نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

سال شانزدهم- شماره ٥٦- بهار ١٤٠١

Vol. 16, No. 56, Spring 2022

ارزیابی روش‌های اصلاحی برآورد بار رسوب معلّق برای رودخانه‌ها با رژیم جریان رسوب واریزه‌ای در رودخانه خرمارود- استان گلستان

امید اسدی نلیوان[1]، غلامرضا خسروی[2]، مهدی تیموری [3]و فرزانه وکیلی تجره[4]

تاریخ دریافت:۱۳۹۹/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۹

چکیده

در تحقیق حاضر تغییرات رژیم رسوب در دو دوره آماری «جریان طبیعی» و «جریان تغییریافته/ واریزه‌ای» مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور تعیین میزان اختلاف معنی‌دار بین دو دوره (۷۱-۱۳٤٥) و (۹٤-۱۳۷۲) از آزمون معنی‌داری استفاده شد. به‌منظور تعیین مناسب‌ترین روش منحنی سنجه رسوب و ضرایب اصلاحی، نتایج حاصل از روش‌های منحنی‌های سنجه یک‌خطی، دوخطی، حد وسط و ضرایب اصلاحی، شامل FAO, MVUE, QMLE و Smearing مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که از سال ۱۳۷۲ با شروع سیل‌های بزرگ، رژیم دبی رسوب با شدت زیاد و روند افزایشی از حالت طبیعی خارج‌شده است و در دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹٤ بیشترین میزان انتقال رسوب به شکل جریان واریزه‌ای است. در بین روش‌ها، روش منحنی یک‌خطی و ضریب اصلاحی Smearing برای دوره رژیم رسوب طبیعی (۷۱-۱۳٤٥) و روش منحنی دوخطی و ضریب اصلاحی Smearing برای دوره رژیم رسوب تغییریافته/ جریان واریزه‌ای (۷۲-۱۳۷۲) دقت بیشتری در برآورد دبی رسوب دارند. از طرفی روش منحنی یک‌خطی بدون احتساب ضرایب اصلاحی خطای کم تخمینی بالاتری دارد و از بین ضرایب اصلاحی عنوان شده، ضریب FAO خطای بیش تخمینی بسیار بالایی دارد. در روش حد وسط دسته‌ها، به‌واسطه کاهش اثر نقاط پایین، برآورد رسوب‌دهی در دبی‌های بالا بهبود می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: *رژیم رسوب، منحنی سنجه رسوب، ضرایب اصلاحی برآورد بار معلق، خرمارود*

مقدمه

اطّلاع از نحوه دقیق فرسایش، انتقال رسوب و فرآیند رسوب‌گذاری در کشور چندان زیاد نیست و در بسیاری از موارد، بین اندازه‌گیری‌ها و برآوردهای انجام شده نیز اختلاف زیادی مشاهده می‌شود. رودخانه‌ها همواره با پدیده‌های فرسایش و انتقال رسوب مواجه می‌باشند، بنابراین برآورد مقدار رسوب در پروژه‌های حفاظت خاک، آبخیزداری و نیز بهره‌برداری از منابع آبی از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱۳]. به‌دلیل اهمیت و نقش پدیده انتقال رسوب در عرصه‌های مختلف مهندسی، تعیین کمیت بار رسوبی از دیرباز مورد توجه متخصصین مسائل رودخانه‌ای و مدیریت منابع آب قرار گرفته است [٦]. بار معلّق شاخصی از رسوب‌دهی کل سطح آبخیز است، غالب ارزیابی‌های مقدار تولید رسوب حوزه‌های آبخیز با استفاده از نمونه‌برداری پراکنده، محدود و نامنظم از رسوبات معلّق رودخانه‌ها صورت می‌گیرد [۱۰]. در صورت نبود اندازه‌گیری واقعی رسوب، هیدرولوژیست‌ها از منحنی‌های سنجه-رسوب برای تعین غلظت رسوب معلّق استفاده می‌کنند و معمول‌ترین روش تخمین بار رسوب با استفاده از داده‌های غلظت رسوب معلّق و دبی جریان هست [۸]. ازآنجایی‌که بیشتر حوزه‌های آبخیز در اکثر کشورها ازجمله ایران فاقد ایستگاه رسوب‌سنجی هستند، استفاده از مدل‌های تجربی و روش‌های آماری برآورد رسوب معلّق ضروری به نظر می‌رسد. در حوزه‌های آبخیز عمل نمونه‌برداری از دبی جریان و رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری صورت می‌گیرد و برای تمامی دبی‌های جریان، نمونه‌برداری رسوب انجام نمی‌شود، بلکه میزان رسوب آن‌ها برآورد می‌گردد [٤]. به‌دلیل عدم کارایی روش‌های منحنی سنجه رسوب، محققین و کارشناسان روش‌های متنوّع و ضرایب اصلاحی زیادی را ارائه کرده‌اند. به‌طورکلی روش برآورد بار معلّق رودخانه‌ها به دو دسته تقسیم شده است. روش اوّل روش‌های مبتنی بر قوانین دینامیک و مکانیک سیالات که عموماً توسط متخصصین علم هیدرولیک ارائه شده است و دسته دوّم روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های مستقیم و تحلیل‌های آماری که بیشتر توسط صاحب-نظران علم هیدرولوژی توصیه داده شده است. در تخمین بار رسوب معلّق رودخانه معمولاً از روش‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود که در این بین برآورد مستقیم، بهترین روش هست و برای این

۱ - نویسنده مسئول و دانش آموخته‌ی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیک: omid.asadi@alumni.ut.ac.ir

۲- دانش آموخته‌ی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- استادیار گروه مهندسی طبیعت. دانشکده کشاورزی شیروان. دانشگاه بجنورد

٤- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

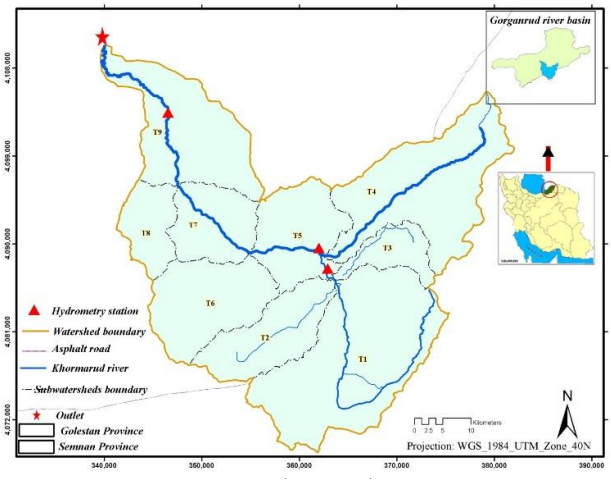
منظور باید آمار کاملی از غلظت رسوب و دبی جریان متناظر در دست باشد که در اغلب موارد به دلیل کمبود امکانات، نیروی انسانی، بالا بودن هزینه امکان برداشت داده رسوب و دبی به اندازه کافی مقدور نیست [۱٤]. در این خصوص به صورت موردی نتایج مطالعات مرتبط به شرح زیر می‌باشد.

