

توسعه رابطه تجربی برآورد بار رسوبی معلق با روش آنالیز ابعادی

(مطالعه موردی: رودخانه باراندوز)

محمد همتی^{۱*}، رحیم حمزه‌پوری^۲، ایمان اکبری^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20959.1026

چکیده

حصول روش‌های مناسب و دقیق در پیش‌بینی بار رسوبی رودخانه‌ها به دلیل اثرات منفی آن بر روی شاخص‌های کیفی آب، تقلیل گنجایش مخازن و تغییر در مورفولوژی رودخانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین بار رسوبی معلق در رودخانه‌ها معمولاً با استفاده از روش‌های هیدرولوژیک تعیین می‌گردد. هدف تحقیق حاضر ارتباط بار معلق رسوب به پارامترهای هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و مورفولوژی رودخانه می‌باشد. برای رسیدن به این هدف از روش تحلیل ابعادی استفاده گردید. داده‌های اندازه‌گیری شده از دو ایستگاه هیدرومتری بر روی رودخانه باراندوز در حوضه آبریز مرکزی دریاچه ارومیه جهت استخراج روابط غیرخطی برای پیش‌بینی بار رسوبی معلق مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی مقادیر برآوردی رابطه جدید در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد که میزان خطای متوسط معادله نهایی در برآورد بار رسوبی معلق در حدود ۲۵ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب رابطه حاصله در برآورد بار رسوبی در رودخانه‌ها است.

واژگان کلیدی: بار معلق، تحلیل ابعادی، ریخت‌شناسی، مهندسی رودخانه.

Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

*^۱ - دانشیار گروه علوم و مهندسی آب - سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

^۲ - دانشجو دکتری علوم و مهندسی آب - سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

^۳ - دانشجو دکتری علوم و مهندسی آب - سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

مقدمه

به دست آوردن روشی مناسب و دقیق در پیش‌بینی بار معلق رسوبی در رودخانه‌ها به دلیل اثرات منفی آن بر روی شاخص‌های کیفی آب، تقلیل گنجایش مخازن، تغییر در مورفولوژی رودخانه‌ها و... از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کل مواد رسوبی انتقالی در رودخانه‌ها به صورت مجموعه‌ای از بارکف، بار معلق و بار شسته می‌باشد. میزان مواد رسوبی غوطه‌ور در جریان که به خاطر بردارهای تلاطمی جریان در بالای لایه بستری در واحد زمان از سطح مقطع عرضی مشخص عبور می‌کند را بار معلق گویند. آن قسمت از بار کل رسوبی که ریزدانه بوده و غالباً قابلیت ته‌نشینی در بستر را نداشته و تابع خصوصیات معینی از جریان نیست، بار شسته^۲ می‌نامند. بار شسته مرکب از ذراتی است که ریزتر از اندازه مواد بستری بوده و همراه جریان انتقال می‌یابند. این ذرات رسوبی عموماً در بستر ظاهر نمی‌شوند. (Hamzepouri 2005) دانشمندان عموماً بار معلق را مربوط به ذرات معلق می‌دانند که کوچکتر از اندازه مواد بستری باشند. همچنین روش‌های برآورد بار معلق به دو گروه اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

الف) اندازه‌گیری مستقیم بار رسوبی در مقاطع ایستگاه‌های آب‌سنجی و کاربرد روش‌های آماری در تحلیل داده‌ها
ب) برآورد غیرمستقیم بار رسوبی به روش تحلیلی-تجربی بر اساس خصوصیات جریان و مواد بستری در یک بازه مطالعات و تحقیقات انجام شده در خصوص برآورد بار رسوبی در سطح کشور عموماً با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط وزارت نیرو صورت می‌پذیرد. گسترده‌گی رودخانه‌ها و مسیل‌ها در سطح کشور، محدودیت در تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی خودکار، مشکلات مربوط به نمونه‌گیری بار رسوبی در ایستگاه‌های هیدرومتری درجه دو و سه و کمبود داده‌های مربوط به زمان‌های سیلابی موجب گردیده است که روش‌های مختلف آماری و تجربی - تحلیلی در برآورد بار رسوبی اعم از بار بستر و معلق مورد استفاده قرار گیرد که این امر تفاوت در نتایج را به دنبال دارد و این پیچیدگی در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه به دلیل توسعه لایه سطحی بستر، بیشتر می‌باشد.

مطالعات زیادی توسط محققان مختلف در زمینه محاسبه بار رسوبی معلق انجام گرفته است که در ادامه به ارائه نتایج برخی از آنها با جزئیات پرداخته شده است (DanandehMehr et al. 2011; Rastgar and Habibi 2012; Yasi et al. 2013; Rahgoshai 2013; Mohammadzadeh and Saeed Panah 2015; Atalo 2016; Asadi et al. 2017; Bazian and Yasi 2018; Emami et al. 2019; Ebrahimi et al. 2020; Ismaeel et al. 2021; Hosseini 2022; Shirdel Haver 2022, Hosseini et al. 2023).

(Rastgar and Habibi 2012) برای ارزیابی روش‌های مختلف برآورد بار رسوبی، در حوزه جگین با استفاده از آمار و اطلاعات ایستگاه آب‌سنجی جگین - پنهان، روش‌های معادله اصلاح شده اینشتین (MESE)^۳، انگلوند - هانسن (EHSE)^۴، حبیبی (HSE)^۵ و فان - راین (VRSE)^۶ را مورد سنجش قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در مجموع متوسط نسبت بار معلق محاسباتی به مشاهده‌ای در روش MESE و متوسط نسبت بار کل محاسباتی به مقادیر اندازه‌گیری شده در روش EHSE به یک نزدیک‌تر است. میزان پراکندگی داده‌ها نیز در برآورد بار معلق به ترتیب در روش‌های HSE، MESE و VRSE افزایش یافت. باتوجه به نتایج حاصله و بررسی‌های به‌عمل‌آمده، استفاده از روش‌های پنج‌گانه فوق و مقایسه این نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده، معادله اصلاح شده MESE پاسخ واقعی‌تری را ارائه کرده است. (Yasi et al. 2013) با ارزیابی بار رسوبی معلق با روش‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در رودخانه‌های قطور، اند و بارون نتیجه گرفتند که روش‌های هیدرولیکی برآورد کمتری نسبت به مقادیر مشاهداتی داشته و داده‌های مشاهداتی نیز با روش دسته‌بندی و تفکیک داده‌ها نتایج آماری قابل‌قبول‌تری را ارائه می‌نماید. (Rahgoshai 2013) بر اساس مطالعات رسوب‌شناسی و هیدرولوژیکی بر روی حوضه آبریز لبرود در شهرستان دامغان با استفاده از روش‌های فائو و روش منحنی سنجه دبی بار معلق را محاسبه کردند و نتیجه گرفتند که روش فائو نسبت به روش منحنی سنجه یک‌خطی عملکرد بهتری داشته و برآورد نسبتاً نزدیک‌تری به مقدار واقعی را بیان می‌کند.

