# ارزیابی معادلات هیدرولیکی بار بستر در رودخانه ناورود، استان گیلان

نوید دهقانی و مهدی وفاخواه[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۳)

## چکیده

مسئله رسوب یکی از مسائل و مشکلات مربوط به بهره‌برداری از منابع آب می‌باشد. برای تخمین بار بستر روابط متعددی ارایه شده‌اند. در این تحقیق به‌منظور گزینش مناسب‌ترین روش برآورد بار بستر در رودخانه ناورود در ایستگاه هیدرومتری خرجگیل از ۱۱ روش پر کاربرد شامل روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی از قبیل انیشتین، توفالتی، میر پیتر مولر، ون‌راین، ون‌راین اصلاح شده، یالین، بگنولد، فرایلینک، حبیبی و سیوا کومار و ساماگا برای محاسبه باربستر استفاده گردید نتایج نشان داد که روش حبیبی و سیواکومار با میانگین محاسباتی به مشاهده‌ای ۱/۳۵، انحراف معیار محاسباتی به مشاهده‌ای۱/۹۶، ریشه میانگین مربعات خطا ۱/۶۳ و هم‌چنین ارزیابی براساس نسبت ناجوری که نسبت نرخ حمل پیش بینی شده به اندازه‌گیری شده است با ۳۳/۸۲ درصد در محدوده تخمین۰/۵ تا ۲ در مقایسه با روش‌های دیگر روش مناسب‌تر شناخته شد.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب، بار بستر، نسبت ناجوری، روش‌های هیدرولیکی بار بستر

۱.گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vafakhah@modares.ac.ir



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]

## مقدمه

در قرن اخیر افزایش جمعیت و بالا رفتن سطح زندگی، روز به روز نیاز به آب برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی را در سرتا سر جهان به‌طور بی‌سابقه‌ای گسترش داده و مجامع بین‌المللی چشم‌انداز مبهمی را در ارتباط با کمبود آب برای آینده بشریت پیش‌بینی می‌نمایند. احداث سدهای مخزنی به‌منظور کنترل سیلاب، تامین آب کشاورزی، تولید انرژی، تهیه آب شرب و صنعت، استفاده از رودخانه‌ها به‌منظور جلوگیری از طغیان و اجتناب از تغییر مسیر آنها، تلاش‌های است که بشر از قرون اخیر به آن پرداخته است. متأسفانه به دلیل شرایط آب و هوائی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و استفاده غیراصولی از اراضی حوزه‌های آبخیز، رودخانه‌های کشور ما در مقایسه با رودخانه‌های جهان میزان رسوب بالاتری را حمل می‌کنند. اکثر پروژه‌ها به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم با منابع آب و در نتیجه با رودخانه‌ها در ارتباط می‌باشند و لذا علم مهندسی رودخانه برای پاسخ به مشکلات بشر روز به روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. مقدار تولید رسوبات بستگی به عوامل متعددی از قبیل؛ سطح حوضه آبخیز، پوشش گیاهی، زمین شناسی ناحیه و تشکیلات آن، توزیع زمانی و مکانی بارندگی و شدت و مدت آن دارد. تجربیات علمی و عملی نشان می‌دهد که بار معلق قسمت مهمی از رسوبات رودخانه را تشکیل می‌دهد که اندازه‌گیری آن آسان است، ولی شناخت خواص کمی و کیفی باربستر به‌علت رسوب در مخازن سدها و یا ایجاد خوردگی و فرسایش در توربین‌ها و پمپ‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حالی که مطالعات بسیار کمی روی بار بستر صورت گرفته و اندازه‌گیری مستقیم بار بستر نیز بسیار مشکل و زمان‌بر می‌باشد. به این دلیل روابط و روش‌های تجربی برای اندازه‌گیری بار بستر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش چکیده‌ای از پژوهش‌های که در این زمینه در داخل و خارج از کشور انجام گردیده، آورده می‌شود. امین و مورفی (۵) دو فرمول انتقال بار بستر را برای رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که روش توفالتی با دقت مناسبی می‌تواند شدت انتقال رسوب را در چنین رودخانه‌هایی برآورد نماید. ناکاتو (۹) ۱۱ روش برآورد رسوب را در دو ایستگاه اندازه‌گیری مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که روش یانگ بهترین نتیجه را می‌دهد. دی ورایس (۷) مطالعه‌ای برروی صحت بعضی از معادلات پیش‌بینی باربستر، با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده حمل رسوب انجام داد، جالب توجه است که معادلات ساده‌ای مانند انگلاند و هانسن و ون‌راین نرخ حمل رسوب را به‌خوبی و یا حتی بهتر از معادلات پیچیده‌ای مانند وایت و همکاران و کریم و کندی برآورد می‌کنند. وو و یو (۱۱) مقایسه‌ای بین ۱۶ روش اینشتین، لارسن، کلبی، بیشاپ و همکاران، انگلاند و هانسن، گراف و همکاران، مدوک، توفالتی، شن و هانگ، ایکرز و وایت، یانگ، بروونلی، رانگا راجو، کریم و همکاران و ون‌راین با استفاده از ۱۷ سری از اطلاعات آزمایشگاهی انجام داد، ایشان معادلات یانگ، انگلاند و هانسن و ایکرز و وایت را بهترین معادلات معرفی کردند.در حالی‌که معادلات اینشتین، بگنولد و لارسن بدترین‌ها می‌باشند و بقیه معادلات در این بین قرار می‌گیرند. یانگ و همکاران (۱۳) مقایسه‌ای بین معادلات یانگ، لارسن، انگلاند و هانسن، ایکرز و وایت، توفالتی و شبکه عصبی مصنوعی انجام دادند و نتایج آنها نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی با پارامترهای کمتری قادر به تخمین بهتر بار بستراست. جیمز و همکاران (۸) با آنالیز حساسیت پارامترهای روش ریکن‌من (۱۹۹۰) به‌منظور تخمین مقدار بار بستر انتقالی از حوزه آبخیز بزرگ آلپ، شرایط جریان و پارامترهای به‌کار رفته در مدل را عوامل اصلی تاثیرگذار در میزان دقت تخمین مدل دانسته و با مقایسه نتایج این روش با نتایج روش‌های میر پیتر مولر و اسمارت و جاگی به‌نتایج متفاوتی دست یافت. راحت‌طلب نخجیری و همکاران (۲) با مقایسه‌ی داده‌های مشاهده‌ای برداشت شده از رودخانه‌ی زرین گل استان گلستان با نتایج ۱۶ روش تجربی تخمین بار بستر، عدم توانایی این روابط در تخمین بار بستر در دبی‌های کم را اعلام کردند. صمدیان‌فرد و همکاران (۴) برای انتخاب بهترین روش برآورد بار بستر و بار معلق در رودخانه اهرچای