اکبرزاده و همکاران [۱] با انجام تحقیقی بر روی شش ایستگاه رسوب‌سنجی در حوزه آبخیز اترک در شمال شرق ایران، جهت انتخاب بهترین روش برآورد رسوب معلق با برقراری روابط بین دبی و رسوب معلق پنج روش یک‌خطی، چندخطی، خطی اصلاح شده با روش FAO، متوسط رسوب در کلاس‌های دبی و روش گرافیکی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از تفاوت در مناسب‌ترین روش برآورد در ایستگاه‌های موردمطالعه بود؛ به‌طوری‌که در بین شش ایستگاه موردمطالعه، در یک ایستگاه روش حد واسط، دو ایستگاه روش خطی، دو ایستگاه روش گرافیکی و یک ایستگاه روش چندخطی، پایین‌ترین میزان خطای مربع متوسط و صحیح‌ترین برآورد را از میزان رسوب معلق نشان می‌داد. داداش‌زاده اصل و همکاران [۳] در پژوهشی بر روی حوزه رودخانه قره‌چای در استان مرکزی، با استفاده از آمار چند واقعه سیلابی در ایستگاه هیدرومتری پل دوآب به ارزیابی و توسعه منحنی سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی واقعه سیلابی پرداختند. برای این منظور ۸ نوع منحنی سنجه‌رسوب یک متغیره شامل یک‌خطی، حد وسط، یک‌خطی-MVUE، حد وسط CF2, CF1, FAO, MVUE و دوخطی و همچنین دو نوع چند متغیره شامل چندجمله‌ای و چند متغیره را با رسوب مشاهداتی در شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف چند واقعه سیلابی مورد مقایسه قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش FAO نسبت به دیگر روش‌ها عملکرد بهتری را نشان می‌دهد، چراکه ضریب FAO ضریب فزاینده‌ای به‌حساب می‌آید و ازاین‌رو برآوردهای زیر حد واقعی منحنی‌های سنجه رسوب یک‌خطی و حد وسط را افزایش می‌دهد. زنگانه و همکاران [۱٦] در پژوهشی بر روی حوزه آبخیز گرگان‌رود در شمال شرق ایران و استان گلستان با استفاده از آمار ۳٤ ساله (۱۳۵۲-۱۳۸٦) ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه، اقدام به تعیین مناسب‌ترین روش برآورد دبی انتقال رسوبات معلق کردند. برای این‌منظور با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی شامل روش CF1, MVUE, FAO, USBR و CF2 اقدام به برآورد رسوب در محل ایستگاه هیدرومتری مذکور کردند. نتایج این محققان نشان داد که روش حد وسط دسته مناسب‌ترین روش در برآورد بار معلق در ایستگاه عنوان‌شده می‌باشد. صمدی بروجنی و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای بر روی حوزه آبخیز سد دز در استان خوزستان با استفاده از آمار ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ در ورودی مخزن سد، منحنی سنجه رسوب روش USBR در دو حالت با اصلاح و بدون اصلاح با روش FAO را تهیه کردند و در ادامه مقادیر برآوردی روش‌های فوق را با کاربرد شاخص آماری درصد خطا با روش پیشنهادی این محققان موسوم به روش نسبت‌ها مورد مقایسه قراردادند. نتایج آنان نشان داد که درصد خطای روش نسبت‌ها برای تخمین بار سالانه رسوب ورودی به سد ۵/۸ درصد هست؛ درحالی‌که این مقدار برای روش USBR برابر با ۲۷ درصد است. یافته‌های این محققان بیان‌گر آن بود که روش توصیه شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک روش خوب برای برآورد رسوب‌دهی رودخانه‌ها در حوزه‌های دارای آمار مورد توجه باشد. در تحقیق حاضر اقدام به‌طور خاص به برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری نوده-خاندوز (با رژیم جریان واریزه‌ای) برای دو دوره آماری (۱۳۷۱-۱۳٤۵) و (۱۳۹٤-۱۳۷۲) با به‌کارگیری منحنی سنجه رسوب یک‌خطی، دوخطی و حد وسط و پنج روش USBR, FAO, MVUE, QMLE و Smearing خواهد شد. سپس نتایج روش‌های مختلف بر اساس دو معیار آماری R.M.S.E و M.A.P.E مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته و مناسب‌ترین روش برای برآورد بار معلق بخصوص برای شرایطی از جریان رودخانه که به صورت معنی‌دار رسوبات افزایش یافته و جریان واریزه‌ای تشکیل می‌شود، معرفی خواهد شد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

رودخانه خرمارود در حوزه آبخیز تیل‌آباد در شمال کشور و شرق استان گلستان واقع شده و یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه گرگان‌رود می‌باشد که از دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و پس از پیوستن شاخه‌های فرعی متعددی به آن به دریای خزر می‌ریزد. منطقه مورد مطالعه با مساحتی بالغ بر ۸۸۹۷۰ هکتار در عرض‌های جغرافیایی ۳٦ درجه و ٤۵ دقیقه و ۲ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۵ دقیقه و ۰ ثانیه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۲ دقیقه و ۷۵ ثانیه تا ۵۵ درجه و ٤۰ دقیقه و ۳۷ ثانیه شرقی قرار دارد. ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز در پایین‌دست حوزه واقع شده است. شکل (۱)، موقعیت حوزه آبخیز تیل‌آباد و رودخانه خرمارود را در حوضه رودخانه گرگان رود، استان گلستان و کشور ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز تیل‌آباد در ایران و استان گلستان

Fig 1. Location of Tilabad watershed in Iran and Golestan province

روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه‌ها

در روش هیدرولوژیکی ابتدا در ایستگاه‌های رسوب سنجی پس از کنترل کیفیت داده‌ها و حذف داده‌های مشکوک و پرت، غلظت مواد معلق (C) بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و گذر حجمی متناظر با آن (Q_W) بر حسب مترمکعب بر ثانیه طی یک دوره آماری بلندمدت اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از رابطه (۱) بار معلق (Q_s) بر حسب تن در روز محاسبه می‌شود.

$$Q_s = 0.0846 \times C \times {}_{Q}W \qquad (۱)$$

در واقع از طریق داده‌های هیدرومتری و رسوب سنجی و با توجه به این که دبی رسوب تابعی از دبی جریان است رابطه‌ای بین Q_w و Q_s ایجاده شده و با استفاده از ارقام بلندمدت گذر حجمی رودخانه، بار معلق بلندمدت رودخانه برآورد می‌شود. در ادامه به معرفی روش‌های گوناگون هیدرولوژیکی برآورد رسوب معلّق و روش‌های منحنی سنجه پرداخته می‌شود. در این تحقیق روش‌های برون‌یابی منحنی سنجه شامل روش یک‌خطی، دوخطی و حد وسط که همگی آن‌ها از رابطه اداره عمران اراضی ایالات‌متحده (USBR) [1] پیروی می‌کنند، تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه به تشریح هر یک از روش‌های مذکور پرداخته می‌شود.

ترسیم منحنی سنجه رسوب: در این مرحله با استفاده از ۸۰ درصد از آمار تفکیک شده کل داده‌های برداشت شده، منحنی سنجه رسوب یک‌خطی، دوخطی و حد وسط در محیط برنامه Excel ترسیم گردید.

منحنی سنجه یک‌خطی: در این روش به‌طور معمول داده‌های غلظت یا دبی رسوب با دبی جریان متناظر آن‌ها، به یک محور تمام لگاریتمی منتقل شده و بهترین خط برازش با استفاده از روش حداقل مربعات خطا از میان نقاط عبور داده می‌شود. معادله این خط به صورت رابطه (۲) است. این روش به روش اداره عمران اراضی ایالات‌متحده (USBR) نیز مرسوم است.