۴- Englund-Hansen Sediment Equation

۵- Habibi's Sediment Equation

۶-Van -Rijn Sediment Equation

۱- Suspended Load

۲-Wash Load

۳- Modified Einstein Sediment Equation

پرداختند. در این تحقیق محل بررسی در پایین‌دست سد و با دبی تنظیمی و رها شده از سد بود. محققین مذکور دقت مناسب رابطه ارائه شده در برآورد بار رسوبی سالانه و انتقال آن را گزارش کردند. (Chitsaz et al. 2020) با استفاده از اطلاعات ۳۰ نوع ویژگی فیزیوگرافیکی، ژئومورفولوژیکی، پوشش گیاهی و اقلیمی به مدل‌سازی رسوب معلق و تعیین عوامل مؤثر بر آن در حوزه‌های آبخیز کارون بزرگ و کرخه پرداختند و نتیجه گرفتند که به‌طور کلی ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه مانند محیط، مساحت، طول آبراهه اصلی و ریف حوضه نسبت به سایر ویژگی‌ها مانند عوامل اقلیمی پوشش گیاهی و زمین‌شناسی منطقه از درجه اهمیت بیشتری برخوردارند.

(Hosseini 2022) به ارزیابی نسبت بار بستر به بار کل رسوبی در بازه‌های معرف رودخانه‌های ایران پرداخت و روابطی را برای آن ارائه نمود. (Peyroyan Kazaroni 2022) در پژوهشی از روابط مختلف تئوری مانند معادله راس (RSE)^۵ و لین - کالینسک (LKSE)^۶ برای محاسبه مقدار بار رسوب معلق رودخانه قره‌آغاج با استفاده از آمار متناظر دبی جریان و رسوب طی سال‌های آبی ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵ استفاده کردند. ایشان پس از بررسی تئوری‌های مختلف و استفاده از رگرسیون خطی دو متغیره، نتیجه گرفتند که دقت روش‌های مذکور در تخمین داده‌های رسوب قابل قبول می‌باشد.

ارتباط دبی بار رسوبی معلق به دبی جریان که به منحنی سنج رسوب معلق معروف است دارای کاربردهای فراوانی است؛ اما میزان خطای برآوردی آن بیشتر است. دیگر محققان از جمله (Mosaedi et al. 2006) نیز توصیه کرده‌اند که حتی‌الامکان از مدل‌هایی که دارای خطای کمتری در برآورد رسوب می‌باشند استفاده شود.

در این راستا برای کاهش میزان خطای برآوردی رسوب معلق، ارتباط دبی بار رسوبی معلق با خصوصیات هیدرولیکی - هیدرولوژیکی و مورفولوژی برای اولین بار در رودخانه باراندوز مورد بررسی قرار گرفت. برای نیل به این هدف و با توجه به تجربیات تحقیقات گذشته از جمله (Ismaeel et al. 2021) و (Khassaf and Hassan 2014) پارامترهای بدون بعد لازم استخراج و با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری

(Mohammadzadeh and Saeed Panah 2015) در تحقیقی به ارزیابی روش‌های هیدرولیکی برآورد بار معلق رسوب شامل بروکس (BSE)^۱، لین - کالینسک (LKSE)^۲ و چانگ - سایمونز - ریچاردسون (CSRSE)^۳ و روش اینشتین (ESE)^۴ پرداختند. نتایج آنها نشان داد که سه روش BSE، LKSE و CSRSE، دارای نتایج نزدیک‌تری نسبت به هم هستند و نسبت به روش ESE جواب‌های معقول‌تری ارائه می‌دهند. همچنین از بین روش‌های مذکور، روش ESE مقدار دبی رسوب کمتری را محاسبه می‌کند. (Bazian and Yasi 2018) روش‌های مختلف هیدرومتری و هیدرولیکی در برآورد بار رسوبی معلق در بازه‌هایی از رودخانه زاب را مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد که روش اینشتین با متوسط خطای نسبی ۹۱٪ نسبت به روش‌های دیگر نتایج قابل‌قبول‌تری ارائه می‌نماید. (Kheirfam et al. 2018) در پژوهشی به ارزیابی تغییرپذیری بار بستر، معلق و نسبت بار بستر به معلق در رودخانه قطور چای پرداختند. آنها بیان کردند از آنجایی که تحلیل و تعیین تغییرپذیری رسوبات انتقالی رودخانه در شرایط مختلف زمانی و هیدرولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای در علوم مهندسی هیدرولیک و هیدرولوژی برخوردار است، اتخاذ تصمیمات مدیریتی برای مهار و کاهش انتقال رسوب در رودخانه‌ها نیازمند به تحلیل و شناخت رفتار سامانه رودخانه در شرایط زمانی مختلف است. علاوه بر آن آنها توصیه کردند که ایستگاه‌های سنجش بار بستر برای تکمیل داده‌ها تجهیز شوند. (Ebrahimi et al. 2020) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی توزیع اندازه ذرات رسوب معلق رودخانه پسیخان در استان گیلان در طی دوره زمانی هفت‌ماهه از مهر ۱۳۹۲ تا فروردین ۱۳۹۳ پرداختند و نتیجه گرفتند در اکثر نمونه‌برداری‌ها، بین دبی جریان و اندازه ذرات رسوب معلق در منطقه ذکر شده ارتباطی وجود ندارد که نشان‌دهنده طبیعت غیر هیدرولیکی و تأثیر متغیرهای متفاوت دیگر مثل منشأ رسوبات، تاریخ و انرژی انتقال، توانایی فرساینده‌گری، فرسایش-پذیری و ته-نشینی در اندازه ذرات رسوبات معلق در جریان رودخانه‌ای است. (Ismaeel et al. 2021) به ارائه فرمول تجربی برای برآورد بار رسوبی معلق در پایین‌دست سد تنظیمی العماره در کشور عراق با استفاده از تحلیل آماری و آنالیز ابعادی بر روی رودخانه دجله

