Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 15, Oct.-Nov. 2021, p. 780-793

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۵، مهر - آبان ۱۴۰۰، ص. ۷۹۳-۷۸۰

مقاله علمی-پژوهشی

تعیین مدل مناسب برآورد بار کف رودخانه‌ها

جواد وجاهت[1*]، شادی صراف[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۷

چکیده

برآورد صحیح میزان رسوبدهی یک حوزه آبخیز از مهم‌ترین مسائل مطرح‌شده در مهندسی آب، مهندسی رودخانه، منابع آب، تأسیسات و سازه‌های آبی و محیط‌زیست برای اجرای طرح‌ها و برنامه‌های توسعه‌ای است. تنوع زیاد در معادلات محاسبه مقدار بار رسوب در رودخانه و نبود اطلاعات در مورد نحوه استخراج معادلات، استفاده از آن را مشکل نموده است. در این تحقیق پس از گردآوری اطلاعات لازم در ایستگاه هیدرومتری بنکوه و تهیه دانه-بندی بستر رودخانه، مقدار بار بستر رودخانه در این ایستگاه هیدرومتری، با استفاده از رگرسیون‌های مختلف و محاسبه از طریق چندین رابطه تجربی استفاده شده برای محاسبه مقدار بار رسوب کف رودخانه، محاسبه گردید. نتایج حاصل از این روابط با نتایج ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری و سایر روابط استفاده شده مورد مقایسه قرار گرفت که نشان‌دهنده این موضوع بود که رابطه توفالتی با میزان خطای ۲۲/۷۱ در بررسی ضریب RMSE توانایی قابل قبولی در محاسبه مقدار بار بستر در منطقه مورد مطالعه دارد، بنابراین به عنوان مدل موردنظر انتخاب شد. پارامترهای موثر در رابطه توفالتی آنالیز حساسیت شدند و نتایج نشان داد 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 به سزایی در مقدار بار رسوبی کف دارد.

واژه‌های کلیدی: توفالتی، رگرسیون، روابط تجربی، تحلیل حساسیت

مقدمه

بار کل رسوبی یک رودخانه از مجموع بار معلق و بار کف به دست می‌آید. تعیین بار معلق و بستر، با استفاده از روابط و توابعی که حاصل اندازه‌گیری‌های محققین بر روی رودخانه‌های دارای شرایط مشترک می‌باشند، حاصل می‌شوند.

علی‌رغم برآوردها و تخمین‌هایی که بعضا توسط برخی از متخصصین صورت می‌گیرد، در کشور ایران اطلاعات دقیقی از کمیت و کیفیت فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری در حوضه‌های آبخیز وجود نداشته و همین امر موجب شده است تا برآوردهای صورت گرفته در موارد مشابه دارای اختلاف فاحشی با یکدیگر باشند. وجود رسوبات، موجب بروز اختلال در عملکرد بهینه طراحی‌های صورت گرفته و کاهش راندمان مصرف در طی دوره بهره‌برداری‌شده و همواره هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیر را افزایش خواهد داد(دنیادیده و رستمی، ۱۳۹۵)

عوامل مؤثر در کم و کیف رسوبات موجب شده است تا تعداد روابط پیشنهادی توسط متخصصین گسترده و از تنوع زیادی برخوردار باشد .در این پژوهش از چند مدل ریاضی- تجربی برای محاسبه مقدار بار رسوب بستر استفاده گردید. با استفاده از این فرمول‌های تجربی مقدار بار بستر در رودخانه در طی سالیان مختلف محاسبه شد. در انتها پس از مقایسه نتایج بهترین فرمول، که تخمین بهتری از مقدار بار بستر ارائه می‌دهد، ارائه گردیده است.

اهمیت گسترده تعیین میزان انتقال رسوب در رودخانه منجر شده است تا تحقیقات گسترده‌ای در این خصوص طی سالیان اخیر با استفاده از روش‌های مختلف صورت پذیرد.

دهقانی و تیموری (۱۳۹۹) در تحقیق خود با توسعه یک نرم‌افزار کاربرپسند، توانایی ۲۷ رابطه موجود در برآورد بار بستر رودخانه‌های ایتان گلستان (چهل‌چای، خرمالو و سوسرا) که در آن‌ها بار بستر اندازه‌گیری می‌شود را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که بهترین روش برای برآورد بار رسوب در رودخانه‌ها استفاده از روش یانگ است.

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه تهران، مهندس مشاور ، تهران، ایران
۲- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول : Email: j,vejahat@ut.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.15.4.4.4

www.SID.ir

Archive of SID

مرادی نژاد و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی کارایی روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی، منحنی سنجه رسوب و رگرسیونی چندمتغیره در پیش‌بینی میزان دبی رسوبات معلق حوزه آبخیز رودخانه قره‌چای پرداختند. نتایج نشان داد روش نروفازی نسبت به سایر روش‌ها از دقت عملکرد بیشتری برخوردار بود و روش منحنی سنجه رسوب در انتهای طبقه‌بندی جای گرفت.

قراچرلو و اسفندیاری (۱۳۹۶) با ارائه مدلی برای رودخانه بالیخلی‌چای در اردبیل، به بررسی رسوبات معلق مطابق با روش توابع رگرسیونی و کلاسه‌بندی زمانی، دریافتند که مدل ماهانه با توجه به آگاهی از رژیم رسوب‌دهی و پیچیدگی‌های انتقال رسوب بهترین نتیجه را می‌دهد.

مطالعه‌ی ابوالفتحی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از شبکه عصبی پیش‌خور چندلایه و تابع شعاعی بر روی رودخانه گل رود صورت پذیرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی MLP دقت بهتری را نسبت به دو مدل دیگر در تخمین میزان رسوب منطقه نشان می‌دهد.

بررسی و شبیه‌سازی بده جریان و میزان بار رسوب در حوضه‌ی کل شور و کشف رود به‌عنوان حوضه‌های نیمه‌خشک توسط خالقی و روانی صورت گرفت. داده‌ها به‌منظور صحت آماری از ۷ ایستگاه انتخاب گردید. استفاده از آزمون‌های مختلف ازجمله شاخص دقت (نسبت بار رسوب برآوردی به بار رسوب مشاهداتی) و سایر روش‌ها جهت اصلاح اریب بودن داده‌ها، مانند روش فائو، QMLE، و ... حاکی از آن بود که ضریب فائو اشتباه برآوردی را در همه ایستگاه‌ها افزایش می‌دهد. فاکتورهای QMLE و smearing اشتباه برآوردی را در منحنی سنجه متوسط دسته‌ها افزایش می‌دهد اما اثری بر برآورد منحنی سنجه خطی ندارد(Khaleghi and Ravani., 2018).

بورا با بررسی شاخه‌ی شهری در حوضه‌ی آبریز براهماپوترا، به بررسی مواد معدنی تشکیل‌دهنده زسوبات پرداخته و توانست شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی برای پیش‌بینی غلظت رسوب و غلظت پارامترهای شیمیایی رسوب توسعه یافت (Boura, 2018).

ویقان و همکاران در حوضه‌ی رودخانه‌ی کر با استفاده از مدل BASINS–WinHSPF در طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ به بررسی جریان آب، کیفیت و وضعیت رسوبات معلق پرداختند (Vigna et al., 2017).

بررسی‌ها حاکی از آن بود که تا حدود ۵۲ با اعمال سناریوی RCP 2/6 مربوط به ماه دسامبر و بیش از ۱۷۰ درصد با اعمال سناریوی RCP 8/5 افزایش خواهد داشت. با اتخاذ سناریوی توسعه‌ی کشاورزی، نتیجه مخالفت با تغییر ارتوفسفات را بیان نمود. اثرات ترکیبی منجر به این نتیجه شد که جریان رودخانه در اواخر پاییز و ماه‌های زمستان افزایش می‌یابد، درحالی‌که در تابستان و اوایل پاییز کاهش می‌یابد.

