نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۳، شماره ۳، ۱۴۰۰، صفحات ۵۷۷-۵۸۹

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 13, Issue 3, 2021, Pages 577-589
DOI: 10.22092/ijwmse.2021.351823.1837

ارزیابی مدل‌های برآورد بار کف رودخانه به‌منظور معرفی مدل مناسب، مطالعه موردی: رودخانه حبله‌رود

رضا ایزدپناه*[۱]، سید علی‌اصغر هاشمی[۲] و علیرضا فرخی[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی، گرمسار، [۲] استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، سمنان، ایران و [۳] مربی، موسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی، گرمسار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵

چکیده

برآورد صحیح میزان رسوب‌دهی یک حوزه آبخیز از مهمترین مسائل مطرح‌شده در مهندسی آب، مهندسی رودخانه، منابع آب، تأسیسات و سازه‌های آبی و محیط زیست برای اجرای طرح‌ها و برنامه‌های توسعه‌ای است. تنوع زیاد معادلات برای محاسبه مقدار بار رسوب در رودخانه و نبود اطلاعات در مورد نحوه استخراج معادلات، استفاده از آن را مشکل کرده است. هدف این پژوهش، استفاده از مدل‌های مختلف برای برآورد بار کف با مطالعه موردی رودخانه حبله‌رود به‌منظور شناسایی بهترین مدل برای تخمین بار کف رودخانه است. مشخصات هندسی رودخانه حبله‌رود و مقطع جریان از بانک اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای سمنان جمع‌آوری و دانه‌بندی رسوبات نمونه‌برداری شده به روش الک انجام شد. مقدار بار بستر رودخانه در ایستگاه هیدرومتری بنکوه، با استفاده از رگرسیون‌های مختلف و از طریق روابط مایر-پیتر-مولر، انشتین-براون، بگنولد و توفالتی محاسبه شد. نتایج حاصل از این روابط با نتایج ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری بنکوه در بازه زمانی ۱۳۹۶-۱۳۹۰ مورد مقایسه قرار گرفت که نشان داد، روش توفالتی با مقدار RMSE، MAE و R^2 برابر ۲۰/۰۷، ۱۰/۸۶ و ۸۳ درصد بهترین پیش‌بینی را از مقدار بار کف در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه می‌دهد. مسیر عبوری و حوزه آبخیز رودخانه حبله‌رود از مناطق کوهستانی تشکیل شده است و عمده مسیر از سنگ‌های مختلفی تشکیل شده است که دارای فرسایش‌پذیری بالایی است، بنابراین رابطه توفالتی، تخمین مناسبی از رودخانه‌های واقع شده بر اقلیم کوهستانی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌دهی، تحلیل حساسیت، رابطه توفالتی، روابط تجربی، معادله مناسب

مقدمه

تولید رسوب از ویژگی‌های ذاتی هر رودخانه است که باعث به‌وجود آمدن تغییراتی در ساختار رودخانه در طی سالیان می‌شود. بار رسوبی در یک رودخانه می‌تواند باعث به‌وجود آوردن مشکلات زیادی از قبیل آسیب‌زدن به تأسیسات و تجهیزات واقع شده در مجاورت رودخانه‌ها شود. در واقع وجود رسوبات، موجب بروز اختلال در عملکرد بهینه طراحی‌های صورت گرفته و کاهش راندمان مصرف در طی دوره بهره‌برداری شده و همواره هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیر را افزایش خواهد داد (Rostmi و Donyadide، ۲۰۱۶). بنابراین، محاسبه مقدار بار رسوبی از اهمیت بالایی برای مهندسان آب برخوردار است (Teymouri و Dehghani، ۲۰۲۰).

* مسئول مکاتبات: r.izadpanah.new@gmail.com

بار کل رسوبی یک رودخانه از مجموع بار معلق و بار کف به‌دست می‌آید. تعیین بار معلق و بستر، با استفاده از روابط و توابعی که حاصل اندازه‌گیری‌های محققین بر روی رودخانه‌های دارای شرایط مشترک هستند، حاصل می‌شوند. بار بستر یا بار کف بخشی از بار تشکیل‌دهنده رودخانه‌ها و مجراهای طبیعی است و از آنجا که اهمیت ویژه‌ای در تعیین میزان انتقال رسوب در رودخانه‌ها دارد، پژوهش‌های گسترده‌ای در این خصوص طی سالیان اخیر با استفاده از روش‌های مختلف صورت گرفته است. اولین بررسی‌ها در این زمینه به‌وسیله دوبویز در سال ۱۸۷۹ مربوط به ساز و کار تشکیل این نوع از رسوبات می‌باشد. نتایج حاصل از تحقیقات دوبویز نشان‌دهنده این بود که تنش برشی ناشی از جریان آب بر روی بار بستر باعث افزایش شدت تولید این نوع از رسوبات در رودخانه می‌شود (Liederman و همکاران، ۲۰۱۸).

با توجه به این موضوع که عوامل متعددی در کم و کیف رسوبات وجود دارد، تعداد روابط پیشنهادی به‌وسیله متخصصین گسترده و از تنوع زیادی برخوردار می‌باشد. در سال‌های اخیر تلاش شده است تا مقدار بار سوبی با استفاده از چندین روش تجربی محاسبه شود و بهترین برآورد انتخاب شود. در این خصوص، پژوهش‌هایی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است از جمله Esllman (۲۰۰۰)، James و همکاران (۲۰۱۰)، Haddadchi و همکاران (۲۰۱۱)، Arabkhedri (۲۰۱۴)، Samadian Fard و همکاران (۲۰۱۴)، Mohamadzadeh و Panah (۲۰۱۴) و Eidi و همکاران (۲۰۱۹). در پژوهشی، James و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از مطالعه تحلیل حساسیت Ricken man (۱۹۹۰)، به بررسی برآورد بار کف در برخی از حوضه‌های بزرگ پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌ها و روش تجربی میر-پیتر-مولر مقدار بار کف در رودخانه را محاسبه کردند و با مقایسه نتایج با مدل میر-پیتر-مولر به نتایج متفاوتی رسیدند و بیان کردند که دقت این روش در محاسبه مقدار بار کف، مطلوب نسیت. نتایج حاصل از مطالعه رودخانه‌های دز و میناب به‌وسیله Arabkhedri (۲۰۱۴) حاکی از این است که نسبت بار کف به بار معلق بسیار بالاتر از رقم‌های کارشناسی ۲۰-۱۵ درصد متداول در مطالعات منابع آب است. وی پیشنهاد کرد که در این مورد و برای یافتن مقدار دقیق‌تر بار کف، می‌بایست رابطه‌ها و روش‌های جدیدی استخراج کرد. هشت روش مختلف برای برآورد بار کف رودخانه به‌وسیله SamadianFard و همکاران (۲۰۱۴) در رودخانه اهرچای آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفت و ایشان به این نتیجه دست یافتند که مناسب‌ترین روش تخمین بار کف مایر-پیتر-مولر است. در مطالعه‌ای Haddadchi و همکاران (۲۰۱۱) با کاربرد ۱۳ معادله مختلف در رودخانه چهل‌چای گلستان، به بررسی بار کف آن رودخانه پرداختند. مبنای مطالعه ایشان بر اساس نسبت ناجوری که عبارت از حاصل تقسیم نرخ حمل پیش‌بینی شده به مقدار متناظر اندازه‌گیری شده است، صورت پذیرفت. یافته‌های پژوهش حاکی از آن بود که رابطه ایکرز-وایت با مقدار نرخ حمل پیش‌بینی ۶۴/۳ درصد، دارای نسبت ناهمگنی ۰/۵ تا دو می‌باشد، همچنین، این مقدار در معادلات مایر-پیتر-مولر و ون راین به‌ترتیب با ۴۳ و ۳۶ درصد حاصل شد. در مرور روش‌های محاسبه و تاثیر پارامترهای مختلف بر مقدار نرخ انتقال رسوب بستر به‌وسیله Eidi و همکاران (۲۰۱۹)، آنان از سه روش بگنولد، مایر-پیتر و ون راین استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده این است که روش بگنولد نسبت به پارامترهای سرعت متوسط و دانه‌بندی حساس نیست و روش‌های مایر-پیتر-مولر و ون راین رفتار مشابهی را نسبت به تغییرات کلیه پارامترها از خود نشان می‌دهند. در مطالعه‌ای که به‌وسیله Mohamadzadeh و Panah (۲۰۱۴) انجام شد، ایشان با پیروی از مشخصات رودخانه نیوبرارا آمریکا، به بررسی روش‌های موجود در تعیین رسوب شامل دوبویز، شیلدز، شالکین، مایر-پیتر، مایر-پیتر-مولر و روتنر کرده، دریافتند که رابطه دوبویز و شیلدز برآوردی بیش از مقدار واقعی داشته و نتیجه به‌دست آمده از مایر-پیتر نیز کمتر از مقدار انتقالی در واقعیت است. آن‌ها روش روتنر و شاکلین را به‌عنوان بهترین رابطه معرفی کردند.