منحنی سنجه چندخطی: اگر وضعیت پراکنش نقاط اجازه دهد، می‌توان به جای یک خط، دو یا سه خط از میان ابر نقاط داده‌ها عبور داد. در این حالت بیش از یک معادله منحنی سنجه رسوب وجود خواهد داشت. در این روش ابتدا منحنی تجمعی داده‌های دبی رسوب نسبت به مقادیر دبی جریان در یک دستگاه مختصات جفت لگاریتمی ترسیم می‌شود، سپس مقدار دبی جریان در نقطه تغییر شیب ناگهانی و زیاد منحنی تجمعی به عنوان مبنا برای تفکیک سری داده‌ها (ابر نقاط) استفاده می‌شود. در مرحله بعد، باید برای هر سری از داده‌ها یک خط رگرسیونی را با بالاترین مقدار ضریب همبستگی طوری برازش داد که دو خط رگرسیونی در مقدار بهینه دبی جریان (مبنای نهایی تفکیک داده‌ها) به هم برسند.

روش حد وسط داده‌ها: این روش که توسط جانسون تشریح شده است، به روش همبستگی بین متوسطه دسته‌ها نیز مرسوم است. هدف از این روش این است که به دبی‌های بالا ارزش بیشتری داده شود. در این روش دبی‌هایی را که در آن‌ها نمونه‌گیری غلظت رسوب انجام شده بر اساس مقدار دبی جریان به صورت صعودی مرتب می‌شود سپس این آمارها با تعیین دامنه‌هایی به چندین دسته تقسیم شده و میانگین هر دسته به دست می‌آید، در مرحله بعد بین دو سری مقادیر دبی جریان آب و غلظت رسوب رابطه رگرسیونی توانی برقرار می‌شود که دارای ضریب همبستگی بالایی نسبت به ضریب همبستگی معادله اولیه است [۲].

روش اداره عمران اراضی ایالات متحده (USBR): در این روش پس از تعیین غلظت نمونه‌های رسوب، با اطلاع از مقدار آبدهی رودخانه در زمان برداشت نمونه، یک رابطه ریاضی (معمولاً غیرخطی) بین بار رسوبی معلّق رودخانه و آب دهی آن برقرار می‌گردد. در عمل با توجه به داده‌های دبی آب و دبی رسوب متناظر با آن، هر دو سری داده به صفحه مختصات لگاریتمی منتقل شده و خط بهترین برازش بر مبنای روش حداقل مربعات [2] از میان آن‌ها عبور داده می‌شود و رابطه‌ای به صورت رابطه (۲) که به منحنی سنجه رسوب معروف است بین دو متغیّر برقرار می‌گردد. در مختصات لگاریتمی مقدار a و b ضرایب ثابت معادله رگرسیونی هستند. تغییرات ضریب a در طول زمان در یک حوزه آبخیز، نشان‌دهنده فشارها و مداخلات انسانی در فرآیند هیدرومورفولوژیکی رودخانه است؛ همچنین پارامتر توانی b برای تعیین مقدار انتقال رسوب یک حوزه بسیار حائز اهمیت است و به‌طور معمول مقدار آن بین ۰/۵ تا ۳ به دست می‌آید، مقدار بالای این پارامتر به معنای حجم بالای انتقال رسوب در جریان رودخانه است. شیب و شکل منحنی سنجه رسوب می‌تواند جهت پی بردن به فرآیندها و عوامل هیدرولوژیکی خاص به کار آید؛ برای مثال منحنی صاف [3] نشان می‌دهد که تقریباً در تمام جریان‌های دبی، به علت فرسایش پذیر بودن حوضه یا وجود مداخلات پیوسته شدید انسانی، رسوبات برای انتقال وجود دارد، شکل مقعر یا برآمده منحنی سنجه نیز نشان‌دهنده آن است که عمده رسوبات حوضه در هنگام رخداد جریان‌های بالاتر انتقال پیدا می‌کنند [۷].

$$Q_s = aQ_w^b \qquad (۲)$$

روش سازمان خواروبار جهانی کشاورزی (FAO) [4]: جونز و همکاران (۱۹۸۱) برای نزدیک کردن مقادیر برآورد شده از منحنی سنجه رسوب به مقادیر مشاهده شده، توصیه نمودند که روابط دبی آب- دبی رسوب به جای ضریب a از ضریب á طبق رابطه ۳ استفاده شود [۹].

$$\acute{a} = \frac{\overline{Q_s}}{\overline{Q_w^b}} \qquad (۳)$$

که در آن $\overline{Q_s}$ متوسط دبی رسوب، $\overline{Q_w}$ متوسط دبی جریان متناظر با آن و b همان ضریب معادله USBR **است.**

1.United State Bureau of Reclamation

2. Least Square Method
3. Flat curve
4. Food and Agricultural Organization

روش برآورد کننده ناااریب با حداقل واریانس (MVUE)[1]: در این روش تصحیح اریب برای هر یک از مقادیر دبی روزانه با استفاده از رابطه ٤ تا ٨ بیان شده است.

$$Q_s = CF_{MVUE}.aQ_w^b \quad (٤)$$

$$CF_{MVUE} = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_{m_i}}{n} \quad (٥)$$

$$g_{m_i} = \frac{m+1}{2m} \times |(1 - V \times S^2)| \quad (٦)$$

$$V = \frac{(Ln(Q_x) - \bar{Q})^2}{Q_{var}} + \left[\frac{1}{N}\right] \quad (٧)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Log\ Qs_{os} - LogQs_{est})^2}{n-2} \quad (٨)$$

در این معادلات Q_S رسوب برآورد شده از روش MVUE، CF_{MVUE} ضریب اصلاحی، aQ_w^b رسوب برآورد شده از منحنی‌های سنجه (روش USBR) برای هر روز، t و g_m تابع فینی، Q_X میانگین دبی جریان روزانه، N تعداد داده، Q_{var} واریانس دبی‌های جریان، $\bar{Q}$ متوسط دبی، S اشتباه استاندارد سنجه و m درجه آزادی معادله رگرسیون (n-1)، Qs_{obs} غلظت رسوبات مشاهداتی (تن در روز) و Qs_{est} غلظت رسوبات برآوردی (تن در روز) و n تعداد نمونه‌های مشاهداتی است [٥].

روش تخمین گر شبه بیشینه درست نما (QMLE)[2]: این روش بر معادله کلی ارائه شده به صورت رابطه (٩) تا (١١) استوار است.

$$Q_s = CF_{QMLE}.aQ_w^b \quad (٩)$$

$$CF_{QMLE} = e^{2.561S^2} \quad (١٠)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Log\ Qs_{obs} - LogQs_{est})^2}{n-2} \quad (١١)$$

که در آن Q_S رسوب برآورد شده از روش QMLE، CF_{QMLE} ضریب اصلاحی، aQ_w^b رسوب برآورد شده از منحنی‌های سنجه (روش USBR) و S^2 مجذور میانگین اشتباه رگرسیون است [٢].

روش اصلاح گر[3]: یک روش غیرپارامتری بوده که شکل کلی آن به صورت رابطه (١٢) تا (١٤) است.

$$Q_s = CF_{Smearing}.aQ_w^b \quad (١٢)$$

$$CF_{Smearing} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} 10^{\varepsilon i}}{N}\right) \quad (١٣)$$

$$\varepsilon i = \log Qs_{obs} . \log Qs_{est} \quad (١٤)$$

که در آن Q_S رسوب برآورد شده از روش Smearing، $CF_{Smearing}$ ضریب اصلاحی، aQ_w^b رسوب برآورد شده از منحنی‌های سنجه (روش USBR)، εi حداقل مربعات باقیمانده با استفاده از معادله منحنی سنجه و در واقع تفاوت لگاریتم طبیعی رسوب مشاهده‌ای و برآوردی است [١٢].

