جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۱۲، پاییز ۱۳۹۳
صص. ۹۳-۸۳

برآورد میانگین دبی رسوب با مدل‌های ریاضی جهت تخمین رسوب به منظور بازسازی نواقص آماری (مطالعهٔ موردی: نکا)

پیام ابراهیمی* ـ دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری
کریم سلیمانی ـ استاد مرکز RS و GIS دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری

وصول: ۱۳۹۲/۱۰/۱۵ **پذیرش:** ۱۳۹۳/۰۴/۱۷

چکیده

داده‌های هیدرومتری و رسوب از اهمّیّت بالایی در پژوهش‌های مربوط به هیدرولوژی برخوردار است؛ امّا وجود نواقص آماری باعث کاهش دقّت و صحّت ارزیابی‌ها می‌گردد. ایستگاه هیدرومتری نکا در بخش سنجش رسوب از سال تأسیس تا دو سال اخیر (۱۳۴۸-۱۳۹۰) دارای ۸ سال نواقص آمار رسوب است. در این پژوهش با سه فرمول توفالتی، بگنولد و بروکس، معادلهٔ خطّی میانگین رسوب تعیین گردید. از میان این سه فرمول به ترتیب فرمول توفالتی، بگنولد و بروکس با ضریب هم‌بستگی ۰/۶۳، ۰/۴۹ و ۰/۳۸ و ضریب نش - ساتکلیف ۰/۷۵، ۰/۳۲ و ۰/۸۶. بهترین روش تخمین رسوب در رودخانهٔ نکا شناخته شد. بهترین فرمول، فرمول توفالتی با معادلهٔ $y = 2.4756x - 146.15$ و فرمول بگنولد با معادلهٔ $y = 1.9555x + 168.78$ و فرمول بروکس با معادلهٔ خطّی $y = 1.619x + 269.2$ به دست آمد. نتایج نشان داد اگرچه فرمول توفالتی از فاکتورهای مختلفی جهت تخمین استفاده می‌نماید و به نسبتِ روش‌های آماری پیچیده و مشکل‌تر است، امّا از لحاظ دقّت قابل توجّه است و علاوه بر روش‌های آماری متداول، جایگزین مناسبی در بازسازی نواقص آماری رسوب است.

کلیدواژه‌ها: آبلو، رسوب، توفالتی، معادلات بازسازی.

* نویسندهٔ مسئول: ۰۹۳۵۹۴۵۳۹۱۳ E-mail:P.Ebrahimi@sanru.ac.ir

مقدّمه

تخمین دقیق حجم رسوبات حمل شده به وسیلهٔ رودخانه‌ها در بسیاری از پروژه‌های مدیریت منابع آب دارای اهمّیّت فراوان است. استفاده از روش‌های کلاسیک به صورت ترسیمی از دقّت کافی برخوردار نیست (اسلمن[1]، ۲۰۰۰: ۲۲۹)؛ بنابراین روش‌های هوشمند می‌تواند به عنوان ابزاری توانمند در مدل‌سازی متغیّرهای هیدرولوژیکی به کار گرفته شود (دهقانی و وفاخواه، ۱۳۹۲: ۲۲۳). روش منحنی سنجهٔ رسوب و روش‌های مختلف دسته‌بندی داده‌ها توسّط پژوهشگران زیادی انجام شده است (تلوری، ۲۰۰۱: ۴۸؛ پاوانلی و بیگی[2]، ۲۰۰۴: ۵۳۸؛ صادقی، ۲۰۰۵: ۱۰۲؛ عرب‌خدری، ۲۰۰۵: ۵۳؛ پرهمت و دومیری گنجی، ۲۰۰۵: ۲۶۸؛ مساعدی و همکاران، ۲۰۰۵: ۳۳۶). از کسانی که برای اوّلین بار به ارائهٔ این فرمول‌ها پرداخته‌اند، می‌توان به اوبراین و رینداوب[3] (۱۹۳۴: ۸۷)؛ استراب[4] (۱۹۳۵: ۲۳۸)؛ شیلدز[5] (۱۹۳۶: ۱۲۲)؛ یالین[6] (۱۹۶۳: ۲۲۱)؛ کالینسکی[7] (۱۹۴۲: ۲) و چانگ و همکاران[8] (۱۹۶۵: ۱۴۹۸) اشاره کرد که معادله‌هایی را بر اساس تنش برشی بحرانی ذکر نموده‌اند؛ امّا در سال‌های بعدی بگنولد نظریهٔ خود را در ارتباط با قدرت جریان به صورت جدّی ارائه داد (بگنولد[9]، ۱۹۶۶: ۲۸۱). انیشتین از مفاهیم آماری و احتمالاتی برای برآورد بار بستر استفاده کرده و با استفاده از این نظریه، مدل‌های مشابهی در روابط رسوب ارائه داده است (انیشتین[10]، ۱۹۵۰: ۳۲۳). در سه رودخانهٔ ارمند، سولگان و بازفت با استفاده از فرمول چانگ – سایمونز – ریچاردسون، بگنولد و توفالتی و نیز روش AHP، وزن نهایی ناشی از مقایسات زوجی فرمول‌های مذکور در رودخانه‌ها تعیین شده است و در این بین فرمول چانگ – سایمونز - ریچاردسون به عنوان مناسب‌ترین فرمول مشخّص شد (صدائی و سلیمانی، ۱۳۹۲: ۲۳۷).