در سال‌های اخیر روش‌های نوینی برای محاسبه مقدار بار رسوب پیشنهاد شده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به Esfandiari و Gharachurlu

(۲۰۱۷)، Abolfathi و همکاران (۲۰۱۸)، Khaleghi و Ravani (۲۰۱۸)، Hajibabaei و همکاران (۲۰۱۹) و Bourah و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. در مطالعه‌ای Esfandiari و Gharachurlu (۲۰۱۷) با ارائه مدلی برای رودخانه بالیخلی‌چای در اردبیل، به بررسی رسوبات بستر مطابق با روش توابع رگرسیونی و طبقه‌بندی زمانی، دریافتند که مدل ماهانه با توجه به آگاهی از رژیم رسوب‌دهی و پیچیدگی‌های انتقال رسوب بهترین نتیجه را می‌دهد. Bourah و همکاران (۲۰۱۹) مدل عددی پیشرفته‌ای برای مدل‌سازی انتقال بار بستر پیشنهاد دادند. آن‌ها از روش المان گسسته برای منقطع‌سازی و حل معادلات استفاده کردند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده حاکی از انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های ثبت شده بود.

چگونگی تعیین و کاربرد رابطه مناسب با هر رودخانه با در نظر گرفتن تمامی شرایط حاکم بر آن رودخانه مهمترین و اصلی‌ترین ضروریت مطالعه رسوب است. یکی از روش‌های مورد استفاده در این زمینه، آزمون عملکرد معادلات با مقادیر اندازه‌گیری شده است. با وجود تنوع زیاد برآوردها و تخمین‌های صورت گرفته، در کشور ایران اطلاعات دقیقی از کمیت و کیفیت فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری در حوزه‌های آبخیز وجود نداشته، همین امر موجب شده است تا برآوردهای صورت گرفته در موارد مشابه دارای اختلاف فاحشی با یکدیگر باشند. همچنین، تا کنون مدل دامنه محیطی برای استفاده از مدل‌های مختلف بار کف پیشنهاد نشده است که این موضوع پیچیدگی انتخاب روابط تجربی را افزوده است. لذا، هدف از انجام این پژوهش، محاسبه مقدار بار رسوب بستر در رودخانه با استفاده از مدل‌های مختلف تجربی می‌باشد که با مقایسه نتایج به‌دست آمده از این مدل‌های تجربی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده مناسب‌ترین روش برآورد بار بستر انتخاب شود. همچنین، در این پژوهش تلاش شده است با تحلیل حساسیت بهترین رابطه برای محاسبه مقدار بار بستر، دامنه محیطی مناسب برای استفاده از رابطه منتخب تعیین شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی ایران و در موقعیت "۵۵ ´۱۳ °۳۵ تا "۵۷ ´۳۱ °۳۵ عرض شمالی و "۳۹ ´۵۱ °۵۱ تا "۴۶ ´۸ °۵۳ طول شرقی واقع شده است. حوزه آبخیز حبله‌رود از سمت شمال به حوزه آبخیز دریای خزر، از شرق به حوزه آبخیز رامه، از جنوب به دشت گرمسار از غرب به حوزه آبخیز ایوانکی محدود می‌شود.

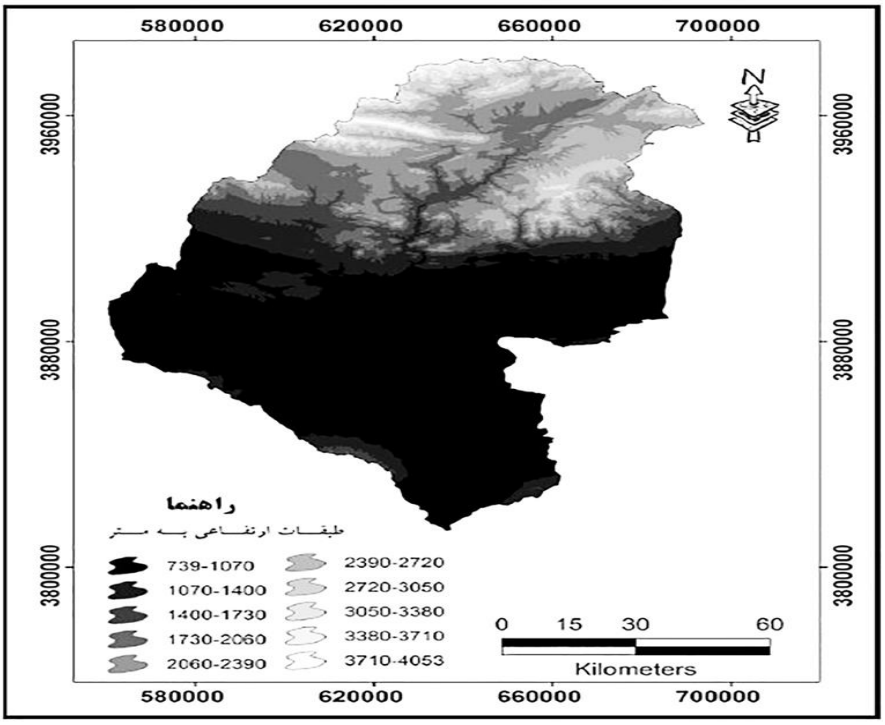
رودخانه حبله‌رود، مهمترین رودخانه استان سمنان به طول ۲۴۰ کیلومتر در حوزه آبریز کویر مرکزی است. چندین ریزابه به نام‌های گورسفید، ساواشی، نمرود، آب دره‌ی درده، دلی‌چای، شاه‌بلاغی، آب کبوتردره، آب دره شور به این رود می‌ریزند. حبله‌رود خود ریزابه رودخانه گلو است و گستردگی حوزه آبخیز آن ۳۲۰۰ کیلومتر مربع است. در خروجی این حوزه آبخیز، یک ایستگاه هیدرومتری مجهز به رسوب‌سنجی به‌نام بنکوه وجود دارد. جنس مصالح موجود در حوزه آبخیز و مقاومت آن‌ها در برابر فرسایش، عموماً بیانگر پتانسیل فرسایش‌پذیری و انتقال رسوب در حوزه آبخیز می‌باشد (Hydraulic Study Report، ۲۰۱۲).