ارزیابی کارایی روش‌ها: با استفاده از ٢٠ درصد دیگر داده‌های رسوب و دو معیار آماری، دقت پنج روش‌های فوق مورد ارزیابی قرار گرفت. دو معیار عبارتند از جذر میانگین مربع خطا (RMSE)[4] و میانگین مطلق خطا (MAE)[5] که روابط آن‌ها به شرح ذیل است:

$$R.M.S.E = \sqrt{\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_o - Q_e)^2\right|} \quad (١٥)$$

$$MAE = n^{-1}\sum_{i=1}^{N}|Q_o - Q_e| \quad (١٦)$$

که در این معادلات، Q_o، مقدار مشاهداتی در طبیعت و Q_e، مقدار رسوب برآوردی است.

نتایج

همان‌طور که بالا تشریح گردید به منظور تفکیک و تعیین میزان اختلاف معنی‌دار بین مقادیر میانه دوره با رژیم جریان طبیعی نسبت به دوره رژیم جریان تغییریافته از آزمون رقم معنی‌داری استفاده شد و دوره زمانی به دو دوره آماری (٧١-١٣٤٥) و (٩٤-١٣٧٢) تفکیک شد. نتایج مربوط به این بخش در منبع [١١] ارائه شده است.

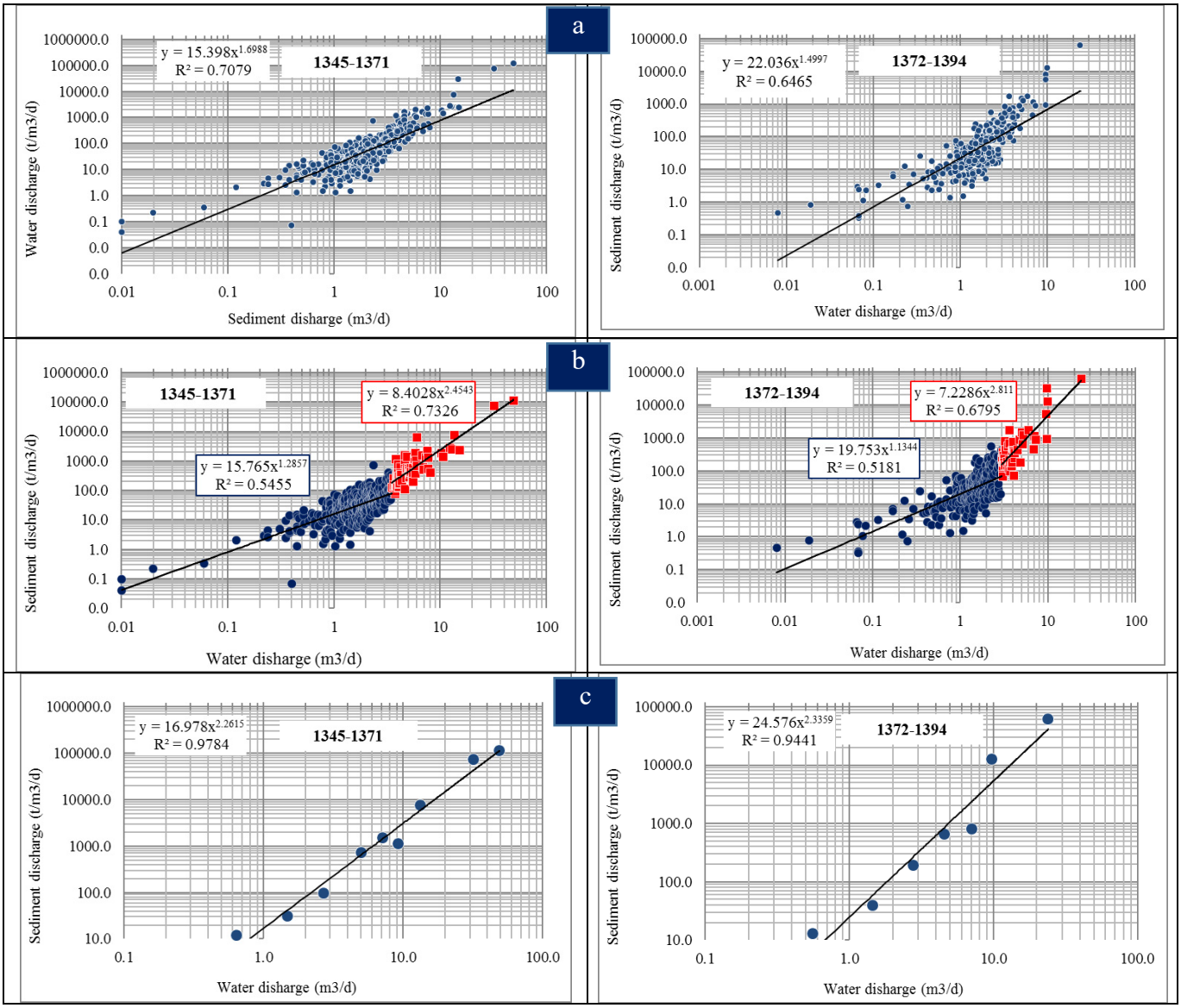
به‌طورکلی معادلات سنجه رسوب و ضرایب آن‌ها برای هر یک از روش‌های منحنی سنجه در دو دوره آماری (١٣٧١-١٣٤٥) و (١٣٩٤-١٣٧٢) در جدول ١ ارائه شده است.

ترسیم منحنی‌های سنجه رسوب: منحنی سنجه یک‌خطی، دوخطی و حد وسط ایستگاه نوده خاندوز، حاصل از روش USBR در شکل (١) و معادله سنجه رسوب و ضرایب ه منحنی سنجه دوخطی پس از ترسیم نمودار منحنی تجمعی دبی رسوب و دبی آب، مناسب‌ترین نقطه تغییر شیب ناگهانی منحنی تجمعی رسوب و دبی جریان متناظر با آن مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت برای دوره آماری (١٣٧١-١٣٤٥) دبی کمتر و بیشتر از ٣/٥ مترمکعب بر ثانیه و برای دوره آماری (٩٤-١٣٧٢) دبی کمتر و بیشتر از ٣ مترمکعب بر ثانیه جهت تفکیک داده‌ها و ترسیم منحنی سنجه دوخطی معین گردید. دامنه دسته‌ها برای ترسیم منحنی سنجه حد وسط در دو دوره آماری مذکور نیز بر حسب تغییرات شیب منحنی تجمعی رسوب و دبی آب تعیین شد. به این ترتیب در مجموع در دوره آماری (٧١-١٣٤٥) ٩ دسته و در دوره آماری (٩٤-١٣٧٢) ٧ دسته تعیین گردید و با محاسبه متوسط دبی رسوب و دبی جریان هر یک از دسته‌ها، منحنی سنجه رسوب حد وسط ترسیم گردید (جدول ٢).

1. Minimum Variance Unbiased Estimator
2. Quasi-Maximum Likelihood Estimator
3

4. Root Mean Square Error
5. Mean Absolute Error

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، ضریب a، b و زاویه خط گرادیان (بخصوص زاویه خط گرادیان مربوط به دبی بیشتر از ۳ مترمکعب در منحنی سنجه دوخطی) برای سه منحنی سنجه رسوب در دو دوره آماری مورد مطالعه تغییر و افزایش پیدا کرده است. مقدار بالای پارامتر توانی b برای دبی‌های بالای سه مترمکعب بر ثانیه (دوره آماری ۹۴-۱۳۷۲) به معنای حجم بالای انتقال رسوب در جریان رودخانه است. به‌طورکلی تقریباً در تمام جریان‌های دبی، به علت فرسایش پذیر بودن حوضه یا وجود مداخلات پیوسته شدید انسانی، رسوبات برای انتقال وجود دارد اما عمده رسوبات حوضه در هنگام رخداد جریان‌های بالاتر انتقال