رابطهٔ رگرسیون خطّی یکی از مناسب‌ترین روابط بین رسوب معلّق تخمینی یک ایستگاه هیدرومتری و داده‌های اندازه‌گیری شدهٔ ایستگاه هیدرومتری است. نتایج استفاده از رابطهٔ رگرسیون خطّی در حوزهٔ آبریز قره‌سو و برآورد رسوب معلّق شبیه‌سازی شده نشان داد که رابطهٔ خطّی از هم‌بستگی بالا و معنی‌داری برخوردار است (فرجزاده و قره‌چورلو، ۱۳۹۰:۸۰). در پژوهشی دیگر بررسی کاربرد روش رگرسیون خطّی در برآورد داده‌های ناقص دبی سالانهٔ ایستگاه هیدرومتری و مقایسهٔ آن با سایر روش‌های متداول به نتایج قابل قبولی منجر شده است که رگرسیون خطّی ساده به عنوان روش برتر انتخاب شد و روش رگرسیون خطّی فازی در اولویّت دوم قرار گرفت (ساداتی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹: ۸۰). از این رو برای تخمین میزان رسوب از روش نسبت تحویل رسوب به صورت خطّی در حوزه‌های آبخیز خشک و روش روئل در حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک در ایران می‌توان استفاده نمود (افسری و قدوسی، ۱۳۹۰: ۱۱۰). در شمال آمریکا نیز با استفاده از دبی پیک رسوب و تغییر آن در ارتباط با دورهٔ بازگشت‌ها، نواقص آماری رسوب را تکمیل نمودند (ترامبلی و

1- Asselman
2- Pavanelli and Bigi
3- Obrien and Rindlaub
4- Straub
5- Shields
6- Yalin
7- Kalinske
8- Changet al.
9- Bagnold
10- Einstein

همکاران[1]، ۲۰۰۸: ۲۴۰). همچنین در رودخانه‌ای در انگلستان نیز تخمین مقادیر رسوب بـه صـورت خطّـی از دقّت بالایی برخوردار گردید (والینگ[2]، ۲۰۰۸: ۱۰). در رودخانه‌ای در کلمبیا مقادیر رسوب با رگرسیون خطّـی محاسبه شد و با هم‌بستگی ۷۵ تا ۷۸ درصد میزان رسوب مورد انتظار برآورد شد و نتایج نشان داد فرمول‌های تعیین دبی رسوب با دقّت نسبتاً خوبی قادر به مدل کردن میزان رسـوب اسـت (رسـترپو و همکـاران[3]، ۲۰۰۹: ۸۲). رگرسیون خطّی حاصل از رودخانه‌ای در آمریکا نیز توانست میزان رسوب حمل شـده را تعیـین نمایـد و ضریب هم‌بستگی ۷۶/۹ تا ۹۲/۷ درصد را در تخمین میـزان رسـوب ایجـاد کنـد (رومـن و همکـاران[4]، ۲۰۱۰: ۳۱۳۸).

با توجّه به اینکه رودخانهٔ نکا هرساله تحت تأثیر سیل با دورهٔ بازگشت‌های مختلـف قـرار مـی‌گیـرد و آورد رسوب بالایی دارد، نیاز به آمار دبـی و رسـوب بسـیار ملمـوس اسـت. از میـان معـادلات پیشـنهادی در سـایر پژوهش‌ها سه معادلهٔ توفالتی، بگنولد و بروکس در حوزه‌های آبخیز مشابه حـوزهٔ آبخیـز نکـا اسـتفاده شـد تـا نواقص آماری ایستگاه آبلو واقع در این حوضه برآورد گردد. ایستگاه هیدرومتری آبلو ۸ سال نـواقص آمـاری از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۹۰ دارد که در این پژوهش به صورت خطّی معادله‌سازی شده است.

مواد و روش‌ها

حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ نکا از حوزه‌های آبخیز دریای خـزر اسـت و در محـدودهٔ جغرافیـایی ˝۱۷ ˚۵۳ الـی ˝۴۴ ˚۵۴ طول شرقی و ˝۲۸ ˚۳۶ الی ˝۴۲ ˚۳۶ عرض شمالی واقع شده است. این حوضه از شمال به حوزهٔ آبخیـز قـره‌سـو و حوزه‌های کوچک خلیج گرگان، از غرب به حوزهٔ آبخیز تجن، از شرق به حوزهٔ آبخیز قره‌سو گرگان و از جنـوب به حوزهٔ آبخیز تجن و حوزه‌های آبخیز استان سمنان منتهـی مـی‌گـردد. مسـاحت ایـن حـوزه معـادل ۱۹۲۲ کیلومترمربع و محیط آن ۴۰۶ کیلومتر است. ایستگاه مورد مطالعه در این پژوهش ایسـتگاه هیـدرومتری آبلـو واقع در خروجی حوزهٔ آبخیز نکاست که مشخّصات آن در (جدول۱) آورده شده است.