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]

آذربایجان شرقی، از ۸ روش برای تخمین بار بستر و ۴ روش برای برآورد بار معلق استفاده کردند که روش میر پیتر مولر را برای تخمین بار بستر و روش چانگ و همکاران (۶) را برای تخمین بار معلق پیشنهاد کردند. حدادچی و همکاران (۱) در رودخانه چهل‌چای استان گلستان ۱۳معادله تجربی موجود برآورد باربستر را موردارزیابی قرار دادند ارزیابی بر اساس نسبت ناجوری که نسبت نرخ حمل پیش‌بینی شده به اندازه‌گیری شده است انجام شد نتایج نشان می‌دهد که معادله ایکرز و وایت بهترین نتایج را با ۶۴/۳ درصد نرخ حمل پیش‌بینی شده در دامنه نسبت ناجوری بین ۰/۵ تا ۲ ارائه می‌دهد. معادلات میر -پیتر و مولر و ون راین نتایج خوبی را به ترتیب با ۴۳ درصد و ۳۶ درصد نرخ پیش‌بینی شده ارایه می‌دهد. با توجه به مطالب گفته شده هدف از این تحقیق مقایسه نتایج به‌دست آمده با فرمول‌های متداول تخمین باربستر و مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده باربستر رودخانه ناورود که یکی از رودخانه‌های مهم استان گیلان است می باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در این تحقیق حوزه آبخیز معرف ناورود اسالم است، که درحوزه آبخیزاصلی دریاچهٔ خزر و زیرحوزه آبخیز تالش و مرداب انزلی قرار دارد. این حوزه آبخیز در شمال ایران و درغرب استان گیلان، در محدوده ۳۵َ ۴۸° تا ۵۴َ ۴۸° درجهٔ طول شرقی و ۳۶َ ۳۷° تا ۴۵َ ۳۷° درجه عرض شمالی واقع شده است. حوزه آبخیز ناورود شکلی مستطیلی و رودخانهٔ اصلی آن در وسط حوضه و به موازات طول آن جریان دارد. حداکثر ارتفاع آن از سطح دریا برابر با ۳۰۰۰ متر است که از ۲۰۰۰ متری فاقد جنگل بوده و برف‌گیر است. رودخانه‌های کوچک دیگری نیز در شمال این رودخانه جریان داشته و به دلتای آن ملحق می‌شوند. شکل ۱ محدوده حوزه آبخیز معرف ناورود اسالم و موقعیت ایستگاه هیدرومتری را نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر از داده‌های نمونه‌بردار هلی‌اسمیت که توسط سازمان امور آب گیلان بین سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ که طی ۵۶ بار نمونه‌برداری از رودخانه ناورود در ایستگاه هیدرومتری خرجگیل برداشت شده بود استفاده شد. هم‌چنین از خصوصیات هیدرولیکی و هندسی مقاطع مختلف می‌توان به عرض رودخانه، عمق آب، دانه‌بندی مواد بستر، دبی، سرعت آب و شیب کف بستر که در هنگام نمونه‌برداری برداشت شده بود، اشاره نمود. در جدول ۱ حداکثر و حداقل مقادیر پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده برای ارزیابی فرمول‌ها، در رودخانه ناورود را نشان می‌دهد. به‌منظور انجام تحقیق حاضر از دو روش هیدرولیکی و هیدرولوژیکی برای برآورد باربستر رودخانه ناورود استفاده گردید. کلیه محاسبات آماری در نرم‌افزار Excel (۲۰۰۳)، و برای برآورد باربستر با روش‌های هیدرولیکی از نرم افزار Sedload (۱۹۹۱) استفاده شد.

