ارائه مدل ریاضی
برآورد بار بستر و بار کل رسوب با روش تصحیح شدهٔ اینشتین

محمود شفاعی بجستان[۱] و منصور استادعسگری[۲]

چکیده

کاربرد روش تصحیح شدهٔ اینشتین، توسط دفتر استانداردهای صنعت آب ایران، وابسته به دفتر فنی وزارت نیرو توصیه شده است. این روش در رودخانه‌های کم عمق نبراسکا (آمریکا) کالیبره شده و ضریب ϕ به طور مصنوعی به نصف کاهش داده شده است. از طرفی، این روش به صورت ترسیمی و وقت گیر می‌باشد، به طوری که کاربرد آن را غیرممکن نموده است. از این رو، در این مطالعه به منظور سهولت و تسریع محاسبات، یک مدل ریاضی تهیه گردیده است. در این مدل کلیه منحنی‌ها به معادلات جبری تبدیل، و انتگرال‌های پیچیده با روش تحلیلی و عددی حل شده است. هم چنین، به منظور تعیین دقت کاربرد و واسنجی روش در رودخانه‌های کارون و کرخه، داده‌های رسوب و هیدرولوژی ایستگاه‌های اهواز و حمیدیه به مدت ۷ سال جمع‌آوری، و میزان بار رسوب با مدل محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه گردید.

میزان تأثیر تعدادی از متغیرهای مهم، از جمله مقدار ϕ، در برآورد بار رسوب مورد مطالعه قرارگرفت. از آن جا که روش تصحیح شدهٔ اینشتین، میزان بار بستر را نیز جداگانه محاسبه می‌کند، سعی گردید تا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شدهٔ قبلی از رودخانه‌های آمریکا، دقت روش در برآورد میزان بار بستر مورد ارزیابی قرارگیرد. در این مقاله نحوهٔ مدل کردن روش، داده‌های جمع‌آوری شده، تجزیه و تحلیل حساسیت روش و دقت روش در برآورد بار بستر و بار کل رسوب ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی : رسوب، بار بستر، بار معلق، کارون، کرخه

مقدمه

به کلیهٔ ذرات سنگی و معدنی، که در اثر جریان آب از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر منتقل می‌شوند، رسوب اطلاق می‌شود. مواد در حال حرکت را بار رسوبی، و حرکت این مواد در آبراهه را انتقال رسوب گویند. انتقال رسوب ممکن است به دو صورت انجام شود، یکی حالت غوطه‌ور که آنها را مواد رسوبی معلق نامند، و دیگری موادی که در نزدیکی بستر به صورت لغزش، چرخش یا پرش کوتاه منتقل می‌گردند، که بار بستر نامیده می‌شوند. قانونمندی حاکم بر انتقال رسوبات و روش‌های محاسبه آن، از

۱. استاد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲. کارشناس ارشد آبیاری، امور مهندسی رودخانه، شرکت مهندسین مشاور دزآب، اهواز

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

اموضوعات مهم و مطرح در علم هیدرولیک است. در دهه‌های اخیر، رابطه‌های متعددی در این زمینه ارائه شده است. تعدادی از این روش‌ها فقط بار بستر، تعدادی فقط بار معلق، و تعدادی نیز مجموع بار بستر و بار معلق را، که بار مواد بستر نامیده می‌شود، برآورد می‌کنند. عمدهٔ این روش‌ها براساس کارهای آزمایشگاهی بنا گردیده و کاربرد آنها همیشه در عمل مورد سؤال بوده است.

یکی از روش‌های برآورد بارکل رسوب، روش تصحیح شدهٔ اینشتین است، که توسط کلبی و همبری (۵)، براساس روش اصلی اینشتین (۷) ارائه گردیده و عملکرد آن در رودخانه‌های نبراسکا در کشور آمریکا، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این روش، برای نزدیک کردن داده‌های به دست آمده و اندازه گیری شده، ضریب ϕ روش اینشتین به طور مصنوعی به نصف کاهش یافته است.

از آن جا که این روش اخیراً توسط دفتر فنی وزارت نیرو مورد توصیه قرار گرفته (۳)، و با توجه به وقت‌گیر بودن روش، به خاطر استفاده از منحنی‌های متعدد، و از آن جا که عملکرد این روش در هیچ یک از رودخانه‌های کشور مورد ارزیابی قرار نگرفته، این پژوهش انجام گردید. در این مطالعه، ابتدا برای سهولت، دقت و سرعت محاسبات، یک مدل ریاضی ارائه شد. سپس داده‌های بار معلق رودخانه‌های کارون و کرخه در ایستگاه‌های اهواز و حمیدیه، و داده‌های بار بستر رودخانه ایست فورک آمریکا، با روش تصحیح شدهٔ اینشتین ارزیابی و دقت روش بررسی گردید.

روش تصحیح شدهٔ اینشتین

در روش تصحیح شدهٔ اینشتین، مقدار دبی رسوب معلق در واحد عرض رودخانه در منطقه نمونه‌برداری شده (Q'_s)، از رابطه ۱ به دست می‌آید (۵ و ۶):

$$Q'_s = \sum Q'_{si} = C'_s \gamma Q \qquad [۱]$$

که در آن Q'_{si} دبی رسوب معلق برای ذرات رسوبی به اندازهٔ D_i می‌باشد، که از رابطهٔ ۲ استخراج می‌شود:

$$Q'_{si} = i_s \gamma C'_s Q \left[(۱ - E') - ۲/۳ \frac{E' \log E'}{P_m - ۱} \right] \qquad [۲]$$

در روابطه فوق، C'_s مقدار غلظت مواد معلق اندازه‌گیری شده، γ وزن واحد حجم آب، Q دبی جریان، i_s درصد اندازهٔ ذرات رسوب معلق به اندازهٔ D_i، و E' برابر a'/d است، که a' فاصله نمونه بردار معلق تا بستر رودخانه، و d عمق رودخانه می‌باشد، و مقدار P_m از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$P_m = ۲/۳ \log \frac{۳۰/۲ x d}{D_{۶۵}} \qquad [۳]$$

که در آن $D_{۶۵}$ اندازهٔ ذرهٔ رسوبی که ۶۵ درصد ذرات کوچک‌تر از آن می‌باشند، و x متغیری است که در رابطه توزیع لگاریتمی سرعت اینشتین (۷) می‌باشد و با سعی و خطا و با داشتن لزجی مایع به دست می‌آید. مقدار x برای جریان‌های با بستر زبر برابر واحد است.

مقدار بار بستر $[q_b]$ را نیز می‌توان از رابطهٔ ۴ به صورت زیر محاسبه کرد:

$$i_b q_b = \frac{۱}{۲} \phi i_b \gamma_s \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma} - ۱} \sqrt{g D_i^۳} \qquad [۴]$$

که در آن i_b درصد ذرات رسوب بستر به اندازهٔ D_i، γ_s وزن واحد حجم ذرات رسوب، g شتاب ثقل و ϕ شدت بار بستر است که برحسب ψ (شدت تنش)، از منحنی که توسط اینشتین ارائه شده (۷)، به دست می‌آید. مقدار ψ بزرگ‌ترین مقداری است که از یکی از روابط ۵ حاصل می‌شود (۷):

$$\psi = \frac{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - ۱\right) D_{۳۵}}{R'S} \qquad [۵]$$

$$\psi = \frac{۰/۴ \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - ۱\right) D_m}{R'S}$$

که در آن D_m اندازهٔ میانهٔ ذرات رسوب، R' شعاع هیدرولیکی ذره و S شیب خط انرژی یا شیب سطح آب می‌باشد. مقدار بار