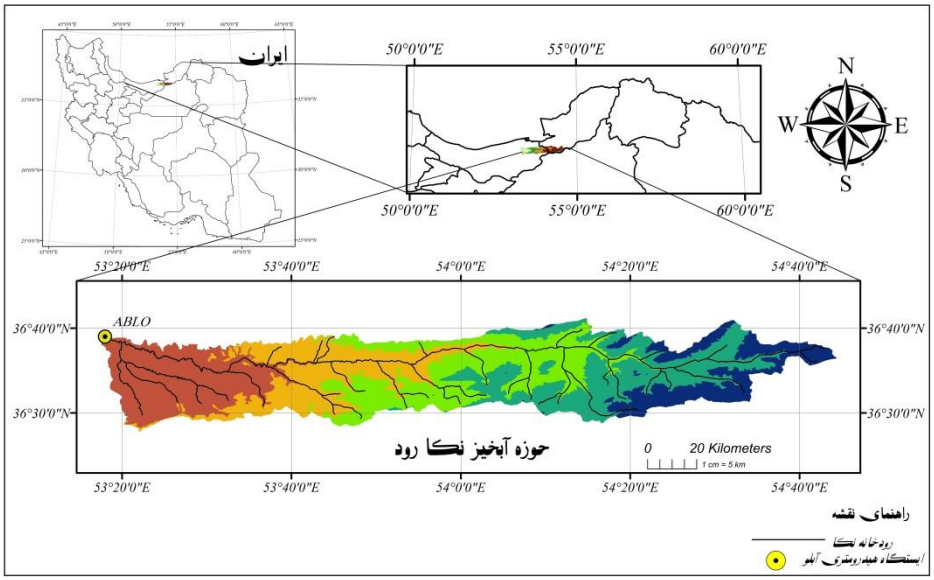
جدول ۱. مشخّصات ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه (آبلو) در حوزهٔ آبخیز نکا

نام ایستگاه	نام رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	مساحت (کیلومترمربع)
آبلو	نکا	۵۳° ۱۶′	۳۶° ۳۸′	۱۵	۱۹۰۵,۶

ارتفاع بلندترین نقطهٔ حوضه ۳۵۰۰ متر (ارتفاعات شاه کوه) و ارتفاع پست‌تـرین نقطـهٔ حوضـه در منطقـهٔ خروجی حدود ۵۰ متر و در ایستگاه آبلو ۱۵ متر و در محلّ اتّصال به دریای خزر (۲۰-) متر است. حدود ۶۱٪ حوضه در محدودهٔ استان مازندران و ۳۹٪ آن در محدودهٔ استان گلستان واقع شده است. حـوزهٔ آبخیـز نکـا از نظر تقسیمات ساختمانی ایران جزیی از ناحیهٔ گرگان و دشت آن محسوب می‌شود کـه بـه علّـت ویژگـی‌هـای خاصّ خود از سایر پهنه‌های زمین‌شناسی ایران، مانند ایران‌مرکزی و زاگـرس متفـاوت اسـت. پهنـهٔ گرگـان و دشت، بین دو گسل اصلی البرز و گسل مازندران - خزر قـرار گرفتـه کـه ردیـف نسـبتاً کـاملی از سـنگ‌هـای رسوبی، آذرین و دگرگونی به ضخامت حدود ۲,۵ کیلومتر است و در طی دوران‌های مختلف زمین‌شناسـی بـه

1- Tramblay et al.
2- Walling
3- Restrepo et al.
4- Roman et al.

دفعات تحت تأثیر حرکات تکتونیک قرار گرفته و منجر به وجود آمدن ریخت‌شناسی کنونی رشته‌کوه‌های این منطقه گردیده است. امتداد و روند عمومی ساختمان‌های منطقه عمدتاً شمال‌غرب - جنوب‌شرق است (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۶۸).



شکل ۱. محدودهٔ مورد مطالعه

داده‌های ورودی در معادلات بگنولد، توفالتی و بروکس به طور کلّی شامل ویژگی‌های رسوب، ویژگی‌های سیال، شرایط جریان و پارامترهای مستقل و هرکدام از آن‌ها شامل چندین متغیّر است که برخی از این پارامترها در (جدول ۲) ارائه شده است.

جدول ۲. خلاصه‌ای از پارامترها و متغیّرهای ورودی روابط انتخاب شدهٔ برآورد رسوب

معادلهٔ انتقال رسوب	ویژگی‌های رسوب	ویژگی‌های سیّال	شرایط جریان	پارامتر مستقل
بروکس	Y_S	v-Y	B-D	Q_b-Q_s
بگنولد	D_i-P_i-Y_s-d_a	v-Y	B-D-S-V	Q_b-Q_s
توفالتی	D_i-P_i-Y_s-d_{65}	v-Y	B-D-S-V	Q_b-Q_s

در (جدول ۲)، Y_S وزن مخصوص ذرّات رسوبی، Y وزن مخصوص آب، v لزجت سینماتیک آب، V سرعت آب و S شیب سطح آب، D عرض سطح آب، Q_b دبی بار بستر، Q_s دبی بار معلّق، d_{65} قطر متوسّط ذرّات کف بستر است و قطری از ذرّات که ۶۵ درصد ذرّات از آن کوچک‌تر است. d_i قطری از بستر که I درصد ذرّات کوچک‌تر از آن است و P_i درصد ذرّات ریز می‌باشد. هرکدام از پارامترهای جدول ۲ در فرمول توفالتی، بگنولد و بروکس شامل چندین متغیّر است که بعضی از آن‌ها در هر سه فرمول مشترک است. متغیّرهایی که فرمول‌های توفالتی، بروکس و بگنولد در آن مشترک هستند در (جدول ۳) نشان داده شده است که تعداد متغیّرهای ورودی به فرمول بگنولد بیشتر از بروکس و برابر با توفالتی است. از طرفی با توجّه به تعیین قطر ۶۵ درصدی ذرّات (d_{65}) در فرمول توفالتی هزینهٔ حلّ معادلات بیشتری نسبت به فرمول بروکس دارد و فرمول بروکس به دلیل نمونه‌برداری مورد نیاز از بستر رودخانه و بررسی d_a در آزمایشگاه خاک هزینهٔ حلّ معادلات بیشتری نسبت به بگنولد را داراست.

