

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

محمود شفاعی بچستان<sup>۱</sup> و منصور استادعسگری<sup>۲</sup>

### چکیده

کاربرد روش تصحیح شده 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  $\phi$  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  $\phi$ ، در برآورد بار رسوب مورد مطالعه قرار گرفت. از آن جا که روش تصحیح شده اینشتین، میزان بار بستر را نیز جداگانه محاسبه می‌کند، سعی گردید تا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده قبلی از رودخانه‌های آمریکا، دقت روش در برآورد میزان بار بستر مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مقاله نحوه 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 کلیه 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 مهندسی مشاور دزآب، اهواز

$$Q'_{si} = i_s \gamma C'_s Q \left[ (1 - E') - \frac{2}{3} \frac{E' \log E'}{P_m - 1} \right] \quad [2]$$

در روابطه فوق،  $C'_s$  مقدار غلظت مواد معلق اندازه گیری شده،  $\gamma$  وزن واحد حجم آب،  $Q$  دبی جریان،  $i_s$  درصد اندازه ذرات رسوب معلق به اندازه  $D_i$ ، و  $E'$  برابر  $a'/d$  است، که  $a'$  فاصله نمونه بردار معلق تا بستر رودخانه، و  $d$  عمق رودخانه می باشد، و مقدار  $P_m$  از رابطه ۳ به دست می آید:

$$P_m = \frac{2/3 \log \frac{30/\gamma x d}{D_{65}}}{D_{65}} \quad [3]$$

که در آن  $D_{65}$  اندازه ذره رسوبی که ۶۵ درصد ذرات کوچک تر از آن می باشند، و  $x$  متغیری است که در رابطه توزیع لگاریتمی سرعت اینشتین (۷) می باشد و با سعی و خطا و با داشتن لزجی مایع به دست می آید. مقدار  $x$  برای جریان های با بستر زیر برابر واحد است.

مقدار بار بستر  $[q_b]$  را نیز می توان از رابطه ۴ به صورت زیر محاسبه کرد:

$$i_b q_b = \frac{1}{\gamma} \phi i_b \gamma_s \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1} \sqrt{g D_i^3} \quad [4]$$

که در آن  $i_b$  درصد ذرات رسوب بستر به اندازه  $D_i$ ،  $\gamma_s$  وزن واحد حجم ذرات رسوب،  $g$  شتاب ثقل و  $\phi$  شدت بار بستر است که برحسب  $\psi$  (شدت تنش)، از منحنی که توسط اینشتین ارائه شده (۷)، به دست می آید. مقدار  $\psi$  بزرگ ترین مقداری است که از یکی از روابط ۵ حاصل می شود (۷):

$$\psi = \frac{\left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) D_{35}}{R' S} \quad [5]$$

$$\psi = \frac{0.4 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) D_m}{R' S}$$

که در آن  $D_m$  اندازه میانه ذرات رسوب،  $R'$  شعاع هیدرولیکی ذره و  $S$  شیب خط انرژی یا شیب سطح آب می باشد. مقدار بار

اموضوعات مهم و مطرح در علم هیدرولیک است. در دهه های اخیر، رابطه های متعددی در این زمینه ارائه شده است. تعدادی از این روش ها فقط بار بستر، تعدادی فقط بار معلق، و تعدادی نیز مجموع بار بستر و بار معلق را، که بار مواد بستر نامیده می شود، برآورد می کنند. عمده این روش ها براساس کارهای آزمایشگاهی بنا گردیده و کاربرد آنها همیشه در عمل مورد سؤال بوده است.

یکی از روش های برآورد بار کل رسوب، روش تصحیح شده اینشتین است، که توسط کلبی و همبری (۵)، براساس روش اصلی اینشتین (۷) ارائه گردیده و عملکرد آن در رودخانه های نبراسکا در کشور آمریکا، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این روش، برای نزدیک کردن داده های به دست آمده و اندازه گیری شده، ضریب  $\phi$  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 وقت گیر بودن روش، به خاطر استفاده از منحنی های متعدد، و از آن جا که عملکرد این روش در هیچ یک از رودخانه های 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 داده های بار معلق رودخانه های کارون و کرخه در ایستگاه های اهواز و حمیدیه، و داده های بار بستر رودخانه ایست فورک آمریکا، با روش تصحیح شده اینشتین ارزیابی و دقت روش بررسی گردید.