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

کل رسوب Q_T نیز از یکی از روابط ۶ یا ۷ محاسبه می‌شود:

$$Q_T = Q'_{si}\frac{P_m J_1 + J_2}{P_m J'_1 + J'_2} \qquad [۶]$$

$$Q_T = i_b Q_b (P'_m I_1 + I_2 + 1) \qquad [۷]$$

که در آن $Q_b = Bq_b$ ، B عرض رودخانه و qb دبی بار بستر در واحد عرض رودخانه است. I_1، I_2، J_1 و J_2 دارای معادلات انتگرال به صورت زیر می‌باشند:

$$I_1 = 0/216\frac{E^{z'-1}}{(1-E)^{z'}}\int_E^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'} dy \qquad [۸]$$

$$I_2 = 0/216\frac{E^{z'-1}}{(1-E)^{z'}}\int_E^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'} \mathrm{Ln}y\, dy \qquad [۹]$$

$$J_1 = \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'} dy \qquad [۱۰]$$

$$J_2 = \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'} \mathrm{Ln}y\, dy \qquad [۱۱]$$

در این روابط، E برابر a/d و a ضخامت بار بستر است، که معمولاً برابر $2D_i$ می‌باشد. z' عبارت است از توان توزیع غلظت در رابطهٔ رأس، که برابر است با $z' = \frac{\omega}{0/4u'_*}$ ، ω سرعت سقوط ذرات رسوب و u'_* سرعت برشی ذره و برابر است با $\sqrt{gR'S}$ ، J'_1 و J'_2 نیز از روابط ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آیند، با این تفاوت که $E' = a'/d$ جای گزین E می‌شود. معادلات ۸ الی ۱۱ توسط اینشتین (۷) و کلبی و همبری (۵)، به صورت ترسیمی حل، و منحنی‌هایی ارائه شده است که از این منحنی‌ها برحسب E یا E' و z' می‌توان مقادیر انتگرال‌ها را به دست آورد.

توان توزیع غلظت (z') به روش آزمون و خطا محاسبه می‌شود، بدین ترتیب که با انتخاب مقادیر متفاوت z' سعی می‌گردد تا تساوی رابطهٔ زیر برقرار باشد:

$$\frac{Q'_{si}}{i_b Q_b} = \frac{I_1}{J_1}\left(P_m J'_1 + J'_2\right) \qquad [۱۲]$$

به علت محدودیت جا، از گنجاندن منحنی‌های متعدد صرف نظر شده است. خوانندگان می‌توانند به یکی از منابع ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۱۰، و یا ۱۱ مراجعه نمایند.

مواد و روش‌ها

مدل ریاضی

استفاده از نمودارها و معادلات متعدد در روش تصحیح شدهٔ اینشتین بسیار وقت‌گیر است و محاسبات از دقت لازم برخوردار نخواهد بود. از این رو، یک مدل ریاضی ارائه شده است که ضمن تسریع در محاسبات، دقت لازم را نیز دارد. در این مدل، به جای استفاده از نمودارها، از معادلات جبری استفاده شده، که توضیح داده شده است. اندازهٔ D_{35} و D_{65}، با فرض توزیع نیمه لگاریتمی دانه‌بندی ذرات رسوب، از روابط زیر استخراج می‌گردد:

$$D_{35} = \mathrm{EXP}\left[D_1 D_2 - \frac{(B_{i2} - 0/35)\ (\mathrm{Ln}D_2 - \mathrm{Ln}D_1)}{B_{i2} - B_{i1}}\right] \qquad [۱۳]$$

$$D_{65} = \mathrm{EXP}\left[D_1 D_2 - \frac{(B_{i2} - 0/65)\ (\mathrm{Ln}D_2 - \mathrm{Ln}D_1)}{B_{i2} - B_{i1}}\right] \qquad [۱۴]$$

که در آن B_{i1} و B_{i2} درصد مواد بستر کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از D_{35} یا D_{65}، و D_1 و D_2 اندازهٔ ذرات کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از D_{35} یا D_{65} می‌باشد. مقدار لزجی سینماتیکی براساس درجه حرارت آب، به صورت رابطهٔ زیر است:

$$\nu = 8/5194\times 10^{-8}(\mathrm{Ln}T_e)^2 + 2/4\times 10^{-8}\mathrm{Ln}(T_e) + 1/7\times 10^{-6} \qquad [۱۵]$$

که در آن T_e درجه حرارت آب برحسب سانتی‌گراد، و r لزجی سینماتیکی برحسب مترمربع در ثانیه می‌باشد. x متغیری است در رابطهٔ توزیع لگاریتمی اینشتین برحسب $M = D_{65}/\delta$ (δ ضخامت زیرلایهٔ ورقه‌ای است)، و از منحنی ارائه شده توسط اینشتین به دست می‌آید. در مطالعهٔ حاضر، معادلات زیر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

جای‌گزین این منحنی شده است:

$$x=0/374(LnM)^2+0/0045LnM+1/577 \qquad M\le 0/56$$

$$x=0/921\log\left(\frac{M}{0/0145}\right) \qquad 0/56<M\le 0/76$$

$$x=0/2921\log\left(\frac{M}{2/9\times 10^{-6}}\right) \qquad 0/76<M\le 0/96$$

$$x=0/2771\log\left(\frac{6732000}{M}\right) \qquad 0/96<M\le 1/35$$

$$x=0/175(LnM)^2-0/752LnM+1/812 \qquad 1/35<M\le 10$$

$$x=1/0 \qquad M>10$$

[۱۶]

رابطهٔ شدت بار بستر ϕ و شدت تنش (ψ) که توسط اینشتین به صورت منحنی ارائه شده (۷)، نیز به وسیلهٔ معادلهٔ ۱۷ جای‌گزین شده است:

$$\phi=EXP\left[-1/071(Ln\psi)^2+0/569(Ln\psi)+1/836\right]$$

$$0/9\le\psi\le 27 \qquad [17]$$

محاسبهٔ z' در مدل با دو روش، یکی روش آزمون و خطا و دیگری روش کلبی، امکان‌پذیر می‌باشد. در روش آزمون و خطا، مقدار z' طوری باید تعیین شود که تساوی رابطه ۱۲ برقرار گردد. بدین ترتیب ابتدا می‌بایستی مقادیر I_1، I_2، J_1، J_2، J'_1 و J'_2 را تعیین کرد. این مقادیر به صورت انتگرال‌هایی هستند که در مدل ریاضی باید با یکی از روش‌های عددی حل گردند. از طرفی، در رودخانه‌های عمیق و با بستر ماسه‌ای نظیر کارون و کرخه، $E=\frac{a}{d}=\frac{2D_i}{d}$ عدد بسیار کوچکی نزدیک به صفر می‌شود، در نتیجه در زمان محاسبه مقدار انتگرال $E=y\Rightarrow 0$، و از آن جا $\frac{1-y}{y}$ به سمت بی‌نهایت میل خواهد کرد، که حل عددی انتگرال‌ها غیرممکن می‌باشد. به منظور رفع این مشکل، انتگرال‌های فوق به صورت زیر نوشته می‌شود (۲ و ۹):

$$\int_E^1\left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'}=\int_E^{\varepsilon}\left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'}dy+\int_{\varepsilon}^1\left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'}dy \qquad [18]$$

که در این جا، ε یک کمیت بزرگ‌تر از E است. عبارت اول سمت راست رابطهٔ ۱۸ را می‌توان به صورت سری زیر جای گزین کرد:

$$\int_E^{\varepsilon}\left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'}dy=\int_E^{\varepsilon}y^{-z'}(1-y)^{z'}dy= \qquad [19]$$

$$\int_E^{\varepsilon}y^{-z'}\left[1-z'y+\frac{z'(z'-1)}{2}y^2+\dots\right]dy$$

سمت راست رابطهٔ ۱۹ را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از انتگرال‌ها نوشت که به روش‌های تحلیلی قابل حل هستند. با حذف ترم‌های چهارم به بعد، و قرار دادن در رابطه ۸، مقدار I_1 برابر خواهد بود با:

$$I_1=0/216\frac{E^{z'-1}}{(1-E)^{z'}}\left[F_1+F_2+F_3+\int_{\varepsilon}^1\left(\frac{1-y}{y}\right)dy\right] \qquad [20]$$