جدول ۳. متغیّرهای مشترک بین سه فرمول توفالتی، بروکس، بگنولد

متغیّرها											
معادلات	سرعت جریان	تنش برشی	شیب	درجهٔ حرارت	شعاع هیدرولیکی	وزن مخصوص رسوب	وزن مخصوص آب	ویسکوزیته	عرض بستر	عمق جریان	غلظت رسوب
بروکس	-	-	-	-	-	-	-	*	*	-	*
بگنولد	*	*	*	-	*	*	*	*	*	-	*
توفالتی	*	-	*	*	*	*	*	-	*	*	*

*: در نظر گرفتن متغیّر مورد نظر در فرمول

روش توفالتی

فرمول توفالتی برای محاسبهٔ بار معلّق از انتگراسیون عمقی حاصل‌ضرب پروفیل غلظت و پروفیل سرعت استفاده می‌نماید. پروفیل سرعت کل عمق جریان، بر اساس قانون انرژی به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطهٔ (۱)

$$\upsilon = 1+\eta_{\nu} \quad \nu \frac{\Psi}{P} \quad \eta\nu$$

U سرعت جریان در عمق، Y نسبت به کف کانال، V سرعت متوسّط جریان در رودخانه و η_v نمایی است که از رابطهٔ تجربی زیر به دست می‌آید:

رابطهٔ (۲)

$$\eta_V = 0.1198\times 0.00048T_F$$

پارامتر T_F درجهٔ حرارت برحسب فارنهایت است. با استفاده از معادلهٔ اوّل توفالتی و اندازه‌گیری سرعت جریان در ارتفاع متوسّط و نیز سرعت متوسّط جریان رودخانه با استفاده از فرمول تعیین درجهٔ حرارت در معادلات توفالتی، سرعت و سپس غلظت مشخّص شد. با استفاده از نمودارهای این روش اقدام به تکمیل سایر متغیّرها شد و در نهایت در دسته‌بندی‌های مشخّص دبی و رسوب به دست آمده برای بررسی میزان خطا، هم‌بستگی با نتایج ایستگاه شاهد بررسی گردید.

روش بگنولد

بگنولد (۱۹۶۶) بر اساس تئوری انرژی تبادلی، میزان انتقال رسوب را به انرژی پتانسیل مصرفی و انرژی توربلانس تولیدی توسّط جریان ربط داد و میزان انتقال را برحسب قدرت جریان محاسبه نمود و نیز بیان کرد که قدرت جریان، انرژی جریان آب را تأمین می‌کند که این انرژی در انتقال ذرّات بار معلّق و بار بستر مصرف می‌شود. این رابطه، رابطه‌ای بدون بعد است و می‌توان در جریان‌های باز کاملاً آشفته با دانه‌بندی متوسّط ۰٫۰۱۵ میلی‌متر استفاده کرد (بگنولد[1]، ۱۹۶۶: ۲۸۱). با این توصیف می‌توان میزان انتقال رسوب را با میزان کار انجام شده بر روی ذرّات رسوب معادل دانست و از این رو میزان کار بار معلّق را چنین بیان نمود:

رابطهٔ (۳)

$$W = (S_g \quad 1)q_{sm}(\omega_s / \overline{u}_s)$$

W میزان کار بار معلّق و u_s سرعت متوسّط انتقال موادّ جامد در داخل مخلوط برحسب متر بر ثانیه است.

1- Bagnold

مقدار کار انجام شده برای انتقال بار معلّق از رابطهٔ ۴ به دست می‌آید:

رابطهٔ (۴)

$$E = \pi\bar{u}(1 \quad e_b)$$

E بخشی از کلّ انرژی است که صرف انتقال بار معلّق شده و در رودخانه تعیین می‌شود. Eb راندمان انتقال بار بستر و τ تنش برشی برحسب نیوتن بر متر مکعّب است و با استفاده از انرژی صرف شده و تنش برشی این راندمان تعیین می‌شود و سپس سرعت متوسّط انتقال ذرّات بر پایهٔ تنش برشی ایجاد شده محاسبه خواهد شد. روش بگنولد بسیار ساده و مختصر است و با تکیه بر تئوری انرژی استخراج شده است و برخلاف روش‌های دیگر مستقل از غلظت مرجع، میزان انتقال رسوبات معلّق را محاسبه می‌کند.