#### روش تصحیح شده اینشتین

در روش تصحیح شده اینشتین، مقدار دبی رسوب معلق در واحد عرض رودخانه در منطقه نمونه برداری شده ( $Q'_s$ )، از رابطه ۱ به دست می آید (۵ و ۶):

$$Q'_s = \sum Q'_{si} = C'_s \gamma Q \quad [1]$$

که در آن  $Q'_{si}$  دبی رسوب معلق برای ذرات رسوبی به اندازه  $D_i$  می باشد، که از رابطه ۲ استخراج می شود:

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 شده 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. اندازه  $D_{۳۵}$  و  $D_{۶۵}$  با فرض توزیع نیمه لگاریتمی دانه‌بندی ذرات رسوب، از روابط زیر استخراج می‌گردد:

$$D_{۳۵} = \text{EXP} \left[ D_۱ D_۲ - \frac{(B_{۱۲} - ۰/۳۵) (\text{Ln} D_۲ - \text{Ln} D_۱)}{B_{۱۲} - B_{۱۱}} \right] \quad [۱۳]$$

$$D_{۶۵} = \text{EXP} \left[ D_۱ D_۲ - \frac{(B_{۱۲} - ۰/۶۵) (\text{Ln} D_۲ - \text{Ln} D_۱)}{B_{۱۲} - B_{۱۱}} \right] \quad [۱۴]$$

که در آن  $B_{۱۲}$  و  $B_{۱۱}$  درصد مواد بستر کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از  $D_{۳۵}$  یا  $D_{۶۵}$  و  $D_۱$  و  $D_۲$  اندازه ذرات کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از  $D_{۳۵}$  یا  $D_{۶۵}$  می‌باشد. مقدار لزجی سینماتیکی براساس درجه حرارت آب، به صورت رابطه زیر است:

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

که در آن  $T_e$  درجه حرارت آب برحسب سانتی‌گراد، و  $I$  لزجی سینماتیکی برحسب مترمربع در ثانیه می‌باشد.  $x$  متغیری است در رابطه توزیع لگاریتمی اینشتین برحسب  $M = D_{۶۵}/\delta$  ( $\delta$  ضخامت زیرلایه ورقه‌ای است)، و از منحنی ارائه شده توسط اینشتین به دست می‌آید. در مطالعه حاضر، معادلات زیر

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

$$Q_T = Q_{si}' \frac{P_m J_۱ + J_۲}{P_m J_۱ + J_۲} \quad [۶]$$

$$Q_T = i_b Q_b (P_m I_۱ + I_۲ + ۱) \quad [۷]$$

که در آن  $Q_b = B q_b$ ،  $B$  عرض رودخانه و  $q_b$  دبی بار بستر در واحد عرض رودخانه است.  $I_۱$ ،  $I_۲$ ،  $J_۱$  و  $J_۲$  دارای معادلات انتگرال به صورت زیر می‌باشند:

$$I_۱ = ۰/۲۱۶ \frac{E^{z'-۱}}{(۱-E)^{z'}} \int_E^1 \left( \frac{۱-y}{y} \right)^{z'} dy \quad [۸]$$

$$I_۲ = ۰/۲۱۶ \frac{E^{z'-۱}}{(۱-E)^{z'}} \int_E^1 \left( \frac{۱-y}{y} \right)^{z'} \text{Ln} y dy \quad [۹]$$