### روش‌های برآورد بار بستر

#### الف-روش هیدرولوژیکی

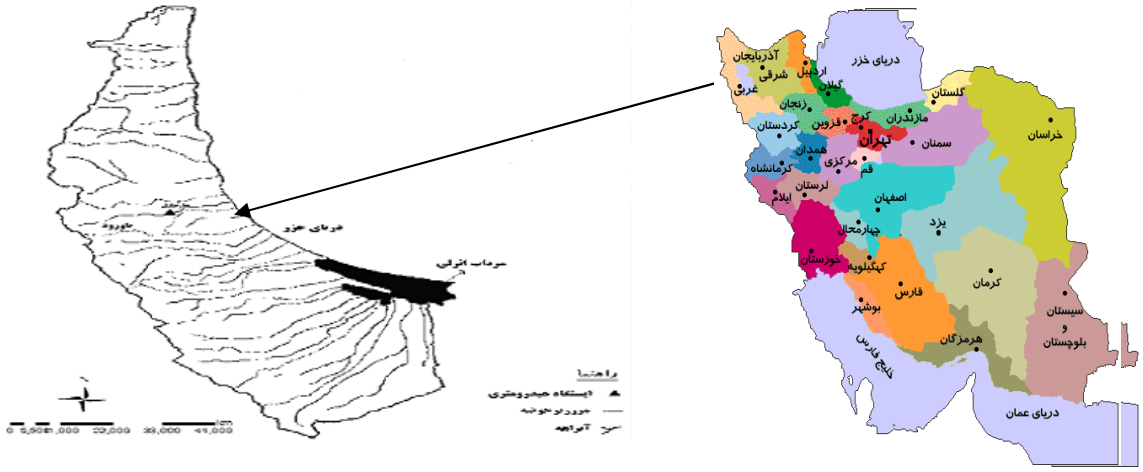
در واقع از طریق داده‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی و با توجه به این‌که دبی رسوب تابعی از دبی جریان می‌باشد، رابطه‌ای بین $Q_W$ و $Q_b$ استخراج می‌گردد و با استفاده از ارقام درازمدت گذر حجمی رودخانه، باربستر رودخانه برآورد می‌گردد. در عمل با توجه به داده‌های دبی آب و دبی رسوب متناظر با آن، هر دو سری داده به صفحه مختصات لگاریتمی منتقل شده و خط بهترین برازش بر مبنای روش حداقل مربعات از میان آنها عبور داده می‌شود و رابطه‌ای به صورت رابطه (۱) که به منحنی‌سنجه رسوب (Sediment rating curve) معروف است بین دو متغیر برقرار می‌گردد. در مختصات لگاریتمی مقدار ضریب a فاصله قائم محل تقاطع خط بهترین برازش با محور قائم تا مبدأ مختصات و مقدار نمای b برابر با شیب خط بهترین برازش است(۱۰). شکل ۲ رابطه توانی منحنی سنجه رسوب رودخانه ناورود را نشان می‌دهد.

$$Q_b = aQ_w^b \qquad [۱]$$



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

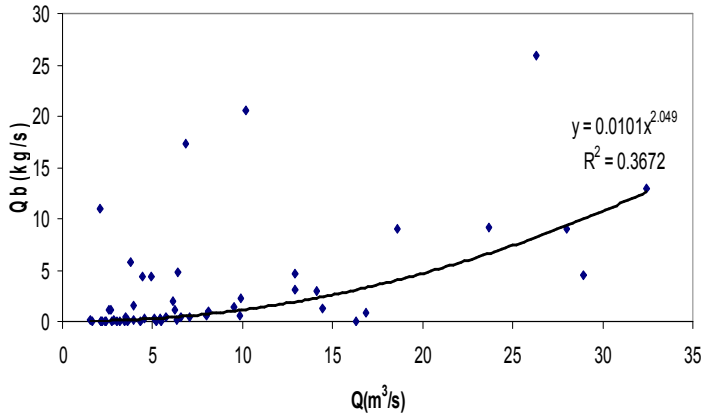
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]




شکل ۱. محدوده حوزه آبخیز معرف ناورود اسالم و موقعیت ایستگاه هیدرومتری خرجگیل

جدول۱. حداکثر و حداقل اطلاعات هیدرولیکی استفاده شده برای ارزیابی فرمول‌ها، رودخانه ناورود

| عمق آب(متر) | دبی واحد عرض (متر مکعب بر ثانیه) | سرعت آب (متر بر ثانیه) | عرض مقطع (متر) | شعاع هیدرولیکی (متر) | شیب طولی بستر |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ۰/۰۱۳ |
| بیشینه | ۳۲/۴۲ | ۲/۴۱۳ | ۱۵ | ۰/۸۲ | |
| کمینه | ۱/۵۲ | ۰/۵۸۷ | ۱۰/۴ | ۰/۱۷ | |




شکل۲. رابطه توانی منحنی سنجه رسوب رودخانه ناورود

**ب- روش‌های هیدرولیکی**

معادلات تجربی و نیمه تجربی برآورد کننده باربستر، به‌طور معمول توسط یک یا دو عامل غالب مانند تنش برشی، شیب انرژی، دبی آب، سرعت جریان ارائه می‌گردند. در این پژوهش، با توجه به داده‌های موجود، مجموعه‌ای کامل از معروف‌ترین معادلات، شامل روش‌های انیشتین، توفالتی، میر پیتر مولر، ون‌راین، ون‌راین اصلاح شده، یالین، بگنولد، فرایلینک، حبیبی و سیوا کومار و روش ساماگا استفاده شد.