روش بروکس

بروکس ۱۹۶۳ با فرض اینکه توزیع نیمه‌لگاریتمی سرعت در این بحث قابل کاربرد است، رابطه‌ای جهت تعیین نرخ انتقال بار معلّق ارائه نمود (وزارت نیرو، ۱۳۹۱: ۱۱۱). رابطهٔ بروکس از لحاظ فرضیّات پایه و شکلی تا حدّی شبیه به رابطهٔ انیشتین است:

رابطهٔ (۵)

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

q_s بار معلّق در واحد عرض (N/s-m)، q بده جریان در واحد عرض (m^3/s-m)، F تابع انتقال که برحسب $(K\frac{V}{U*})Z_1$ پارامتر و بر اساس نمودار بروکس استخراج می‌شود و c_{md} غلظت وزنی در فاصلهٔ D۰٫۵ از بستر است. بار معلّق در رودخانهٔ نکا و دبی جریان در واحد عرض متوسّط رودخانه تعیین شد و غلظت وزنی در فاصلهٔ D0.5 محاسبه و سپس بر اساس نمودارهای معادله بروکس مقادیر در دبی‌های کلاسه فصلی، سالانه، کم‌آبی و پرآبی استخراج و همگی وارد جداول هم‌بستگی و میزان خطا شدند.

نتایج و بحث

با توجّه به پارامترهای ذکر شده در بحث مواد و روش، چهار پارامتر مؤثّر در (جدول ۴) آمده است. نتایج این جدول بیان می‌دارد فرمول توفالتی در محدودهٔ ۲ ≥ R≥۰/۵ بیشترین مقدار را دارد و با توجّه به R متوسّط کمتری که دارد می‌توان آن رابه عنوان فرمول برتر انتخاب نمود.

جدول ۴. بخشی از پارامترهای مقادیر غلظت رسوب و عمق

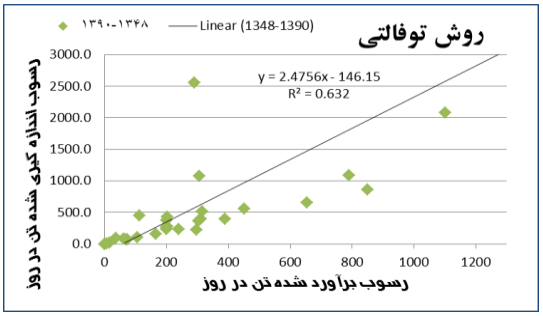
فرمول	R متوسّط	۲≥۰/۵ ≥ R	MNE%	AGD
بگنولد	۹/۵	۱۳/۱۲	۳۹/۱۷	۱/۸
توفالتی	۵/۵	۱۷/۲۲	۵۶/۵۴	۱/۲
بروکس	۱۷/۵	۷/۸	۱۹/۶۷	۲/۱

جهت مقایسهٔ نتایج به دست آمده از کاربرد سه فرمول و مقادیر دبی رسوب معلّق، دبی رسوب میانگین ۳۴ سال با استفاده از نمایه‌های آماری در مرحلهٔ آزمون سنجهٔ رسوب در ۵ بخش سالانه، فصلی، دبی کلاسه، دورهٔ کم‌آبی و پرآبی و وضعیّت هیدروگراف در (جدول ۵) تعیین شد. در این بخش محدودهٔ تغییرات دبی از ۶۷۱٫۶۶ تن در سال تا ۸۶۵٫۸۸ تن در سال مشخّص گردید که کمترین آن از طریق برآورد سالانهٔ فرمول توفالتی و بیشترین آن از طریق هیدروگراف به دست آمد.

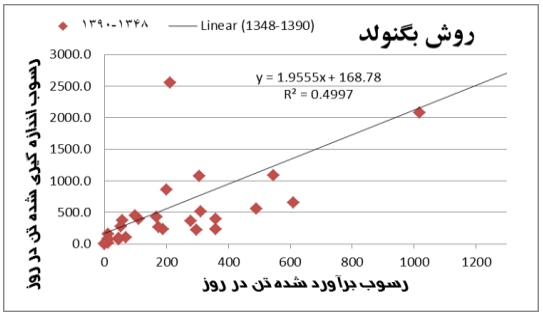
جدول ۵. نمایه‌های آماری روش توفالتی و تأثیر برآورد آن بر سنجهٔ رسوب

وضعیّت رسوب	R^2	MAE	RMSE	CNS	دبی رسوب (تن در سال)
سالانه	۰/۳۷	۴/۹۳	۱۸۷۰۱,۳۰	۰/۰۴	۶۷۱,۶۶
فصلی	۰/۵۹	۷/۸۷	۱۹۹۱۲,۳۴	۰/۰۸	۷۹۴,۴۵
دبی کلاسه	۰/۴۸	۴/۳۹	۱۶۶۱۵,۱۴	۰/۰۹	۸۶۵,۸۸
دورهٔ پرآب-کم آب	۰/۳۲	۴/۶۴	۱۶۷۴۹,۴۵	۰/۰۹	۸۰۱,۷۴
وضعیّت هیدروگراف	۰/۵۱	۴/۳۲	۱۷۷۵۶,۳۲	۰/۰۲۷	۶۸۷,۴۱

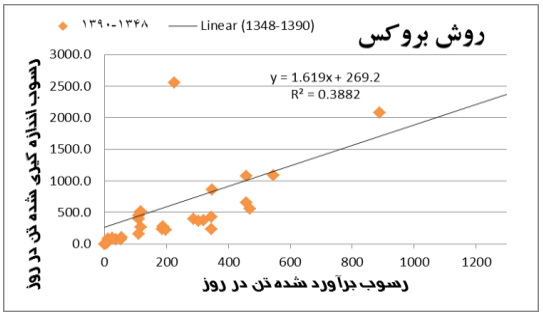
با حلّ روابط و برآورد رسوب معلّق برای رودخانهٔ نکا، هر سه فرمول شد و شکل‌های ۲ تا ۴ مشخّص نمود بازسازی به روش توفالتی از ضریب هم‌بستگی بالاتری برخوردار است.