$$J_۱ = \int_E^1 \left( \frac{۱-y}{y} \right)^{z'} dy \quad [۱۰]$$

$$J_۲ = \int_E^1 \left( \frac{۱-y}{y} \right)^{z'} \text{Ln} y dy \quad [۱۱]$$

در این روابط،  $E$  برابر  $a/d$  و  $a$  ضخامت بار بستر است، که معمولاً برابر  $۲D_i$  می‌باشد.  $z'$  عبارت است از توان توزیع غلظت در رابطه رأس، که برابر است با  $z' = \frac{\omega}{۰/۴ u_*'}$ ،  $\omega$  سرعت سقوط ذرات رسوب و  $u_*'$  سرعت برشی ذره و برابر است با  $\sqrt{gR'S}$  و  $J_۱'$  و  $J_۲'$  نیز از روابط ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آیند، با این تفاوت که  $E' = a/d$  جای  $E$  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 رابطه زیر برقرار باشد:

$$\frac{Q_{si}'}{i_b Q_b} = \frac{I_۱}{J_۱} (P_m J_۱' + J_۲') \quad [۱۲]$$

که در این جا،  $\varepsilon$  یک کمیت بزرگتر از  $E$  است. عبارت اول سمت راست رابطه ۱۸ را می توان به صورت سری زیر جایگزین کرد:

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

سمت راست رابطه ۱۹ را می توان به صورت مجموعه ای از انتگرال ها نوشت که به روش های تحلیلی قابل حل هستند. با حذف ترم های چهارم به بعد، و قرار دادن در رابطه ۸، مقدار  $I_1$  برابر خواهد بود با:

$$I_1 = \frac{0.216 E^{z'-1}}{(1-E)^{z'}} \left[ F_1 + F_2 + F_3 + \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y}\right) dy \right] \quad [20]$$

که در آن:

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

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

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

به همین ترتیب مقدار  $I_2$  نیز محاسبه می شود، که می توان نوشت:

$$I_2 = \frac{0.216 E^{z'-1}}{(1-E)^{z'}} \left[ G_1 + G_2 + G_3 + \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{z'} \text{Ln} y dy \right] \quad [21]$$

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

جایگزین این منحنی شده است:

$$x = 0.374(\text{Ln} M)^2 + 0.045 \text{Ln} M + 1.577 \quad M \leq 0.56$$

$$x = 0.92 \log \left( \frac{M}{0.145} \right) \quad 0.56 < M \leq 0.76$$

$$x = 0.292 \log \left( \frac{M}{2/9 \times 10^{-6}} \right) \quad 0.76 < M \leq 0.96$$

$$x = 0.277 \log \left( \frac{632000}{M} \right) \quad 0.96 < M \leq 1.35$$

$$x = 0.175(\text{Ln} M)^2 - 0.752 \text{Ln} M + 1.812 \quad 1.35 < M \leq 10$$

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

[۱۶]

رابطه شدت بار بستر  $\phi$  و شدت تنش ( $\psi$ ) که توسط اینشتین به صورت منحنی ارائه شده ( $\nu$ )، نیز به وسیله معادله ۱۷ جایگزین شده است:

$$\phi = \text{EXP} \left[ -1/0.71(\text{Ln} \psi)^2 + 0.569(\text{Ln} \psi) + 1/836 \right] \quad 0.9 \leq \psi \leq 27 \quad [17]$$

محاسبه  $z'$  در مدل با دو روش، یکی روش آزمون و خطا و دیگری روش کلبی، امکان پذیر می باشد. در روش آزمون و خطا، مقدار  $z'$  طوری باید تعیین شود که تساوی رابطه ۱۲ برقرار گردد. بدین ترتیب ابتدا می بایستی مقادیر  $I_1, I_2, I_3, I_4$  را تعیین کرد. این مقادیر به صورت انتگرال هایی هستند که در مدل ریاضی باید با یکی از روش های عددی حل گردند. از طرفی، در رودخانه های عمیق و با بستر ماسه ای نظیر کارون و کرخه،  $E = \frac{a}{d} = \frac{\gamma D_i}{d}$  عدد بسیار کوچکی نزدیک به صفر می شود، در نتیجه در زمان محاسبه مقدار انتگرال  $E=y \Rightarrow 0$ ، و از آن جا  $\frac{1-y}{y}$  به سمت بی نهایت میل خواهد کرد، که حل عددی انتگرال ها غیر ممکن می باشد. به منظور رفع این مشکل، انتگرال های فوق به صورت زیر نوشته می شود (۲) و (۹):

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

داده‌های استفاده شده

برای بررسی دقت روش تصحیح شده 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، و در 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 نامه استاد عسگری (۱) استخراج کرد.