رودخانه مورد مطالعه از نوع رودخانه‌های دائمی است، همچنین، ایستگاه هیدرومتری هم از نوع دائمی است. شیب غالب رودخانه در مناطق عبوری ملایم می‌باشد، هر چند که در برخی از نقاط با شیب تند همراه است (Hydraulic Study Report، ۲۰۱۲). در ایستگاه مذکور برای نمونه‌گیری بار بستر در رودخانه از نمونه‌بردار چنگکی استفاده شده است. با توجه به دانه‌بندی بستر رودخانه، نوع جریان (متلاطم)، سادگی در راه‌اندازی، نگهداری و جلوگیری از شستگی و هرز رفتن رسوبات، این نوع نمونه‌بردار برای اندازه‌گیری بار بستر استفاده می‌شود.

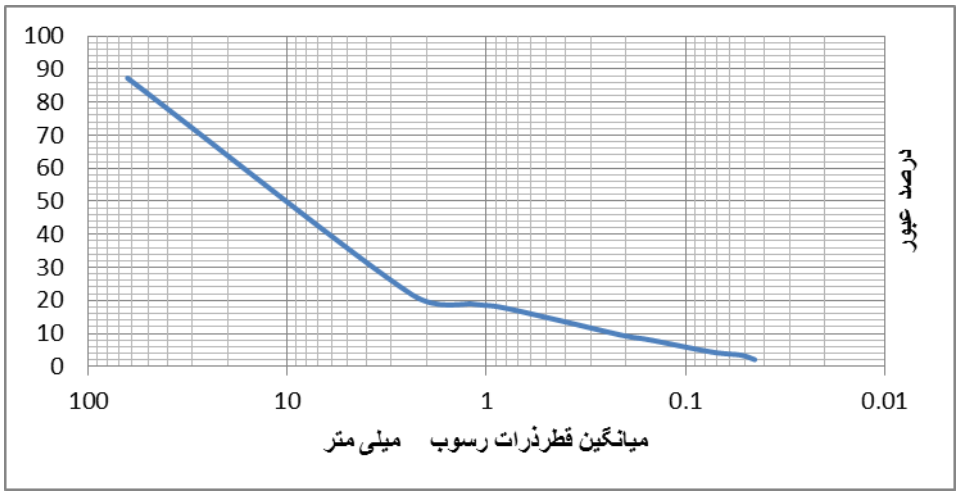
گردآوری اطلاعات و داده‌ها: آمار و اطلاعات ایستگاه هیدرومتری بنکوه از شرکت آب منطقه استان سمنان جمع‌آوری شده است. این ایستگاه هیدرومتری با کد ۰۱۵-۴۷ وزارت نیرو در موقعیت جغرافیای طول ´۲۵ °۵۲ و عرض ´۱۸ °۳۵ در ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. اطلاعات گردآوری شده شامل مشخصات ماهانه هیدرولیکی رودخانه در ایستگاه

هیدرومتری بنکوه در طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ می‌باشد.

داده‌های مورد نیاز شامل نوع دانه‌بندی و تخلخل دانه‌های بستر رودخانه در شرکت مذکور موجود نبودند و با انجام نمونه‌گیری از بستر رودخانه، آزمایش دانه‌بندی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان انجام شد. پنج نمونه مختلف، برای دانه‌بندی انجام شده که پس از تعیین دانه‌بندی هر نمونه، نمونه‌بندی میانگین بر حسب هر پنج نمونه تهیه شد و مبنا محاسبات قرار گرفت که در شکل ۲ نشان داده شده است.

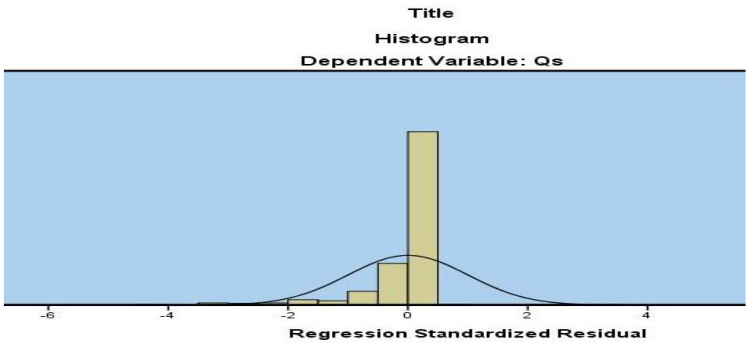


شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی میانگین بستر رودخانه

بررسی داده‌ها: برای بررسی صحت داده‌ها با استفاده از رگرسیون خطی دو متغیره برای شناسایی داده‌های پرت، نحوه توزیع داده‌های مربوط به دبی رسوب بررسی شده است. برای این منظور، تمامی داده‌ها در ابتدا استانداردسازی شده، سپس، توزیع آن‌ها بر حسب انحراف معیار رسم شده است (شکل ۳).



شکل ۳- نحوه توزیع داده‌های مربوط به دبی رسوب

در ادامه، آمار توصیفی این داده‌ها و میزان همبستگی داده‌های به‌دست آمده با استفاده از رگرسیون انجام شده مورد بررسی قرار گرفته است. روابطی که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، شامل مایر-پیتر-مولر، انشتین براون، بگنولد و رابطه توفالتی می‌باشد که در ادامه معادلات محاسبه مقدار بار رسوب بستر با استفاده از این روش‌ها معرفی شده است.

معادله مایر-پیتر-مولر[1]: نتایج بررسی‌های صورت گرفته به‌وسیله پیتر-مولر (۱۹۴۸) که بر مبنای کار آزمایشگاهی به همراه عملیات صحرایی می‌باشد، رابطه ارائه شده به‌صورت زیر است.

$$\frac{q_b}{[g(G_s-1)d^3]} = 8\left[\left(\frac{\acute{n}}{n}\right)^{1.5} F_s - 0.047\right]^{1.5} \qquad (۱)$$

که در آن، q_b بار بستر در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه در متر)، g شتاب ثقل زمین (متر بر مجذور ثانیه)، G_s چگالی دانه‌های رسوب، d اندازه متوسط دانه‌های رسوب (متر) و $\left(\frac{\acute{n}}{n}\right)$ عامل ریپل است که در آن $\acute{n}$ ضریب مانینگ دانه‌های بستر و n ضریب مانینگ بستر رودخانه می‌باشد. F_s عدد شیلدز است که از رابطه $F_s = \frac{\tau}{\gamma(G_s-1)d}$ به‌دست می‌آید.

برای محاسبه مقدار ضریب مانینگ بستر رودخانه از رابطه زیر استفاده شده است.

$$\acute{n} = 0.034\, {d_{90}}^{\frac{1}{6}} \qquad (۲)$$

d_{90} در رابطه (۲) نشان‌دهنده، قطر نظیر ۹۰ درصد مواد رسوبی بستر (بر حسب متر) می‌باشد. با توجه به این‌که رابطه مایر-پیتر-مولر از طریق نتایج آزمایشگاهی استخراج شده است، برخی شرایط محیطی در آن‌ها در نظر گرفته نشده است.