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]

**جدول۲. انواع معادلات استفاده شده تخمین بار بستر**

| نام معادله | شمای کلی معادله |
|---|---|
| ۱. یالین(۱۲) | $q_b = CS_t\sqrt{\tau_*}\left[1-\frac{2/3U}{aS_t}\log(1+aS_t)\right]$ ، $S_t = \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1$ ، $a = 2/45\frac{\sqrt{\tau_{*c}}}{\left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{0/2}}$ |
| ۲. ون‌راین(۱۲) | $q_b = 0/053\left(\frac{\rho_s}{\rho}-1\right)^{0/5} g^{0/5} d_{50}^{1/5} D_*^{-0/3} T^{2/1}$ ، $D_* = d_{50}\left[\left(\frac{\rho_s}{\rho}-1\right)\frac{g}{\nu^2}\right]^{\frac{1}{3}}$ |
| ۳. ون‌راین اصلاح شده(۱۲) | $q_b = 0/25 d_{50} u'_{*c} D_*^{-0/3} T^{1/5}$ ، $T = \frac{\tau'_b - \tau_c}{\tau_c}$ ، $u'_{*c} = \sqrt{\frac{\tau'_0}{\rho}} = \frac{g^{0/5}U}{C'}$ |
| ۴. میر پیتر مولر (۳) | $RS = 0/047(\gamma_s-\gamma)d + 0.25\rho^{1/3} q_b^{2/3}$ ، $\gamma\left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2}$ |
| ۵. روش اینشتین- براون (۳) | $\varphi = 40\left(\frac{1}{\psi}\right)^3$ ، $\varphi = \frac{q_{bv}}{\gamma_s k\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma}-1\right)gd^3}}$ |
| ۶. بگنولد(۱۲) | $q_{bs} = a_s qb$ ، $a_s = \frac{\tan\varphi}{\cos\theta(\tan\varphi \pm \tan\theta)}$ |
| ۷. ساماگا(۱۲) | $\varphi_B = \frac{i_B q_b}{\Delta p_i \gamma_s}\sqrt{\frac{\gamma}{\Delta\gamma_s g d_i^3}}$ |
| ۸. توفالتی(۱۲) | $q_b = M(2Di)^{1+n_v - 0/756Z_1}$ |
| ۹. حبیبی و سیوا کومار(۱۲) | $q_b = \alpha\lambda_1\lambda_2\frac{SDu_*^2}{\Delta\kappa\omega_b}$ |
| ۱۰. فرایلینک(۱۲) | $q_b = 5\mu^{0/5} u_{*,c} d_{50} e^{-0/27/(\mu\theta)}$ ، $C = 18\log\frac{12h}{k_s}$ |

جدول۲ انواع کلی معادلات استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. به‌منظور ارزیابی دقت برآورد معادلات تجربی تخمین‌گر باربستر از نمودار تغییرات مقادیر محاسبه شده بار بستر برحسب مقادیر اندازه‌گیری شده و پراکندگی نتایج حول خط ۴۵ درجه و هم‌چنین نمایه ریشه میانگین مربعات خطا (Root mean squared error) (رابطه ۲) و میانگین نسبت ناجوری (R) (رابطه ۳) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(q_m - q_c)^2} \quad [2]$$

$$R = \frac{q_c}{q_m} \quad [3]$$



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]

که در آن، $q_c$ دبی باربستر محاسبه شده (مترمکعب بر ثانیه)، q دبی باربستر اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر ثانیه) و n تعداد اندازه‌گیری‌ها است. هر چه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کمتر و نسبت ناجوری نزدیک‌تر به یک باشد آن معادله برآورد خوبی از دبی باربستر داشته است.

در معادلات جدول ۲ $q_b$= دبی باربستر در واحد عرض آبراهه(kg/m.s)، $q_{bi}$= دبی باربستر هر اندازه رسوب (kg/m.s)، در رابطه توفالتی $q_b$= دبی باربستر هر اندازه ذره برحسب ton/day.ft می‌باشد، در رابطه انیشتین- براون $q_{bv}$= دبی باربستر هر اندازه ذره به‌صورت حجمی است، $D_i$ =اندازه ذره، (mm) (در رابطه توفالتی،Di= اندازه ذرات بستر بر حسب ft می‌باشد)، $D_{50}$= اندازه متوسط ذرات رسوب(mm)، S= شیب کف آبراهه (kg/m$^2$)، $\varphi_{*i}$ = پارامتر شدت بار بستر در رابطه اینشتین، $\rho_s$ = جرم مخصوص رسوب (kg/m$^3$)، $\rho$ = جرم مخصوص آب (kg/m$^3$)، $\gamma s$ = وزن مخصوص رسوب (ton/m$^3$)، g= شتاب ثقل (m/s$^2$)، $K_r$ = ضریب استریکلر، $K_s$ = ضریب زبری مانینگ، R= شعاع هیدرولیکی، $\nu$ لزجت سینماتیکی، $\tau$ = تنش برشی شیلدز، $\tau_c$ = تنش برشی بحرانی، $S'$= شیب مرتبط با دانه است، $(K_s / K_r)S$ = نوعی از شیب، که تعدیل کننده تنها بخشی از افت انرژی کل است،که ناشی از مقاومت دانه $S_r$، پاسخی برای حرکت بار بستر است، m، M، $n_v$ و Z1 در رابطه توفاتی پارامترهای خاصی هستند که از روابط بخصوصی به دست می‌آیند، می‌باشند (۳ و ۱۲). در رابطه حبیبی و سیواکومار $\lambda_1$،$\lambda_2$ ضرایب کالیبراسیون هستند و K=۰/۴ ثابت ون‌کارمن است.

## نتایج و بحث

### ارزیابی براساس مقادیر دبی باربستر

روش‌های محاسباتی حداکثر ظرفیت حمل رودخانه را نشان می‌دهند در حالی‌که ممکن است این مقدار رسوب در اختیار رودخانه نباشد .بنابراین انتظار می‌رود که این روش‌ها مقادیر بالاتری از مقدار اندازه‌گیری شده را نشان دهند(۳). نتایج باربستر رودخانه ناورود با استفاده از روش هیدرولوژیکی و ده روش هیدرولیکی برای تعدادی از نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده بار بستر و نتایج محاسبه شده، می‌توان دریافت که در رودخانه ناورود روش حبیبی و سیواکومار در مواقع سیلابی و عادی روخانه نتایج بهتری را از خود نشان داده است و پس از آن روش هیدرولوژیکی برآورد بهتری نسبت به‌سایر روش‌ها داشته است. رابطه میر پیتر مولر که در واقع روش اصلاح شده روش میر پیتر است انتظار می‌رفت که برآورد بهتری داشته باشد، ولی در این تحقیق در ردیف ۵ قرار گرفت. در شکل ۳ مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای باربستر رودخانه ناورود برای ۱۰ روش مورد استفاده به استثنای روش یالین نشان داده شده است. در ضمن معادله یالین در تمام نمونه ها بیش از ۱۰ برابر مقدار بار بستر را برآورد کرده است.