نتایج و بحث

از آن جا که روش تصحیح شده اینشتین نیاز به داده‌های متعددی دارد که همه 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. نتیجه این بررسی‌ها نشان داد که ۱۰ درصد خطا، در متغیرهایی چون درجه حرارت،  $D_{۳۵}$  و  $D_{۶۵}$ ، عمق متوسط و سرعت جریان، تأثیر ناچیزی روی بار کل رسوب دارد. تغییر ضریب  $\phi$  به اندازه  $\pm 0/۱۵$ ، تنها باعث تغییر سه درصد در میزان بار کل رسوب گردید. هم‌چنین، خطای

$$G_{\gamma} = \begin{cases} \frac{z' \varepsilon^{z'-z'} \left( \text{Ln} \varepsilon - \frac{1}{z'-z'} \right) - \frac{z' E^{z'-z'} \left( \text{Ln} \varepsilon - \frac{1}{z'-z'} \right)}{z'-z'} & z' \neq 2 \\ - \left[ (\text{Ln} \varepsilon)^2 - (\text{Ln} E)^2 \right] & z' = 2 \end{cases}$$

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

مقادیر  $J_1, J_2, J_3, J_4$  با استفاده از روابط ۲۰ و ۲۱ به دست می‌آیند.

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

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

مقدار  $Z'_i$  برای سایر اندازه ذرات محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $\omega_i$  و  $\omega$  سرعت سقوط، به ترتیب برای اندازه ذره  $i$  و اندازه ذره مینا می‌باشد. در مدل، مقدار  $\omega$  یا سرعت سقوط، از رابطه روبی (۴) به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\omega = \frac{\left( 10/79 \cdot 10 D_i^2 + 36 \nu^2 \right)^{0/5} - 6 \nu}{D_i} \quad [23]$$

که  $D_i$  اندازه ذره برحسب متر،  $\nu$  لزجی سینماتیک ( $m^2/sec$ )، و  $\omega$  سرعت سقوط ذره  $D_i$  برحسب متر در ثانیه است. رابطه ۲۳ برای ذرات با چگالی  $2/65$  و  $g=9/81$  در سیستم متریک می‌باشد.

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

مقادیر در محدوده 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 شده اینشتین و بر مبنای بار معلق  $Q_s'$  از رابطه ۶ محاسبه می‌شود، که  $Q_s'$  مطابق رابطه 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 شده 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 رودخانه کارون بین حداقل صفر تا حداکثر ۱۱ درصد، و برای رودخانه 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.

#### نتیجه‌گیری

استفاده از روش تصحیح شده اینشتین که توسط دفتر فنی 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 کلیه 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 شده اینشتین با دقت خوبی مقدار بار بستر را

$\pm 10\%$  درصد در میزان  $Z'$  تنها  $\pm 0/1$  درصد در میزان بار کل رسوب تغییر ایجاد می‌کند. به ازای  $50\%$  درصد تغییر در فاصله نمونه‌گیر از کف بستر ( $a'$ )، میزان تغییر در بار کل رسوب تنها  $1/2$  درصد بوده است، و خطای  $50\%$  درصد در میزان ضریب  $\alpha$  تنها  $3/5$  درصد در بار بستر و  $0/1$  درصد در بار کل رسوب خطا ایجاد می‌کند. نتایج فوق برای رودخانه 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  $\omega$  مربوط به اندازه 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  $\phi$  مورد بررسی قرار گرفت، که در این جا نتایج حاصل از به کار بردن  $0/2\phi$ ، و  $0/5\phi$  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  $0/2\phi$ ، و برای دبی‌های بالاتر از ۱۱ مترمکعب در ثانیه  $0/5\phi$  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  $0/88$  و  $0/85$  به دست آمد. این