بوی و همکاران مدل عددی پیشرفته‌ای برای مدل‌سازی انتقال بار بستر پیشنهاد دادند. آن‌ها از روش المان گسسته (DEM) برای منقطع سازی و حل معادلات استفاده نمودند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌شده حاکی از انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی‌شده با داده-های ثبت‌شده بود (Bui et al., 2019).

صادقی پور (۱۳۹۵) در رودخانه قم‌رود با استفاده از منحنی سنجه رسوب به پژوهش پرداخت. نتایج حاکی از آن بود که با اعمال حدود دسته‌های لگاریتمی، مقادیر دبی رسوب و جریان در مناطق خشک تعدیل داشته و روابط رگرسیونی همبستگی بهتری داشته‌اند. در این مطالعه از مقادیر ثبت‌شده در ایستگاه‌ها استفاده گردید که بیانگر وضعیت مطلوب نتایج می‌باشد.

مصفایی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی و ارزیابی روش‌های منحنی سنجه رسوب در رودخانه پل رود پرداختند. آن‌ها ۳۰ درصد از داده‌های مربوط به آمار ۴۵ ساله را به‌صورت تصادفی انتخاب و جهت ارزیابی در فاز صحت سنجی جدا نمودند. نتایج استفاده از شاخص RMSE حاکی از آن بود که در برخی از ماه‌ها به‌خصوص بهمن نتایج بهتری حاصل‌شده و بنابراین روش ماهانه به‌عنوان روش برتر برای ایستگاه موردبررسی انتخاب و معرفی گردید.

در این پژوهش به بررسی مکانیسم انتقال رسوب در حالت کلی پرداخته‌شده و سپس از چند مدل ریاضی- تجربی برای محاسبه مقدار بار رسوب بستر استفاده خواهد شد. با استفاده از این فرمول تجربی مقدار بار بستر در رودخانه در طی سالیان مختلف محاسبه می‌شود و با مقادیر اندازه‌گیری شده ثبت می‌گردد. در انتها پس از مقایسه نتایج و محاسبه مقدار خطا، بهترین فرمول، که تخمین بهتری را از مقدار بار بستر ارائه می‌دهد، انتخاب می‌شود و این رابطه موردبحث و ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌طورکلی اهمیت مطالعه تفسیری و متکی بر داده‌های صحرایی منجر به این می‌شود که در وهله نخست معادلات رسوب ارائه‌شده بومی و سازگار با شرایط ایران‌گردند و در گام بعدی برای هر حوضه رابطه تجربی‌ای که دارای بیشترین برازش با شرایط طبیعی دارد تعیین شود.

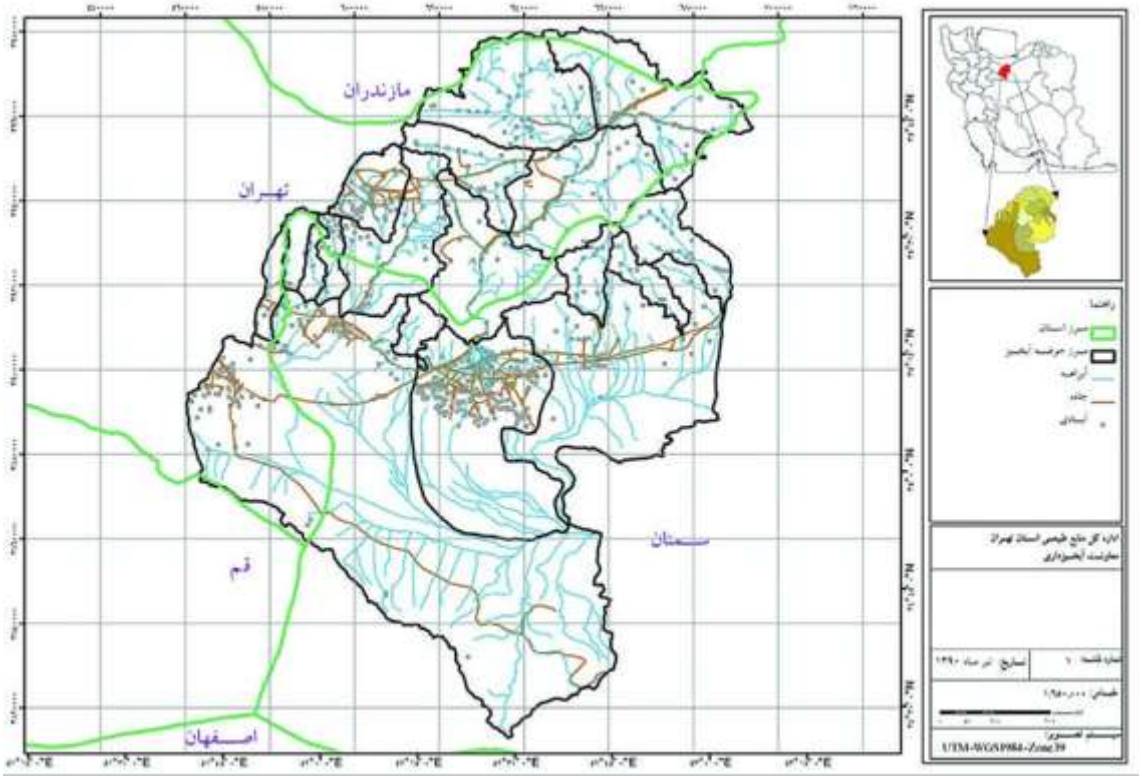
مواد و روش‌ها

منطقه‌ی موردمطالعه

منطقه‌ی موردمطالعه با مساحت ۶۱۰۹۰۸ هکتار 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 گردیده است. حوزه-ی آبخیز حبله‌رود از سمت شمال به حوزه آبخیز دریای خزر، از شرق به حوزه آبخیز رامه، از جنوب به دشت گرمسار از غربی به حوزه آبخیز ایوانکی محدود می‌گردد. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه مشخص شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز منطقه مورد مطالعه

رودخانه حبله‌رود به طول ۲۴۰ کیلومتر در حوضه آبریز کویر مرکزی است. ریزآبه‌های متعددی از جمله گورسفید، ساواشی، نمرود، آب دره‌ی دره، دلی‌چای، شاه‌بلاغی، آب کبوتردره، آب دره شور به این رود می‌ریزند. حبله‌رود خود ریزآبه‌ی رودخانه گلو است. گستردگی حوضه آبریز آن ۳۲۰۰ کیلومتر مربع است. در خروجی این حوزه آبریز، یک ایستگاه هیدرومتری مجهز به رسوب‌سنجی به نام بنکوه وجود دارد.

اطلاعات و داده‌ها

آمار و اطلاعات ایستگاه هیدرومتری بنکوه از شرکت آب منطقه‌ای استان سمنان گردآوری گردیده است. این ایستگاه هیدرومتری با کد ۰۱۵- ۴۷ وزارت نیرو در موقعیت جغرافیای طول ´۲۵ °۵۲ و عرض ´۱۸ °۳۵ و در ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد.

داده‌های مورد نیاز شامل؛ نوع دانه بندی 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. فرآیند نمونه‌گیری با حضور در محل بازه‌های مختلف رودخانه جهت تعیین مشخصات دانه‌بندی صورت پذیرفت. در جدول ۱ مشخصات هندسی مقاطع تهیه نمونه مشخص شده است.

منحنی دانه‌بندی به دست آمده برای بستر رودخانه مطابق شکل ۲ می‌باشد.

