، دفتر مطالعات پایه منابع آب، (تماب سابق) وزارت نیرو، (۱۳۷۱).
- ۲- «برنامه‌ریزی آزمایش‌های رسوب»، نشریه شماره ۲۲۲ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۸۰).
- ۳- بهادری، فیروز، «اصول و مبانی برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها»، دفتر مهندسی رودخانه، سواحل و کنترل سیلاب، شرکت مدیریت منابع آب ایران، (۱۳۷۹).
- ۴- بنی‌حبیب، محمدابراهیم، «زبری هیدرولیکی جریان با غلظت بالای رسوب»، مجموعه مقالات دومین کنفرانس هیدرولیک، تهران، (۱۳۷۸).
- ۵- بنی‌حبیب، محمدابراهیم، «علل طغیان رودخانه با جریان غلیظ»، مجموعه مقالات چهارمین سمینار مهندسی رودخانه، اهواز، (۱۳۷۵).
- ۶- بنی‌حبیب، محمدابراهیم، معصومی، ابوالفضل، «اثر غلظت بالای رسوب بر طغیان رودخانه‌ها، مطالعه موردی رودخانه ماسوله»، مجموعه مقالات دومین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، (۱۳۸۷).
- ۷- «راهنمای ادوات نمونه‌برداری بار رسوبی رودخانه‌ها»، نشریه شماره ۱۴۶، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو، (۱۳۸۳).
- ۸- «دانه‌بندی رسوبات درشت‌دانه»، نشریه شماره ۲۰، (۱۳۷۶)، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، وزارت نیرو.
- ۹- مصباحی، جمشید، چیتی، محمدحسن، «فرهنگ مهندسی رودخانه»، طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو، (۱۳۷۷).
- ۱۰- «راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل»، نشریه شماره ۲۶۰، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۸۱).
- ۱۱- «راهنمای عملیات صحرایی نمونه‌برداری مواد رسوبی رودخانه‌ها و مخازن سدها»، نشریه شماره ۳۴۹، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۸۶).
- ۱۲- «راهنمای تعیین غلظت نمونه‌های رسوبات معلق رودخانه‌ها»، نشریه شماره ۲۰۵، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۷۹).
- ۱۳- رنجبر تکلیمی، محمد باروت کوب احد، بهادری، فیروز، «روش‌های نوین ارزیابی رسوبات رودخانه‌ای»، پروژه پژوهشی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده عمران، (۱۳۷۱).
- ۱۴- «راهنمای تعیین منحنی بده - اشل رودخانه با استفاده از روش انشتین - بارباروسا»، نشریه شماره ۱۵۶، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۷۵).
- ۱۵- «راهنمای مطالعات فرسایش و رسوب در ساماندهی رودخانه‌ها»، نشریه شماره ۳۸۳، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۸۶).
- 16- Bogardi, J., (1978), "Sediment transport in alluvial streams", Akademia Kiado, Budapest, Hungary.

- 17- Chadwick, A., and Morfett J. (1993), "Hydraulics in civil and environmental engineering", E & FN SPON New York. Bogardi, J., (1978), "Sediment transport in alluvial streams", Akademia Kiado, Budapest, Hungary.
- 18- Chanson, H., (1999), "The hydraulics of open channel flow", Arnold Publishing Compony, England. Brooks, N.H., (1958), "Mechanics of streams with moveable beds of fine sand, in sediment transport technology", ch. 10, Tras. Am. Soc. Civil Engrs., vol. 123, p. 526.
- 19- Chow, V. T., (1964), "Handbook of Applied Hydrology", McGraw Hill Book Co., New York
- 20- Culberston, D.M., (1967), "Scour and fill in alluvial channels", U.S Geological Survey.
- 21- Gary, J., (2005), "Geomorphology and river management", Blackwell Publishing, USA.
- 22- Graf, W.H., (1984), "Hydraulics of sediment transport", Book Crafters Inc., USA.
- 23- Hemphill, R.W., and Bramley, M.E., (1990), "Protection of river and canal banks", University Press, England.
- 24- Henderson, F. M. (1973), "Open channel flow, sediment transport", ch., Mc – Millan Pub. Co., U.A.S.
- 25- Jansen, P. P., (1983), "Principles of river engineering", Pitman Pub. Inc., England.
- 26- Langendoen, E.J., (2002), "Sediment transport and bed adjustment", Department of Agriculture, USA.
- 27- Linsley, R.K., (1975), "Hydrology for engineers", Mc Graw Hill Book Co., USA.
- 28- Linsley, R. K, Franzini, J.B., (1984), "Water resvurces engineering", McGraw – Hill Book Co., USA.
- 29- Maidment, D. R., Mays, L. W., Chow, V. T., (1998), "Applied Hydrology", McGraw – Hill Book Company, New York.
- 30- Petersen, M.S., (1986), "River engineering", Prentice Hall, N.J., USA.
- 31- Raudkivi, A. J. (1976), "Loose boundary hydraulics", Pergamon Press, England.
- 32- Raynov, S., (1986), "River response to hydraulic structures", UNESCO, Paris.
- 33- Richardson, E.V., (1983), "Highways in the river environment, hydraulic and environmental design considerations", Fort Collins, Colorado.
- 34- Shen, H.W., (1972), River Mechanics, Vol. III , Ch. 14, "Behavior of Cohesive material", Fort Collins., Colorado , USA.
- 35- Simons, D. B. and Senturk, F. (1994), "Sediment transport technology", Book Crafters Inc., U.S.A.
- 36- Thorne, C.R., (1987), "Sediment transport in gravel bed rivers", John Wiley & Sons, England.
- 37- Vanoni, A. V., (1977), "Sedimentation engineering", the ASCE, Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation, New York.
- 38- Van Rijn, L.C., (1986), "Manual of sediment transport measurements", Delft Hydraulics Laboratory, the Netherlands.
- 39- Van Rijn, L. C., (1990), "Principles of Sediment transport in river, estuaries and coastal Seas," Delft Hydraulics. Delft, the Netherlands.
- 40- Yang, C. T. (1996), "Sediment transport", McGraw – Hill Book Co., U. S.A.
- 41- Yang, C.T., and Huang, C., (2001), "Applicability of sediment transport formulas, International Journal of Sediment Research", Vol. 16, No. 3, pp. 335-353.
- 42- Yang, C. T., and Simoes, F.J.M., (2000), "User's manual for GSTARS2-1", U.S Bureau of Reclamation, Denver Colorado.

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision

Guideline for Calculation of Suspended-load and Bed-load of Rivers

No.590

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

با عنوان «راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر» اصول و مبانی حاکم بر فرآیند انتقال رسوب و به‌ویژه عوامل هیدرولیکی تاثیرگذار بر کمیت بارمعلق و باربستر حمل شده توسط رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. به‌منظور تعیین کمی بار رسوبی و استفاده از آن در عرصه‌های کاربردی، ضمن معرفی ساختار معادلات و روش‌های نوین و متداول ارائه شده توسط متخصصین مهندسی رسوب و به‌کارگیری تجارب مطالعاتی و میدانی حاصل از رودخانه‌های کشور، با درج مثال‌های تجربی نیز راهکارهای پایه‌ای برای محاسبه بارمعلق، باربستر و بارکل تشریح گردیده است. بخش پایانی نشریه به توصیه روش‌های مناسب محاسبه بار رسوبی برای رودخانه‌های مختلف در بازه‌های کوهستانی، شریانی و پیچانرودی اختصاص دارد.