جدول ۱. داده‌های رودخانه ایست فورک و محاسبه بار بستر با روش اصلاح شده اینشتین

| شماره                    | دبی              | مساحت مقطع | عمق            | سرعت        | بار بستر اندازه‌گیری شده | بار بستر محاسبه شده | نسبت بار بستر اندازه‌گیری شده به محاسبه شده |
|--------------------------|------------------|------------|----------------|-------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------------------|
| نمونه (مترمکعب در ثانیه) | (مترمربع)        | (متر)      | (متر بر ثانیه) | (تن در روز) | ضریب ۰/۲                 | ضریب ۰/۵            |                                             |
| 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                       | ۱۷/۲             | 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                                        |
| ۰/۸۷                     | میانگین          |            |                |             |                          |                     |                                             |
| ۰/۸۵                     | انحراف استاندارد |            |                |             |                          |                     |                                             |
| ۰/۹۷                     | ضریب تغییرات     |            |                |             |                          |                     |                                             |

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

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



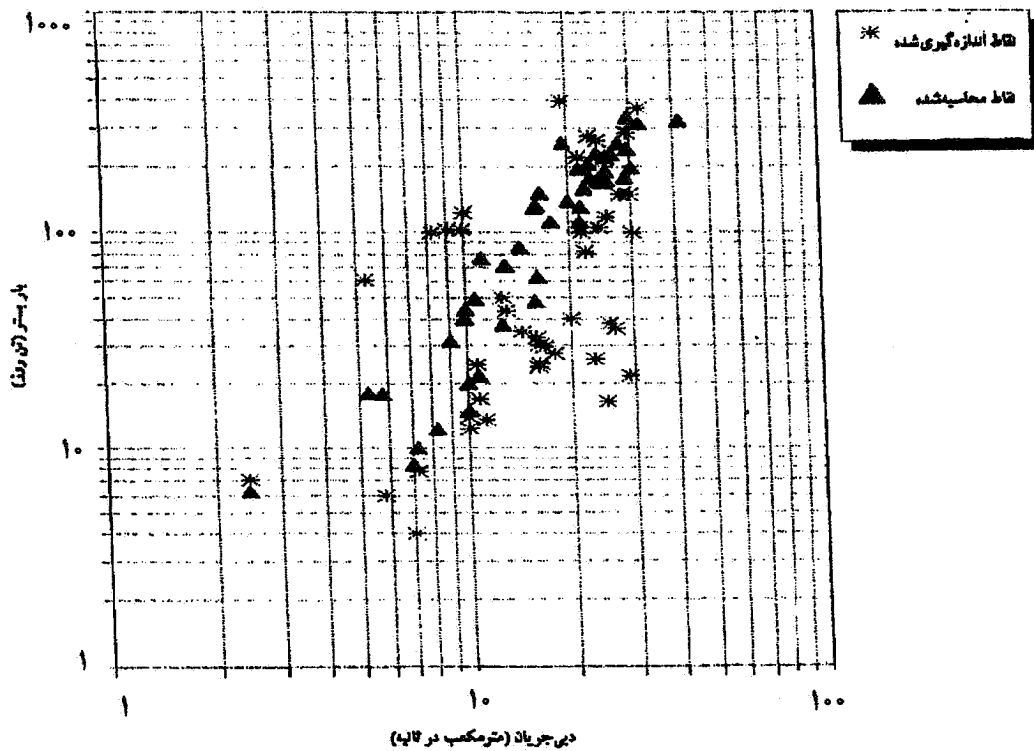
جدول ۳. داده‌های ایستگاه حمیدیه بر روی رودخانه کرخه و محاسبه بار رسوب آن