شکل ۲. مقایسهٔ دبی رسوب برآورد شده به روش توفالتی و دبی رسوب اندازه‌گیری شده در رودخانهٔ نکا



شکل ۳. مقایسهٔ دبی رسوب برآورد شده به روش بگنولد و دبی رسوب اندازه‌گیری شده در رودخانهٔ نکا



شکل ۴. مقایسهٔ دبی رسوب برآورد شده به روش بروکس و دبی رسوب اندازه‌گیری شده در رودخانهٔ نکا

ضریب هم‌بستگی و ضریب نش - ستکلیف هر یک از فرمول‌ها در شبیه‌سازی و تخمین میزان رسوب در (جدول ۶) آورده شده است. این جدول بیان می‌کند با توجّه به نتایج به دست آمده، روابط مذکور، هر یک با ضریب هم‌بستگی مشخّصی با ۳۴ سال دادهٔ ایستگاه هیدرومتری آبلو قادر به ایجاد رابطهٔ خطّی جهت بازسازی

نواقص آماری است.

جدول ۶. ضرایب آماری روابط بین دبی رسوب اندازه‌گیری شده و برآورد معادلات بروکس، بگنولد و توفالتی

	معادلات	R^2	NS
رودخانهٔ نکا	بروکس	۰/۳۸	۰/۸۶
	بگنولد	۰/۴۹	۰/۳۲
	توفالتی	۰/۶۳	۰/۷۵

نتایج پژوهش نشان داد فرمول توفالتی با ضریب هم‌بستگی ۰/۶۳و فرمول بگنولد با ضریب هم‌بستگی ۰/۴۹ و فرمول بروکس با ضریب هم‌بستگی ۰/۳۸ به ترتیب بیشترین مطابقت را با داده‌های مشاهده‌ای ۳۴ سال از ۴۲ سال آمار ایستگاه هیدرومتری آبلو دارد. اگر هم‌بستگی بزرگ‌تر از ۰/۳باشد، مقدار معناداری کوچک‌تر از سطح خطای ۰/۰۵ خواهد بود که در این صورت با توجّه به «جدول ۷» در بازه هم‌بستگی زیاد قرار می‌گیرد.

جدول ۷. تفسیر ضریب هم‌بستگی

تفسیر	ضریب هم‌بستگی
خیلی اندک و قابل چشم‌پوشی	۰/۰ – ۰/۱
اندک	۰/۱ – ۰/۳
متوسّط	۰/۳ – ۰/۵
زیاد	۰/۵ – ۱/۰

منبع: (حبیبی، ۱۳۹۲: ۸۳).

از میان فرمول‌های خطّی ارائه شده در این پژوهش، فرمول توفالتی با معادلهٔ $y = 2.4756x - 146.15$ و فرمول بگنولد با معادلهٔ $y = 1.9555x + 168.78$ و فرمول بروکس با معادلهٔ خطّی $y = 1.619x + 269.2$ برای بازسازی ۸ سال نواقص آماری این ایستگاه تعیین گردید. فرمول توفالتی با معادلهٔ خطّی ارائه شده به عنوان مناسب‌ترین فرمول بازسازی نواقص آماری اهداف این تحقیق را دنبال می‌نماید. نتایج این پژوهش نتایجی نزدیک به تحقیقات رودخانهٔ چهل‌چای استان گلستان و رودخانه‌های خوزستان دارد (قمشی و ترابی‌پوده، ۱۳۸۱: ۱۳؛ حدادچی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۴۹). ایشان در تحقیقات خود اقدام به رسم نسبت بار رسوبی در برابر تعداد داده‌ها برای ایستگاه‌های مورد نظر نمودند و مشخّص کردند هرچه نقاط رسم شده به خط نزدیک‌تر باشند، داده‌ها پراکنش مناسب‌تری داشته و بازسازی نواقص آماری به درستی صورت گرفته است. پراکنش بار رسوب کف در ارتباط با میانگین اندازهٔ ذرّات ۰/۷۳ در تحقیقات قمشی و ترابی‌پوده و ۰/۷۲ در تحقیقات حدادچی و همکارانش به دلیل قرارگیری ذرّات بار کف در بین نسبت ناجوری محدودتر است؛ این پژوهش نیز با برازش و تعیین میزان هم‌بستگی این فرمول با داده‌های مشاهده‌ای میزان دقّت فرمول‌ها را مشخّص نمود و فرمول توفالتی را با میزان ۰/۶۳ به عنوان بهترین فرمول در رودخانهٔ نکا ارزیابی نموده است. از دیگر نتایجی که پژوهش حاضر را هم‌سو با بخش شمالی حوزهٔ کارون می‌نماید وضعیّت مشابه فرمول بگنولد در کارایی نسبتاً پایین نسبت به توفالتی است و به عبارتی دیگر بار رسوبی را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری برآورد نموده است (صدائی و سلیمانی، ۱۳۹۲: ۲۳۷)؛ امّا به دلیل نزدیک بودن ضریب هم‌بستگی این فرمول به خط با ضریب هم‌بستگی ۰/۳۴، ۰/۵۳ و ۰/۴۳ در سه رودخانهٔ الحاقی به کارون، می‌توان ضریب هم‌بستگی ۰/۴۹ را با