۵- Rouse Sediment Equation

۶- Lane-Kalinske Sediment Equation

۱- Brooks Sediment Equation

۲- Lane-Kalinske Sediment Equation

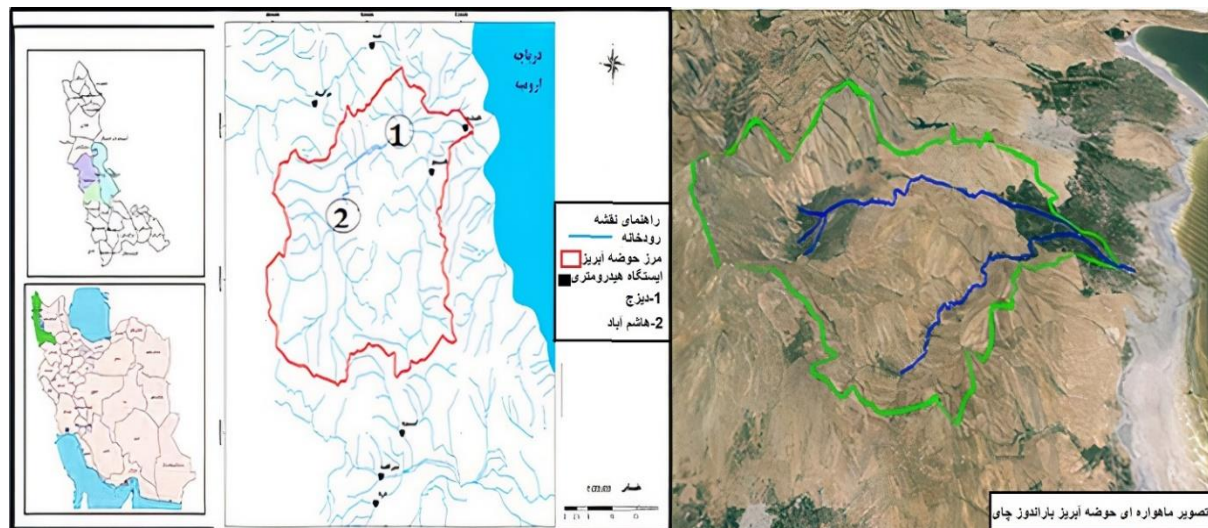
۳- Chang-Simons-Richardson equation

۴- Einstein Sediment Equation

شده، روابطی غیر خطی برای پیش‌بینی میزان دبی بار معلق توسعه داده شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش دو ایستگاه هیدرومتری بیبکران و دیزج بر روی رودخانه باراندوز و بازه‌های مجاور ایستگاه‌های هیدرومتری مذکور، مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱). در ایستگاه‌های مورد اشاره، دبی جریان و بار رسوبی معلق در دوره‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. رودخانه مذکور در بازه‌های مطالعاتی جزء رودخانه‌های با مواد بستری



شکل (۱): موقعیت رودخانه باراندوز و ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده

غلظت رسوب، سرعت جریان و عمق (اشل) و عرض سطح آب و دمای آب است. موقعیت ایستگاه بیبکران با شماره (۲) در شکل (۱) نشان داده شده است. نمونه‌برداری از بار معلق طبق شیوه معرفی شده در (Shafa'i Bajestan 2016) به صورت عمقی و در سه نقطه از مقطع رودخانه (نقطه‌ای در ساحل راست، ساحل چپ و مقطع میانی جریان) انجام شد. نمونه‌برداری عمقی به صورت دستی و با استفاده از نمونه‌بردار استاندارد D_{84} آلومینیومی انجام شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه رسوب، تعیین غلظت شده و متوسط غلظت سه مقطع به کل مقطع لحاظ شد. با در نظر گرفتن دبی جریان، مقدار کل بار معلق عبوری از مقطع مشخص گردید.

ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده

ایستگاه هیدرومتری بیبکران (هاشم‌آباد)

این ایستگاه بر روی رودخانه باراندوز و در مختصات با طول و عرض جغرافیایی بترتیب $۳۷^{\circ} ۲۱' ۱۶''$ و $۴۴^{\circ} ۵۶' ۵۵''$ قرار دارد. مساحت حوضه آبریز در بالادست ایستگاه ۲۶۲ کیلومترمربع است. شیب طولی رودخانه با استفاده از نقشه توپوگرافی رودخانه در محدوده بالادست دستگاه ۰/۰۰۶۵ (۰/۱۶۵ درصد) می‌باشد، در این ایستگاه آمار و نتایج مربوط به اندازه‌گیری دبی جریان و نمونه بار رسوبی که به صورت هم‌زمان در یک دوره پنج‌ساله (از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰) با تعداد ۵۱ داده اندازه‌گیری شده است، بررسی شد. متغیرهای اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه شامل دبی،

رابطه جدید تجربی- تحلیلی بر اساس متغیرهای هیدرولیکی، رسوبی و هندسه جریان با استفاده از آنالیز ابعادی و بی‌بعد نمودن آنها ارائه گردید. ابتدا متغیرها و عوامل مؤثر در انتقال بار رسوبی معلق در بازه‌های مورد مطالعه شناسایی (رابطه ۱) و سپس با روش و تئوری پای - باکینگهام پارامترهای بی‌بعد استخراج شد (رابطه ۲). متغیرهای مؤثر انتخاب شده عبارت‌اند از: شیب بستر (S)، دبی بار رسوبی معلق (Q_s)، شاخص اندازه موارد بستری (d₅₀)، سرعت متوسط سقوط مواد رسوبی (ω)، سرعت متوسط جریان (V)، عرض سطح آب (T)، عمق متوسط جریان (D)، وزن مخصوص مواد رسوبی (ρ_s)، وزن مخصوص آب (ρ)، دمای آب و لزجت کینماتیک (ν).

$$Q_s = F(S, d_{50}, V, \omega, T, D, \rho, \rho_s, \nu) \quad (1)$$

لازم به ذکر است تأثیر دمای آب در برآورد لزجت کینماتیک و وزن مخصوص آب لحاظ شده است و شیب بستر به‌عنوان یک متغیر بی‌بعد بوده، لذا با تحلیل ابعادی و بی‌بعد نمودن پارامترها تابع هدف به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

$$\frac{Q_s}{(\rho \omega D^2)} = f\left[\left(\frac{V}{\omega}\right), \left(\frac{D}{d_{50}}\right), \left(\frac{T}{D}\right), \left(\frac{\omega D}{\nu}\right), \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)\right] \quad (2)$$

پارامترهای ذکر شده همگی از عوامل مؤثر در انتقال رسوب بوده و اندازه‌گیری آن‌ها نیز در محل ایستگاه‌های هیدرومتری انجام گردیده است.

جهت پیش‌بینی روابط، از نرم‌افزار SPSS و برای ارزیابی و بررسی دقت روابط استخراجی از پارامترهای آماری متوسط مربعات خطا^۲ (رابطه ۳) و میانگین ریشه دوم خطا^۳ (رابطه ۴) استفاده شد. متوسط مربعات خطا روشی برای برآورد میزان خطاست که در واقع تفاوت بین مقادیر مشاهده‌ای و آنچه تخمین زده شده است را نشان می‌دهد و میانگین ریشه دوم خطا به معنی میانگین مربع خطاها است.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (4)$$

در بررسی انتقال رسوب جریان، خصوصیات مواد رسوبی (لایه سطحی و لایه زیرسطحی) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ لذا در این تحقیق به‌منظور بررسی انتقال رسوب، مشخصات و دانه‌بندی مواد بستری شامل لایه سطحی و زیرسطحی بستر در محدوده بالادست ایستگاه بررسی و انجام شد. نمونه‌برداری و تحلیل مواد لایه سطحی با استفاده از روش شبکه‌بندی اندازه‌گیری سه محوری مواد رسوبی^۱ (Shafa'i Bajestan 2016) و لایه زیرسطحی بستر با برداشت لایه سطحی از عمق ۲۵ الی ۵۰ سانتی‌متری انجام گردید که منحنی دانه‌بندی مربوطه در شکل (۲) ارائه شده است.