### ارزیابی براساس فراوانی مقادیر نسبت ناجوری

برای بیان بهتر دقت معادلات از فراوانی نسبت ناجوری و نمایه رتبه‌بندی (Score) که درصد قرارگیری میزان باربستر محاسباتی در محدوده ۰/۵ تا ۲ برابر است را نشان می‌دهد، استفاده شد. دلیل انتخاب این بازه، تخمین مناسب معادلات باربستر براساس منابع معتبر است. در شکل ۴ بازه‌های نسبت ناجوری در محور افقی و درصد فراوانی آن در محور عمودی آن ارائه شده است. از بین روش‌های مورد استفاده براساس فراوانی نسبت ناجوری کمتر از ۰/۵ به‌ترتیب معادله توفالتی، روش هیدرولوژیکی و معادله ون‌راین اصلاح شده قرار گرفتند. روش توفالتی ۱۰۰ درصد کمتر از ۰/۵ برابر برآورد کرده است. براساس نسبت ناجوری بین ۰/۵ تا ۱ به‌ترتیب معادله بگنولد، میر پیتر مولر، ون‌راین، ون‌راین اصلاح شده در یک ردیف قرار گرفتند. براساس نسبت ناجوری بین ۰/۵ تا ۲ به‌ترتیب معادله بگنولد، میر پیتر مولر و ون‌راین اصلاح شده قرار گرفتند. براساس نسبت ناجوری بین ۲ تا ۱۰ به‌ترتیب معادله فرایلینک، ساماگا و انیشتین قرار گرفتند و براساس نسبت ناجوری بیشتر از ۱۰ به‌ترتیب معادله یالین، انیشتین و فرایلینک قرار گرفتند. هم‌چنین براساس نمایه رتبه‌بندی به‌ترتیب معادله بگنولد، میر پیتر مولر و حبیبی و سیواکومار قرار گرفتند. روش بگنولد اگرچه از لحاظ رتبه‌بندی بهترین معادله بوده است ولی از لحاظ



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]
[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]