معادله انشتین-براون[2]: این رابطه در سال ۱۹۵۰ پیشنهاد شده است. اساس رابطه به‌دست آمده بر مبنای سرعت سقوط ذرات و خواص فیزیکی آب (رابطه استوکس) با در نظر گرفتن برخی از ویژگی‌های رسوبات مورد بررسی می‌باشد. این رابطه به‌شکل زیر به‌دست آمده است.

$$\frac{q_b}{\omega d} = \varphi \qquad (۳)$$

که در آن، ω سرعت سقوط دانه‌ها (متر بر ثانیه) است که به‌وسیله رابطه سرعت سقوط دانه‌ها محاسبه می‌شود. φ در این رابطه تابع بار بستر انشتین-براون می‌باشد که با کمک مقدار عدد شیلدز از نمودارهای ارائه شده استخراج می‌شود.

در این پژوهش، برای محاسبه مقدار ω از رابطه زیر استفاده شده است.

$$\omega = G\sqrt{gd(G_s-1)} \qquad (۴)$$

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

که در آن، ϑ^2 برابر با ویسکوزیته سینماتیکی آب (متر مربع در ثانیه) است. این رابطه بیشتر در رودخانه‌ها با دانه‌بندی ریز و متوسط کارا می‌باشد، زیرا که سرعت سقوط ذرات استفاده شده در این رابطه، در مورد ذرات بزرگ‌تر با خطا بیشتری همراه است. بنابراین، این رابطه برای رودخانه‌های عبوری از دشت‌ها مناسب است.

معادله بگنولد[3]: این روش در سال ۱۹۶۶ ارائه شده است که در این معادله مقدار بار رسوبی انتقال‌یافته در

[1] Meyer-Peter Müller

[2] Einstein and Brown

[3] Bagnold

کف رودخانه تابعی از جریان رودخانه، شیب رودخانه و زاویه اصطکاک ذرات رسوب است (Habibi، ۱۹۹۴).

$$q_b = a_s\, q \quad (۶)$$

که در آن، مقدار پارامتر a_s از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$a_s = \frac{\tan\emptyset}{cos\theta\ (tan\emptyset + tan\theta)} \quad (۷)$$

که در آن، $\emptyset$ زاویه اصطکاک ذرات و θ برابر با مقدار زاویه بستر با سطح افق می‌باشد. رابطه بگنولد برای محاسبه بار کف در رودخانه‌های با شیب زیاد مناسب است، بنابراین، دامنه محیطی این رابطه بیشتر شامل رودخانه‌های واقع‌شده در کوهستان‌های پر شیب می‌باشد.

معادله توفالتی[1]: رابطه ارائه شده برای محاسبه مقدار بار بستر به‌صورت زیر می‌باشد (Habibi، ۱۹۹۴).

$$q_b = M(2d)^{1+z_v-0.756\,z_i} \quad (۸)$$

که در آن، پارامترهای z_v و z_i کمیت‌های تجربی هستند که با کمک روابط زیر استخراج می‌شود.

$$z_v = 0.1198 + 0.00048T \quad (۹)$$

$$z_i = \frac{V\omega}{SRC_z} \quad (۱۰)$$

$$C_z = 260.67 - 0.667T \quad (۱۱)$$

$$M = 43.2P_iC_i(1+Z_v)V(R^{0.756\,z_i - z_v}) \quad (۱۲)$$

که در آن‌ها، T در جه حرارت رودخانه (فارنهایت)، V سرعت جریان رودخانه، ω سرعت سقوط ذرات می‌باشد. از آنجایی‌که در رابطه توفالتی از مجموعه‌ای از داده‌ها استفاده می‌شود، لذا، این رابطه می‌تواند طیف وسیع‌تری از ویژگی‌های محیطی رودخانه عبوری را در بر گیرد. بنابراین، استفاده از این رابطه در بیشتر شرایط محیطی مناسب است، هر چند که در رودخانه‌های عبوری از مناطق کوهستانی با دانه‌بندی متوسط این رابطه، تخمین مناسب‌تری ارائه می‌دهد.

در ادامه، به‌منظور مقایسه روش‌های مورد استفاده در تحلیل مقادیر و انتخاب بهترین گزینه، از مقایسه میزان خطای آن‌ها بهره برده و بدین‌منظور روش خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) مورد استفاده قرار گرفت که رابطه آن به‌صورت زیر تعریف شده است (Sobhani و Malekian، ۲۰۱۱).

$$RMSE = [\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{S_{sim}} - Q_{S_{obs}})^2]^{0.5} \quad (۱۳)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Q_{S_{sim}} - Q_{S_{obs}}| \quad (۱۴)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{S_{sim}} - Q_{S_{obs}})^2]}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{S_{sim}} - \bar{Q}_{S_{sim}})^2]} \quad (۱۵)$$

که در آن‌ها، $Q_{S_{obs}}$ مقدار بار کف مشاهداتی، $Q_{S_{sim}}$ مقدار بار کف محاسبه‌شده و $\bar{Q}_{S_{sim}}$ مقدار میانگین بار کف محاسبه‌شده می‌باشد. مقادیر RMSE و MAE بین صفر تا بی‌نهایت متغیر بوده، معادلاتی که در آن‌ها این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد، به‌عنوان معادلات مناسب انتخاب خواهند شد.

نتایج و بحث

با توجه به بررسی صحت داده‌ها و استانداردسازی آن‌ها مشخص شد که تمامی داده‌ها در محدوده استاندارد قرار گرفته‌اند و می‌توان ادعا کرد که داده‌ها دارای توزیع نرمال هستند و تمامی داده‌ها در محدوده مجاز قرار دارند. بنابراین، داده پرت وجود ندارد و از تمامی داده‌ها برای محاسبات استفاده شده است.

آمار توصیفی این داده‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- آمار توصیفی داده‌های مورد استفاده

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	تعداد نمونه
Qs (tonday^{-1})	۳۸۸/۳۷۰	۳۵۱/۷۰۳	۷۲
Qd (m2s^{-1})	۶/۷۷۰	۵/۵۲۳	۷۲

میزان همبستگی داده‌های به‌دست آمده با استفاده از رگرسیون انجام شده و نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی پیرسون در محدوده قابل قبولی قرار گرفته است که نشان‌دهنده همبستگی داده‌های مربوط به دبی رسوب و دبی جریان است. همچنین، در رگرسیون خطی انجام‌شده مقدار خطای استاندارد نیز نزدیک به صفر می‌باشد که نشان‌دهنده عدم وجود داده پرت در محدوده داده‌های به‌دست آمده است. در جدول ۳، مقادیر تجزیه واریانس روابط و همچنین، رگرسیون متغیرها، به‌خوبی مشخص شده است.