ایستگاه هیدرومتری دیزج

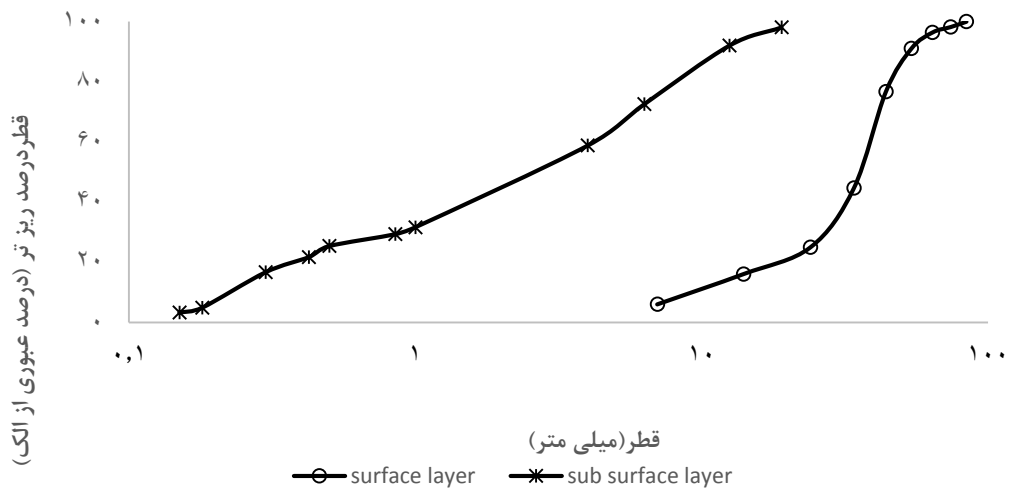
این ایستگاه بر روی رودخانه باراندوز و مختصات با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب "۳۹ ۴ ۴۵" و "۵۱ ۲۳ ۳۷" قرار دارد. مساحت حوضه آبریز در بالادست ایستگاه ۶۱۸ کیلومترمربع است. این ایستگاه در پایین‌دست ایستگاه بیبکران قرار دارد (موقعیت شماره ۱ در شکل ۱) و تأسیسات ذخیره آب در حد فاصل دو ایستگاه احداث نشده است، شیب طولی رودخانه با استفاده از نقشه توپوگرافی رودخانه در محدوده بالادست دستگاه ۰/۰۰۵ (۰/۵ درصد) است.

بازه مورد مطالعه جزء رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه بوده و منحنی دانه‌بندی برای مواد لایه سطحی و زیرسطحی مطابق با روش اشاره شده در شکل (۳) ارائه شده است. در این ایستگاه نیز آمار و نتایج مربوطه به اندازه‌گیری دبی جریان و نمونه بار رسوبی که به‌صورت هم‌زمان در یک دوره پنج‌ساله (از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰) با تعداد ۵۴ داده اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه شامل دبی جریان، غلظت رسوب، سرعت، عمق (اشل) و عرض سطح آزاد جریان و دمای آب است. همچنین در جدول (۱) مقادیر متوسط متغیرهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده طی دوره ۵ساله ارائه گردیده است.

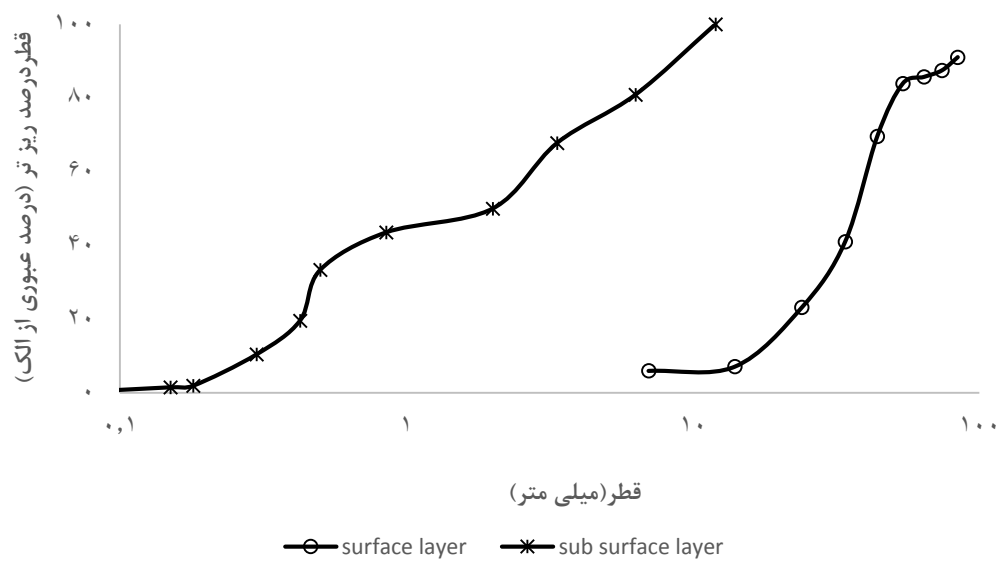
تحلیل ابعادی و توسعه مدل جدید بار رسوبی

۲-RMSE

۱- Grid by Number
۱- MSE



شکل (۲): منحنی دانه‌بندی مواد رسوبی بستر (لایه سطحی و زیر سطحی) در محدوده ایستگاه هاشم‌آباد (بیکران)



شکل (۳): منحنی دانه‌بندی مواد رسوبی بستر (لایه سطحی و زیر سطحی) در محدوده ایستگاه دیزج

پیش‌بینی معادله بار رسوبی معلق

فرمول نهایی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده با نرم افزار SPSS با آنالیز و برقراری رگرسیون غیرخطی مورد

نتایج و بحث

$$\frac{Q_s}{\rho \omega D^2} = 7.095 \times 10^{-6} \times \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{7.7} \times \left(\frac{V}{\omega}\right)^{2.7} \times \left(\frac{T}{D}\right)^{1.42} \times \left(\frac{\omega D}{v}\right)^{-4.82} \times \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{1.84} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که تعداد ۲۱ داده از مجموع کل داده‌ها در استخراج رابطه (۵) دخالت نداشتند. این داده‌ها در مرحله صحت سنجی و ارزیابی رابطه پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند.