| محاسبه شده           |                      | اندازه‌گیری شده      |                           | شماره نمونه | محاسبه شده           |                      | اندازه‌گیری شده      |                           | شماره نمونه |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|-------------|
| $Q_t$<br>(تن در روز) | $Q_b$<br>(تن در روز) | $Q_s$<br>(تن در روز) | $Q$<br>(مترمکعب در ثانیه) |             | $Q_t$<br>(تن در روز) | $Q_b$<br>(تن در روز) | $Q_s$<br>(تن در روز) | $Q$<br>(مترمکعب در ثانیه) |             |
| ۷۷۲۹                 | ۵۲                   | ۷۰۰۸                 | ۷۵                        | ۴۴          | ۳۷۶                  | ۲                    | ۳۵۱                  | ۵۰                        | ۱           |
| ۱۹۷                  | ۵                    | ۱۶۰                  | ۳۱                        | ۴۵          | ۳۷۴                  | ۰                    | ۲۶۱                  | ۴۱                        | ۲           |
| ۶۷۲                  | ۸                    | ۵۸۶                  | ۴۲                        | ۴۶          | ۸۳۷                  | ۲                    | ۷۹۵                  | ۵۹                        | ۳           |
| ۲۷۷                  | ۰                    | ۲۵۸                  | ۲۸                        | ۴۷          | ۲۸۷۹۴                | ۷۱                   | ۲۷۳۴۲                | ۱۷۴                       | ۴           |
| ۳۶۳                  | ۱                    | ۳۳۱                  | ۲۶                        | ۴۸          | ۸۶۱۶۳                | ۲۴۱                  | ۸۲۲۷۹                | ۴۴۳                       | ۵           |
| ۱۱۰                  | ۱                    | ۹۶                   | ۲۴                        | ۴۹          | ۱۴۴۱۵۱               | ۴۰۳                  | ۱۳۷۲۶۷               | ۴۳۲                       | ۶           |
| ۱۰۹                  | ۰                    | ۱۰۰                  | ۲۱                        | ۵۰          | ۱۷۹۳۳                | ۲۲۸                  | ۱۶۰۴۳                | ۳۰۸                       | ۷           |
| ۵۸۴۸                 | ۱۱۸                  | ۴۹۱۴                 | ۱۳۹                       | ۵۱          | ۲۹۳۹۹                | ۱۸۴                  | ۱۸۵۸۳                | ۲۷۸                       | ۸           |
| ۲۱۷۰۳                | ۳۹۱                  | ۱۸۱۵۸                | ۲۵۳                       | ۵۲          | ۶۱۲۱۵                | ۲۱۴                  | ۵۸۰۷۵                | ۴۱۰                       | ۹           |
| ۷۱۸۱۴                | ۴۷۵                  | ۶۴۴۹۶                | ۲۷۲                       | ۵۳          | ۸۵۱۱۸                | ۹۲                   | ۸۳۰۶۳                | ۴۶۵                       | ۱۰          |
| ۱۹۰۰۲۶               | ۵۲۹                  | ۱۷۷۵۶۱               | ۳۶۹                       | ۵۴          | ۱۰۱۵۱۰               | ۶۹                   | ۹۹۶۱۰                | ۳۸۲                       | ۱۱          |
| ۸۲۲                  | ۳۷                   | ۶۵۰                  | ۸۳                        | ۵۵          | ۵۸۷                  | ۲۷                   | ۴۵۳                  | ۵۲                        | ۱۲          |
| ۱۸۹۸                 | ۵۵                   | ۱۵۶۴                 | ۷۷                        | ۵۶          | ۲۲۷                  | ۱۰                   | ۱۷۸                  | ۴۲                        | ۱۳          |
| ۴۹۶۵۹                | ۵۰۹                  | ۴۳۶۴۹                | ۲۵۵                       | ۵۷          | ۲۰۰                  | ۵                    | ۱۷۱                  | ۴۱                        | ۱۴          |
| ۶۲۴۳۶۲               | ۱۴۱۸                 | ۵۸۷۴۳۷               | ۵۴۸                       | ۵۸          | ۱۶۴                  | ۰                    | ۱۵۵                  | ۳۳                        | ۱۵          |