که در آن:

$$F_1=\int_E^{\varepsilon}y^{-z'}dy=\begin{cases}\frac{1}{1-z'}\left(\varepsilon^{1-z'}-E^{1-z'}\right) & z'\ne 1\\ Ln\varepsilon-LnE & z'=1\end{cases}$$

$$F_2=\int_E^{\varepsilon}y^{1-z'}dy=\begin{cases}\frac{z'}{z'-2}\left(\varepsilon^{2-z'}-E^{2-z'}\right) & z'\ne 2\\ -2(Ln\varepsilon-LnE) & z'=2\end{cases}$$

$$F_3=\frac{z'(z'-1)}{2}\int_E^{\varepsilon}y^{2-z'}dy=\begin{cases}\frac{z'(z'-1)}{2(3-z')}\left(\varepsilon^{3-z'}-E^{3-z'}\right) & z'\ne 3\\ 3(Ln\varepsilon-LnE) & z'=3\end{cases}$$

به همین ترتیب مقدار I_2 نیز محاسبه می‌شود، که می‌توان نوشت:

$$I_2=0/216\frac{E^{z'-1}}{(1-E)^{z'}}\left[G_1+G_2+G_3+\int_{\varepsilon}^1\left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'}Lny\,dy\right]$$

[۲۱]

$$G_1=\begin{cases}\frac{\varepsilon^{1-z'}}{1-z'}\left(LnE-\frac{1}{1-z'}\right)-\frac{E^{1-z'}}{1-z'}\left(LnE-\frac{1}{1-z'}\right) & z'\ne 1\\ \frac{1}{2}\left[(Ln\varepsilon)^2-(LnE)^2\right] & z'=1\end{cases}$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

$$G_2=\begin{cases}\dfrac{z'\varepsilon^{2-z'}}{z'-2}\left(\mathrm{Ln}\varepsilon-\dfrac{1}{2-z'}\right)-\dfrac{z'E^{2-z'}}{z'-2}\left(\mathrm{Ln}\varepsilon-\dfrac{1}{2-z'}\right) & z'\neq 2\\ -\left[(\mathrm{Ln}\varepsilon)^2-(\mathrm{LnE})^2\right] & z'=2\end{cases}$$

$$G_3=\begin{cases}\dfrac{z'(z'-1)\varepsilon^{3-z'}}{2(3-z')}\left(\mathrm{Ln}\varepsilon-\dfrac{1}{3-z'}\right)-\dfrac{z'(z'-1)E^{3-z'}}{2(3-z')}\left(\mathrm{LnE}-\dfrac{1}{3-z'}\right)\\ \dfrac{3}{2}\left[(\mathrm{Ln}\varepsilon)^2-(\mathrm{LnE})^2\right]\end{cases}$$

مقادیر J_1، J_2، J'_1 و J'_2 با استفاده از روابط ۲۰ و ۲۱ به دست می‌آیند.

در روش کلبی، مقدار z' براساس سرعت سقوط محاسبه می‌شود. بدین ترتیب که، ابتدا از روش آزمون و خطا مقدار z' برای اندازه ذرهٔ مبنا، یعنی اندازه ذره‌ای که بیشترین بار معلق و بار بستر متعلق به آن است، تعیین می‌گردد و سپس از رابطه ۲۲:

$$\frac{z'_i}{z'}=\left(\frac{\omega_i}{\omega}\right)^{0/7} \qquad [22]$$

مقدار z'_i برای سایر اندازهٔ ذرات محاسبه می‌شود. در این رابطه، ω_i و ω سرعت سقوط، به ترتیب برای اندازهٔ ذره i و اندازهٔ ذره مبنا می‌باشد. در مدل، مقدار ω یا سرعت سقوط، از رابطهٔ روبی (۴) به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\omega=\frac{\left(10/791D_i^3+36\nu^2\right)^{0/5}-6\nu}{D_i} \qquad [23]$$

که D_i اندازهٔ ذره برحسب متر، ν لزجی سینماتیک (m^2/sec)، و ω سرعت سقوط ذره D_i برحسب متر در ثانیه است. رابطهٔ ۲۳ برای ذرات با چگالی ۲/۶۵ و g=۹/۸۱ در سیستم متریک می‌باشد.

مقدار بار کل رسوب برای یک اندازهٔ مشخص در مدل، از یکی از روابط ۶ یا ۷، برحسب این که مقدار بار معلق یا بار بستر برای آن اندازهٔ ذره بزرگ‌تر باشد، محاسبه می‌شود.

داده‌های استفاده شده

برای بررسی دقت روش تصحیح شدهٔ اینشتین، داده‌های سه رودخانه به شرح زیر جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت.

الف) ایستگاه اهواز - رودخانه کارون. تعداد ۸۰ نمونه داده‌های رسوب مواد معلق، که به مدت هفت سال، در سال‌های ۱۳۶۷ الی ۱۳۷۴ برداشت شده است. نمونه‌هایی انتخاب شده‌اند که هم‌زمان با دبی جریان، مشخصات رسوب بستر و معلق، و هم‌چنین شیب سطح آب اندازه‌گیری شده است.

ب) ایستگاه حمیدیه - رودخانه کرخه. تعداد ۸۶ نمونه رسوب مواد معلق با مشخصاتی که اشاره شد، ودر سال‌های ۱۳۶۷ الی ۱۳۷۴ برداشت شده است.

ج) داده‌های بار بستر رودخانه ایست فورک در آمریکا، که توسط لئوپولد و امت (۸) اندازه‌گیری شده است.

توضیح این که، داده‌های الف و ب توسط اداره کل امور آب، سازمان آب و برق استان خوزستان برداشت شده و در اختیار نویسندگان قرار گرفته است. جزئیات بیشتر، و کلیه داده‌های مورد استفاده را می‌توان از پایان نامهٔ استاد عسگری (۱) استخراج کرد.

نتایج و بحث

از آن جا که روش تصحیح شدهٔ اینشتین نیاز به داده‌های متعددی دارد که همهٔ آنها به طور هم زمان در ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری نمی‌شود، و یا ممکن است با دقت مناسب اندازه‌گیری نشود، لذا ابتدا میزان حساسیت برآورد بار رسوب در میزان خطای ناشی از هر یک از متغیرها مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی تعداد ۲۰ نمونه از ایستگاه اهواز، که تقریباً به طور هم زمان اندازه‌گیری شده بودند، و شامل دبی‌های کم تا حداکثر می‌شدند، انتخاب گردید. نتیجهٔ این بررسی‌ها نشان داد که ۱۰ درصد خطا، در متغیرهایی چون درجه حرارت، D_{35} و D_{65}، عمق متوسط و سرعت جریان، تأثیر ناچیزی روی بار کل رسوب دارد. تغییر ضریب ϕ به اندازهٔ ۰/۱۵±، تنها باعث تغییر سه درصد در میزان بار کل رسوب گردید. هم چنین، خطای

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

۱۰± درصد در میزان z'، تنها ۰/۱± درصد در میزان بار کل رسوب تغییر ایجاد می‌کند. به ازای ۵۰ درصد تغییر در فاصله نمونه‌گیر از کف بستر (a')، میزان تغییر در بار کل رسوب تنها ۱/۲ درصد بوده است، و خطای ۵۰ درصد در میزان ضریب x تنها ۳/۵ درصد در بار بستر و ۰/۱ درصد در بار کل رسوب خطا ایجاد می‌کند. نتایج فوق برای رودخانهٔ کرخه نیز صادق است. دلیل این امر، عمیق بودن رودخانه و ریزدانه بودن رسوبات می‌باشد.

از طرفی، ملاحظه گردید که برای رودخانه‌هایی چون کارون و کرخه، که بار رسوبی آنها ریزدانه (ماسه و سیلت) است، نمی‌توان از روش کلبی و همبری (رابطه ۱۵) برای تعیین z'_i استفاده کرد، زیرا ω مربوط به اندازهٔ معرف رسوبات بسیار کوچک، و در نتیجه به استناد رابطه ۱۵، مقدار z'_i برای ذرات بار بستر خیلی زیاد به دست می‌آید، که منجر به خطای زیاد در محاسبه بار کل رسوب خواهد شد.