تجزیه، تحلیل و بررسی قرار گرفت. چنانچه اشاره گردید تعداد کل داده‌های اندازه‌گیری شده در این مطالعه ۱۰۵ داده است. (۵۴ داده در ایستگاه دیزج و ۵۱ داده در ایستگاه بیبکران) که از این تعداد داده، ۸۴ مورد در ایجاد فرمول مورد استفاده قرار گرفت و ۲۱ داده جهت ارزیابی و صحت سنجی آن بکار گرفته شد. فرمول و نتیجه نهایی به شرح رابطه (۵) ارائه شده است. این رابطه با استفاده از معادلات رگرسیون غیرخطی موجود در نرم‌افزار SPSS برای ۸۴ داده اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه مذکور به دست آمده است.

جدول (۱): مقادیر متوسط متغیرهای اندازه‌گیری شده طی دوره ۵ ساله در محل ایستگاه دیزج

سال	ماه	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	سرعت (متر بر ثانیه)	مساحت مقطع جریان (مترمربع)	عمق متوسط جریان (متر)	عرض سطح آب (متر)	دبی رسوب معلق (تن بر روز)	دبی رسوب معلق (کیلوگرم بر ثانیه)
۹۶	۱	۷/۰۶	۰/۶	۱۱/۷	-/۵۷۲۸	۲۱/۵	۴۹	-/۵۶۷۱۳
۹۶	۲	۲۷/۸۹	۱/۴۸	۱۸/۸۷	-/۹۹۱۸	۱۹	۴۵۵۸	۵۲/۷۵۴۶
۹۶	۱۲	۵/۱۶	-/۵۶۶	۷/۳۳	-/۶۰۷۷	۱۵	۳۷/۴۴۹	-/۴۳۳۴۴۳
۹۷	۱	۱۵/۸۱	۱/۰۲۵	۱۲/۷۹	-/۱۸۵۶۹	۱۸	۱۶۳۰/۹۸	۱۸/۷۸۸۱
۹۷	۲	۱۹/۰۱	۱/۰۰۵	۱۹	-/۹۵	۲۰	۱۰۶۴/۹۵	۱۲/۱۰۹۳
۹۷	۳	۴/۹۰۴	۰/۶۴	۷/۳	-/۵۱۰۸	۱۵	۳۵/۵۹۱	-/۴۱۱۹۳
۹۷	۹	۲۱/۵۷	۱/۳۸۷	۱۵/۵۵	-/۱۸۴۰۸	۱۸/۵	۱۱۴۱/۷۹	۱۳/۲۱۵۲
۹۷	۱۰	۷/۲۱۱	-/۹۳۷	۷/۶۹	-/۵۱۱۳	۱۵	۶۴/۷۹۵	-/۷۴۹۹۴
۹۷	۱۱	۶/۶۰۴	-/۸۱۸	۸/۰۷۵	-/۵۳۸۲	۱۵	۶۴/۷۸۸	-/۵۴۱۵۲
۹۷	۱۲	۵/۶۱	-/۷۸۵	۷/۴۷	-/۵	۱۴/۸	۳۷/۸۰۷	-/۴۳۵۸
۹۸	۲	۳۷/۰۴	۱/۷۵	۲۱/۴	-/۱۱۳۹	۱۹	۴۰۱۶/۳۲	۴۶/۴۸۵۲
۹۸	۱۲	۷/۵	۰/۷۲	۱۰/۲۴	-/۵۸۱۹	۱۷/۹	۷۴/۲	-/۸۵۸۷
۹۹	۱	۱۵/۵۵۴	۰/۱۱	۱۴/۰۳	-/۷۱۸۵	۱۹/۵	۲۱۸/۱۵۴	۲/۵۲۴۹
۹۹	۲	۵۷/۲۱۸	۲/۲۴	۲۵/۵۶	۱/۳۰۹۹	۱۹/۵	۱۷۵۹۷/۱	۲۰۳/۶۷۷
۹۹	۲	۱۹/۱۹۶	۱/۴۳	۱۳/۲	-/۷۵۵۷	۱۸	۱۲۶۳/۸۰۳	۱۴/۶۲۷۳
۹۹	۳	۷/۰۱۷	۰/۷۶	۹/۲۷	-/۵۲۷۵	۱۷/۵	۷۳/۶۹۵	-/۸۵۶۰۷
۹۹	۴	۳/۰۵۴	۰/۵۳	۵/۷۵	-/۳۹۴۶	۱۶/۶	۳۸/۲۶۱	-/۴۴۲۸۳
۹۹	۸	۴/۱۹۱	۰/۶۷	۶/۳۶	-/۴۵۳۲	۱۳/۸	۵۳/۵۹۱	-/۶۲۰۲۶
۹۹	۹	۵/۴۴۲	۰/۷۷۵	۷/۰۷	-/۴۷۴۴	۱۴/۸	۴۹/۳۷	-/۵۷۱۴۱
۹۹	۱۱	۵/۹۲۵	۰/۷۹	۷/۵۴	-/۴۷۴۶	۱۵/۸	۵۷/۳۳۵	-/۶۶۲۶
۹۹	۱۲	۶/۰۲۸	۰/۷۹	۷/۶	-/۴۸۹۰	۱۵/۶	۳۵/۹۳۱	-/۴۱۵۸
۹۹	۱۲	۷/۸۳۵	۰/۹۸	۸	-/۵۶۷۰	۱۴/۱	۱۵۰/۵۰۷	۱/۷۴۱۹
۱۴۰۰	۱	۱۳/۴۵	۱/۲۳	۱۰/۹۳	-/۶۲۱۵	۱۷/۶	۲۲۷/۴۸۲	۲/۶۳۳۸
۱۴۰۰	۲	۸/۰۳۱	۰/۹۶	۸/۳۳	-/۶۰۶۲	۱۳/۸	۱۴۳/۱۷	۱/۶۵۷۰

ارزیابی و صحت سنجی دقت روابط پیشنهادی

نتایج بررسی‌ها نشان داد که رابطه (۵) دارای متوسط مربعات خطا برابر با ۰/۳۸ و میانگین ریشه دوم خطای برابر با ۰/۵۵ است. همچنین ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مقادیر تخمین زده شده با رابطه (۵) توسط نرم‌افزار با ایجاد رگرسیون غیرخطی ۰/۹ به دست آمد. نتایج ارزیابی و صحت سنجی در جدول (۲) و شکل (۴) ارائه شده است. (Ismaeel et al. 2021) نیز در تحقیقی جهت برآورد بار رسوبی معلق در پایین‌دست سد تنظیمی