به‌منظور مقایسه روش‌های مورد استفاده در تحلیل مقادیر و انتخاب بهترین گزینه، از میزان خطای آن‌ها بهره برده و بدین‌منظور روش خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) مورد استفاده قرار گرفت که معادله آن به صورت زیر تعریف شده است(سبحانی و ملکیان، ۱۳۹۰).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{s_{sim}} - Q_{s_{obs}})^2\right]^{0.5} \quad (۱)$$

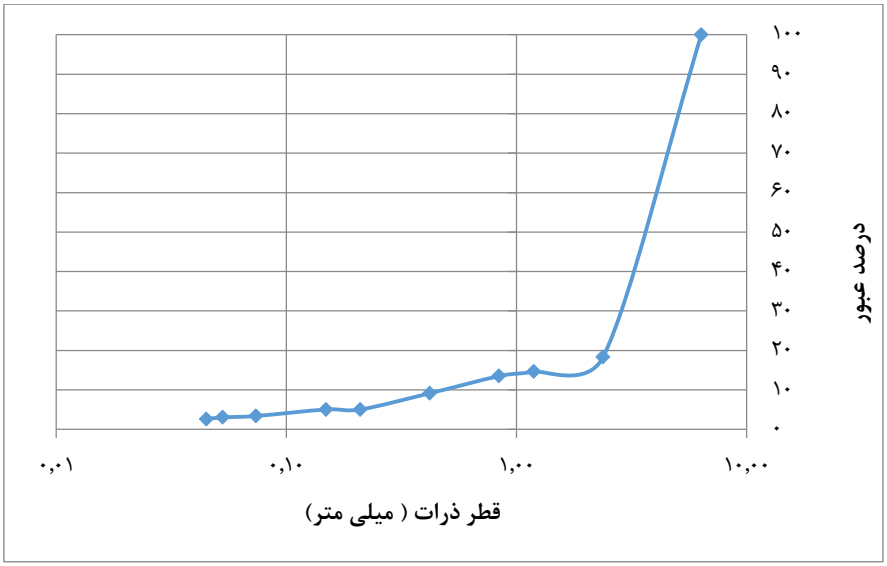
مقادیر RMSE بین صفر تا بی‌نهایت متغیر بوده و معادلاتی که مقدار RMSE آنها به صفر نزدیکتر باشد به عنوان معادلات مناسب انتخاب خواهند شد. مقدار خطای محاسبه شده با این معیار با هر یک از روابط زیر در جدول ۲ نمایش داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه‌برداری از رودخانه

شماره مقطع	فاصله از مبدا	مدت به ثانیه	تعداد دور در یک ثانیه	سرعت			عمق متوسط	سطح مقطع	عرض مقطع	دبی به متر مکعب در ثانیه
				در یک نقطه	متوسط قائم	متوسط مقطع				
۱	۰	۰	۰,۰۰	۰,۰۰	---	0.20	0.075	0.075	1	0.015
۲	۱	۴۰	۰,۷۵	۰,۴۰	---	0.47	0.3	0.3	1	0.142
۳	۲	۴۰	۱,۰۵	۰,۵۵	---	0.60	0.5	0.5	1	0.299
۴	۳	۴۰	۱,۲۳	۰,۶۴	---	0.65	0.6	0.6	1	0.389
۵	۴	۴۰	۱,۲۵	۰,۶۶	---	0.61	0.55	0.55	1	0.336



شکل ۲- دانه بندی بستر رودخانه

جدول ۲- مقدار معیار RMSE در رابطه‌های مختلف

محقق	معادله	RMSE
Shields	$q_b = \frac{q_s}{G_s}(10 \times \frac{\tau - \tau_c}{\gamma (G_s - 1)d})$	۲۵,۱۲
Einstein	$q_b = \frac{\phi \rho_s}{\sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \times \frac{1}{gd^2}}}$	۳۷,۴۳
Meyer-Peter-Muller	$\frac{q_b}{(g(G_s - 1)d^2)} = 8\left[(\frac{n'}{n})^{1.5} F_s - 0.047\right]^{1.5}$	۵۹,۳۴
Einstein and Brown	$\frac{q_b}{\omega_d} = \varphi$	۲۷,۵۶
Bagnold	$q_b = a_s q$	۳۳,۵۹
Toffaletti	$q_b = M(2d)^{1+z_v - 0.756 z_i}$	۲۲,۱۷
Ackers & White	$\frac{q_b}{q}\frac{D}{d_s}(\frac{u}{v})^n = c(\frac{F_s}{A} - 1)^m$	۳۲,۸۱
Nielsen	$\frac{q_b}{\left[(1-S)gd^2\right]^{0.5}} = (\frac{12\tau}{\rho(1-S)gd} - 0.05)\sqrt{\frac{\tau}{\rho(1-S)gd}}$	۳۱,۵۹

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی جدول ۲ نشان می‌دهد رابطه توفالتی دارای نتایج بهتری می‌باشد و مقدار خطا به دست آمده از این روش در مقایسه با سایر رابطه‌ها کمتر می‌باشد. بنابراین از این رابطه می‌توان به عنوان رابطه مناسب برای محاسبه مقدار بار کف در منطقه موردمطالعه استفاده نمود. علاوه بر این میزان همبستگی داده‌های به دست آمده با استفاده از رگرسیون انجام شده در جدول ۳ مورد بررسی قرار گرفت.

جدول۳- جدول همبستگی بین داده‌ها

پارامتر آماری	مقدار	Qs (m^2/day)	Qd (m^2/day)
ضریب همبستگی پیرسون	۱,۰۰۰	۰,۸۵۴	۰,۸۵۴
R	۰,۸۵۴	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰
خطای استاندارد	---	۰,۰	۰,۰
PVALUE			
تعداد نمونه	---	۷۲	۷۲

همانطور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی پیرسون در محدوده ۰,۸۵۴ قرار گرفته است که نشان‌دهنده همبستگی داده‌های مربوط به دبی رسوب و دبی جریان می‌باشد. همچنین در رگرسیون خطی انجام شده مقدار خطای استاندارد نیز نزدیک به صفر می‌باشد که نشان‌دهنده عدم وجود داده پرت در محدوده داده‌های به دست آمده است. در جدول ۴، مقادیر تجزیه واریانس روابط و همچنین رگرسیون متغیرها مشخص شده است.

جدول ٤- ضریب تشخیص رابطه رگرسیونی در مدل نرم افزاری SPSS

مدل	ضریب همبستگی پیرسون	مجذور ضریب همبستگی پیرسون	مجذور ضریب همبستگی تعدیل یافته
۱	۰,۸۵۴	۰,۷۲۹	۰,۷۲۹

مطابق با جدول ۴، رابطه‌ی معنی‌دار و خطی بین متغیرها وجود دارد، علاوه بر آن، نتیجه‌ی رابطه‌ی رگرسیونی نشان می‌دهد که بین متغیر مستقل و وابسته رابطه وجود دارد و این رابطه معنی‌دار می‌باشد. در پژوهش حاضر از چهار مدل رگرسیونی خطی (Linear)، لگاریتمی (Logarithmic)، توانی (Power) و نمایی (Exponential) استفاده شده است. پس از بررسی روابط به دست آمده، بهترین مدل به عنوان مدل مناسب معرفی می‌گردد (جدول ۵).