بار بستر

به منظور مقایسه نتایج حاصله از مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده بار بستر، تعداد ۴۵ نمونه داده‌های بار بستر رودخانه ایست فورک آمریکا استفاده شد. نتایج مدل با انتخاب درصدهای مختلفی از ϕ مورد بررسی قرار گرفت، که در این جا نتایج حاصل از به کار بردن $۰/۲\phi$، و $۰/۵\phi$ نشان داده می‌شود. این نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. بار بستر محاسبه شده در مقابل دبی جریان روی کاغذ لگاریتمی رسم، و ملاحظه گردید که برای دبی‌های کمتر از ۱۱ مترمکعب در ثانیه $۰/۲\phi$، و برای دبی‌های بالاتر از ۱۱ مترمکعب در ثانیه $۰/۵\phi$ مناسب است. به منظور نشان دادن میزان دقت روش به صورت کمی، از روش یانگ (۱۲) استفاده گردید. بدین ترتیب که نسبت بار بستر محاسبه شده به بار بستر اندازه‌گیری شده محاسبه می‌گردد. بدیهی است هرچه این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد، دقت برآورد روش بیشتر خواهد بود. میانگین و انحراف معیار این نسبت‌ها نیز محاسبه شد، که به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۰/۸۵ به دست آمد. این مقادیر در محدودهٔ دقت خوبی هستند (۱۲). شکل ۱ داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را در مقابل دبی جریان نشان می‌دهد.

بار کل رسوب

مقدار بار کل رسوب در روش تصحیح شدهٔ اینشتین و بر مبنای بار معلق Q'_s از رابطهٔ ۶ محاسبه می‌شود، که Q'_s مطابق رابطهٔ ۲، مستقیماً به غلظت مواد معلق و دبی جریان بستگی دارد. با استفاده از ۸۰ نمونه ایستگاه اهواز و ۸۶ نمونه داده ایستگاه حمیدیه، میزان بار کل رسوب با روش تصحیح شدهٔ اینشتین محاسبه گردید. از آن جا که در این روش میزان بار بستر به طور جداگانه نیز محاسبه می‌شود، سعی شده تا نسبت بار بستر محاسبه شده به بار معلق محاسبه گردد. این نسبت برای رودخانهٔ کارون بین حداقل صفر تا حداکثر ۱۱ درصد، و برای رودخانهٔ کرخه بین حداقل دو تا حداکثر هشت درصد به دست آمد. نتایج در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

با استفاده از نتایج مدل، روابطی بین بار بستر، بار معلق و بار کل رسوب، و دبی جریان در ایستگاه‌های اهواز و حمیدیه استخراج گردید، که در جدول ۴ ارائه شده است. شکل‌های ۲ و ۳ بار معلق اندازه‌گیری شده رودخانه کارون و کرخه را در مقابل دبی جریان نشان می‌دهند.

نتیجه گیری

استفاده از روش تصحیح شدهٔ اینشتین که توسط دفترفنی وزارت نیرو توصیه شده است، نیاز به صرف وقت زیادی دارد، که در این مطالعه برای سهولت، تسریع و دقت محاسبات یک مدل ریاضی ارائه گردید. برای کاربرد مدل در کلیهٔ رودخانه‌ها، از جمله رودخانه‌های عمیق و با بستر ریزدانه، مقادیر انتگرال‌های این روش با ترکیب روش تحلیلی و عددی حل گردیده است. در این مطالعه داده‌های سه رودخانه مورد استفاده قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل شد:

۱. روش تصحیح شدهٔ اینشتین با دقت خوبی مقدار بار بستر را

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

جدول ۱. داده‌های رودخانهٔ ایست فورک و محاسبه بار بستر با روش اصلاح شدهٔ اینشتین

شماره نمونه	دبی (مترمکعب‌درثانیه)	مساحت مقطع (مترمربع)	عمق (متر)	سرعت (متربرثانیه)	بار بستر اندازه‌گیری شده (تن در روز)	بار بستر محاسبه شده ضریب ۰/۲	بار بستر محاسبه شده ضریب ۰/۵	نسبت بار بستر اندازه‌گیری شده به محاسبه شده
۱	۲/۴	۴/۰۳	۰/۲۸	۰/۶۱	۲/۶	۶/۳		۰/۴۲
۲	۵/۳	۶/۹۹	۰/۴۸	۰/۷۶	۷/۱	۱۸/۰		۰/۳۹
۳	۵/۸	۷/۴۲	۰/۵۱	۰/۷۸	۶۱/۲	۱۷/۸		۳/۴۳
۴	۷/۰	۸/۴۵	۰/۵۸	۰/۸۳	۶/۰	۸/۴		۰/۷۱
۵	۷/۲	۸/۶۴	۰/۵۹	۰/۸۴	۴/۰	۱۰/۰		۰/۴۰
۶	۸/۲	۹/۴۷	۰/۶۵	۰/۸۷	۷/۸	۱۲/۳		۰/۶۳
۷	۹/۱	۱۰/۲۰	۰/۷۰	۰/۹۰	۹۹/۹	۳۱/۵		۳/۱۷
۸	۹/۹	۱۰/۸۰	۰/۷۴	۰/۹۲	۱۰۳/۹	۴۰/۴		۲/۵۷
۹	۱۰/۰	۱۰/۹۰	۰/۷۴	۰/۹۲	۱۰۲/۶	۴۴/۲		۲/۳۲
۱۰	۱۰/۱	۱۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۹۲	۱۳/۹	۱۹/۹		۰/۷۰
۱۱	۱۰/۱	۱۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۹۲	۱۲/۲	۱۴/۹		۰/۸۲
۱۲	۱۰/۷	۱۱/۴۰	۰/۷۸	۰/۹۴	۱۲۲/۷	۴۹/۵		۲/۴۸
۱۳	۱۰/۸	۱۱/۵۰	۰/۷۸	۰/۹۴	۲۴/۵	۲۱/۸		۱/۱۳
۱۴	۱۱/۳	۱۱/۸۰	۰/۸۱	۰/۹۶	۱۶/۸		۷۶/۴	۰/۲۲
۱۵	۱۲/۸	۱۲/۹۰	۰/۸۸	۰/۹۹	۱۳/۵		۳۷/۶	۰/۳۶
۱۶	۱۳/۱	۱۳/۱۰	۰/۹۰	۱/۰۰	۵۰/۱		۷۰/۵	۰/۷۱
۱۷	۱۴/۴	۱۴/۰۰	۰/۹۶	۱/۰۳	۴۴/۰		۸۵/۵	۰/۵۱
۱۸	۱۵/۸	۱۵/۰۰	۱/۰۲	۱/۰۶	۳۴/۹		۴۸/۴	۰/۷۲
۱۹	۱۵/۹	۱۵/۰۰	۱/۰۳	۱/۰۶	۳۲/۹		۱۳۰/۰	۰/۲۵
۲۰	۱۶/۱	۱۵/۲۰	۱/۰۴	۱/۰۶	۲۴/۰		۶۲/۵	۰/۳۸
۲۱	۱۶/۱	۱۵/۲۰	۱/۰۴	۱/۰۶	۲۴/۸		۱۳۲/۲	۰/۱۹
۲۲	۱۶/۶	۱۵/۵۰	۱/۰۶	۱/۰۷	۳۰/۴		۱۵۱/۴	۰/۲۰
۲۳	۱۷/۸	۱۶/۳۰	۱/۱۱	۱/۰۹	۲۹/۷		۱۱۲/۰	۰/۲۶
۲۴	۱۹/۲	۱۷/۱۰	۱/۱۷	۱/۱۹	۲۷/۶		۲۵۶/۲	۰/۱۱
۲۵	۲۰/۰	۱۷/۷۰	۱/۲۱	۱/۱۳	۳۹۳/۹		۱۳۹/۹	۲/۸۲
۲۶	۲۱/۵	۱۸/۶۰	۱/۲۷	۱/۱۶	۴۰/۱		۱۱۲/۰	۰/۳۶
۲۷	۲۱/۵	۱۸/۶۰	۱/۲۷	۱/۱۵	۲۲۱/۹		۱۹۶/۳	۱/۱۳
۲۸	۲۱/۷	۱۸/۷۰	۱/۲۸	۱/۱۶	۱۰۵/۸		۱۳۱/۵	۰/۸۰
۲۹	۲۲/۲	۱۹/۰۰	۱/۳۰	۱/۱۷	۱۰۰/۵		۱۵۸/۹	۰/۶۳
۳۰	۲۲/۹	۱۹/۴۰	۱/۳۳	۱/۱۸	۸۱/۷		۲۰۴/۹	۰/۴۰
۳۱	۲۳/۱	۱۹/۵۰	۱/۳۴	۱/۱۸	۲۷۳/۲		۱۷۷/۰	۱/۵۴
۳۲	۲۴/۳	۲۰/۲۰	۱/۳۸	۱/۲۰	۲۶/۱		۲۲۷/۷	۰/۱۱
۳۳	۲۴/۳	۲۰/۲۰	۱/۳۸	۱/۲۰	۱۰۵/۸		۱۷۱/۱	۰/۶۲
۳۴	۲۴/۸	۲۰/۵۰	۱/۴۰	۱/۲۱	۲۶۲/۱		۱۶۹/۶	۱/۵۵
۳۵	۲۵/۵	۲۰/۹۰	۱/۴۳	۱/۲۲	۱۶/۴		۲۱۶/۶	۰/۰۷
۳۶	۲۵/۶	۲۱/۰۰	۱/۴۴	۱/۲۲	۲۱۶/۱		۱۸۹/۸	۱/۱۵
۳۷	۲۵/۷	۲۱/۱۰	۱/۴۴	۱/۲۲	۱۱۶/۹		۱۷۲/۳	۰/۶۸
۳۸	۲۶/۵	۲۱/۵۰	۱/۴۷	۱/۲۳	۳۸/۶		۲۲۸/۴	۰/۱۷
۳۹	۲۷/۹	۲۲/۳۰	۱/۵۲	۱/۲۵	۳۶/۲		۲۵۴/۱	۰/۱۴
۴۰	۲۹/۰	۲۲/۹۰	۱/۵۷	۱/۲۷	۱۴۹/۸		۱۷۷/۰	۰/۸۵
۴۱	۲۹/۷	۲۳/۳۰	۱/۵۹	۱/۲۷	۲۱/۸		۲۴۰/۹	۰/۰۹
۴۲	۲۹/۸	۲۳/۴۰	۱/۶۰	۱/۲۸	۲۸۴/۳		۳۳۲/۰	۰/۸۶
۴۳	۳۰/۳	۲۳/۶۰	۱/۶۲	۱/۲۸	۱۴۹/۸		۱۹۸/۲	۰/۷۶
۴۴	۳۲/۲	۲۴/۶۰	۱/۶۸	۱/۳۱	۹۹/۳		۳۱۲/۴	۰/۳۲
۴۵	۴۱/۵	۲۹/۵۰	۲/۰۱	۱/۴۱	۳۶۷/۵		۳۲۰/۰	۱/۱۵
							میانگین	۰/۸۷
							انحراف‌استاندارد	۰/۸۵
							ضریب تغییرات	۰/۹۷