**جدول۳. دبی باربستر محاسباتی رودخانه ناورود با ۱۱ روش محاسباتی برای تعدادی از نمونه‌ها**

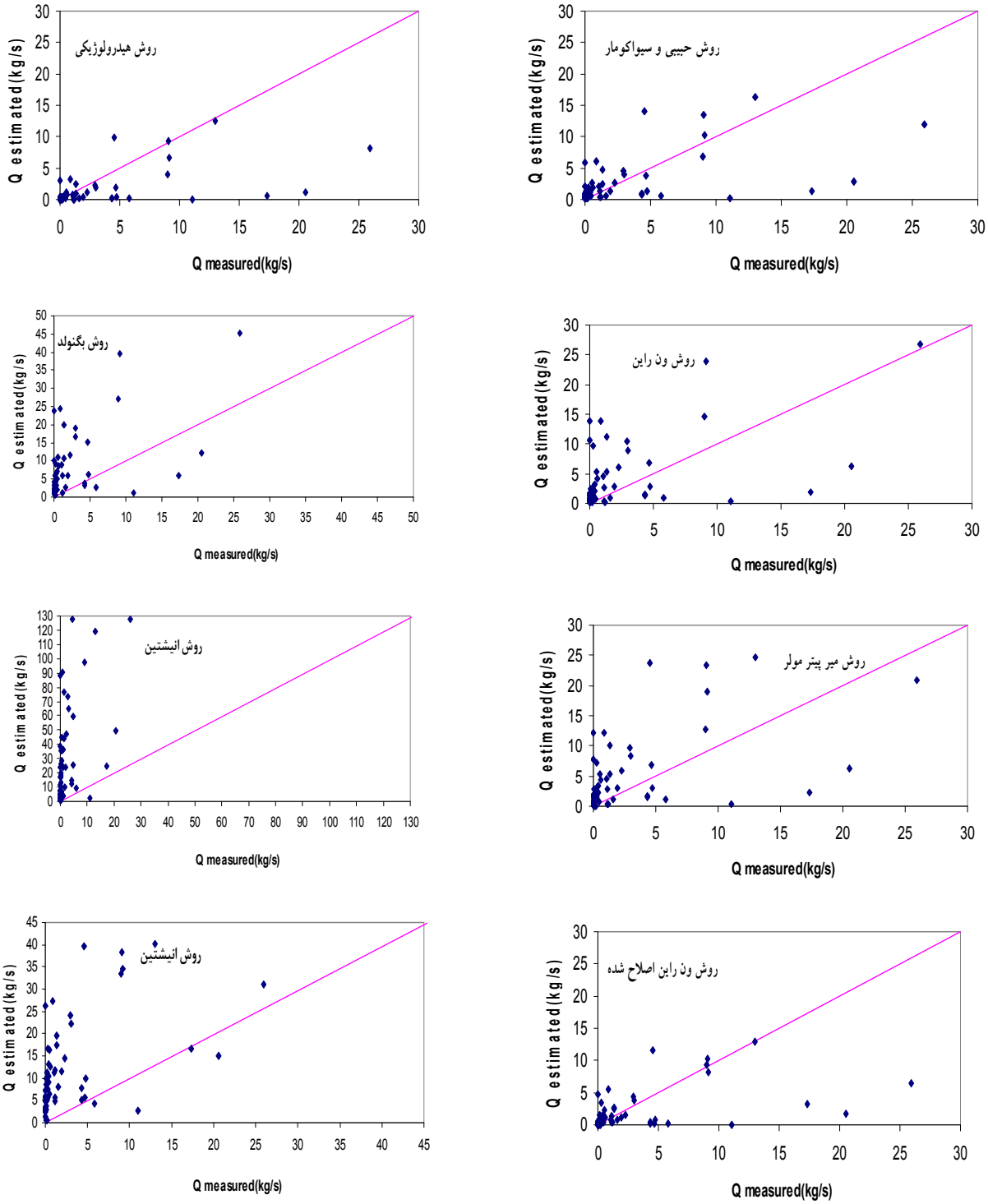
| دبی آب | دبی رسوب اندازه‌گیری شده (kg/s) | هیدرولوژیکی (kg/s) | حبیبی و سیواکومار (kg/s) | ون‌راین (kg/s) | بگنولد (kg/s) | میر پیتر مولر (kg/s) | انیشتین (kg/s) | ساماگا (kg/s) | توفالتی (kg/s) | ون راین اصلاح شده (kg/s) | فرایلینک (kg/s) | یالین (kg/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۶/۱۳۱ | ۱/۹۱ | ۰/۴۱ | ۱/۳۱ | ۲/۸۷ | ۵/۹۶ | ۳/۰۴ | ۲۳/۹۰ | ۶/۴۳ | ۰/۴۹ | ۱/۱۰ | ۱۱/۵۹ | ۲۳۰/۹۹ |
| ۲۳/۶۹ | ۹/۱۸ | ۶/۶۲ | ۱۰/۳۱ | ۲۳/۸۶ | ۳۵/۹۵ | ۱۸/۹۷ | ۱۳۲/۴۴ | ۸/۱۷ | ۰/۳۰ | ۸/۱۵ | ۳۴/۵۵ | ۷۸۰/۲ |
| ۹/۸۵ | ۲/۲۷ | ۱/۱۰ | ۲/۶۷ | ۵/۹۹ | ۱۱/۶۶ | ۵/۹۱ | ۴۷/۳۰ | ۹/۸۰ | ۰/۴۲ | ۱/۵۳ | ۱۴/۳۶ | ۳۶۰/۳ |
| ۲۶/۲۹ | ۲۵/۹۰ | ۸/۱۹ | ۱۲/۰۳ | ۲۶/۷۶ | ۴۵/۱۷ | ۲۰/۸۵ | ۱۲۸/۰۳ | ۸/۵۴ | ۰/۲۶ | ۶/۴۱ | ۳۱/۰۶ | ۸۱۸/۴ |
| ۱۴/۴۵ | ۱/۳۱ | ۲/۴۰ | ۴/۸۰ | ۱۱/۲۴ | ۱۹/۹۱ | ۱۰/۱۳ | ۷۶/۲۷ | ۱۱/۴۰ | ۰/۳۹ | ۲/۶۰ | ۱۹/۴۴ | ۵۰۸/۱ |
| ۳۲/۲۴ | ۱۲/۹۷ | ۱۲/۵۸ | ۱۶/۳۰ | ۳۲/۷۹ | ۵۸/۲۶ | ۲۴/۷۶ | ۱۱۹/۲۰ | ۹/۰۴ | ۰/۱۹ | ۱۲/۹۴ | ۴۰/۱۰ | ۹۰۰/۱ |
| ۸/۱۲ | ۱/۰۵ | ۰/۷۳ | ۲/۰۱ | ۴/۵۴ | ۹/۰۴ | ۴/۶۰ | ۳۶/۷۰ | ۸/۶۴ | ۰/۴۶ | ۰/۸۴ | ۱۱/۱۶ | ۳۰۰/۵ |
| ۳/۴۹ | ۰/۴۳ | ۰/۱۳ | ۰/۵۰ | ۰/۶۸ | ۲/۱۰ | ۰/۷۸ | ۷/۲۳ | ۱/۰۱ | ۰/۲۷ | ۰/۴۴ | ۶/۵۲ | ۱۱۵/۵ |

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ] [ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]