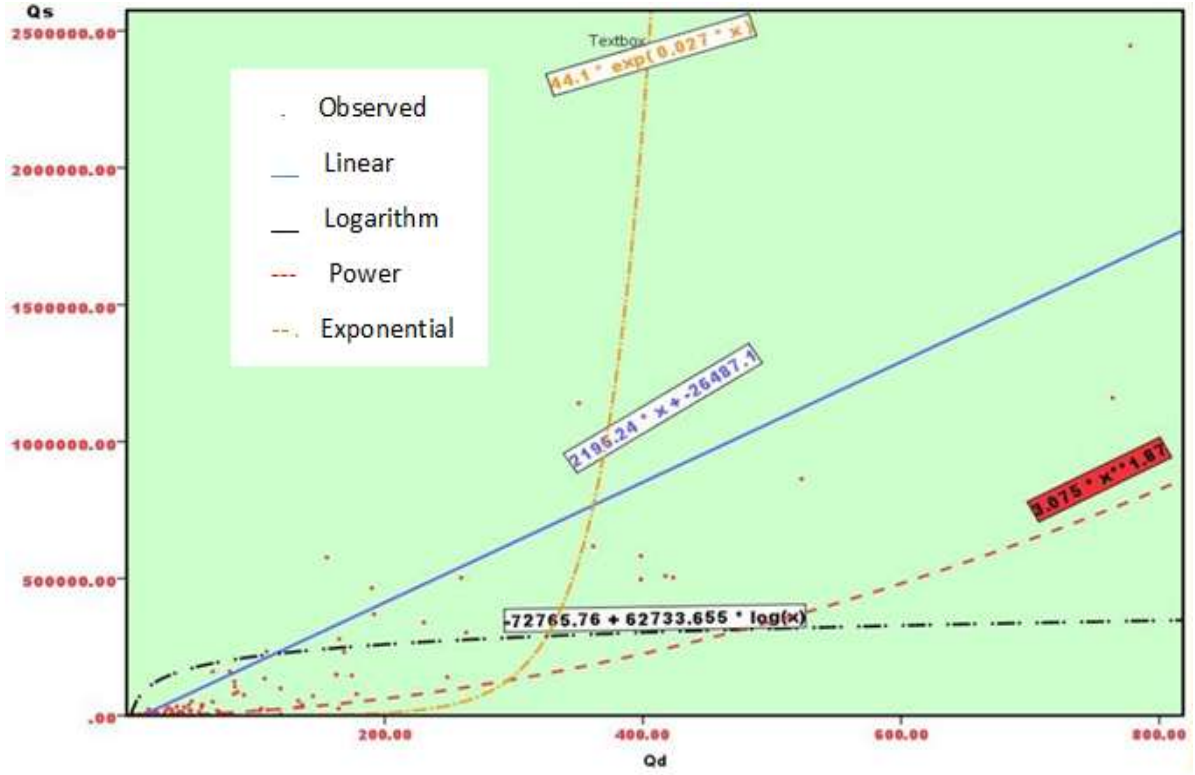
جدول ۵- خلاصه مدل و پارامترهای برآورد شده مدل

متغیر وابسته (دبی رسوب - تن در روز)							
پارامترهای برآورد شده		خلاصه مدل					
b1	Constant	Sig.	df2	df1	F	مجذور ضریب همبستگی پیرسون	معادله
۲۱۹۶,۳۲۶	-۲۶۴۸۷,۱۱۵	۰	۴۷۰	۱	۱۲۶۷,۴۷۵	۰,۷۲۹	خطی
۶۲۷۳۳,۶۵۵	-۷۲۷۶۵,۷۶۲	۰	۴۷۰	۱	۱۳۲,۵۴۹	۰,۲۲۰	لگاریتمی
۱,۸۷۴	۳,۰۷۵	۰	۴۷۰	۱	۳۱۹۶,۹۸۴	۰,۸۷۲	توانی
۰,۰۲۷	۴۴,۱۰۶	۰	۴۷۰	۱	۴۷۵,۹۶۳	۰,۵۰۳	نمایی

نتایج جدول۵، بین متغیرهای مستقل و خطی روابط معنی‌داری حاکم است. مدل توانی با دارا بودن ضریب همبستگی ۸۷,۲ درصد بیشترین میزان ضریب R را داشته و به عنوان مدل برتر انتخاب می‌گردد. نکته‌ی قابل توجه این است که تحلیل‌های صورت گرفته در این جدول تماما بر مبنای سطح اعتماد ۹۹ درصد در مورد داده‌های بار بستر و بده جریان می‌باشند. نتایج حاصل از برازش مدل‌های انتخابی در ذیل ارائه شده‌اند. نمودار به دست آمده از هر رگرسیون در شکل ۳ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- نمودار توابع توانی، نمایی، لگاریتمی و خطی برازش یافته بین متغیر مستقل (دبی جریان) و متغیر وابسته (دبی رسوب)

معادلات

به‌منظور انجام این پژوهش و تعیین بهترین مدل مطابق با داده‌های برداشت شده، همان‌طور که پیشتر نیز بیان گردید از معادلات تجربی زیر در تحلیل‌ها استفاده خواهد گردید.

روش شیلدز

مطالعات شیلدز در سال ۱۹۳۶ به منظور تعیین و برآورد میزان بار کف مطابق مشاهدات آزمایشگاهی، رابطه‌ی زیر را ارائه نمود. در شکل ۴ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی شیلدز مشخص شده است.

$$q_b = \frac{q_s}{G_s}\left(10 \times \frac{\tau - \tau_c}{\gamma (G_s - 1) d}\right) \quad (۲)$$

روش انیشتین

رابطه انشتن برای محاسبه مقدار بار بستر به صورت زیر می‌باشد. در شکل ۵ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی ایشتین مشخص شده است.

$$q_b = \frac{\phi \rho_s}{\sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \times \frac{1}{g d^2}}} \quad (۳)$$

روش میر- پیتر و مولر

رابطه ارائه شده توسط میر – پیتر و مولر برای محاسبه بار بستر به صورت زیر می‌باشد. در شکل ۶ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی میر – پیتر و مولر مشخص شده است.

$$\frac{q_b}{(g(G_s - 1)d^2)} = 8\left[\left(\frac{n'}{n}\right)^{1.5} F_s - 0.047\right]^{1.5} \quad (۴)$$

روش انیشتین- براون

مقدار بار بستر با استفاده از رابطه زیر استخراج می‌شود. در شکل ۷ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی انیشتین – براون مشخص شده است.

$$\frac{q_b}{\omega_d} = \varphi \quad (۵)$$

روش بگنولد

مقدار بار رسوبی انتقال یافته در کف رودخانه با استفاده از این روش از فرمول زیر به دست می‌آید. در شکل ۸ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی بگنولد مشخص شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

$$q_b = a_s q \quad (۶)$$

روش توفالتی

محاسبه مقدار بار بستر از این روش با استفاده از فرمول زیر می‌باشد. در شکل ۹ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی توفالتی مشخص شده است.

$$q_b = M\,(2d)^{1+z_v - 0.756 z_i} \quad (۷)$$

روش ایکرز- وایت

مقدار بار رسوبی بستر از این روش طبق رابطه زیر به دست می‌آید. در شکل ۱۰ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی ایکرز - وایت مشخص شده است.

$$\frac{q_b}{q}\frac{D}{d_s}\left(\frac{u}{v}\right)^n = c\left(\frac{F_s}{A}-1\right)^m \quad (۸)$$

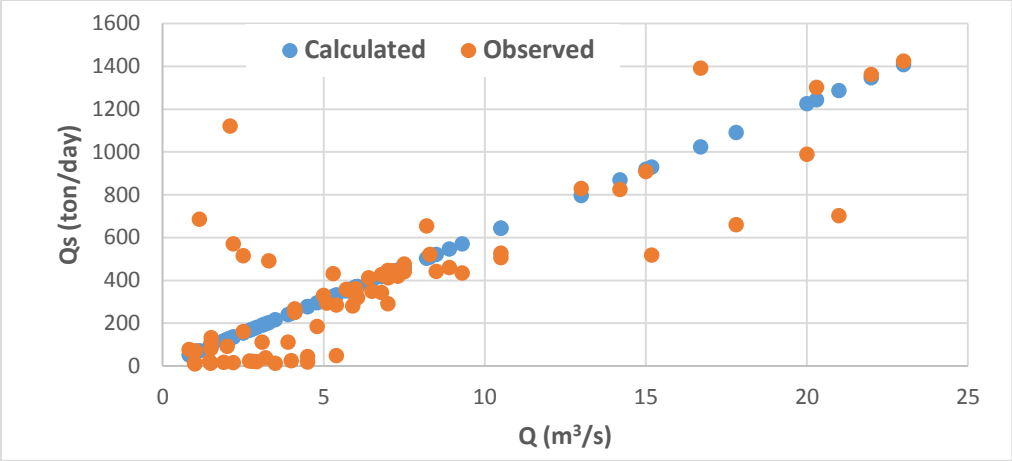
روش نلسن

نلسن برای محاسبه مقدار بار بستر از فرمول زیر را پیشنهاد داد. در شکل ۱۱ رابطه‌ی بین نتایج اندازه‌گیری شده و آزمایش شده با استفاده از رابطه‌ی نلسن مشخص شده است.