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

جدول ۲. داده‌های ایستگاه اهواز بر روی رودخانه کارون و محاسبه بار رسوب آن

شماره نمونه	اندازه‌گیری شده Q (مترمکعب درثانیه)	اندازه‌گیری شده Q_s (تن در روز)	محاسبه شده Q_b (تن در روز)	محاسبه شده Q_t (تن در روز)	شماره نمونه	اندازه‌گیری شده Q (مترمکعب‌درثانیه)	اندازه‌گیری شده Q_s (تن در روز)	محاسبه شده Q_b (تن در روز)	محاسبه شده Q_t (تن در روز)
۱	۱۲۳۳	۷۶۴۸۹	۸۸۰	۸۴۲۳۸	۴۱	۳۴۶۲	۱۵۴۹۴۲	۳۶۱۹	۱۷۱۸۹۲
۲	۴۱۴	۴۹۳۶	۱۰۸	۵۵۰۴	۴۲	۱۸۲۱	۵۹۶۳۰	۱۸۶۴	۶۸۱۵۸
۳	۴۱۹	۳۷۲۹	۲۱۵	۴۵۴۲	۴۳	۱۹۸۸	۸۹۳۱۷	۱۷۸۶	۹۸۴۶۸
۴	۴۹۵	۴۹۶۱	۱۶۵	۵۶۵۱	۴۴	۲۷۶۰	۲۳۵۶۰۲	۳۰۰۷	۲۵۹۲۹۴
۵	۶۸۹	۸۶۳۲	۳۷۰	۱۰۱۵۴	۴۵	۹۸۲	۷۹۰۷۵	۱۲۱۷	۸۷۲۷۸
۶	۱۲۰۴	۷۸۹۵۵	۱۲۴۹	۸۹۰۰۰	۴۶	۷۸۲	۲۵۴۰۴	۶۶۵	۲۸۵۵۹
۷	۶۷۵	۱۷۹۰۴	۳۵۱	۲۰۱۹۵	۴۷	۹۰۵	۸۵۴۶۴	۸۲۱	۹۱۸۹۳
۸	۱۲۳۸	۴۷۱۷۱	۱۲۶۴	۵۳۶۱۰	۴۸	۷۶۴	۸۴۷۰۳۵	۵۷۹	۸۵۲۱۰۱
۹	۸۹۸	۳۱۱۹۰	۶۳۱	۳۵۲۴۷	۴۹	۳۹۸	۲۴۰۷	۱۵۰	۲۹۴۳
۱۰	۹۰۵	۱۰۶۷۳۲	۶۵۴	۱۱۲۶۸۴	۵۰	۴۱۵	۸۵۳۴	۱۵۰	۹۳۷۳
۱۱	۸۵۶	۱۱۴۳۴۰	۵۱۱	۱۱۹۴۵۰	۵۱	۲۸۵	۳۴۷۲	۶۴	۳۷۹۸
۱۲	۴۰۵	۳۴۹۹	۱۴۰	۴۰۶۰	۵۲	۲۵۶	۳۲۹۶	۴۳	۳۵۴۷
۱۳	۵۷۴	۱۱۶۰۵	۳۲۶	۱۳۱۶۸	۵۳	۳۹۸	۲۹۹۲	۱۷۴	۳۶۴۰
۱۴	۴۰۲	۶۵۹۹	۱۲۱	۷۲۲۸	۵۴	۳۸۷	۸۸۹۴	۱۱۳	۹۵۹۱
۱۵	۳۹۲	۴۴۰۳	۱۱۹	۴۹۵۲	۵۵	۳۵۹	۲۰۰۶۸	۲۲۸	۲۱۴۸۷
۱۶	۴۹۵	۸۲۹۷	۲۰۷	۹۳۲۱	۵۶	۱۸۸	۷۸۰	۸۲	۹۷۵
۱۷	۵۰۹	۷۴۳۲	۱۶۱	۸۳۹۸	۵۷	۳۳۰	۲۸۵۱	۲۱۷	۳۶۱۵
۱۸	۶۷۳	۸۴۳۱	۲۸۸	۹۷۰۶	۵۸	۳۹۹	۱۴۶۵۱	۱۳۸	۱۵۵۷۴
۱۹	۴۵۱	۴۴۰۸	۱۴۰	۴۹۶۷	۵۹	۲۵۵	۱۷۴۱	۴۱	۱۹۱۷
۲۰	۵۵۹	۹۸۰۴	۲۳۸	۱۱۱۸۲	۶۰	۳۷۲	۳۳۷۵	۱۰۷	۳۸۸۰
۲۱	۵۹۹	۷۰۹۰	۴۸۱	۹۰۲۹	۶۱	۳۱۱	۱۵۵۸	۸۱	۱۸۶۱
۲۲	۸۷۸	۱۲۰۶۲	۵۴۰	۱۴۲۹۸	۶۲	۳۴۹	۲۰۸۱	۹۱	۲۴۳۴
۲۳	۳۱۵۶	۱۱۲۸۸۹	۲۷۱۴	۱۲۵۶۶۵	۶۳	۴۷۸	۱۵۷۷۶	۲۱۲	۱۷۱۱۴
۲۴	۲۷۵۸	۶۹۴۱۴۲	۲۶۴۶	۷۲۷۱۴۴	۶۴	۸۵۵	۳۳۷۶۰	۸۹۳	۳۹۱۲۲
۲۵	۲۵۱۳	۱۱۲۴۶۹	۲۲۷۵	۱۲۳۷۵۳	۶۵	۶۰۶	۲۲۵۱۰	۵۰۴	۲۵۶۱۰
۲۶	۳۵۴۶	۱۷۲۶۴۲۰	۳۴۳۶	۱۷۷۳۳۶۴	۶۶	۸۹۵	۷۹۸۰۲	۹۱۵	۸۶۶۰۲
۲۷	۳۴۰۴	۷۹۸۲۰۳	۳۳۰۳	۸۳۴۵۳۶	۶۷	۱۰۱۸	۶۴۸۲۳	۱۱۳۳	۷۳۳۷۵
۲۸	۳۰۵۹	۱۲۱۸۶۷۶	۳۵۰۷	۱۲۵۸۲۲۸	۶۸	۲۴۸۲	۱۶۳۲۰۰۹	۳۵۴۱	۱۶۸۳۳۴۵۹
۲۹	۵۱۲	۱۰۳۰۷	۲۱۴	۱۱۶۸۱	۶۹	۴۳۴	۱۱۵۴۹	۱۸۱	۱۲۵۸۷
۳۰	۲۹۶	۵۱۹۲	۳۵	۵۴۱۶	۷۰	۳۲۴	۹۳۲۲	۷۴	۹۸۱۳
۳۱	۳۴۶	۸۴۰۰	۱۲۸	۹۱۴۵	۷۱	۳۳۶	۶۹۳۸	۷۴	۷۳۹۰
۳۲	۱۰۰۹	۳۱۳۸۴	۸۵۴	۳۵۸۷۱	۷۲	۳۴۲	۱۰۵۱۹	۷۷	۱۱۰۵۴
۳۳	۷۷۴	۵۹۲۲۱	۵۷۳	۶۳۷۰۰	۷۳	۴۳۴	۱۶۳۸۶	۱۹۵	۱۷۵۸۱
۳۴	۲۷۷	۱۹۶۲	۴۷	۲۱۹۵	۷۴	۵۵۱	۲۶۲۷۹	۳۵۷	۲۸۹۲۵
۳۵	۳۴۶	۱۳۴۷	۹۱	۱۶۶۲	۷۵	۹۳۸	۴۷۴۱۰	۹۶۲	۵۳۵۵۶
۳۶	۲۹۴	۲۱۸۵	۵۹	۲۴۵۶	۷۶	۶۲۱	۲۵۵۹۳	۴۴۸	۲۸۵۷۹
۳۷	۲۸۰	۱۲۵۸	۵۷	۱۴۶۶	۷۷	۶۴۵	۳۱۳۱۹	۴۹۱	۳۴۶۱۶
۳۸	۳۹۰	۳۲۰۱	۸۶	۳۶۲۹	۷۸	۴۸۸	۶۴۹۳۱	۲۵۶	۶۷۰۳۴
۳۹	۲۵۸	۱۸۷۲	۳۲	۲۰۴۰	۷۹	۳۹۵	۱۸۸۰۴	۱۵۴	۱۹۸۲۱
۴۰	۱۶۲۱	۹۴۸۱۷	۱۲۲۲	۱۰۵۵۷۱	۸۰	۴۸۲	۱۶۵۳۳	۱۸۸	۱۷۷۱۶