اعمال ضریب اصلاحی با توجّه بـه نتـایج قمشـی و ترابـی‌پـوده در بازسـازی نـواقص آمـاری رسـوب ایسـتگاه هیدرومتری آبلو نیز استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

در میان سال‌های آماری ایستگاه هیدرومتری نکا (آبلو)، سال ۱۳۸۳ به دلیل سیل بالا و دادهٔ تاریخی که ایجاد نمود، میزان رسوب ۳۶۸۲ تن رسوب را به همراه داشت که این میـزان رسـوب در بحـث ضـریب هـم‌بسـتگی فرمول را به شدّت تحت تأثیر قرار می‌داد؛ به همین دلیل با استفاده از روش آماری نرمـال‌سـازی داده‌هـا ایـن عدد نرمال‌سازی شد تا ضریب هم‌بستگی به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک‌تـر گـردد. اگرچـه دقّـت فرمـول توفالتی قابل قبول است، امّا به دلیل فاکتورهای مختلف و فرمول‌های متعدّد، بازسـازی نـواقص آمـاری رسـوب کاری بس دشوار است و باید بررسی کرد که بازسازی نواقص آماری تا چـه حـد از اهمّیّـت قـرار دارد و میـزان صرف هزینه و زمان در مقایسه با روش‌های آماری متداول مقایسه گردد. برآورد رسوب و تکمیل نواقص آمـاری مختصّ حوزه‌های آبخیزی است که میزان نواقص آماری آن‌ها طول مدّت بالاتری را نسبت به حوزهٔ آبخیـز نکـا دارد (رسترپو، ۲۰۰۹: ۷۹)؛ با وجود این برای اوّلین بار در حوزه‌های آبخیز شمال کشور، نواقص آماری رسـوب با فرمول‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفت که لازمهٔ آن نواقص آماری به نسبت کمتر است و میـزان خطـای هریک از فرمول‌ها به‌روشنی و با دقّت بالاتری مشخّص می‌گردد. دقّت این فرمول‌ها در کشوری دیگـر و مشـابه آب‌وهوای قسمت مرطوب و معتدل ایران انجام شده و نتایجی نظیر تحقیق حاضر به دست آمده اسـت (یانـگ، ۲۰۰۹: ۲۶۸). این پژوهش به منظور افزایش دقّت فرمول‌های یاد شده، پیشنهاد می‌کند تا فرمول‌های دیگـری نظیر انیشیتن، چانگ – سایمنز - ریچاردسون نیز افزوده شـود (یانـگ و همکـاران، ۱۹۶۵: ۱۴۹۸). همچنـین نتایج همراه با روش‌های آماری متداول توأماً مورد بررسی قرار گیرد تا دقّت و صحّت بازسازی نواقص آماری در بخش رسوب را بیشتر شاهد باشیم؛ از این رو انتظار می‌رود با ارائهٔ معادلهٔ مناسـب بـرای هـر حـوزهٔ آبخیـز در بخش رسوب، نواقص آماری سایر ایستگاه‌ها را نیز بازسازی نمود.

منابع

افسری، روح‌اله و جمال قدوسـی، ۱۳۹۰، **ارزیابی روش‌های مختلف تخمین نسبت تحویل رسوب (SDR) تحـت شرایط آب‌وهوائی مختلف مطالعهٔ موردی: حوضه‌های آبخیز استان مرکزی**، فصلنامهٔ جغرافیای طبیعـی، ۴ (۱۲)، ۱۱۸-۱۰۷.

ابراهیمی، پیام؛ کریم سلیمانی و کاکا شـاهدی، ۱۳۹۲، **بررسی تغییر کاربری اراضـی و نقـش آن بـر پهنـه‌هـای سیلابی در محیط RS و GIS، مطالعهٔ موردی: نکارود**، نشریهٔ مهندسی و مدیریت آبخیز، ۵ (۲)، ۷۳-۶۷.

حبیبی، آرش، ۱۳۹۲، **آموزش کاربردی SPSS**، چاپ سوم، نشر پایگاه اینترنتی پارس مدیر، چالوس.

حدادچی، آرمان؛ محمدحسین امید و امیراحمد دهقـانی، ۱۳۹۰، **ارزیابی معادلات تجربی برآورد دبی بار بستر در رودخانه کوهستانی با بستر شنی (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ چهـل‌چـای در اسـتان گلسـتان)**، مجلّـهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸ (۳)، ۱۶۵-۱۴۹.

دهقانی، نوید و مهدی وفاخواه، ۱۳۹۲، **مقایسهٔ روش‌های تخمین رسوب معلّق روزانه بـا اسـتفاده از روش‌هـای منحنی سنجه رسوب و شبکهٔ عصبی (مطالعهٔ مـوردی: ایسـتگاه قزاقلـی، اسـتان گلسـتان)**، مجلّـهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰ (۲)، ۲۳۰-۲۲۱.

ساداتی‌نژاد، جواد؛ رحیم نقدی و محمد شایان‌نـژاد، ۱۳۸۹، **کاربرد روش رگرسیون خطّی فازی در برآورد داده‌های ناقص دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری و مقایسهٔ آن با سایر روش‌هـای متـداول**، مجلّـهٔ پـژوهش‌هـای حفاظت آب و خاک، ۱۷ (۴)، ۸۶-۶۷.