[1] Toffaletti

جدول ۲- بررسی همبستگی بین داده‌ها

		Qs (m^2day^{-1})	Qd (m^2day^{-1})
ضریب همبستگی پیرسون	۱/۰۰۰	۰/۸۰۹	۰/۸۰۹
	۰/۸۰۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
خطای استاندارد	۰/۰	۰/۰	۰/۰
	۰/۰		
تعداد نمونه	۷۲	۷۲	۷۲
	۷۲	۷۲	۷۲

جدول ۳- ضریب تشخیص رابطه رگرسیونی

مدل	ضریب همبستگی پیرسون	مجذور ضریب همبستگی پیرسون	مجذور ضریب همبستگی تعدیل یافته
۱	۰/۸۰۹	۰/۶۵۶	۰/۷۲۹

مطابق این جدول، رابطه معنی‌دار و خطی بین متغیرها وجود دارد، علاوه‌برآن، از نتیجه رابطه رگرسیونی می‌توان دریافت که بین متغیر مستقل و وابسته نیز رابطه معنی دار وجود دارد. در پژوهش حاضر از پنج مدل رگرسیونی خطی، لگاریتمی، توانی و نمایی استفاده شده است. خلاصه نتایج به‌دست آمده از آن در جدول ۴ نمایش داده شده است.

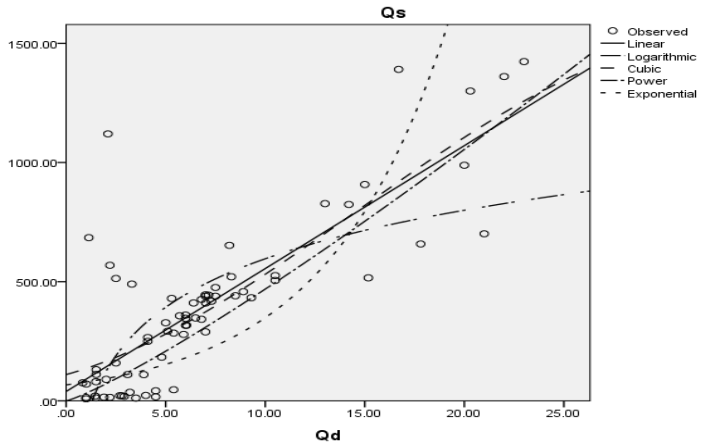
جدول ۴- نتایج رگرسیون‌های مختلف برای برآورد

معادله	Model Summary					Parameter Estimates			
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1	b2	b3
خطی	۰/۶۵۶	۱۳۳/۵۰۳	۱	۷۰	۰	۳۹/۱۸۰	۵۱/۵۷۶		
لگاریتمی	۰/۴۸۵	۶۵/۸۶۱	۱	۷۰	۰	-۸۰/۰۰۶	۲۹۳/۶۷۷		
کوبیک	۰/۶۶۱	۴۴/۲۳۵	۳	۶۸	۰	۱۱۰/۲۵۰	۲۳/۱۹۵	۲/۴۴۵	-۰/۰۶
توانی	۰/۴۸۱	۴۴/۹۰۸	۱	۷۰	۰	۳۱/۶۷۳	۱/۱۷۰		
نمایی	۰/۴۱۹	۵۰/۴۵۵	۱	۷۰	۰	۶۷/۰۷۳	۰/۱۶۵		

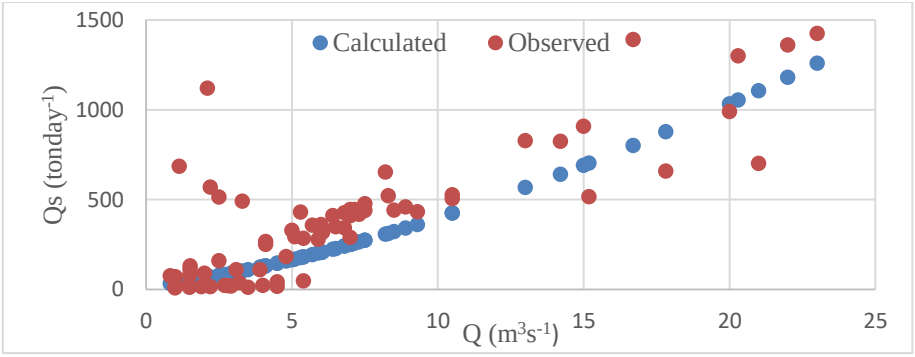
مطابق نتایج به‌دست آمده در جدول ۴، بین متغیرهای مستقل و وابسته روابط معنی‌داری حاکم بوده، این امر موجب می‌شود که برای انتخاب تابع با بهترین برازش، با استفاده از ضریب رگرسیونی پیرسون به انتخاب تابع برتر دست یافت. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مدل‌های رگرسیونی کوبیک و خطی با دارا بودن ضریب همبستگی R^2= ۰/۶۶ بیشترین میزان ضریب R^2 را داشته، به‌عنوان مدل‌های برتر انتخاب می‌شود. باید توجه داشت که مدل رگرسیونی خطی علاوه‌بر دقت، در نحوه اجرا و محاسبات ساده است که از این حیث مورد توجه می‌باشد. نکته قابل ملاحظه این است که تحلیل‌های صورت‌گرفته در این جدول در مورد داده‌های بار بستر و بده جریان تماماً بر مبنای سطح اعتماد ۹۹ درصد هستند. نمودارهای تخمین دبی رسوب برحسب دبی جریان با استفاده از رگرسیون‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این پژوهش مقدار دبی رسوب برحسب دبی جریان با استفاده از معادلات بیان‌شده، محاسبه شده است که نتایج آن در ادامه بیان شده است.

معادله مایر-پیتر-مولر: مقدار دبی رسوب به‌دست آمده از این رابطه در شکل ۵ نمایش داده شده است.



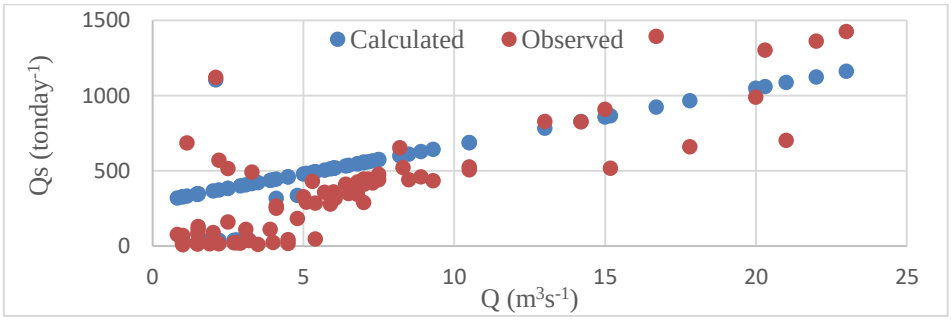
شکل ۴- نمودار توابع توانی، نمایی، لگاریتمی و خطی برازش‌یافته بین متغیر مستقل (دبی جریان) و متغیر وابسته (دبی رسوب)



شکل ۵- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه‌های مختلف سال با استفاده از رابطه مایر-پیتر-مولر

نتایج به‌دست آمده از رابطه مایر- پیتر- مولر نشان می‌دهد که مقدار دبی بار بستر به‌دست آمده از این رابطه، در مواقعی که مقدار دبی جریان کم باشد، بسیار نزدیک به مقدار بار به‌دست آمده است اما در محدوده مشخصی این پیش‌بینی‌ها بسیار بیشتر از مقدار مشاهده می‌باشد. این رابطه در جریان با دبی-های متوسط و زیاد نیز می‌تواند تخمین مناسبی از مقدار بار بستر ارئه دهد. این رابطه به‌صورت خطی نیست و در برخی نقاط پیش‌بینی قابل قبولی ارائه نمی‌دهد، اما در موارد مربوط به دبی پایین نتایج به-دست آمده بسیار مطلوب است و شباهت بالای با نتایج مشاهده شده دارد. اما با افزایش مقدار دبی، از کیفیت نتایج به‌دست آمده از این روش کاسته و بر خطای آن افزوده می‌شود.