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

جدول ۳. داده‌های ایستگاه حمیدیه بر روی رودخانه کرخه و محاسبه بار رسوب آن

شماره نمونه	اندازه‌گیری شده Q (مترمکعب درثانیه)	اندازه‌گیری شده Q_s (تن در روز)	محاسبه شده Q_b (تن در روز)	محاسبه شده Q_t (تن در روز)	شماره نمونه	اندازه‌گیری شده Q (مترمکعب‌در ثانیه)	اندازه‌گیری شده Q_s (تن در روز)	محاسبه شده Q_b (تن در روز)	محاسبه شده Q_t (تن در روز)
۱	۵۰	۳۵۱	۲	۳۷۶	۴۴	۷۵	۷۰۰۸	۵۲	۷۷۲۹
۲	۴۱	۲۶۱	۰	۲۷۴	۴۵	۳۱	۱۶۰	۵	۱۹۷
۳	۵۹	۷۹۵	۲	۸۳۷	۴۶	۴۲	۵۸۶	۸	۶۷۲
۴	۱۷۴	۲۷۳۴۲	۷۱	۲۸۷۹۴	۴۷	۲۸	۲۵۸	۰	۲۷۷
۵	۴۴۳	۸۲۲۷۹	۲۴۱	۸۶۱۶۳	۴۸	۲۶	۳۳۱	۱	۳۶۳
۶	۴۳۲	۱۳۷۲۶۷	۴۰۳	۱۴۴۱۵۱	۴۹	۲۴	۹۶	۱	۱۱۰
۷	۳۰۸	۱۶۰۴۳	۲۲۸	۱۷۹۳۳	۵۰	۲۱	۱۰۰	۰	۱۰۹
۸	۲۷۸	۱۸۵۸۳	۱۸۴	۲۹۳۹۹	۵۱	۱۳۹	۴۹۱۴	۱۱۸	۵۸۴۸
۹	۴۱۰	۵۸۰۷۵	۲۱۴	۶۱۲۱۵	۵۲	۲۵۳	۱۸۱۵۸	۳۹۱	۲۱۷۰۳
۱۰	۴۶۵	۸۳۰۶۳	۹۲	۸۵۱۱۸	۵۳	۲۷۲	۶۴۴۹۶	۴۷۵	۷۱۸۱۴
۱۱	۳۸۲	۹۹۶۱۰	۶۹	۱۰۱۵۱۰	۵۴	۳۶۹	۱۷۷۵۶۱	۵۲۹	۱۹۰۰۲۶
۱۲	۵۲	۴۵۳	۲۷	۵۸۷	۵۵	۸۳	۶۵۰	۳۷	۸۲۲
۱۳	۴۲	۱۷۸	۱۰	۲۲۷	۵۶	۷۷	۱۵۶۴	۵۵	۱۸۹۸
۱۴	۴۱	۱۷۱	۵	۲۰۰	۵۷	۲۵۵	۴۳۶۴۹	۵۰۹	۴۹۶۵۹
۱۵	۳۳	۱۵۵	۰	۱۶۴	۵۸	۵۴۸	۵۸۷۴۳۷	۱۴۱۸	۶۲۴۳۶۲
۱۶	۵۱	۱۶۱	۳	۱۷۹	۵۹	۶۴	۵۴۸	۱۲	۶۳۱
۱۷	۲۱۶	۲۰۳۲۳	۲۰۵	۲۲۶۲۹	۶۰	۵۴	۳۴۳	۵	۳۸۳
۱۸	۲۷۴	۳۴۳۸۹	۲۵۸	۳۷۶۰۵	۶۱	۵۳	۸۸۵	۶	۹۶۰
۱۹	۳۲۴	۴۹۳۱۴	۵۴۸	۵۵۲۰۸	۶۲	۶۵	۴۹۷۷	۹	۵۲۷۰
۲۰	۱۴۸	۳۲۵۰	۷۸	۳۷۴۸	۶۳	۴۱	۴۵۶	۱	۴۸۷
۲۱	۱۵۰	۵۳۴۹	۵۴	۵۸۸۹	۶۴	۳۲	۱۰۴	۰	۱۱۳
۲۲	۵۲	۴۸۷	۱۱	۵۷۵	۶۵	۳۱	۱۰۰۴	۰	۱۰۶۸
۲۳	۴۷	۱۷۴	۷	۲۱۴	۶۶	۴۳	۱۰۷۱	۲	۱۱۴۶
۲۴	۳۹	۱۹۱	۲	۲۱۴	۶۷	۵۰	۷۷۸	۳	۸۳۶
۲۵	۶۷	۵۹۳	۱۱	۶۴۳	۶۸	۱۴۴	۷۸۷۶	۶۹	۸۶۷۹
۲۶	۷۰	۷۳۵	۲۳	۸۶۹	۶۹	۲۳۰	۳۳۴۲۵	۱۱۳	۳۵۷۶۳
۲۷	۲۴۹	۳۰۱۶۳	۲۷۸	۳۳۵۳۰	۷۰	۴۸۱	۱۴۴۳۸۷	۴۳۷	۱۵۱۹۴۸
۲۸	۴۳۶	۹۹۸۲۹	۴۸۵	۱۰۷۰۵۶	۷۱	۱۳۷	۵۴۶۹	۶۶	۶۱۲۶
۲۹	۴۶۷	۲۵۵۹۹۱	۷۶۶	۲۷۱۱۵۲	۷۲	۱۲۴	۶۱۸۴	۳۰	۶۷۰۰
۳۰	۱۱۲۳	۱۶۶۸۱۸۴	۲۳۰۸	۱۷۴۱۱۲۵	۷۳	۲۴۱	۴۱۸۲۲	۱۴۱	۴۴۵۴۵
۳۱	۶۲۹	۳۲۱۶۷۳	۸۴۵	۳۳۷۶۴۰	۷۴	۸۷	۱۱۵۱۶۳	۶۱	۱۲۳۲۶۲
۳۲	۱۸۴	۱۲۵۷۸	۸۶	۱۳۷۳۲	۷۵	۴۲	۶۸۹	۷	۷۸۰
۳۳	۱۶۴	۲۴۹۱۲	۲۵۴	۲۸۰۳۹	۷۶	۴۲	۱۵۷۰	۶	۱۷۲۰
۳۴	۱۵۰	۸۵۹۳	۳۵۸	۱۱۰۷۰	۷۷	۳۸	۱۳۸۳	۵	۱۵۲۷
۳۵	۳۱	۳۲۰	۲۱	۴۴۵	۷۸	۳۵	۱۳۸۱	۳	۱۵۱۸
۳۶	۳۹	۲۵۲	۲۰	۳۵۵	۷۹	۳۹	۱۳۱۰	۵	۱۴۴۵
۳۷	۵۶	۷۴۲	۲۵	۹۱۰	۸۰	۵۲	۱۶۱۵	۸	۱۷۷۱
۳۸	۱۱۰	۲۰۰۲	۱۳۷	۲۷۵۳	۸۱	۸۸	۲۸۶۷	۳۳	۳۱۹۹
۳۹	۲۳۷	۱۶۸۲۸	۲۵۶	۱۹۳۶۶	۸۲	۴۸۷	۵۱۶۵۷	۵۹۹	۵۶۷۳۹
۴۰	۱۲۸۲	۱۱۰۳۷۴۳	۱۸۷۸	۱۱۴۹۰۶۶	۸۳	۱۱۹	۵۰۱۴	۲۲۳	۶۵۶۴
۴۱	۶۹۱	۲۰۳۸۹۸	۸۱۳	۲۱۶۱۹۸	۸۴	۱۴۴	۷۴۴۳	۲۴۳	۹۲۹۸
۴۲	۸۱۵	۹۰۶۵۸۳	۲۰۳۵	۹۵۹۷۸۷	۸۵	۹۱	۲۹۴۲	۲۴۱	۴۰۸۹
۴۳	۱۲۵	۴۷۰۹	۷۳	۵۴۲۶	۸۶	۶۲	۱۲۲۹	۷۴	۱۶۱۵