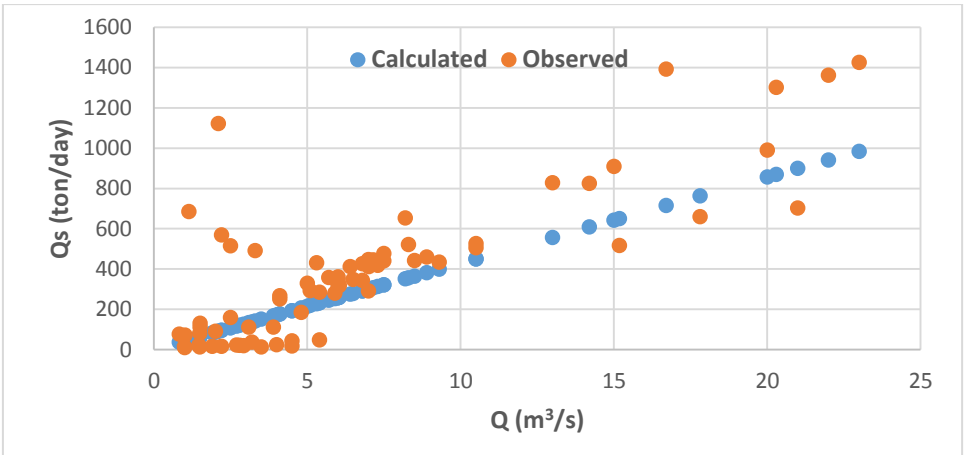
$$\frac{q_b}{\left[(1-S)gd^2\right]^{0.5}} = \left(\frac{12\tau}{\rho(1-S)gd} - 0.05\right)\sqrt{\frac{\tau}{\rho(1-S)gd}} \quad (۹)$$

نتایج

اعمال روش‌های مختلف بر مبنای روابط ارائه شده و همچنین مقادیر مشاهداتی تعیین و در جداول زیر ارائه شده‌اند.



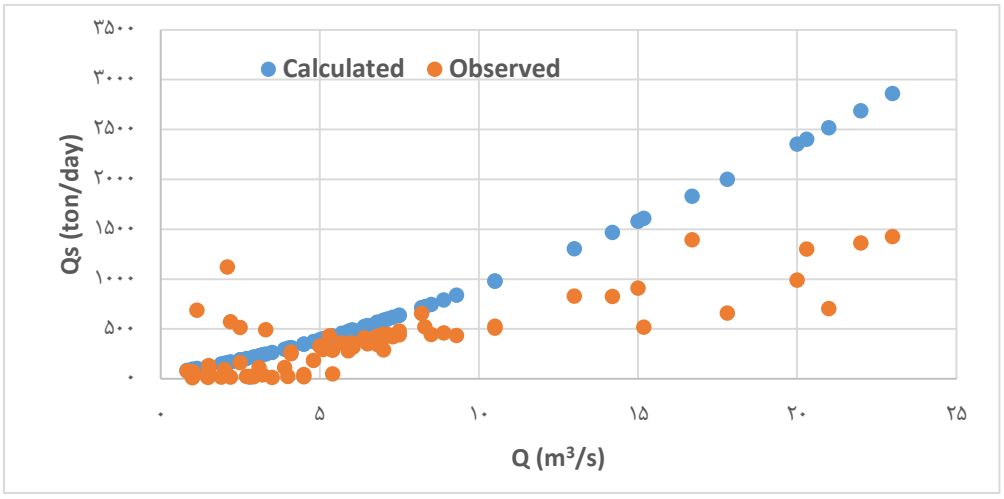
شکل ٤- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه شیلدز



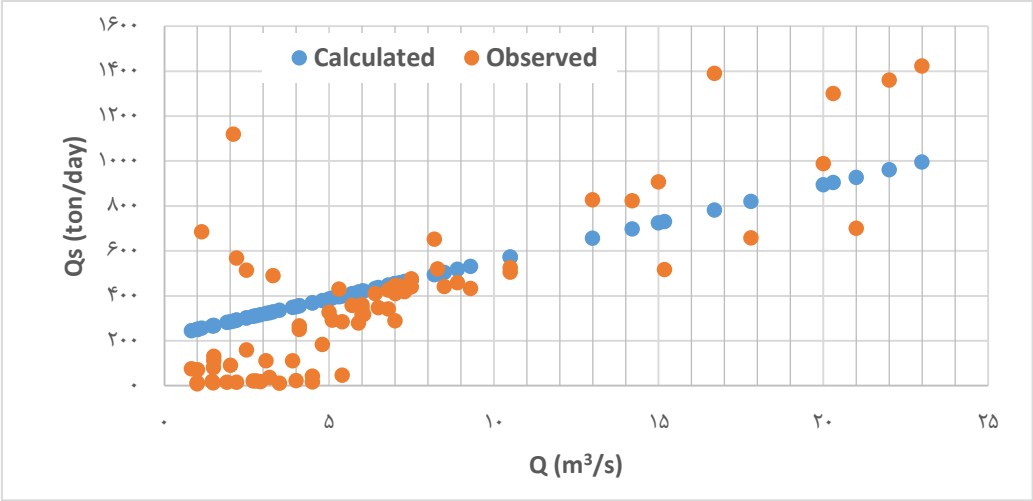
شکل ٥- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه انیشتن