شکل ۲- منحنی سنجه a) یک‌خطی؛ b) دوخطی و c) حد واسط ایستگاه هیدرومتری نوده-خاندوز بر اساس روش USBR و دو دوره آماری (۱۳۷۱-۱۳۴۵) و (۱۳۹۴-۱۳۷۲)

Fig 2. Measurement curve a) one-line; b) two-line and c) the interface of Nodeh-Khandouz hydrometric station based on USBR method and two statistical periods (1966-1992) and (1993-2015)

جدول ۱- معادله سنجه رسوب و ضرایب آن در هر یک از روش‌های منحنی سنجه و دو دوره آماری (۱۳۷۱-۱۳٤٥) و (۱۳۹٤-۱۳۷۲)

Table 1. Sediment measurement equation and its coefficients in each of the methods of measurement curve and two statistical periods (1966-1992) and (1993-2015)

معادله سنجه رسوب Sediment measurement equation	R^2	تعداد داده (N) Number of data	دوره آماری Statistical course	روش منحنی سنجه Curve measurement method
$Q_s=15.398Q_w^{1.6988}$	0.71	4521	1966-1992	یک‌خطی One-line
$Q_s=22.036Q_w^{1.499}$	0.65	299	1993-2015	
$Q_s=15.765Q_w^{1.285}$	0.55	382	1966-1992	دوخطی- دبی کمتر از ۳/۵ (m^3/s) Two-line - flow less than 3.5 (m^3 / s)
$Q_s=8.4028Q_w^{2.454}$	0.73	70	1966-1992	دوخطی- دبی بیشتر از ۳/۵ (m^3/s) Two-line - flow greater than 3.5 (m^3 / s)
$Q_s=19.753Q_w^{1.1344}$	0.52	251	1993-2015	دوخطی- دبی کمتر از ۳ (m^3/s) Two-line - flow less than 3 (m^3 / s)
$Q_s=7.228Q_w^{2.811}$	0.68	48	1993-2015	دوخطی- دبی بیشتر از ۳ (m^3/s) Two-line - flow greater than 3 (m^3 / s)
$Q_s=16.978Q_w^{2.2614}$	0.98	9	1966-1992	حد واسط Intermediate
$Q_s=24.576Q_w^{2.336}$	0.94	7	1993-2015	

جدول ۲- اطلاعات دسته‌های داده برای ترسیم منحنی سنجه رسوب حد وسط

Table 2. Data set information to plot the average sediment measurement curve

دوره آماری (۱۳۹٤-۱۳۷۲) Statistical course (1993-2015)		دوره آماری (۱۳۷۱-۱۳٤٥) Statistical course (1966-1992)		دامنه دبی (m^3/s) Flow rate (m^3/s)	دسته Category
متوسط دبی رسوب (تن در روز) Average sediment flow rate (tons /day)	دبی متوسط (m^3/s) Medium flow (m^3 /s)	متوسط دبی رسوب (تن در روز) Average sediment flow rate (tons /day)	دبی متوسط (m^3/s) Medium flow (m^3 /s)		
12.8	0.6	11.9	0.6	<1	1
39.6	1.5	31.4	1.5	1-2	2
192.7	2.8	98.1	2.7	2-4	3
662.8	4.6	560.6	5	4-6	4
805.8	7	857.3	7.2	6-8	5
12666.6	9.8	1124.4	9.2	8-10	6
-	-	7442.3	13.2	10-20	7
62000	24	-	-	20-30	8
-	-	72874.9	32	30-40	9
-	-	112301.4	49	40-50	10

پیدا می‌کنند.

محاسبه ضرایب اصلاحی روش‌های مختلف

نتایج ضرایب اصلاحی روش‌های مختلف برای اصلاح کم تخمینی تبدیل لگاریتمی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- ضرایب اصلاحی روش‌های مختلف برای کاهش کم تخمینی تبدیل لگاریتمی برای دو دوره آماری (۱۳۷۱-۱۳۴۵) و (۱۳۹۴-۱۳۷۲)

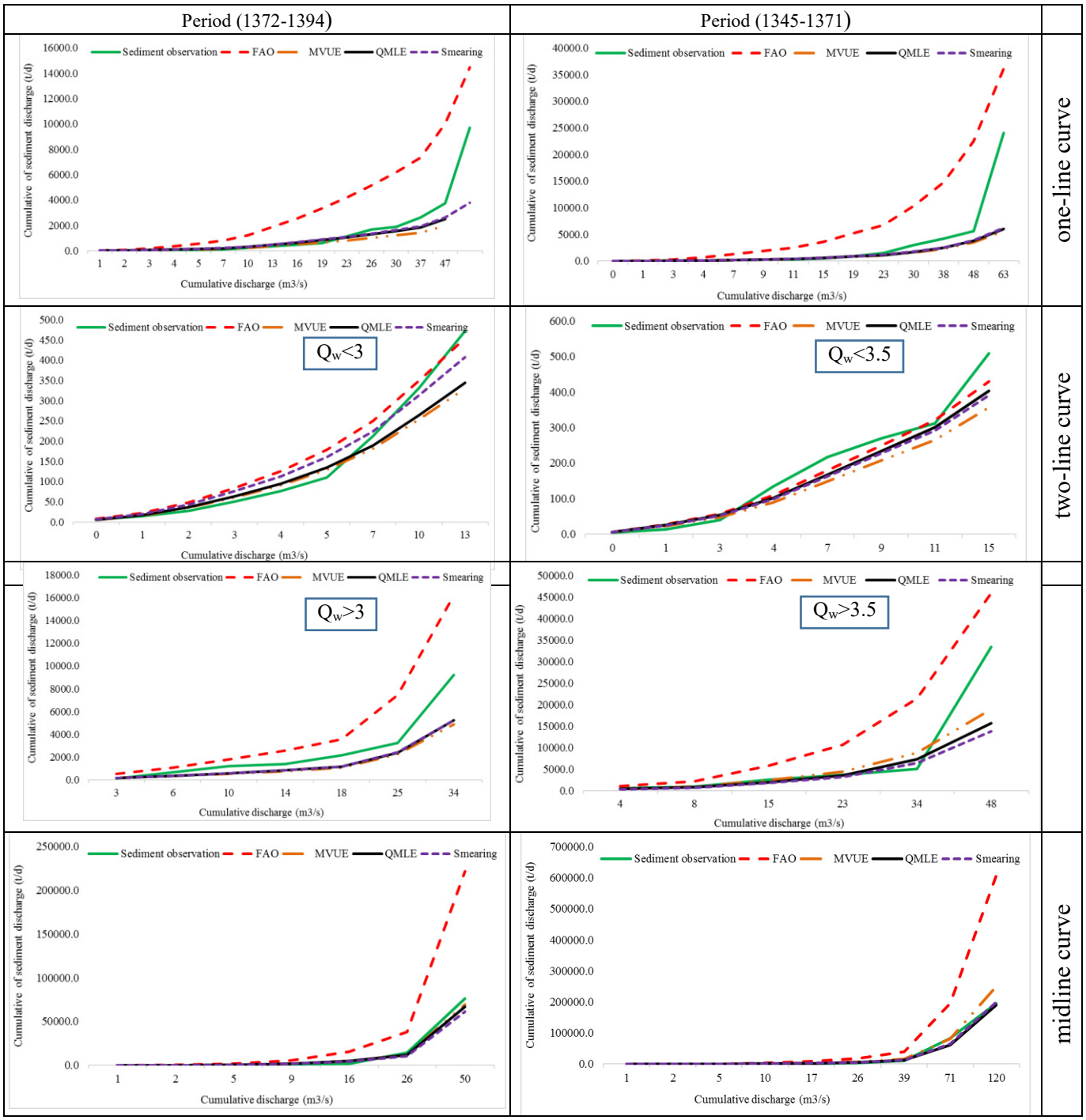
Table 3. Correction coefficients of different methods to reduce the estimated logarithmic transformation for two statistical periods (1966-1992) and (1993-2015)