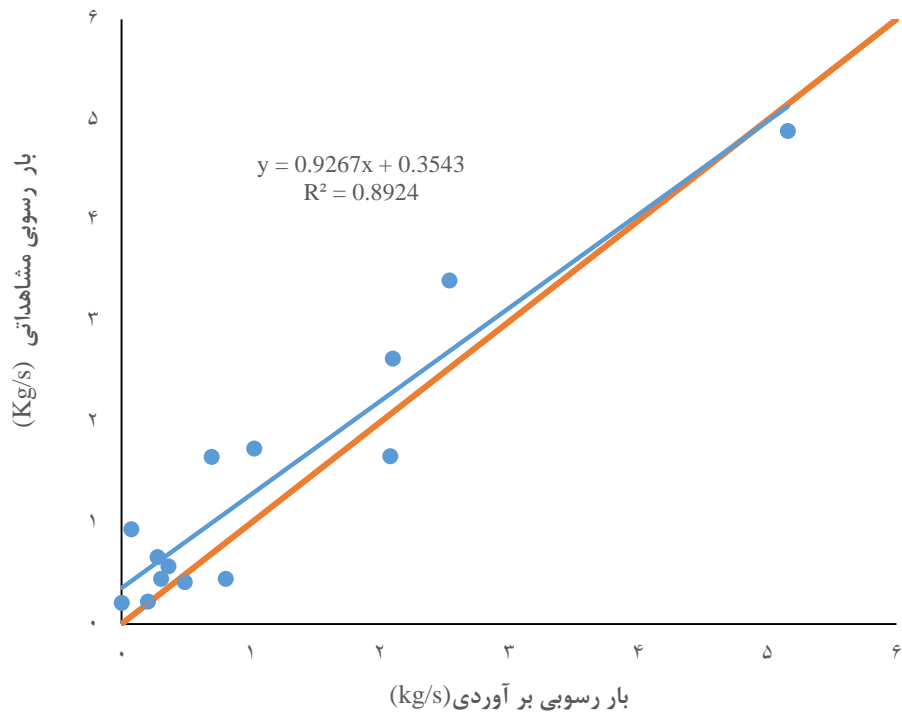
العماره بر روی رودخانه دجله در کشور عراق، از تحلیل آماری و آنالیز ابعادی استفاده کردند و نتایج به دست آمده نشان داد که معادله پیشنهادی آنها دارای ضریب تعیین ۰/۸۹ می‌باشد و دقت مناسبی در پیش‌بینی بار رسوبی معلق دارد. همچنین (Khasraf and Hassan 2014) نیز در تحقیقی با استفاده از آنالیز ابعادی فرمول جدیدی را برای تخمین دبی رسوب معلق در رودخانه دجله واقع در بالادست سد العماره در استان میسان - عراق پیشنهاد کردند که این رابطه دارای ضریب تعیین ۰/۸۲ بود.

شکل (۴) و ضریب مناسب رابطه همبستگی آماری ۰/۹ نشان‌دهنده برآورد مناسب روش ارائه شده جدید برای مقادیر بار رسوبی می‌باشد. با این وجود اختلاف نتایج در داده‌های مربوط به بار رسوبی در دامنه ۰/۰۱ تا ۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه و پراکندگی داده‌های مشاهداتی موجب خطا نسبی بالاتر در این خصوص گردیده است. نتایج مربوط به خطای نسبی بین داده‌های مشاهداتی و برآوردی در حدود ۴۵ درصد است. چنانچه در شکل (۴) نیز مشهود می‌باشد بخش بزرگی از خطاها مربوط به دبی‌های با بار رسوبی کمتر از ۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه است. بار رسوب معلق انتقالی در دبی‌های جریان کم‌آبی رودخانه باراندوز دارای پراکندگی بوده و مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده به‌ازای

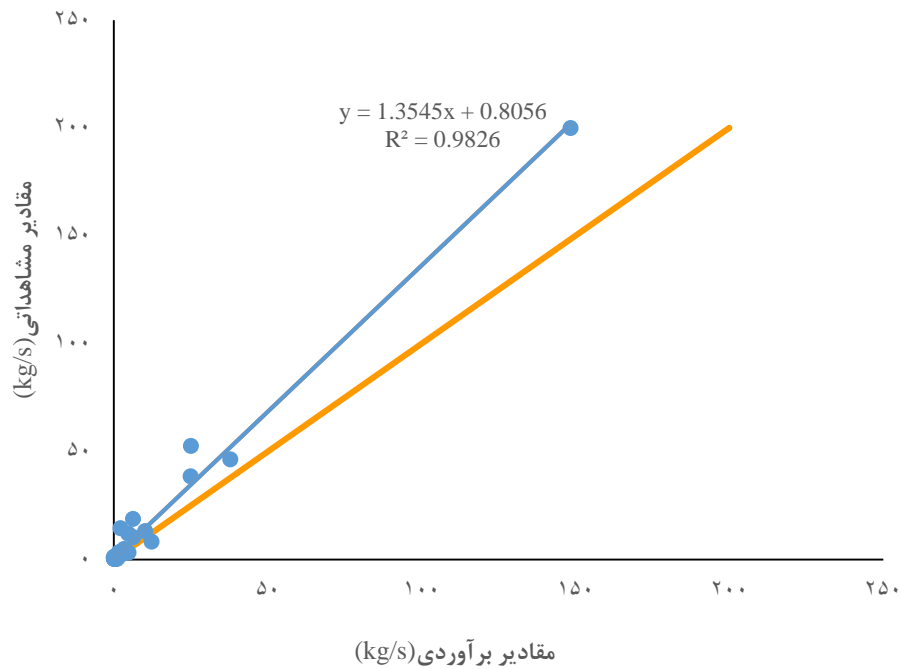
دبی‌های جریان تقریباً یکسان، بسیار متفاوت و دارای دامنه وسیعی است. به عبارت دیگر ارتباط و همبستگی معنی‌دار در خصوص بار رسوبی معلق با شرایط جریان و عوامل مؤثر در انتقال رسوب در دو ایستگاه مذکور در محدوده دبی جریان رسوبی کمتر از ۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه بسیار ناچیز است. بدیهی است در مباحث مهندسی رودخانه و تغییرات مورفولوژی، بار رسوبی معلق انتقالی در دبی‌های جریان پرآبی و سیلابی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ لذا با تفکیک داده‌های اندازه‌گیری برای مقادیر بار رسوبی بیش از ۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه در دو ایستگاه مورد اشاره، تعداد داده‌ها به ۵۱ داده کاهش یافت که با تحلیل مجدد آماری داده‌ها در نرم‌افزار آماری ضرایب پارامترهای بی‌بعد تغییر یافت و در نهایت رابطه (۶) پیشنهاد گردید.

$$\frac{Q_s}{\rho \omega D^2} = 4.7 \times 10^{-7} \times \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{7.3} \times \left(\frac{V}{\omega}\right)^{2.67} * \left(\frac{T}{D}\right)^{1.26} \times \left(\frac{\omega D}{v}\right)^{-4.95} \times \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{3.45} \quad (6)$$

با بررسی انجام شده میزان خطای متوسط داده‌های مشاهداتی با مقادیر برآوردی به ۲۵ درصد کاهش یافت و ۵۱ داده رسوبی با میانگین بار رسوبی معلق ۹/۹۵ کیلوگرم بر ثانیه دارای متوسط مربعات خطا^۱ برابر با ۷۹ و میانگین مربعات ریشه دوم خطا^۲ برابر با ۸/۹ محاسبه شد. با تحلیل آماری بر اساس خطای نسبی با توجه به گستردگی داده‌های مورد استفاده، نتایج برآوردی از روش تفکیک داده (۵۱ داده اندازه‌گیری شده) نتایج قابل‌قبول‌تری را در دو ایستگاه انتخاب شده نشان داد که شکل (۵) و جدول (۳) گویای این موضوع است. دلیل وجود خطای زیاد برای مواقع سیلابی را می‌توان به دلیل آمار کم داده‌ها برای مواقع سیلابی دانست که این امر نیز طبیعی می‌باشد.