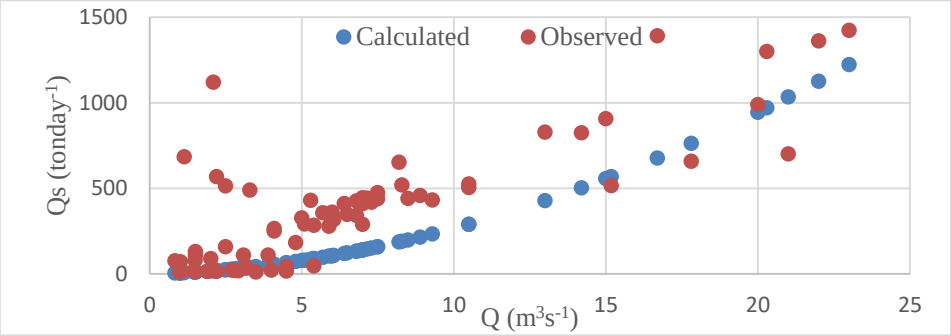
معادله انشتین – براون: مقدار دبی رسوب به‌دست آمده از رابطه انشتین- براون در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه‌های مختلف سال با استفاده از رابطه انشتین- براون

نتایج رابطه انشتین-براون برای تخمین مقدار دبی بار رسوب در این روش به‌صورت غیرخطی می‌باشد. همانطور که در شکل نمایش داده شده است، این رابطه می‌تواند مقدار بار بستر را در حالت‌های مختلف با دقت بالایی پیش‌بینی کند. رابطه فوق قادر به پیش-بینی بار بستر با دقت قابل قبول در محدوده جریان با دبی کم و زیاد است. هر چند که مقدار خطا در جریان با دبی‌های کم به‌نسبت جریان با دبی‌های بیشتر، افزایش می‌یابد.

معادله بگنولد: مقدار دبی رسوب به‌دست آمده از این روش در شکل ۷ نمایش داده شده است.



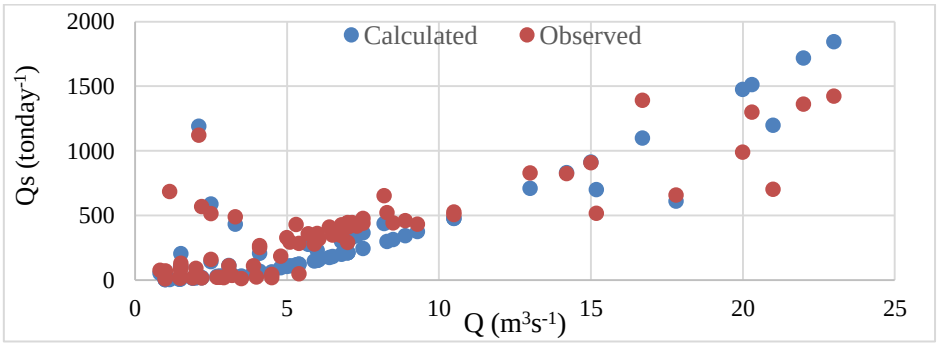
شکل ۷- تغییرات مقدار بار کف برحسب مقدار دبی جریان در ماه‌های مختلف سال با استفاده از رابطه بگنولد

نمودار فوق نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که رابطه بگنولد توانسته است تا حد قابل قبولی بار بستر را در جریان‌های با دبی پایین پیش‌بینی کند و هرچه مقدار دبی افزایش پیدا کند، این پیش‌بینی با خطای بیشتری همراه است. برای دبی‌های بالا، این رابطه تخمین مناسبی برای بار کف ارائه نمی‌دهد، اما در جریان‌های معمولی با دبی متوسط و دبی پایین دقت این روش مطلوب است. از سوی دیگر این روش، روند کلی افزایش دبی رسوب در برابر افزایش دبی جریان را به‌درستی پیش‌بینی می‌کند.

معادله توفالتی: مقدار دبی رسوب به‌دست آمده از رابطه توفالتی در شکل ۸ نمایش داده شده است.

شکل ۸، نشان‌دهنده دقت قابل قبول روش توفالتی در محاسبه مقدار بار کف می‌باشد. این رابطه می‌تواند بار کف را با دقت قابل قبولی در هر نوع جریانی پیش‌بینی کند. هر چند در برخی نقاط مربوط به دبی پایین این روش دقت کمتری را ارائه می‌دهد، اما به‌طورکلی این روش قابلیت بالایی در پیش‌بینی بار کف دارد.

مقدار خطای محاسبه شده با معیارهای RMSE، MAE، R^2 در جدول ۵ نمایش داده شده است.



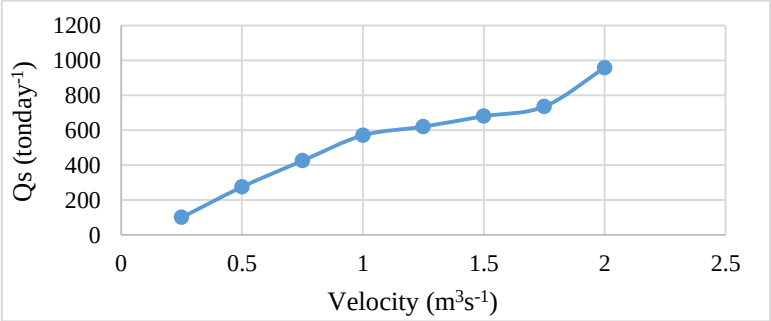
شکل ۸- تغییرات مقدار بار کف برحسب مقدار دبی جریان در ماه‌های مختلف سال با استفاده از رابطه توفالتی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده از رابطه توفالتی دارای نتایج بهتری می‌باشد و مقدار خطای به‌دست آمده از این روش در مقایسه با سایر رابطه‌ها کمتر است. به‌عبارت دیگر، این روش در

مقایسه با سایر روش‌ها، مقدار خطای به‌دست آمده کمتر و ضریب تبیین بیشتری را دارا می‌باشد که نشان‌دهنده قابلیت بیشتر این روش در پیش‌بینی رسوب است. برای درک بهتر پارامترهای مختلف رابطه توفالتی و نحوه تاثیرگذاری هر پارامتر بر مقدار دبی رسوب، متغیرهای این رابطه مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته‌اند. نمودارهای شکل‌های ۹ الی ۱۱ حساسیت رابطه توفالتی در محاسبه مقدار بار بستر بر حسب تغییرات هر پارامتر را نشان می‌دهد.