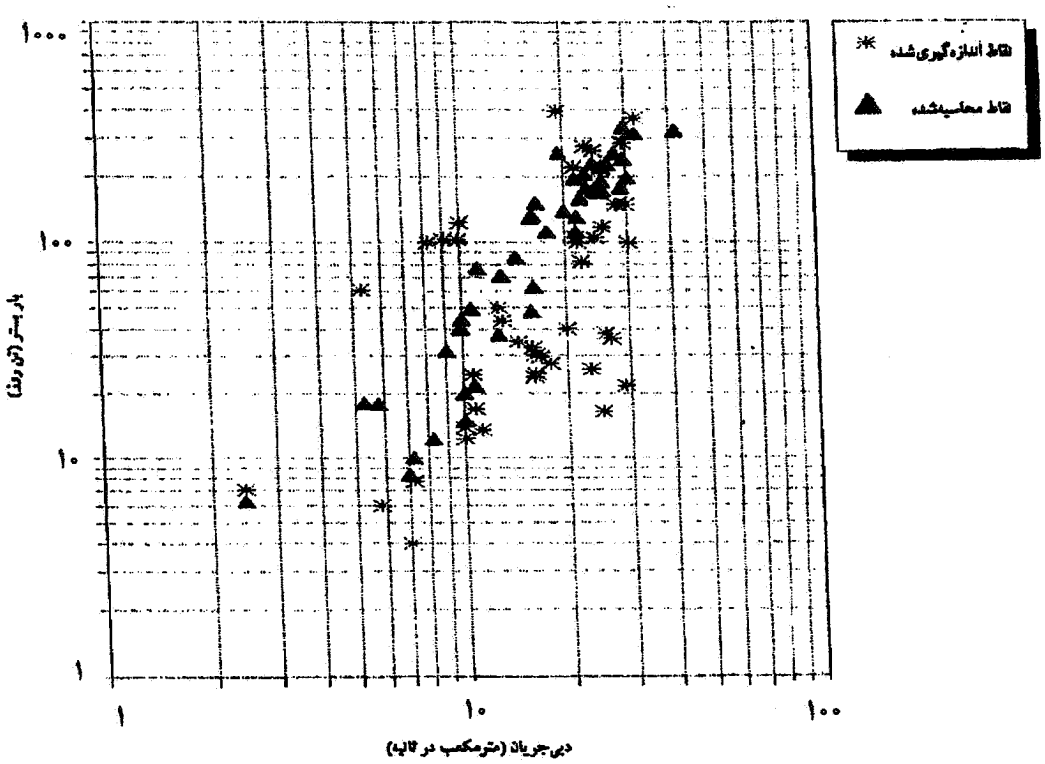
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

جدول ۴. روابط بار رسوبی و دبی جریان در ایستگاه‌های اهواز و حمیدیه

نام ایستگاه	بار بستر و دبی جریان	بار معلق و دبی جریان	بار کل و دبی جریان
اهواز، بر روی رودخانه کارون	$Q_b=۰/۰۰۶Q^{۱/۶۸}$	$Q_s=۰/۰۱۷Q^{۲/۱۵}$	$Q_t=۰/۰۲۱Q^{۲/۱۴}$
(۸۰ نمونه)	$R^۲=۰/۸۲$	$R^۲=۰/۸۸$	$R^۲=۰/۷۹$
حمیدیه، بر روی رودخانه کرخه	$Q_b=۰/۰۰۱Q^{۲/۲۱}$	$Q_s=۰/۰۹Q^{۲/۳۲}$	$Q_t=۰/۱۰Q^{۲/۳۰}$
(۸۶ نمونه)	$R^۲=۰/۷۳$	$R^۲=۰/۹۵$	$R^۲=۰/۹۰$

Q = دبی جریان (مترمکعب در ثانیه)، Q_b = بار بستر (تن در روز)، Q_s = بار معلق (تن در روز) و Q_t = بار کل (تن در روز)



شکل ۱. بار بستر (اندازه‌گیری شده و محاسبه شده) در مقابل دبی جریان رودخانه ایست فورک

پیش بینی می‌کند.

۲. ضریب ϕ که توسط کلبی و همبری برابر ۰/۵ و ثابت در نظر گرفته شده است، در همهٔ رودخانه‌ها ثابت نبوده و به دبی جریان بستگی دارد.

۳. مقدار z' در رودخانه‌های عمیق با بستر رسوبی ریزدانه را نمی‌توان از رابطه نسبت سرعت سقوط، که توسط کلبی و همبری ارائه شده است، به دست آورد.