شکل (۴): مقایسه مقادیر بار رسوبی معلق اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده از رابطه (۳)



شکل (۵): مقایسه مقادیر بر آوری رسوب معلق با اندازه‌گیری شده برای داده‌های رسوبی بالای ۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه

جدول (۲): مقایسه مقادیر برآوردی رابطه (۳) با اندازه‌گیری شده (۲۱ داده)

ردیف	بار رسوبی مشاهداتی	بار رسوبی برآوردی	خطا (درصد)
۱	۰/۵۷	۰/۳۶۳	-۳۶/۵۶
۲	۰/۲۲	۰/۲۰۵	-۷/۶۶
۳	۰/۶۶	۰/۳۷۹	-۵۷/۹۹
۴	۰/۴۱	۰/۴۹۰	۱۷/۸۴
۵	۱/۷۴	۱/۰۲۹	-۴۰/۹۵
۶	۲/۶۳	۲/۱۰۱	-۲۰/۲۰
۷	۱/۶۵	۰/۶۹۹	-۵۷/۸۵
۸	۰/۲	۰/۰۰۱	-۹۹/۴۴
۹	۰/۴۴	۰/۳۰۷	-۳۱/۳۵
۱۰	۰/۴۴	۰/۸۰۸	۸۱/۱۴
۱۱	-۰/۰۲۶	-۰/۰۰۱۱	-۹۹/۵
۱۲	-۰/۰۰۴	-۰/۰۰۱۳	-۹۹/۵
۱۳	۳/۴۱	۲/۵۴۰	-۲۵/۵۱
۱۴	۴/۸۹	۵/۱۶۰	۵/۴۸
۱۵	۱/۶۶	۲/۰۸۲	۲۵/۰۲
۱۶	-۰/۹۵۴	۰/۰۷۶	-۹۱/۹۳
۱۷	۰/۱۶	۰/۰۰۹	-۹۴/۶۵
۱۸	۰/۱۲	۰/۰۰۹	-۹۳/۰۶
۱۹	۰/۱۶	۰/۰۰۳	-۹۸/۰۱
۲۰	-۰/۰۴	-۰/۰۰۴	-۹۰/۷۵
۲۱	-۰/۰۳۹	-۰/۰۰۳	-۹۲/۵۰

جدول (۳): مقایسه مقادیر دبی رسوب معلق بر آوری با اندازه‌گیری شده با رابطه (۶)

ردیف	خطا	بار رسوبی برآوردی (کیلوگرم بر ثانیه)	بار رسوبی مشاهداتی (کیلوگرم بر ثانیه)
۱	-۱۶/۶	-/۵۷	۰/۶۶
۲	۵۲	۵۲/۷۵	۲۵/۰۲
۳	۳۵/۳	۰/۴	۰/۲۸
۴	۶۶/۶	۱۸/۸	۶/۲۳
۵	۶۱/۴	۱۲/۱۱	۴/۶۷
۶	۸۳/۹	-/۴۵	۰/۰۷
۷	۲۲/۹	۱۳/۲	۱۰/۱۹
۸	-۹/۷	-/۷۵	۰/۸۲
۹	۱۹/۶۸	-/۵۴	۰/۴۳
۱۰	۱۶/۷۵	-/۴۳	۰/۳۶
۱۱	۱۸/۶۵	۴۶/۴	۳۷/۸
۱۲	۵۲/۸	-/۸۶	۰/۴۱
۱۳	-۷/۱	۲/۵	۲/۷۰
۱۴	۲۵/۷۹	۲۰۰	۱۴۸/۴۲
۱۵	۸۴/۹	۱۴/۶۳	۲/۲۰
۱۶	۸۵/۴	-/۸۶	۰/۱۲
۱۷	۶۶	-/۳۴	۰/۱۱
۱۸	۷۹/۰۵	-/۶۲	۰/۱۳
۱۹	۵۰/۸۵	-/۵۷	۰/۲۸
۲۰	۶۸/۱	-/۶۶	۰/۲۱
۲۱	۹/۷۴	-/۴۲	۰/۳۸
۲۲	۳۵/۱۶	۲۴/۹۹	۳۸/۵۴
۲۳	-۶۱/۷۴	-/۶۰	۰/۳۷
۲۴	۳۸/۹۴	۶/۳۲	۱۰/۳۵
۲۵	-۳۵/۴۶	۴/۵۲	۳/۳۴
۲۶	۵۸/۲۱	-/۶۵	۱/۵۶
۲۸	۲۴/۹۳	-/۶۶	۰/۹۲

مشابه در فصول، سالها و ایستگاهها متفاوت است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که رابطه به دست آمده به وسیله شش متغیر هندسی، هیدرولیکی و رسوبی با به کارگیری رگرسیون غیرخطی دارای دقت مناسبی است. بطوری که متوسط خطای برآوردی بار رسوبی معلق با استفاده از رابطه نهایی در حدود ۲۵ درصد می باشد. در ضمن ضریب همبستگی این رابطه و ضریب تعیین آن به ترتیب ۹۱ و ۸۴ درصد می باشد؛ که بیانگر عملکرد مناسب رابطه مذکور در تخمین دبی بار رسوبی معلق است. با این حال به منظور توسعه و ارائه روابط جامع تر و همچنین بررسی و تأثیر پیچیدگی های مربوط به انتقال بار رسوبی معلق در رودخانه ها به ویژه در رودخانه های با مواد بستری درشت دانه، گسترش مطالعات با دخالت سایر پارامترهای هیدرولیکی - هیدرولوژیکی و مورفولوژی پیشنهاد می گردد.