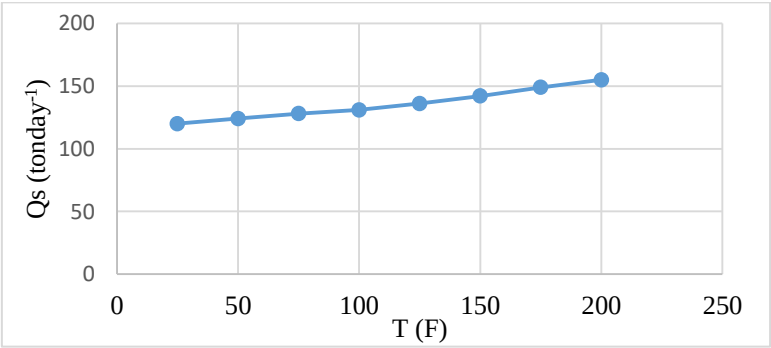
جدول ۵- مقدار معیار RMSE، MAE و R^2 در رابطه‌های مختلف

R^2	MAE	RMSE	Equation
۰/۷۱	۱۲/۹۲	۲۲/۵۵	Meyer-Peter-Muller
۰/۷۲	۱۲/۴۵	۲۱/۵۱	Einstein and Brown
۰/۴۴	۱۸/۷۸	۳۰/۳۵	Bagnold
۰/۸۳	۱۰/۸۶	۲۰/۰۷	Toffaletti



شکل ۹- تحلیل حساسیت مقدار بار کف برحسب سرعت در رابطه توفالتی

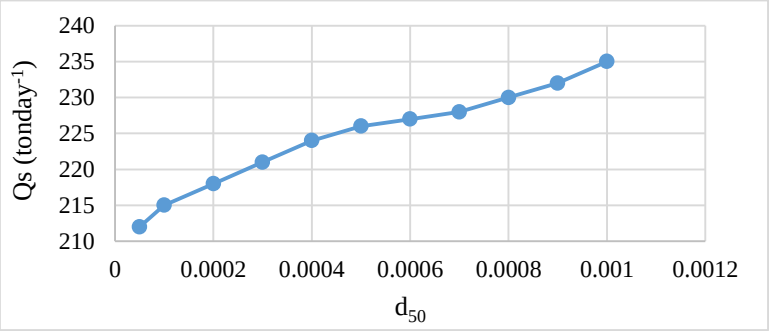
نمودار شکل ۹ تغییرات محسوس مقدار بار کف برحسب مقدار سرعت جریان را نشان می‌دهد. شیب این خط نشان‌دهنده شدت تغییرات است که بیان کننده این مطلب می‌باشد که مقدار بار بستر به‌مقدار سرعت جریان وابسته است و به شدت بر اثر تغییرات آن تغییر می‌کند.



شکل ۱۰- تحلیل حساسیت مقدار بار کف برحسب دما در رابطه توفالتی

نمودار شکل ۱۰، نشان‌دهنده مقدار تغییرات بار کف بر حسب مقدار دما در رودخانه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار دما در رودخانه مقدار بار کف نیز افزایش پیدا می‌کند، اما این مقدار تغییرات عدد بزرگی نیست، بنابراین اثر این عامل بر محاسبه مقدار بار کف چشمگیر نمی‌باشد.

در این رابطه، تغییرات مقدار اندازه دانه‌بندی بر روی مقدار بار بستر لحاظ شده است. همان‌طور که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، تغییرات دبی بستر بر اثر تغییرات اندازه دانه‌بندی محسوس نیست که این موضوع نشان از اثر ناچیز مقدار دانه‌بندی بر بار بستر دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت رابطه توفالتی می‌توان بیان کرد که در این رابطه مهمترین عامل مقدار سرعت جریان است که تأثیر مستقیمی بر اندازه مقدار بار بستر دارد و باید سعی شود که این پارامتر با بیشینه میزان دقت و کمینه خطا ثبت شود و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۱- تحلیل حساسیت مقدار بار کف برحسب دانه‌بندی در رابطه توفالتی

نتیجه‌گیری

یکی از مسائل و مشکلات مربوط به بهره‌برداری از منابع آب مبحث رسوب می‌باشد. در این بین بار بستر از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است و همواره مورد توجه مهندسان علوم محیطی قرار گرفته است، به‌طوری‌که برای تخمین بار بستر در رودخانه‌های دنیا در سالیان اخیر روابط تجربی و ریاضی متعددی به‌وسیله محققین مختلف ارائه شده است که به‌کارگیری آن‌ها در سایر مناطق بایستی با احتیاط و با دقت صورت گیرد.

در پژوهش حاضر، تلاش شد که با استفاده از روابط مختلف، مقدار دبی بار بستر در رودخانه حبله‌رود در ایستگاه هیدرومتری بنکوه محاسبه شود. برای این منظور، داده‌های ایستگاه هیدرومتری بنکوه جمع‌آوری شد و روابط تجربی و ریاضی مختلف برای محاسبه مقدار بار بستر استفاده شد. نتایج، نشان‌دهنده این بود که داده‌های مربوط به جریان در ماه‌های مختلف سال، از دقت قابل قبولی برخوردار بوده، به‌طوری‌که از توزیع نرمال تبعیت کرده است. همچنین، ارزیابی داده‌ها نشان‌دهنده فقدان داده‌های پرت است. از بین روش‌های مورد استفاده، با توجه به نتایج به‌دست آمده روش‌های مایر-پیتر-مولر و انشتین براون در محدوده قابل قبولی قرار گرفته‌اند. اما رابطه بگنولد نتوانسته است، حد قابل قبولی برای پیش‌بینی بار بستر ارائه کند. نتایج به‌دست آمده از روش توفالتی، حاکی از کمترین مقدار خطا است. محاسبات در این روش بسیار سنگین بوده، مجموعه عوامل مختلف را برای در نظر گرفتن بار بستر، لحاظ می‌کند و به‌همین دلیل قادر است، بار کف را با دقت بالاتر و در تمامی حالات مختلف جریان پیش‌بینی کند. در روش مذکور از مجموعه دانه‌بندی نمونه‌ها استفاده می‌شود و فقط به قطر دانه میانگین اکتفا نمی‌کند. در این روش مقادیر RMSE، MAE و R^2 برابر ۲۰/۰۷، ۱۰/۸۶ و ۸۳ درصد است که در مقایسه با روابط مایر-پیتر-مولر، انشتین-براون و بگنولد بهترین برآورد برای بار بستر را ارائه می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، می‌توان بیان کرد که رابطه توفالتی بهترین رابطه برای محاسبه مقدار بار بستر در مقایسه با سایر روابط موجود در بحث بار بستر می‌باشد. این رابطه برای استفاده در تخمین مقدار بار کف در مناطق کوهستانی بسیار مناسب بوده، از دقت قابل قبولی برخوردار است. بنابراین، دامنه محیطی استفاده از رابطه توفالتی، مناطق کوهستانی همراه با دانه‌بندی متوسط و شیب ملایم یا کند پیشنهاد می‌شود.

نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، مشابهت زیادی با نتایج به‌دست آمده از تحقیق Afzalimehr و همکاران (۲۰۱۴) و Anki (۲۰۲۰) مبنی بر دقت قابل

قبول روش مایر-پیتر –مولر دارد. همچنین، در پیش‌بینی مقدار بار رسوبی مطابق با نتایج به‌دست آمده از تحقیق Afzalimehr و همکاران (۲۰۱۴) و Jasim (۲۰۲۰) به دقت بالای رابطه انشتین براون و به دقت پایین رابطه بگنولد در برخی از تحقیقات پیشین همانند، Woo و Yu (۲۰۰۱) و Haddadchi و همکاران (۲۰۱۱) اشاره شده است. Ghorbani و Shakeri (۲۰۲۰) نیز در نتایج خود به دقت بالای روش توفالتی در حل معادله یک‌بعدی انتقال رسوب اشاره کرده‌اند.