www.SID.ir

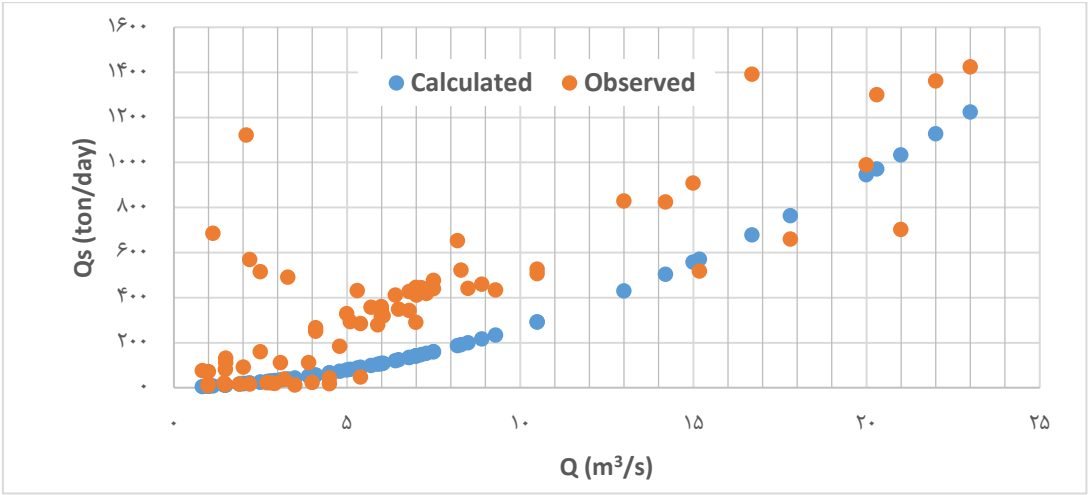
Archive of SID



شکل ٦- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه میر-پیترمولر



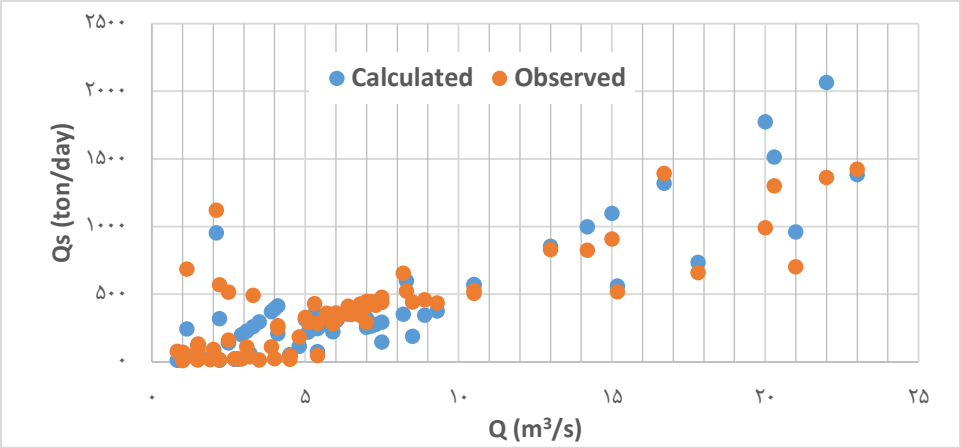
شکل ۷- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه انیشتین-براون



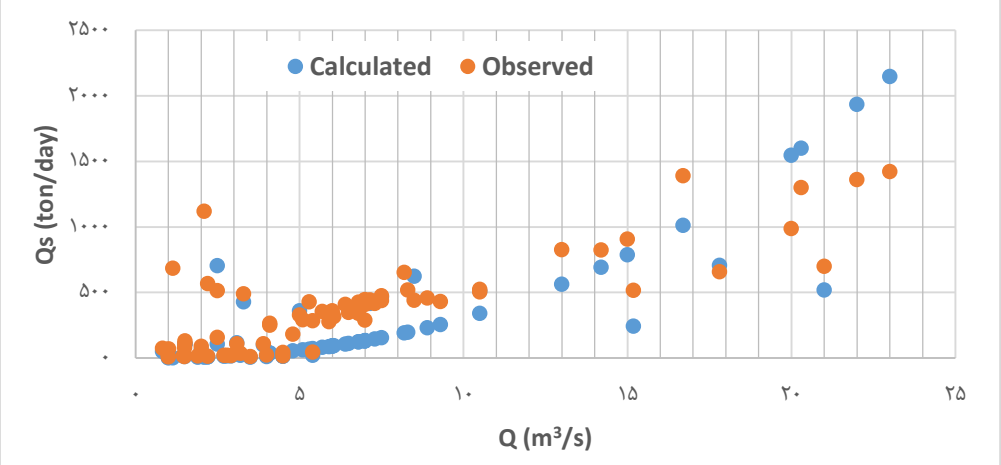
شکل ۸- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه بگنولد

www.SID.ir

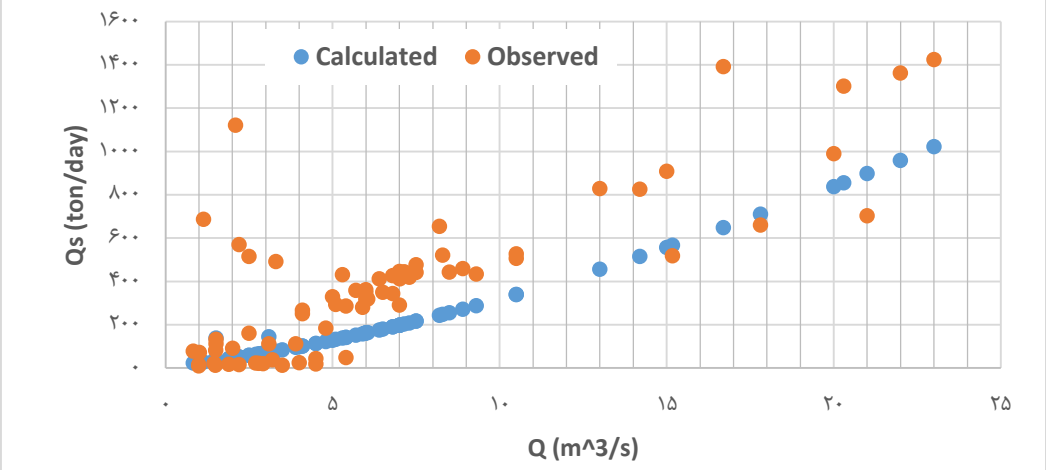
Archive of SID



شکل ۹- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه توفالتی



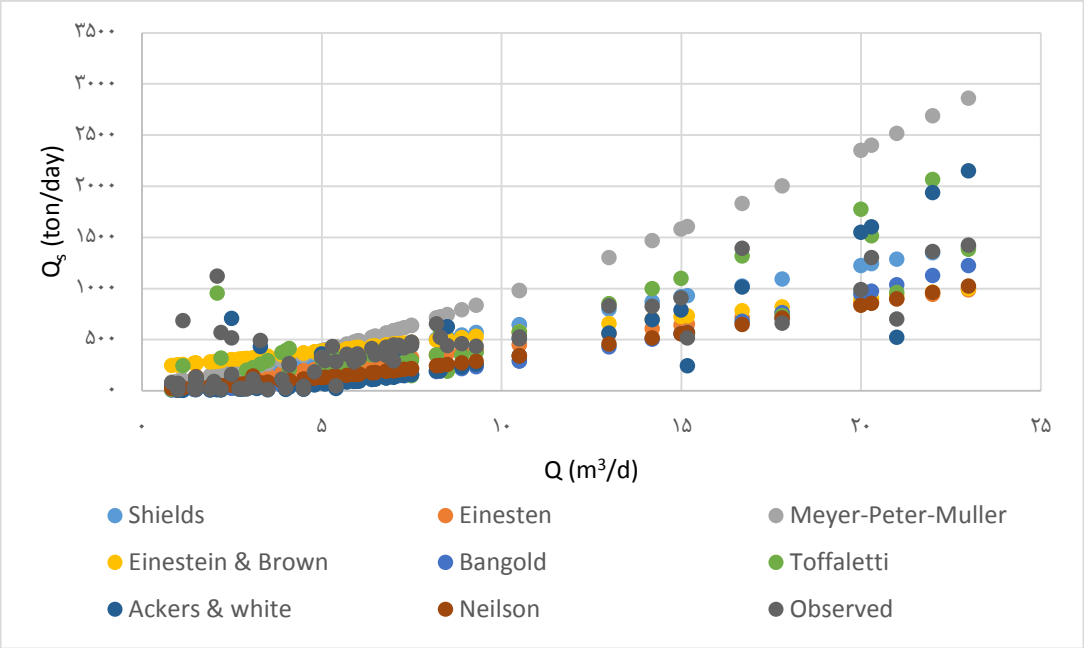
شکل ۱۰- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه ایکرز و وایت



شکل ۱۱- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از رابطه نلسن

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲- تغییرات مقدار بار کف بر حسب مقدار دبی جریان در ماه های مختلف سال با استفاده از روابط مختلف