**جدول۴. رتبه‌بندی روش‌های مختلف بر اساس معیارهای مختلف آماری**

| نام روش | R<۰/۵ | ۰/۵<R<۱ | ۱<R<۲ | ۲<R<۱۰ | R>۱۰ | میانگین محاسباتی به مشاهده ای | انحراف معیار محاسباتی به مشاهده ای | RMSE (kg/s ) | SCORE | SCORE(٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حبیبی و سیواکومار | ۴۶/۴۲ | ۱۷/۸۵ | ۱۶/۰۷ | ۱۹/۶۴ | ۰ | ۱/۳۵ | ۱/۹۶ | ۱/۶۳ | ۱۹ | ۳۳/۸۲ |
| ون راین اصلاح شده | ۵۷/۱۴ | ۱۶/۰۷ | ۱۰/۷۱ | ۱۶/۰۷ | ۰ | ۱/۰۴ | ۱/۶۱ | ۳/۴۹ | ۱۵ | ۲۶/۷۸ |
| هیدرولوژیکی | ۷۱/۴۲ | ۱۰/۷۱ | ۷/۱۴ | ۱۰/۷۱ | ۰ | ۰/۷۴ | ۱/۴۱ | ۴/۷۶ | ۱۰ | ۱۷/۸۵ |
| ون راین | ۳۳/۹۲ | ۱۶/۰۷ | ۱۴/۲۸ | ۲۶/۷۸ | ۸/۹۲ | ۲/۹۸ | ۴/۳۹ | ۵/۶۳ | ۱۷ | ۳۰/۳۵ |
| مییر پیتر مولر | ۳۰/۳۵ | ۱۶/۰۷ | ۱۷/۸۵ | ۲۸/۵۷ | ۷/۱۴ | ۲/۵۸ | ۳/۳۷ | ۹/۲۷ | ۱۹ | ۳۳/۹۲ |
| بگنولد | ۳/۵۷ | ۲۱/۴۲ | ۱۹/۶۴ | ۳۹/۲۸ | ۱۶/۱ | ۵/۴۴ | ۷/۲۶ | ۷/۳۳ | ۲۳ | ۴۱/۰۷ |
| ساماگا | ۲۵ | ۱۲/۵ | ۱۰/۷۱ | ۵۱/۷۸ | ۰ | ۲/۵۸ | ۲/۰۹ | ۴۵/۷۸ | ۱۳ | ۲۳/۲۱ |
| فرایلینک | ۳/۵۷ | ۱/۷۸ | ۱۲/۵ | ۶۲/۵ | ۱۹/۶ | ۶/۳۲ | ۵/۵۱ | ۱۲/۶۴ | ۸ | ۱۴/۲۸ |
| اینشتین | ۳/۵۷ | ۰ | ۱۴/۲۸ | ۳۲/۱۴ | ۵۰ | ۱۷/۹۳ | ۲۰/۰۶ | ۴۳/۴۰ | ۸ | ۱۴/۲۸ |
| توفالتی | ۱۰۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۱۸ | ۰/۰۸ | ۶/۰۳ | ۰ | ۰ |
| یالین | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۱۳۹/۹۷ | ۱۲۰/۰۴ | ۳۳۶/۴ | ۰ | ۰ |

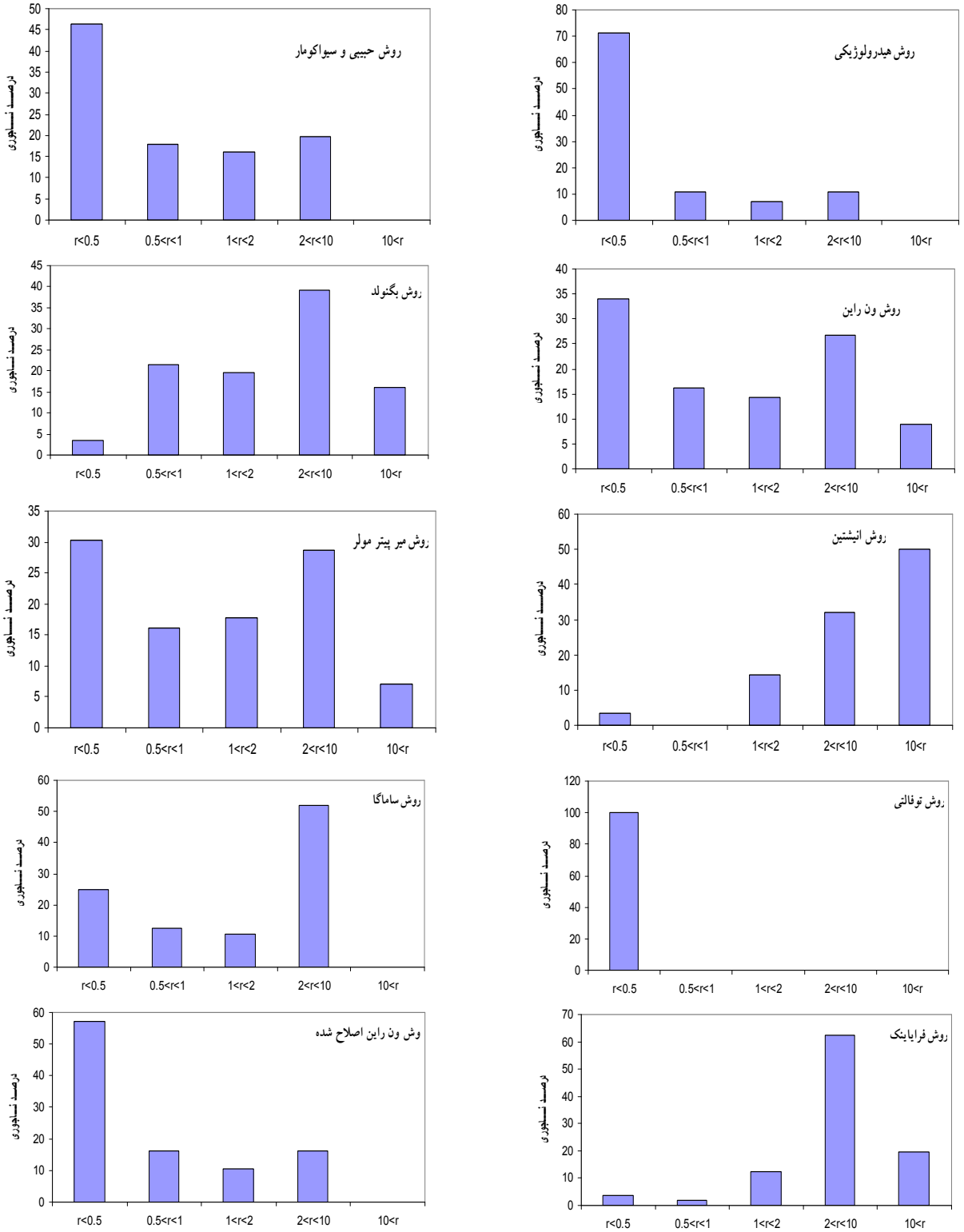



شکل۳. مقایسه بین باربستر محاسبه شده و اندازه گیری شده



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]