Smearing	QMLE	MVUE	FAO (á)	دوره آماری Statistical course	روش منحنی سنجه Curve measurement method
1.51	1.51	1.4	138.6	1966-1992	یک‌خطی One-line
1.74	1.65	1.3	145.9	1993-2015	
1.35	1.39	1.23	23.4	1966-1992	دوخطی- دبی کمتر از ۳/۵ (m^3/s) Two-line - flow less than 3.5 (m^3 / s)
1.17	1.32	1.6	32.6	1966-1992	دوخطی- دبی بیشتر از ۳/۵ (m^3/s) Two-line - flow greater than 3.5 (m^3 / s)
1.48	1.50	1.2	32.6	1993-2015	دوخطی- دبی کمتر از ۳ (m^3/s) Two-line - flow less than 3 (m^3 / s)
1.40	1.39	1.3	31.2	1993-2015	دوخطی- دبی بیشتر از ۳ (m^3/s) Two-line - flow greater than 3 (m^3 / s)
1.2	1.14	1.5	61.8	1966-1992	حد واسط Intermediate
1.23	1.34	1.4	109.6	1993-2015	

مقایسه و ارزیابی منحنی سنجه رسوب

در این مرحله از تحقیق، ٤٠ مقدار برآوردی حاصل از سه منحنی سنجه (۸ معادله سنجه) با احتساب ضرایب اصلاحی و بدون احتساب ضرایب اصلاحی با مقادیر مشاهده‌ای ۲۰ درصد از کل داده‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به اینکه منحنی سنجه دوخطی دارای دو معادله می‌باشد، در مرحله برآورد رسوب با استفاده از این دو معادله، مقادیر رسوب در قالب روش دوخطی محاسبه گردید. برای مقایسه میزان برآورد روش‌های مذکور با مقادیر مشاهده‌ای ابتدا با استفاده از ۲۰ درصد داده‌ها، منحنی تجمعی رسوب برآوردی هر یک از روش‌های منحنی سنجه یک‌خطی، دوخطی و حد وسط با احتساب ضرایب اصلاحی و بدون احتساب ضرایب اصلاحی برای دو دوره آماری مورد مطالعه با منحنی تجمعی رسوب مشاهداتی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت (شکل ۲). در ادامه جهت انتخاب مناسب‌ترین منحنی سنجه و ضریب اصلاحی، مقادیر برآوردی روش‌های مذکور با مقادیر مشاهده‌ای با استفاده از معیارهای آماری R.M.S.E و M.A.E مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در نهایت روشی که در مجموع کمترین خطاهای آماری را در مقایسه با سایر روش‌ها داشته باشد به‌عنوان روش مناسب جهت برآورد دبی رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه معرفی گردید (جدول ٤). با بررسی منحنی‌های تجمعی برآوردی مشخص شد که روش‌های منحنی سنجه رسوب بدون ضرایب اصلاحی در برآورد دبی رسوب تخمین کم دارند و در بین این روش‌ها به‌ترتیب روش منحنی یک‌خطی، دوخطی و حد وسط کمترین مقدار رسوب را برآورد نمودند. نتایج مربوط به روش‌های منحنی سنجه با ضرایب اصلاحی نشان داد که ضریب اصلاحی FAO در همه روش‌های منحنی سنجه به‌جز منحنی دوخطی با دبی کمتر ۳/۵ مترمکعب بر ثانیه (دوره ۷۱-۱۳٤۵) و دبی کمتر از ۳ مترمکعب بر ثانیه (دوره ۹٤-۱۳۷۲) دارای بیش تخمینی است. درحالی‌که سایر روش‌ها کمترین بیش تخمینی را دارند. شایان ذکر است که نتایج حاصل از ارزیابی و مقایسه روش‌های برآوردی رسوب توسط معیار RMSE با مقادیر مشاهداتی و منحنی‌های تجمعی دبی رسوب (شکل ۲) منطبق نمی‌باشد. این بدین علت است که برای متغیرهایی مانند رسوب که با افزایش دبی جریان آب، تغییرپذیری زیادی دارند (بخصوص دوره ۹٤-۱۳۷۲ که با افزایش دبی، رسوب به صورت تصاعدی افزایش پیدا کرده است)، وقتی اختلاف بین مقادیر برآوردی و مشاهداتی در این معادله به توان ۲ می‌رسد منجر به افزایش اختلاف مقادیر رسوب برآوردی در بین دبی جریان کم تا زیاد می‌شود و در نهایت میانگین مقادیر به دست آمده از معادله RMSE منطبق با شرایط واقعی نیست. بنابراین این معیار برای متغیرهایی که تغییرات افزایشی یا کاهشی آن‌ها نسبت به متغیر مستقل به صورت تصاعدی است توصیه نمی‌شود. با این وجود پس از ارزیابی و مقایسه روش‌های برآورد رسوب توسط معیار MAE مشخص شد که برای برآورد رسوب در دوره آماری (۷۱-۱۳٤۵) روش منحنی سنجه یک‌خطی با ضرایب اصلاحی به ترتیب الویت روش Smearing، QMLE و MVUE مناسب است و برای دوره آماری (۹٤-۱۳۷۲) روش منحنی سنجه دوخطی و ضریب اصلاحی به ترتیب اولویت روش Smearing، QMLE و MVUE مناسب

هستند. در نتیجه با استفاده آمار دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری نوده–خاندوز در دو دوره زمانی مذکور، مقادیر رسوب متناظر برآورد گردید. و نتایج آن در شکل (۳) و (٤) ارائه شده است.



شکل ۳- مقایسه منحنی‌های تجمعی روش‌های برآورد دبی رسوب با منحنی تجمعی رسوب مشاهداتی برای دو دوره آماری (۱۳۷۱-۱۳٤٥) و (۱۳۷۲-۱۳۹٤)

Fig 3. Comparison of cumulative curves of sediment discharge estimation methods with cumulative sediment accumulation curves for two statistical periods (1966-1992) and (1993-2015)

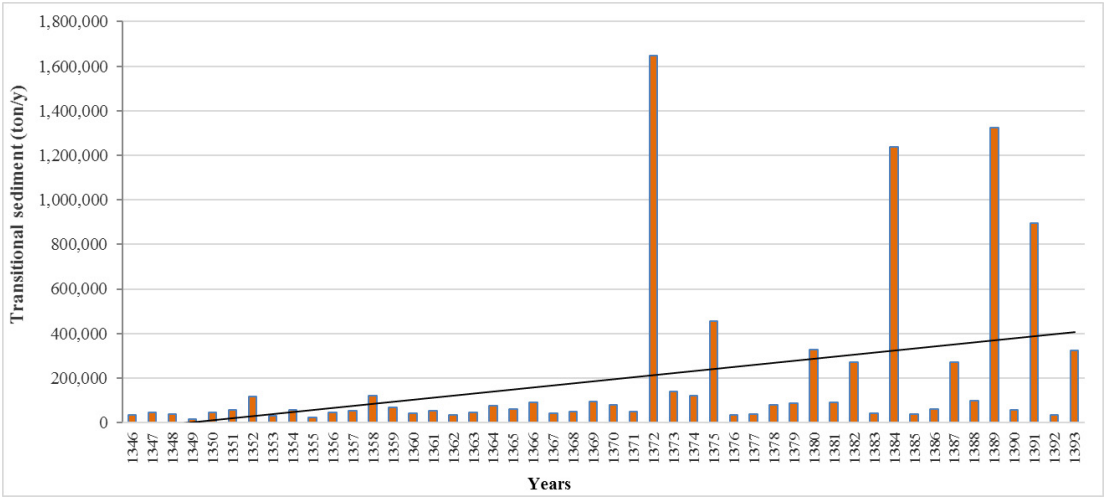
جدول ٤- مقادیر و رتبه معیارهای آماری RMSE و MAE برای ارزیابی و مقایسه روش‌های برآورد دبی رسوب برای دو دوره آماری (۱۳۷۱-۱۳٤٥) و (۱۳۹٤-۱۳۷۲)