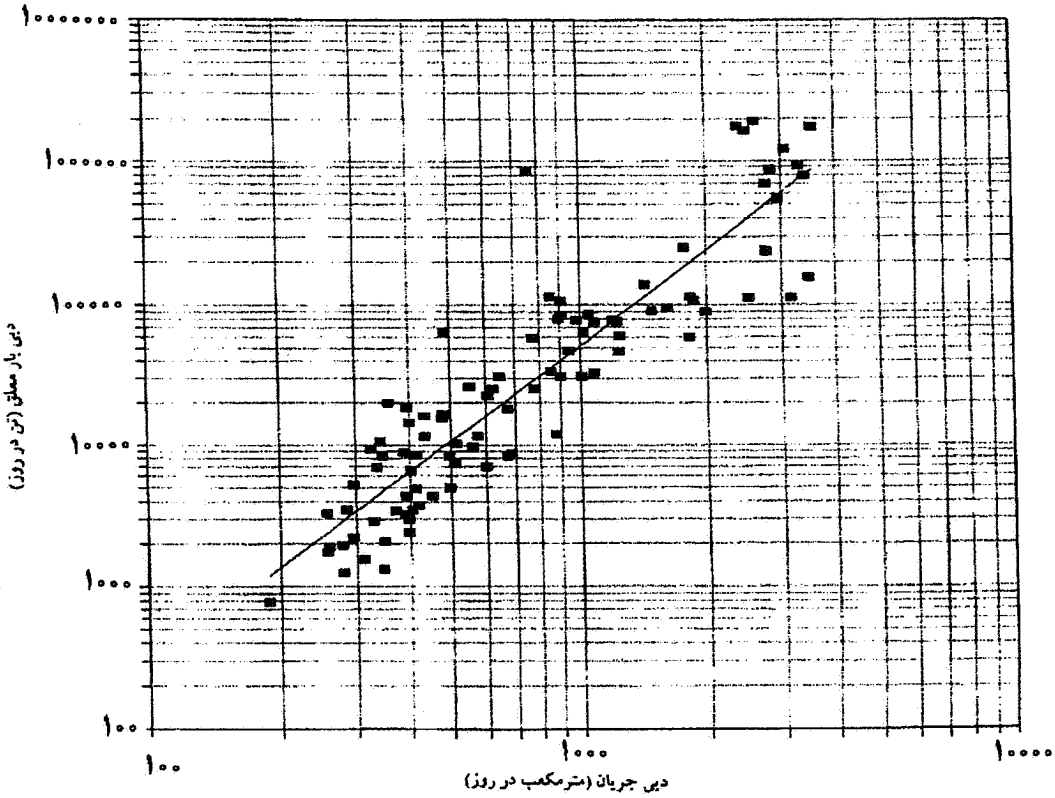
۴. کاربرد روش تصحیح شدهٔ اینشتین در ایستگاه‌های اهواز و حمیدیه نشان داد که نسبت بار بستر به بار معلق ثابت نبوده و مقدار آن بین صفر تا حداکثر ۱۱ درصد متغیر است.

سپاسگزاری

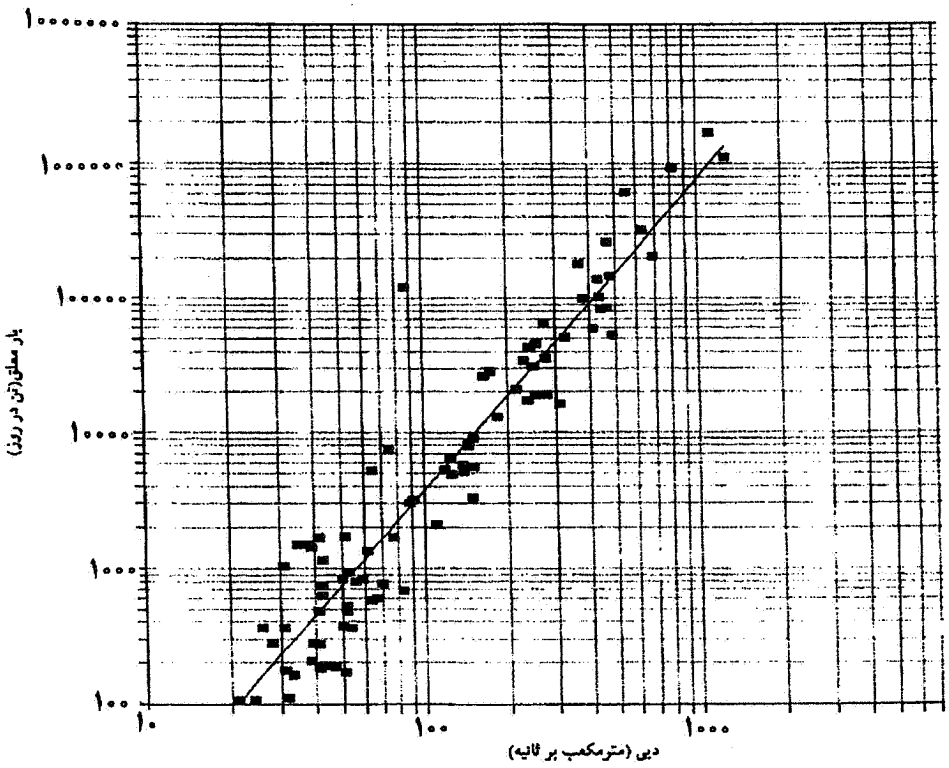
از اداره کل امور آب استان خوزستان به خاطر در اختیار دادن داده‌های آب‌سنجی مورد نیاز، و از شرکت مهندسین مشاور دزآب به خاطر تأمین بخشی از کمک‌های مالی این مطالعه تشکر و قدردانی می‌شود.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]



شکل ۲. رابطهٔ دبی مواد رسوبی معلق با دبی جریان رودخانهٔ کارون در ایستگاه اهواز



شکل ۳. رابطهٔ دبی مواد رسوبی معلق با دبی جریان رودخانهٔ کرخه در ایستگاه حمیدیه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]

منابع مورد استفاده

۱. استاد عسگری، م. ۱۳۷۶. بررسی عملکرد روش تصحیح شدهٔ اینشتین در برآورد بار کل رسوب رودخانه‌های کارون و کرخه در ایستگاه‌های اهواز و حمیدیه. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته تأسیسات آبیاری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲. حبیبی، م. ۱۳۷۳. پیشنهاد یک روش عددی مرکب برای محاسبهٔ انتگرال‌های اینشتین. سومین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳. دفتر فنی امور آب. ۱۳۷۶. محاسبهٔ بار کل رسوب با استفاده از روش تصحیح شدهٔ اینشتین (موسوم به روش Step Method). استاندارد آب، شماره ۵۶.

۴. شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۸. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۹۰ صفحه.

5. Colby. B. R. and C. H. Hemleer. 1955. Computation of total sediment discharge, Niobana River near Cody. Nebraska. USGS, Water Supply Paper No. 1357.

6. Colby, B. R. and D. W. Hulbell. 1961. Simplified methods for computation of total sediment discharge with the modified Einstein procedure. USGS. Water Supply Paper 1593.

7. Einstein H. A. 1950. The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Technical Buletin 1926, USDA, SCS, Washington, D. C.

8. Leopold, L. B. and W. W. Emnet. 1976. Bed load measurements, East Fork River, Wyoming, Department of Geology and Geophysics, University of California, Berkley, USA.

9. Nakato, T. 1994. Numerical integration of Einstein's integrals, I_1 and I_2. J. Hyd. Engin. 110(12): 1863-1868.

10. Simons, D. B. and E. Sentra. 1992. Sediment Transport Technology. Book Craters Inc., Chelsea, Michigan, U.S.A.

11. Yang, C. T. 1996. Sediment Transport: Theory and Practice. McGraw-Hill, New York, U.S.A.

12. Yang, C. T. and S. Wan. 1991. Comparison of selected bed material load formula. J. Hyd. Engin. 117(8): 973-989.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1379.4.2.3.8]