نتیجه گیری

هدف تحقیق حاضر ارتباط دبی بار رسوبی معلق با متغیرهای بی بعد هیدرولیکی - هیدرولوژیکی و مورفولوژی است. برای این منظور از داده های اندازه گیری شده در رودخانه باراندوزچای طی دوره ۵ ساله استفاده گردید که در ادامه به شرح نتایج تحقیق حاضر پرداخته می شود. مقادیر بار رسوبی معلق برآوردی عموماً کمتر از مقادیر مشاهداتی بوده که با نتایج مطالعات انجام شده در سایر رودخانه ها همخوانی دارد. این موضوع می تواند ناشی از وجود تغییرات و پراکندگی داده های اندازه گیری شده در دبی های پایین بار رسوبی و تأثیر نسبی بار شسته در اندازه گیری مستقیم باشد، به طوری که تغییرات مقادیر بار رسوبی اندازه گیری شده برای یک دبی و شرایط هیدرولیکی

مراجع

1. Ismaeel, A.J., Al-Rekabi, W.S. and Abbas, S.A. 2021. Empirical formula development for predicting the average suspended load discharge in the downstream Al-Amarah barrage, Iraq. *Journal of Engineering Science and Technology, Special Issue on DMPCE2021, February (2021)* 1 – 9.
2. Asadi M., Fathzadeh A., and Taghizadeh Mehrjardi R. 2017. Optimization suspended load estimation models by using geo-morphometric parameters and attribute reduction technique. *Iran Water and Soil Research (Agricultural Sciences of Iran)*, 48(3): 669-678. <https://sid.ir/paper/504921/fa>. (In Persian).
3. Atalo N. 2016. Comparison of mathematical models and sediment gauge curve in estimation of suspended load of Nazlochai River in Urmia. MSc dissertation, Faculty of Natural Resources, Urmia University (In Persian).
4. Bazian H., and Yasi M. 2018. Evaluation of Sediment Transport Capacity in Rivers with Coarse-bed Material (Zab Transboundary Basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 11(6): 1100-1110 (In Persian).
5. Chitsaz V., Nazari Samani A., Soltani S., and Feiznia S. 2020. Modeling of suspended sediment and determination of factors affecting it in the great Karun and Karkheh watersheds. *Pasture and Watershed (Natural Resources of Iran)*. 73(2): 293-303. <https://sid.ir/paper/374835/fa>. (In Persian).
6. Danandeh Mehre., Oliaie A., and Ghorbani M.A. 2011. Suspended sediment load prediction based on river discharge and genetic programming method. *Watershed Management Researches Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*. 88: 44-54. <https://sid.ir/paper/200538/fa>. (In Persian).

7. Ebrahimi M., Asadi H., Sharifi A., and Ebrahimi A. 2020. Investigating temporal and spatial changes in particle size distribution of suspended sediments in the Psikhan River, Gilan Province. *Water and soil*, 33(2): 229-243. doi: 10.22067/jsw.v33i2.75427 (In Persian).
8. Emami H., Emami S., and Heydari S.H. 2019. Prediction Suspended Sediment Load of River Using Meta-heuristic Algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage*. 13(5): 1426-1438 https://idj.iaid.ir/article_100437.html (In Persian).
9. Hamzepouri R. 2005. Evaluation of sediment load in rivers with coarse-grained bed materials. MSc dissertation, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia (In Persian).
10. Hosseini M. 2022. Evaluation of the ratio of bed load to total sediment load in the representative sections of Iranian rivers. PhD Dissertation, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia (In Persian).
11. Hosseini M., Hemmati M., and Yasi M. 2023. Predicting river suspended load using artificial neural network and non-dominant genetic sorting algorithm. *Applied Soil Research*, 10(4): 45-60 (In Persian).
12. Kheirfam H., Kheirfam B., Azhdan Y., and Hossein S. 2018. Variability of bed and suspended load and bed to suspended load ratio in Qotour Chay River. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 410-420 (In Persian).
13. Khassaf S. I., and Hassan, A. A. 2014. Suspended sediment transport formula for the upstream of Al-Amarah barrage. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. 3(12):1129-1133.
14. Mohammadzadeh S., and Saeed Panah. 2015. Investigation of hydraulic methods for estimating suspended load in rivers, National Conference of Architecture, Civil Engineering and Modern Urban Development, Tabriz, <https://civilica.com/doc/314823> (In Persian).
15. Mosaedi A., Shahabi M., and Mohammadi Ostadkalaye A. 2006. Investigating the changes in the relationship between discharge and suspended sediment in Merawa hydrometric station (Atrak), the second national conference on watershed management and water and soil resources management, Kerman, <https://civilica.com/doc/107944> (In Persian)
16. Peyroyan Kazaroni S. 2022. Determining the appropriate equation to estimate the sediment yield of Qara Aghaj River - a case study of Band Bahman station. MSc dissertation, Islamic Azad University, Marvdasht branch (In Persian).
17. Rahgoshai M. 2013. Classification of Labroud river sediments in the inlet section and estimated amount of sediments entering Shahid Shahcheraghi Damghan Dam. MSc dissertation, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Shahrood Branch (In Persian).
18. Rastgar H., and Habibi M. 2012. Evaluation of five sediment estimation methods in Jegin river in Hormozgan province. *Watershed Engineering and Management*, 3(1):12-20. <https://sid.ir/paper/470066/fa>. (In Persian).
19. Shafa'i Bejestan M. 2016. Theoretical and practical hydraulic principles of sediment transfer. Ahvaz University Publishing House, Ahvaz (In Persian).
20. Shirdel Havar A. 2022. Estimation of river sediment load using hydraulic methods and artificial intelligence (case study of Zaringol river) MSc dissertation, Faculty of Water and

Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (In Persian).

21. Yasi M., Hamzepouri R., and Yasi A. 2013. Uncertainties in the evaluation of sediment transport rates in typical coarse-bed rivers in Iran. Journal of Water Sciences Research. 5.2:1-12 (In Persian).

Development of an Empirical Formula in Predicting the Suspended Sediment Load by Dimensional Analysis Method (Case Study: Barandoz River)

Mohammad Hemmati*¹, Rahim Hamzepouri², ImanAkbari³

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20959.1026

Abstract

Obtaining appropriate and accurate methods in predicting the sediment load of rivers is of particular importance due to its negative effects on water quality indicators, reducing the capacity of reservoirs and changing the morphology of rivers. Also, the suspended sediment load in rivers is usually determined by hydrological methods. The aim of the present research is to link the suspended sediment load to the hydraulic-hydrological-morphological parameters of the river. To achieve this goal, dimensional analysis method was used. The measured data from two hydrometric stations on the Barandoz River-Urmia Lake basin were used to extract non-linear relationships in predicting the suspended sediment load. The evaluation of the estimated values of the new relationship revealed that the final presented equation has a 25% error in estimating the suspended sediment load compared to measured data, which indicates the appropriate accuracy in estimating the sediment load in rivers.

Keywords: Suspended load, Dimensional analysis, Morphology, River engineering.

^{1*}- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering - Water Structures, Urmia University, Urmia, Iran.

Corresponding Author: m.hemmati@urmia.ac.ir

² - Ph.D. student of Water Sciences and Engineering - Water Structures, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

³ - Ph.D. student of Water Sciences and Engineering - Water Structures, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.