Table 4. Values and rank of RMSE and MAE statistical criteria for evaluation and comparison of sediment flow estimation methods for two statistical periods (1966-1992) and (1993-2015)

رتبه میانگین مجموع امتیاز ضرایب اصلاحی برای سه نوع منحنی	MAE					RMSE					دوره زمانی	روش منحنی سنجه	
	Smearing	QMLE	MVUE	FAO	USBR	Smearing	QMLE	MVUE	FAO	USBR			
	1292.7	1302.8	1330.5	1554.9	1434.9	65.6	65.8	66.1	49.3	67.4	T_1	A	مقادیر معیارها
	412.2	417.1	439.9	493.8	473.4	34.9	35.2	36.1	26.0	36.8	T_2		
	26.2	26.1	27.1	25.9	30.2	7.4	7.4	7.5	7.3	7.7	Q_w<3.5 T_1	B	
	3992.5	3899.4	3748.7	3388.2	4100.3	92.9	90.9	87.1	67.3	95.1	Q_w >3.5 T_1		
	18.3	20.1	20.4	17.2	22.7	4.9	5.5	5.6	4.5	6.2	Q_w <3 T_2		
	632.3	634.2	651.6	995.4	784.5	34.8	34.9	35.9	38.8	39.0	Q_w >3 T_2		
	5226.3	4767.8	7813.4	45547.3	3731.5	102.3	98.2	138.5	321.5	99.9	T_1	C	
	2925.8	2255.1	1889.3	20786.5	4328.2	70.7	59.4	53.4	215.1	91.7	T_2		
3	1	2	3	5	4	7	8	9	2	10		A	رتبه معیارها
8	9	8	7	6	10	5	4	3	1	6	T_1	میانگین B	
13	14	13	15	12	11	13	11	14	15	12		C	
6.8	4	6	7	9	8	7	8	9	6	10		A	
4.2	1	2	3	10	5	1	2	3	4	5	T_2	میانگین B	
12	13	12	10	11	14	13	12	11	15	14		C	
	7	7.17	7.5	8.83	8.67	7.67	7.5	8.18	7.17	9.5	میانگین رتبه معیارها		

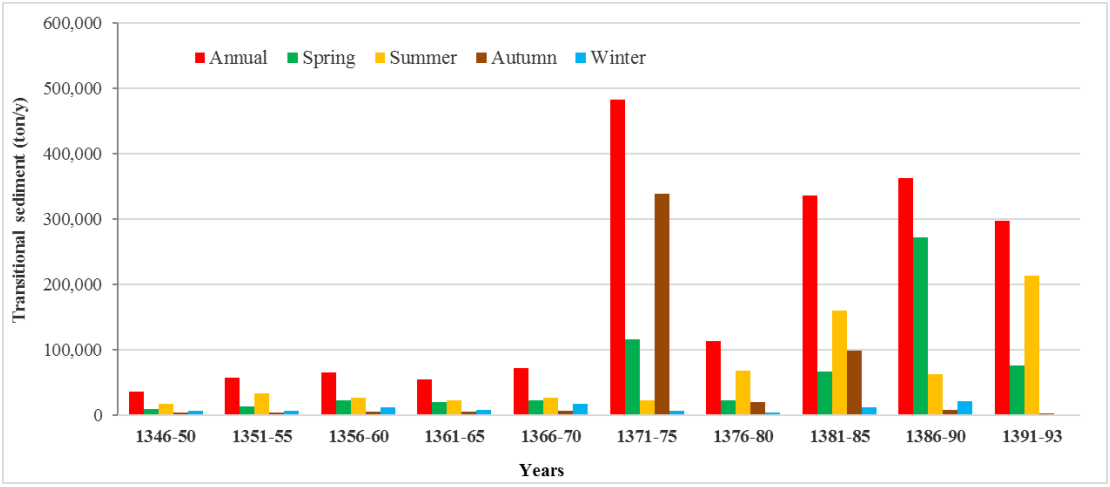
A= منحنی یک‌خطی؛ B= منحنی دوخطی؛ C= منحنی حد وسط و Q_w= دبی آب

T_1= دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳٤٥ و T_2= دوره آماری ۱۳۹٤-۱۳۷۲



شکل ٤- نمودار تغییرات مقادیر سالانه دبی رسوب انتقالی ایستگاه نوده خاندوزه در طی دوره آماری چندین ساله (تن در سال)

Fig 4. Graph of changes in annual discharge rates of transfer sediment at Nodeh Khandozeh station during several years (tons per year)



شکل ۵- نمودار تغییرات میانگین مقادیر پنج ساله (سالانه و فصلی) دبی رسوب انتقالی ایستگاه نوده خاندوزه در طی دوره آماری چندین ساله (میانگین تن در دوره پنج ساله)

Fig 5. Chart of changes in the average five-year values (annual and seasonal) of sediment transfer discharge at Nodeh Khandozeh station during the statistical period of several years (average ton in the five-year period)

بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در شکل (۳) و (٤) مشاهده می‌شود رژیم رسوب در دوره قبل از سال ۱۳۷۲ طبیعی بوده اما از سال ۱۳۷۲ با شروع رخدادهای سیل‌های بزرگ، رژیم دبی رسوب با شدت زیاد و روند افزایشی از حالت طبیعی خارج‌شده است به‌طوری‌که در دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹٤ بیشترین میزان انتقال رسوب به صورت جریان واریزه‌ای در حوزه مورد مطالعه به وقوع پیوسته است. بیشترین مقدار انتقال رسوب در فصول مختلف به ترتیب مربوط به فصل تابستان، بهار، پاییز و زمستان است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حجم غالب رسوبات انتقالی از حوزه در دوره رژیم رسوب تغییریافته از طریق سیل‌های بزرگ که در فصل تابستان و بهار رخداده است از حوزه مورد مطالعه خارج می‌شوند. ضریب a، b و زاویه خط گرادیان (بخصوص زاویه خط گرادیان مربوط به دبی بیشتر از ۳ مترمکعب در منحنی سنجه دوخطی) برای سه منحنی سنجه رسوب در دو دوره آماری مورد مطالعه تغییر و افزایش پیدا کرده است. این تغییرات در طول زمان نشان‌دهنده فشارها و مداخلات انسانی در فرآیند هیدرومورفولوژیکی رودخانه است. در روش FAO وجود داده‌های با مقادیر رسوب زیاد در زوج متناظر دبی آب-دبی رسوب تأثیر زیادی روی ضریب á به وجود می‌آورد، زیرا در معادله آن، تغییرات مخرج کسر به مراتب محدودتر از صورت کسر است که این امر از نقاط ضعف روش FAO است. این به این معنی است که این روش، میزان رسوب معلق محاسبه شده را بیشتر از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد. در روش حد وسط دسته‌ها، به‌واسطه کاهش اثر نقاط پایین، برآورد رسوب‌دهی در دبی‌های بالا بهبود می‌یابد. همچنین پراکنش نقاط کاهش یافته و خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی به حداقل می‌رسد. اما از طرفی منجر به افزایش معنی‌دار مجموع رسوب سالانه می‌شود این به این علت است که بخش عمده دبی جریان رودخانه در طول سال را جریان پایه و حداقل تشکیل می‌دهد و با توجه به اینکه اثر این دبی‌ها (نقاط پایین گرادیان) در این روش کاهش پیدا می‌کند، مجموع رسوب به دست آمده به تبع افزایش پیدا می‌کند. بنابراین این روش برای رودخانه‌هایی که آمار مقادیر رسوبات آن در طی دوره آماری، انحراف از معیار زیادی داشته باشد مناسب نمی‌باشد. معیار RMSE برای متغیرهایی که تغییرات افزایشی یا کاهشی آن‌ها نسبت به متغیر مستقل به صورت تصاعدی است توصیه نمی‌شود. نتایج نشان داد که در بین روش‌ها، روش منحنی یک‌خطی و ضریب اصلاحی Smearing برای دوره رژیم رسوب طبیعی (۷۱-۱۳٤۵) و روش منحنی دوخطی و ضریب اصلاحی Smearing برای دوره رژیم رسوب تغییریافته (۷۲-۱۳۷۲) دقت بیشتری در برآورد دبی رسوب دارند از طرفی روش منحنی یک‌خطی بدون احتساب ضرایب اصلاحی خطای کم تخمینی بالاتری دارد و از بین ضرایب اصلاحی عنوان شده، ضریب FAO خطای بیش تخمینی بسیار بالایی دارد.