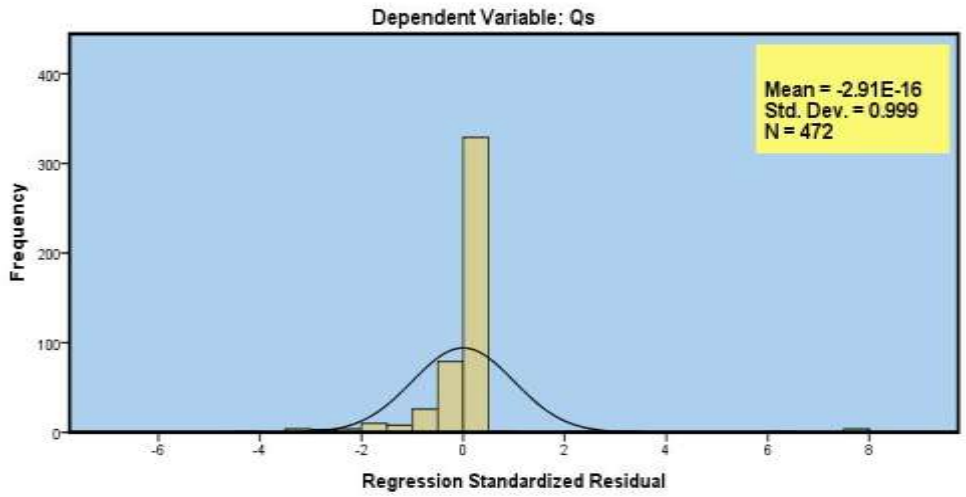
بررسی معادلات رسوب در هشت شکل متفاوت با توجه به بررسی داده‌های واقعی و مقایسه با آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۲ مجموعه روش‌های فوق نشان داده شده است و مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

شکل ۱۲ نشان می دهد که در بین روابط موجود، رابطه میر- پیتر و مولر از دقت بسیار پایینی برخوردار می‌باشد. از سوی دیگر، رابطه انیشتین از دقت کمی در پیش‌بینی مقدار بار کف داشت که با اصلاح این رابطه و استفاده از رابطه انیشتین- براون این رابطه تا حد زیادی اصلاح شد. روش ایکرز- وایت و نلسن نتایج تقریباً مشابه هم ارائه می‌دهند که دقت این روش نیز مطلوب ارزیابی می‌شود. از سوی دیگر رابطه توفالتی محاسبه مقدار دبی رسوب را با دقت بالاتری ارائه می‌دهد و می‌تواند معیار مناسبی برای پیش بینی دقت رسوب باشد.

بحث

کنترل داده‌ها

با استفاده از داده‌های موجود که مربوط به ۷۲ ماه می باشد رگرسیون بر این داده ها برازش داده‌شده است. رگرسیون انجام گرفته در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- رگرسیون خطی دبی رسوب

www.SID.ir

Archive of SID

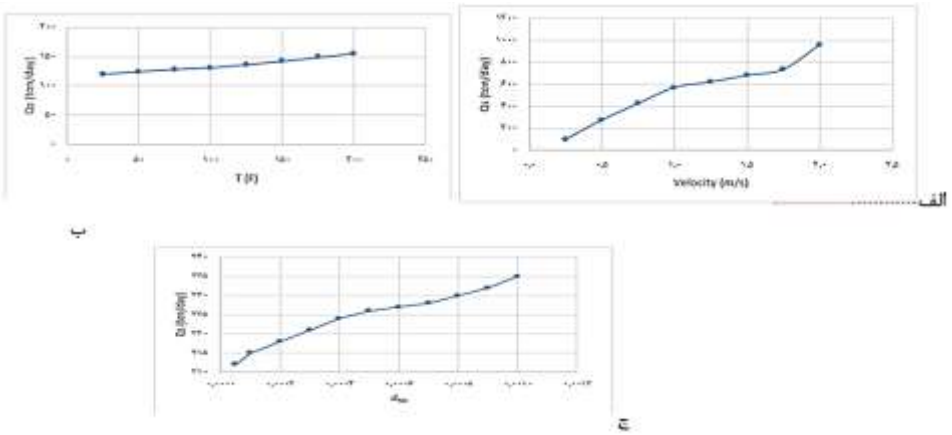
شکل ۱۳ مبتنی بر تحلیل و بررسی آماری مربوط به شرایط داده‌ها از نقطه نظر آماری در ۷۲ ماه می‌باشد. همانطور که از شکل مشخص است و در ادامه نیز بیان شده است، میزان دقت داده‌ها در ماه‌های مختلف از میزان قابل‌توجهی برخوردار می‌باشد. به عبارت بهتر با کم بودن دامنه متغیرات نسبت به منحنی گاوس می‌توان ارزیابی مناسب بودن داده‌ها را استنباط نمود.

در جدول ۶ نتایج ارائه شده از تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار SPSS مشخص شده است.

جدول ٦- خلاصه آمار توصیفی مورد استفاده نرم افزار SPSS

پارامتر	میانگین	خطای استاندارد	تعداد نمونه
Qs (m^2/day)	۱۴۴۰۰,۹۷۳۴	۲۲۸۱۴,۷۰۱۴۴	۷۲
Qd (m^2/day)	۱۰۸۰۰,۵۱۵۱	۸۸,۹۸۴۶۸	۷۲

برای آنالیز حساسیت هر پارامتر در رابطه توفالتی با تغییر مقدار یک پارامتر، مقدار ثابت برای سایر مقادیر در نظر گرفته شد و بدین-ترتیب با اعمال تغییرات متفاوت، تغییرات مقدار دبی رسوب به دست آمده مقایسه گردید و از این روش حساسیت رابطه (محاسبه مقدار بار بستر) بر حسب تغییرات هر پارامتر مطابق با شکل ۱۴ به دست آمد.



شکل ١٤- تحلیل حساسیت‌های مختلف در رابطه توفالتی الف) تحلیل حساسیت مقدار بار کف بر حسب سرعت ب) تحلیل حساسیت مقدار بار کف بر حسب دما ج) تحلیل حساسیت مقدار بار کف بر حسب دانه بندی

شکل ۱۴- الف نشان‌دهنده تغییرات محسوس مقدار بار کف بر حسب مقدار سرعت جریان می‌باشد. شیب این خط نشان‌دهنده شدت تغییرات می‌باشد و بیان‌کننده این مطلب است که مقدار بار بستر به مقدار سرعت جریان وابسته است و به شدت بر اثر تغییرات آن تغییر می‌کند.

علاوه بر این، مقدار تغییرات بار کف بر حسب مقدار دما در رودخانه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

شکل ۱۴- ب نشان‌دهنده مقدار تغییرات بار کف بر حسب مقدار دما در رودخانه می باشد. مشاهده می شود با افزایش مقدار دما در رودخانه مقدار بار کف نیز افزایش پیدا می‌کند، اما این مقدار تغییرات همانطور که شیب نمودار نشان می‌دهد عدد بزرگی نیست، بنابراین اثر این عامل بر محاسبه مقدار بار کف چندان چشمگیر نمی‌باشد.

در شکل ۱۴- ج رابطه بین دانه‌بندی بار کف رودخانه نسبت به برآورد رابطه توفالتی مشخص شده است.

مطابق با شکل ۱۴- ج، تغییرات مقدار اندازه دانه‌بندی بر روی مقدار بار بستر لحاظ شده است، همانطور که نشان داده شده است تغییرات دبی بستر بر اثر تغییرات اندازه دانه بندی محسوس بوده که این موضوع نشان از اثر ناچیز مقدار دانه‌بندی بر بار بستر دارد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

بررسی‌های صورت گرفته از تحلیل‌های انجام شده با ۸ معادله ذکر شده نشان دهنده دقت بهتر رابطه توفالتی به شرح نتایج زیر می باشد:

۱. داده‌های مربوط به جریان در ماه‌های مختلف سال، از دقت قابل‌قبولی برخوردار بود به طوری که از توزیع نرمال تبعیت نموده و

www.SID.ir

Archive of SID

ارزیابی داده‌ها نشان‌دهنده فقدان داده‌های پرت است. بنابراین تمامی داده‌های موجود به عنوان داده‌های محاسباتی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲. نتایج به‌دست‌آمده از روش توفالتی، حاکی از کمترین مقدار خطا می‌باشد و به عنوان رابطه مناسب در تخمین بار بستر لحاظ شده است. این روش مجموعه عوامل مختلف را برای در نظر گرفتن بار بستر، لحاظ می‌نماید و به همین خاطر قادر است بار کف را با دقت بالاتر و در تمامی حالات مختلف جریان پیش‌بینی نماید.