**شکل۴. تغییرات بازه‌های نسبت ناجوری بر حسب درصد فراوانی برای برآورد بار بستر براساس فرمول‌های مختلف**



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]

مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین محاسباتی و مشاهده‌ای و انحراف معیار محاسباتی به مشاهداتی به مراتب بیش از روش حبیبی و سیواکومار بوده است. براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش حبیبی و سیواکومار بهترین معادله در بین روش‌های مورد استفاده است و معادله توفالتی و یالین هم برای رودخانه مورد مطالعه به‌ترتیب کم تخمین (Underestimation) و بیش تخمین (Overestimation) بوده‌اند. رتبه بندی روش‌های مختلف بر اساس معیارهای مختلف آماری در جدول ۴ نشان داده شده است.

## نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف ارزیابی ۱۱ روش پر کاربرد شامل روش های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی از قبیل انیشتین، توفالتی، میر پیتر مولر، ون‌راین، ون‌راین اصلاح شده، یالین، بگنولد، فرایلینک، حبیبی و سیوا کومار و ساماگا برای محاسبه باربستر انجام شسده است. به منظور ارزیابی دقت برآورد معادلات تجربی تخمین‌گر باربستر از نمودار تغییرات مقادیر محاسبه شده بار بستر برحسب مقادیر اندازه‌گیری شده و پراکندگی نتایج حول خط ۴۵ درجه، نمایه ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین نسبت ناجوری (R) و رتبه‌بندی استفاده شد در این پژوهش معادله حبیبی و سیواکومار با نسبت ناجوری ۳۲/۸۲، ریشه میانگین مربعات خطا ۱/۶۳ و رتبه‌بندی ۳۳/۸۲ درصد به عنوان روش برتر انتخاب شد. ضعیف‌ترین نتایج را معادلات یالین و اینشتین داشتند. در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود از معادله حبیبی و سیواکومار در سایر رودخانه‌های کشور استفاده شده و دقت این معادله ارزیابی شود، و هم‌چنین پیشنهاد می‌شود با استفاده از معادلات انتقال رسوب مقدار باربستر را به‌روش تحلیلی ارزیابی و با آن‌چه که از نتایج عمق‌یابی مخزن حاصل می‌گردد، مقایسه نمود.

## سپاسگزاری

مؤلفین مقاله از سازمان آب منطقه ای استان گیلان برای در اختیار گذاشتن این اطلاعات کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع مورد استفاده

۱. حدادچی، آ.، م. ح. امید و ا. ا. دهقانی. ۱۳۹۰. ارزیابی معادلات تجربی برآورد دبی بار بستر در رودخانه کوهستانی با بستر شنی(مطالعه موردی: رودخانه چهل چای در استان گلستان)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۱۸(۳): ۱۶۵-۱۴۹.

۲. راحت‌طلب، چ.، چ. غلامی، ا. یوسفی و ر. اکتایی. ۱۳۸۳. مقایسه و انتخاب بهترین روش برآورد باربستر(مطالعه موردی: رودخانه زرینگل، استان گلستان)، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۳): ۱۴۰-۱۳۳.

۳. شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۳. *هیدرولیک رسوب*، انتشارات دانشگاه شهید چمران، ۴۳۸ص.

۴. صمدیان‌فرد، س.، م .ع. قربانی، ر. حسینیلر، ع. حسین‌زاده دلیر و د. فرسادی‌زاده. ۱۳۸۶. انتخاب مناسب ترین روش های برآورد بار معلق و بار بستر در رودخانه اهرچای (بالادست سد ستارخان)، مجله فن‌آوری زیستی در کشاورزی ۷(۳): ۱۰۳-۹۱.

5. Amin, M. I. and P. J. Murphy. 1981.Two bed load formulas: An evaluation. J. Hydraulic Eng. ASCE. .107(,8):961-972.

6. Chang, F. M., Simons, D. B. and E.V. Richardson. 1967. Total bed material discharge in alluvial channels, PP. 132-139. *In*: Proc. 20th Conference of the International Association for Hydraulic Research, Fort Collins, Colorado, USA.

7. De Vries, M. 1993. Assessment of bed load formulas. IAHR Congress Proceeding. China.

8. Gems, B., Achleitner, S., Schöberl, F. and M. Aufleger. 2010. Sensitivity study for a bed-load transport routing scheme applied to a large alpine catchment, Procedia Social and Behavioral Sci. 2:7662-7663.

9. Nakato, T. 1990. Tests of selected sediment-transport formulas. J. Hydraulic Eng. ASCE. 116(2):362-379.

10. Walling, D. E. and B. W. Webb. 1981. The reliability of suspended sediment load data, 133:177-194. *In*: Erosion and sediment transport, Proceeding of Florence Congress, IAHS Pub.



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]

11. Woo, H. and K. Yu. 2001. Reassessment of selected sediment discharge formulas. XXIX IAHR Congress Proceeding, China.
12. Yang, C. T. 1996. Sediument Transport, Theory and Practice. McGraw-Hill Companies Press. 446. p.
13. Yang, C. T., Marsooli, R. and M. T. Alami., 2009. Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN. International J. Sediment Res. 24 (2009):274-286.

[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.7.4 ]