علاوه‌بر این، نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در رابطه توفالتی نشان‌دهنده این است که مقدار بار کف محاسبه شده در این روش بیش از همه به مقدار پارامتر سرعت جریان وابسته است و تغییرات سرعت جریان آب در رودخانه، تأثیر بسزایی در مقدار بار رسوبی کف به‌دست آمده، دارد. پارامترهای دیگر در این رابطه از قبیل مقدار درجه حرارت آب و دانه‌بندی بستر رودخانه تأثیر قابل توجه‌ای در تغییرات مقدار دبی رسوب ندارند.

در صورتی که تمهیدات لازم مانند حوضچه‌های رسوب‌گیر، تجهیزات تخلیه مناسب و ... در طراحی آبگیرها لحاظ نشود و همچنین، ایستگاه‌های بیشتر برای اندازه‌گیری رسوب در حوضه حبله‌رود احداث نشود، وجود و انتقال رسوبات خسارات زیادی را برای بهره‌برداری از تأسیسات پایین‌دست در بر خواهد داشت. به‌همین منظور لازم است، هم‌زمان با توسعه روش‌های مطالعاتی موجود در زمینه برآورد و پیش-بینی میزان رسوبات در انواع متفاوت آن شامل بار معلق و بار کف، روش‌های عملیاتی با کاربرد ساده‌تر و بدون موارد جانبی اضافی که منجر به کاهش هزینه‌ها نیز شود، هم‌زمان گسترش یابد.

با استفاده از مدل انتخاب شده در این پژوهش، می‌توان میزان پیش‌بینی‌های میزان بار رسوبی رودخانه را برآورد کرد تا برای استفاده در زمینه‌های مدیریت منابع آب و خاک از قبیل شناسایی منابع تولید رسوب و تعیین مناطق با پتانسیل رسوب‌دهی بالا برای کاهش فرسایش در حوضه مورد مطالعه استفاده شود.

منابع مورد استفاده

1. Abolfathi, D., A. Madadi and S. Asghari. 2018. Modeling estimation of river sedimentation rate using artificial neural network method, case study: Golroud River. Pajouhesh Geomorphology Journal, 7(2): 196-208 (in Persian).
2. Arabkhedri, M. 2014. Estimation of bed load to suspended load ratio in Dez and Minab rivers. Watershed Engineering and Management. 4(6): 390-399 (in Persian).
3. Bahadori Khosroshahi, F. 2012. Guideline for calculation of suspended load and bed load of rivers. Office of Deputy for Strategic Supervision, No. 590 (in Persian).
4. Borah Das, M.T. 2019. Study of mineralogical composition of sediment in Brahmaputra River in urban stretch of Guwahati City, Assam, India. Water Science and Technology Library, 243-259.
5. Donyadideh, M. and A. Rostmi. 2016. Evaluation of sedimentary equations to estimate suspended load in the Dalki River. 15th National Iranian Hydraulic Conference, Qazvin, International Imam Khomeini University (in Persian).
6. Eidi, A., H. Heydarnezhad, P. Badiei and A. Shahiri. 2019. Review of different methods of evaluating bed load. 18th Hydraulic Conference, University of Tehran (in Persian).
7. Esllman, R.L. 2000. Bed-load sediment transport on steep longitudinal slopes. Journal of Hydraulic Engineering, 123(12): 1130-1138.
8. Gharachurlu, M. and F. Esfandiari. 2017. Providing a suitable model for estimating the bed load sediment using the combination of regression functions and time series of discharge in the Balkhli Chai Watershed (Ardabil Province). Fazaye Joghrafiaie Journal, 56: 133-149 (in Persian).
9. Habibi, M. 1996. Application of suspended sediment calculation methods in selected rivers in Iran. Proceedings of the First Conference on Erosion and Sediment, Ministry of Jihad Sazandegi, 161-178 (in Persian).
10. Haddadchi, A., M.H. Omid and A.A. Dehghani. 2011. Evaluation of bed load discharge formulas in gravel bed, case study: Chehel Chay River. Pajouhesh Geomorphology Journal, 18(3): 149-165 (in Persian).

11. Haji Babaei, E., S.A. Hosseini and M. Sanei. 2019. Laboratory study of the parameters affecting the bed load transfer capacity in substrates erosion. Watershed Engineering and Management. 4(11): 1116-1129.
12. Hydraulic Study Report. 2012. First level of determining the basin of Hablerood River. Power Ministry (in Persian).
13. James, P.J., W.E Dietrich, L. Leopold, B. Drake and R.L. Shreve. 2010. Bedload sheets in heterogeneous sediment. Geology, 16(2): 105-108.
14. Khaleghi, M.R. and A. Ravani. 2018. Simulation of relationship between river discharge and sediment yield in the semi-arid river watersheds. Acta Geophysica, 66: 109-123.
15. Samadian Fard, S., M.A. Ghorbani, R. Hosseinzadeh Delir and A. Farsadizadeh. 2007. Selection of suitable method to estimate suspended load and bed load in Ahar Chai River. Agricultural Research Journal, 7(3): 91-101 (in Persian).
16. Sobhani, H. and A. Malekian. 2011. Investigating the effect of data classification models on the correctness of the estimated sedimentation in the watershed of Hableh Rud. 4th Iranian Water Resources Management Conference, Tehran, AmirKabir University (in Persian).
17. Teymouri, R. and A.A. Dehghani. 2020. Comparison of different bed load equation by development of STE. Journal of Water and Soil Conservation, 27(1): 229-236 (in Persian).
18. Tramblay, Y., A. St-Hilaire and T.B.M.J. Ouarda. 2010. Modeling extreme suspended sediment concentrations in north America: frequency analysis and correlations with watershed characteristics. In: Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21st Century, Proceedings of Symposium HS2005 at IUGG2007, Perugia, Italy, July 2007, IAHS Publication No. 314: 20–27.

DOI: 10.22092/ijwmse.2021.351823.1837

Evaluating river bed load estimation models to introduce a suitable model, case study: Hablehroud River

Reza Izadpanah[*1], Seyyed Ali Asghar Hashemi[2] and Alireza Farrokhi[3]
[1] MSc of Civil Engineering, Engineering and Water Resources Management, Alaodoleh Semnani Institute of Higher Education, Garmsar, Iran, [2] Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Agricultural and Natural Resources Research Center of Semnan, AREEO, Semnan, Iran and [3] Scientific Board, Engineering and Water Resources Management, Alaodoleh Semnani Institute of Higher Education, Garmsar, Iran

Received: 26 September 2020 Accepted: 04 January 2021

Abstract

Estimation of sediment bed load is one of the most important issues in river engineering. Accordingly, several methods and relations have been proposed to estimate the bed load in streams for the past decades. The present research aimed to select the most accurate method to estimate bed load through the testing of various relations to estimate the bed load of the Hablehroud River. The hydraulic and geometric specifications of the Hablehroud River at Bankouh hydrometry station were measured on specific dates by the expert team. The bed load rate was calculated by four different relations in Bankouh hydrometry station from 2011 to 2017. Resultant data showed that the Toffaletti method with RMSE, MAE, and R^2 of 20.07, 10.86, and 83 estimates more accurate in comparison with other methods. The sensitivity analysis of the Toffaletti equation revealed that the bed load depends greatly on the velocity of the river flow. Such a method is firmly recommended to use in the mountainous region.

Keywords: Bed load, Empirical equation, Hablehroud River, Sensitivity analysis, Toffaletti equation

[*] Corresponding author: r.izadpanah.new@gmail.com