۳. به طور کلی بار بستر تابعی از دانه‌بندی بستر رودخانه، نوع دانه‌بندی، اندازه و خصوصیات دانه‌های خاک، جریان و مشخصات آن می‌باشد . نتایج این تحقیق نشان داد که رابطه‌ی توفالتی که دانه‌بندی بستر را در محاسبه مقدار بار بستر در نظر می‌گیرند از دقت بالاتری برخوردار تر می‌باشد.

۴. آنالیز حساسیت در رابطه توفالتی نشان می‌دهد که این رابطه به شدت تحت تأثیر پارامترهای جریان می‌باشد و با تغییر آن، مقدار بار کف تغییر می‌کند. پارامترهای دیگر در این رابطه از قبیل مقدار درجه حرارت آب، دانه‌بندی بستر رودخانه (به میزان کمتر) و ... تأثیر قابل‌توجهی در تغییرات مقدار دبی جریان نخواهد داشت.

۵. در رابطه توفالتی می‌توان با لحاظ نمودن مقدار قطر متوسط دانه‌های بستر رودخانه، به جای لحاظ نمودن تمامی اندازه‌های دانه-های خاک بستر رودخانه حجم محاسبات را کاهش داد و دقت ناشی از این رابطه را افزایش داد.

علائم و اختصارات

q_b = بار بستر در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه در متر)
τ = تنش برشی جریان (نیوتن بر مترمربع)
γ = وزن مخصوص آب (نیوتن بر متر مکعب)
R = شعاع هیدرولیکی (متر)
S = شیب رودخانه
τ_c = تنش بحرانی برحسب قطر دانه‌های بستر
q = بده جریان در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه)
G_s = چگالی دانه‌های رسوبی
$\emptyset$ = پارامتر شدت بار بستر
ρ و ρ_s = جرم مخصوص آب و رسوب (کیلوگرم بر مترمکعب)
g = شتاب ثقل زمین (متر بر مجذور ثانیه)
d = اندازه متوسط دانه های رسوب (متر)
$\acute{n}$ = ضریب مانینگ دانه های بستر
n = ضریب مانینگ بستر رودخانه
F_s = عدد شیلدز

منابع

صادقی‌پور، ا. ۱۳۹۵. مطالعه و بررسی منحنی‌های رسوب‌سنجی در حوضه آبریز قم‌رود. دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی مناطق نیمه خشک. سنندج. جهاد دانشگاهی دانشگاه کردستان.

قراچورلو، م. و اسفندیاری، ف. ۱۳۹۶. ارائه مدل مناسب برآورد بار رسوب معلق با استفاده از تلفیق توابع رگرسیونی و کلاسه بندی زمانی دبی در حوضه آبخیز بالیخلی چای (استان اردبیل). نشریه فضای جغرافیایی. ۱۶ (۵۶): ۱۴۹-۱۳۳.

دنیادیده، م. و رستمی، ا. ۱۳۹۵. ارزیابی معادلات رسوبی بار معلق در رودخانه دالکی. پانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. قزوین. دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی قزوین.

ابوالفتحی، د.، مددی، ع. و اصغری، ص. ۱۳۹۷. مدل سازی تخمین میزان رسوب رودخانه به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی (نمونه موردی: رودخانه گلرود). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. ۷(۲): ۲۰۸-۱۹۶.

سبحانی، ا. و ملکیان، ف. ۱۳۹۰. تعیین الگوی توزیع آماری رسوب معلق حوضه آبریز دریاچه نمک، پژوهش و سازندگی. ۱۲ (۴۴): ۹۹-۹۴.

مصفایی، ج.، کمالی، م.، پایروند، و. و شاپورزاده، مهدی. ۱۳۹۵. مقایسه کارایی روش‌های منحنی سنجه رسوب رودخانه پلرود، یازدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، یاسوج، انجمن آبخیزداری ایران، دانشگاه یاسوج.

دهقانی، امیراحمد. و تیموری، رضا. ۱۳۹۹. ارزیابی معادلات بار بستر در رودخانه‌های استان گلستان با استفاده از نرم‌افزار توسعه‌یافته STE. مهندسی عمران امیرکبیر. ۵۲ (۱۱): ۱۸-۱

مرادی‌نژاد، ا.، داوودمقامی، د. و مرادی،م .۱۳۹۸. بررسی کارآیی روش‌های برآورد بار رسوب معلق رودخانه قره‌چای، مجله محیط-زیست و مهندسی آب. ۵ (۴):۳۲۳۸-۳۲۸

Gary, J. 2005 .Geomorphology and river management, Blackwell Publishing, USA.

Chadwick, A.,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.

Vaighan, A.A., Talebbeydokhti, N., Bavani, A.M. 2017. Assessing the impacts of climate and land use change on streamflow, water quality and suspended sediment in the Kor River Basin, Southwest of Iran, Environmental Earth Sciences.76: 543.

www.SID.ir

Archive of SID

Modeling. Water Science and Technology Library, vol 81. Springer, Singapore.

Khaleghi, M.R.Varvani,M. 2018. Simulation of relationship between river discharge and sediment yield in the semi-arid river watersheds Journal of Acta Geodaetica. 66: 109.

Vaighan, A.A., Talebbeydokhti, N. & Bavani, A.M. (2017) Assessing the impacts of climate and land use change on streamflow, water quality and suspended sediment in the Kor River Basin, Southwest of Iran, Environmental Earth Sciences .76: 543. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6880-6.

Borah Das M., T. 2018. Study of Mineralogical Composition of Sediment in Brahmaputra River in Urban Stretch of Guwahati City, Assam, India. In: Singh. V., Yadav S., Yadava R. (eds) Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library. 81. Springer. Singapore

Bui, V. H., Bui, M. D., Rutschmann, P. 2019. Advanced numerical modeling of sediment transport in gravel-bed rivers.Water. 11(3): 550.

Borah Das M., T. (2018) Study of Mineralogical Composition of Sediment in Brahmaputra River in Urban Stretch of Guwahati City, Assam, India. In: Singh V., Yadav S., Yadava R. (eds) Hydrologic

www.SID.ir

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 15, Oct.-Nov. 2021, p. 780-793

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۵، مهر - آبان ۱۴۰۰، ص. ۷۹۳-۷۸۰

Determining The Appropriate Model for Estimating River Bed Loads

J. Vejahat[1*], Sh. Saraf[2]

Recived: Feb. 03, 2021 Accepted: Apr. 27, 2021

Abstract

Accurate estimation of sedimentation of a watershed is one of the most important issues in water engineering, river engineering, water resources, water facilities and structures, and the environment for the implementation of development plans and programs. The great variability in the equations has made it difficult to calculate the amount of sediment load in the river and the not exsit of information on how to extract the equations. In this paper, after collecting the necessary information in Benkooh hydrometric station and preparing the riverbed granulation, the amount of river bed load in this hydrometric station, using different regressions and calculating through several experimental relationships used to calculate the amount of sediment load The river floor was calculated. The results of these relationships were compared with the results recorded in the hydrometric station and other relationships used, indicating that the relationship between the tuff and the error rate of 22.71 in the RMSE coefficient of acceptable ability to calculate the amount of bed load in the area Has been studied, so it was chosen as the best model. The effective parameters in the sensativity analysis were analyzed and the results showed that the amount of floor load calculated in this method depends on the value of the flow velocity parameter and changes in water flow velocity in the river have a significant effect on the amount of sediment load.

Keywords: Empirical equations, Regressions, Sensitivity analysis, Toffaletti

1- Master of Hydraulic Structures, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Master of Hydraulic Structures, Sari Agriculture and Natural Resource University, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: j.vejahat@ut.ac.ir)

www.SID.ir