شایان ذکر است با توجه مقادیر مشاهداتی زوج نقاط متناظر دبی رسوب- دبی آب در حوزه مورد مطالعه، میزان دبی به صورت واحد نمی‌تواند یک معیار اساسی برای تولید و برآورد رسوب در نظر گرفته شود، زیرا در برخی مواقع بخصوص در سال‌های اخیر، مقادیر دبی کم، رسوب زیادی تولید کرده‌اند. اما به‌طورکلی با افزایش دبی به صورت تصاعدی، مقدار دبی نیز افزایش پیدا کرده است.

منابع

1. Akbarzadeh, M.R. Ghezelsofloo, A. Hajibigloo, M. and Khodashenas, S.R. 2014. Selecting the Most Appropriate Method

of Basin Sediment Estimation by Sediment Rating Curves at Hydrometric Stations (Case study: Atrak basin). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 4(6): 661-671.

2. Atalu, N. 2015. Comparison of Mathematical Models and Sediment Rating Curves in Estimating the Suspended Load of Nazluchay River in Urmia, Master of Thesis in Watershed Management Science and Engineering. Urmia University. 123 p. (In Persian)

3. Dadashzade asl, F. Mohseni saravi, M. Ahmadi, H. and Vervani, J. 2009. Assessment and development Sediment Rating Curves for load estimation of flood events (Case Study: Watershed Gharachay). Journal of Pazhouhesh va Sazandeghi (Watershed Management Research). 84: 28-35. (In Persian)

4. Dastorani, J. Babaei, A. Rezaei Rad, N. 2007. Application of flow and sediment discharge data on the effect of earthquakes on the Sefidrood watershed sediment, 10th Congress of Soil Science Iran, Karaj, Tehran University College of Agriculture and Natural Resources. (In Persian)

5. Endreny, Th. and Hassett, J. 2005. Robustness of pollutant loading estimators for sample size reduction in a suburban watershed. Intl. J. River Basin Manage. (IAHR & INBO), 3: 1. 53-66.

6. Guide erosion and sediment studies in Accounting rivers, 2007, Publication No. 383, vice president of strategic planning and monitoring.

7. Heng, S. and Suetsugi, T. 2014. Comparison of regionalization approaches in parameterizing sediment rating curve in ungauged catchments for subsequent instantaneous sediment yield prediction. Journal of Hydrology, 512: 240-253.

8. Horowitz A. J. 2003. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. Hydrological Processes 17: 3387–3409.

9. Jones, K.R., Berney, O., Carr, D.P., and Barret, E.C. 1981. Arid zone hydrology for agricultural development. FAO Irrigation and Drainage Paper, 37: 271.

10. Kao, Sh., Lee, T., and Milliman, J.D. 2005. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. TAO, 16: 3. 653-675.

11. Khosravi, Gh. Sadoddin, A. Ownegh, Bahremand, A. and M. Mostafavi, H. 2019. Classification and identification of changes in river flow regime using the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) Case study: (The Khormarud River- Tilabad Watershed-Golestan Province). Ecohydrology. 6(3): 651-671. (In Persian)

12. Pavanelli, D. and Bigi, A. 2004. Suspended sediment concentration for three apennine monitored basins, particle size distribution and physical parameters.P 537 -544, In: The Agro Environment Congress, Venice, Italy.

13. Sadeghi, S.H.R. Mizuyama, T. Miyata, S. Gomi, T. Kosugi, K. Fukushima, T. Mizugaki, S. and Onda, Y. 2008. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. Geoderma, 144: 198-211.

14. Sadeghi, S.H.R. Tofighi, B. Mahdavi, M. 2006. Sediment estimat ion modeling in Zarrinderakht watershed, Iranian j. Natural Res. 58(4): 759-768. (In Persian).

15. Samadi, H. Zamaniyan, M. and Hoseinpor, F. 2013. Discharge-Sediment Relative Approach (DSRA) to Estimate of the Annual River Sediment Delivery. Journal of Irrigation and Water Engineering. 3(11): 35-46. (In Persian)

16. Zanganeh, M.E. Mosaedi, A. Meftah Halghi, M. and Dehghani, A.A. 2011. Determination of Suitable Method for Estimating Suspended Sediments Discharge in Arazkoose Hydrometric Station (Gorganrood Basin). Journal of Water and Soil Conservation, Vol. 18(2): 85-103. (In Persian)

نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 16, No. 56, Spring 2022
سال شانزدهم- شماره ٥٦- بهار ١٤٠١

Assessment of Corrective Methods for Estimating Suspended Sediment Load for Rivers with Debris Sediment Flow Regime in Khorramarood River - Golestan Province

O. Asadi Nalivan[1], GH. Khosravi[2], M. Teimouri[3] and F. Vakili Tajareh[4]

Received: 26-02-2021 Accepted: 29-04-2021

Abstract

In the present research, changes in sediment regime in two statistical periods of "natural flow" and "modified / debris flow" were evaluated. In order to determine the significant difference between two mentioned periods (1966-1992) and (1993-2015), the significance test was used. In order to determine the most suitable method of Sediment Rating Curve and correction coefficients, the results of simple linear, bilinear, midline rating curve methods as well as the mentioned rating curves with correction coefficients including correction coefficients of FAO, MVUE, QMLE and Smearing methods were evaluated. The results showed that since 1993, with the onset of large floods, the sediment discharge regime with a high intensity and increasing trend is out of normal and in the period 2011 to 2015, the highest rate of sediment transfer in the form of debris flow has occurred. Among the methods, the one-line curve method and the smearing correction factor for the natural sediment regime period (1966-1992) and the two-line curve method and the smearing correction coefficient for the modified sediment regime / debris flow period (1993-2015) are more accurate in estimating sediment flow. On the other hand, the one-line curve method without taking into account the correction coefficients have a higher low estimation error and among the mentioned correction coefficients, the FAO coefficient has a very high overestimation error. In the batch middle method, sediment estimation at high discharges is improved by reducing the effect of low points.

Keywords: Sediment regime, Sediment rating curve, Corrective coefficients for suspended load estimation, Khorrmarood

1. Corresponding author and Ph.D Graduated in Watershed Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Email: omid.asadi@alumni.ut.ac.ir
2. Ph.D Graduated in Watershed Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
3. Assistant Professor,Department of Nature Engineering, Shirvan Faculty of Agriculture, University of Bojnord, Iran
4. Ph.D Student in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.