صدائی، نازیلا و کریم سلیمانی، ۱۳۹۲، **اولویّت‌بندی سه فرمول چانـگ – سـایمونز - ریچاردسـون، بگنولـد و توفالتی در سه رودخانه با استفاده از روش AHP**، نشریهٔ دانش آب و خاک، ۲۳ (۳)، ۲۴۹-۲۳۷.

فرجزاده، منوچهر و مرتضی قره‌چورلـو، ۱۳۹۰، **تحلیل مکانی و زمانی رسوب معلّق در حوزه آبریز قره‌سـو**. مجلّـهٔ پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۳ (۱)، ۸۴-۶۱.

قمشی، مهدی و حسن ترابی‌پوده، ۱۳۸۱، **ارزیـابی کـاربرد معادلـه‌های بـرآورد بـار رسـوبی در رودخانـه‌های خوزستان**، مجلّهٔ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۶ (۱)، ۲۹-۱۳.

وزارت نیرو، ۱۳۹۱، **راهنمای محاسبهٔ بار رسوب معلّق و بستر رودخانه**، نشـریهٔ معاونـت نظـارت راهبـردی، ۵۹۰، ۱۷۳-۱.

Arabkhedri, M., 2005, **Investigation of Suspended Load in Iran's Watershed Basin**, Iranian Journal of Water Resource, 1 (2), 51-60.

Asselman, N. E. M., 2000, **Fitting and interpretation of sediment rating curves**, Journal of Hydrol, 23 (4), 228-248.

Bagnold, R. A., 1966, **An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics**, Journal of USGS, 422, 280-283.

Chang, F. M., Simons, D. B and Richardson, E. V., 1965, **Total Bed-material Discharge in Alluvial Channels**, USGS Water Supply Paper, 1, 1498-1508.

Einstein, H. A., 1950, **The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channels Technical Bulletin, U.S Dept of Agric Soil Conservation Service, Washington, D.C,** 1026, 249-538.

Kalinske, A.A, 1942, **Criteria for Determining Sand-transport by Surface Creep and Solution**. Maxwell Stanley Hydraulics Laboratory, 23, 2-3.

Mosaedi, A., Shahabi, M and MohammadiOstadkelaye, A., 2005, **Variation of Suspended Sediment Load Formulas in Marave(Atrak) Hydrometric Station**, In Proceeding of 2th National Conference on Watershed and Water & Soil Resources Management, Kerman, Iran, 333-340.

Obrien, L and Rindlaub, M. P., 1934, **The Transport of Bed Load by Streams**, Trans Am Geophy Science, 2, 87-119.

Pavanelli, D and Bigi, A., 2004, **Suspended Sediment Concentration for Three Apennine Monitored Basins, Particle Size Distribution and Physical Parameters**, Proceeding of Agro Environment Congress, Venice, Italy, 537-544.

Porhemat, J. M and DomeriGanji, M., 2005, A**nalysis of Sediment Load Relations in Hendijan-Jarahi Hydrometric Stations**, Proceeding of 3rd National Conference on Erosion & Sediment, ShahidChamran University, Ahvaz, Iran, 265-272.

Restrepo, Juan D., Lopez, Sergio A and Restrepo, Juan C., 2009, **The Effects of Geomorphic Controls on Sediment Yield in the Andean Rivers of Colommbia**, Latin American Journal of Sedimontology and Basin Analusis, 16 (2), 79-92.

Roman, David C.,Vogel, Richard M and Schwarz, Gregory E., 2010, **Multivariate Models of Watershed Suspended Sediment Loads for the Eastern United States**. Urban Water Resources Research Council - 7th Urban Watershed Management Symposium, 3133-3144.

Sadeghi, H., 2005, **Development of Sediment Rating Curve Equations for Rising and Falling Limbs of Hydrograph Using Regression Models. Iran**. Journal of Water Res, 1 (1), 101-103.

Shields, A., 1936, **Anwendung Der Aehnlichkeits Mechanic Undderturbulens for Schung Auf Die Geschiebebewegung**, Mitteilungen der Pruessischenver Such Sanstalt Fur Wasser, 3rd. Schiffsbau, Berlin, 26, 122-134.

Straub, L.G., 1935, **Missouri River Report**. House Document 238, 73rd Congress, 2nd session, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 25, 238-239.

Telvari, A., 2001, **The Relation of Suspended Sediment with Some of the Watershed Characteristics in Dez and Karkheh in Lorestan Province**. Journal of Res Construc, 15 (56), 47-56.

Tramblay, Y., St-Hilaire, A and Ouarda, B. M. J., 2008, **Frequency Analysis of Maximum Annual Suspended Sediment Concentrations in North America**, Hydrological Sciences Journal, 53, 236-252.

Walling, D. E., 2008, **The Changing Sediment Loads of the World's Rivers**, Land Reclamation, 39, 3-20.

Yalin, M. S., 1963, **An Expression for Bed Load Transportation**, Journal Hydraulic Division, ASCE, 89, 221–250.

Yang, C. T., Marsooli, R, and Aalami, M. T, 2009, **Evaluation of Total Load Sediment Transport Formulas Using ANN**, International journal of sediment research, 24 (3), 268-274.