| ۶۳۱                  | ۱۲                   | ۵۴۸                  | ۶۴                        | ۵۹          | ۱۷۹                  | ۳                    | ۱۶۱                  | ۵۱                        | ۱۶          |
| ۳۸۳                  | ۵                    | ۳۴۳                  | ۵۴                        | ۶۰          | ۲۲۶۲۹                | ۲۰۵                  | ۲۰۳۲۳                | ۲۱۶                       | ۱۷          |
| ۹۶۰                  | ۶                    | ۸۸۵                  | ۵۳                        | ۶۱          | ۳۷۶۰۵                | ۲۵۸                  | ۳۴۳۸۹                | ۲۷۴                       | ۱۸          |
| ۵۲۷۰                 | ۹                    | ۴۹۷۷                 | ۶۵                        | ۶۲          | ۵۵۲۰۸                | ۵۴۸                  | ۴۹۳۱۴                | ۳۲۴                       | ۱۹          |
| ۴۸۷                  | ۱                    | ۴۵۶                  | ۴۱                        | ۶۳          | ۳۷۴۸                 | ۷۸                   | ۳۲۵۰                 | ۱۴۸                       | ۲۰          |
| ۱۱۳                  | ۰                    | ۱۰۴                  | ۳۲                        | ۶۴          | ۵۸۸۹                 | ۵۴                   | ۵۳۴۹                 | ۱۵۰                       | ۲۱          |
| ۱۰۶۸                 | ۰                    | ۱۰۰۴                 | ۳۱                        | ۶۵          | ۵۷۵                  | ۱۱                   | ۴۸۷                  | ۵۲                        | ۲۲          |
| ۱۱۴۶                 | ۲                    | ۱۰۷۱                 | ۴۳                        | ۶۶          | ۲۱۴                  | ۷                    | ۱۷۴                  | ۴۷                        | ۲۳          |
| ۸۳۶                  | ۳                    | ۷۷۸                  | ۵۰                        | ۶۷          | ۲۱۴                  | ۲                    | ۱۹۱                  | ۳۹                        | ۲۴          |
| ۸۶۷۹                 | ۶۹                   | ۷۸۷۶                 | ۱۴۴                       | ۶۸          | ۶۴۳                  | ۱۱                   | ۵۹۳                  | ۶۷                        | ۲۵          |
| ۳۵۷۶۳                | ۱۱۳                  | ۳۳۴۲۵                | ۲۳۰                       | ۶۹          | ۸۶۹                  | ۲۳                   | ۷۳۵                  | ۷۰                        | ۲۶          |
| ۱۵۱۹۴۸               | ۴۳۷                  | ۱۴۴۳۸۷               | ۴۸۱                       | ۷۰          | ۳۳۵۳۰                | ۲۷۸                  | ۳۰۱۶۳                | ۲۴۹                       | ۲۷          |
| ۶۱۲۶                 | ۶۶                   | ۵۴۶۹                 | ۱۳۷                       | ۷۱          | ۱۰۷۰۵۶               | ۴۸۵                  | ۹۹۸۲۹                | ۴۳۶                       | ۲۸          |
| ۶۷۰۰                 | ۳۰                   | ۶۱۸۴                 | ۱۲۴                       | ۷۲          | ۲۷۱۱۵۲               | ۷۶۶                  | ۲۵۵۹۹۱               | ۴۶۷                       | ۲۹          |
| ۴۴۵۴۵                | ۱۴۱                  | ۴۱۸۲۲                | ۲۴۱                       | ۷۳          | ۱۷۴۱۱۲۵              | ۲۳۰۸                 | ۱۶۶۸۱۸۴              | ۱۱۲۳                      | ۳۰          |
| ۱۲۳۲۶۲               | ۶۱                   | ۱۱۵۱۶۳               | ۸۷                        | ۷۴          | ۳۳۷۶۴۰               | ۸۴۵                  | ۳۲۱۶۷۳               | ۶۲۹                       | ۳۱          |
| ۷۸۰                  | ۷                    | ۶۸۹                  | ۴۲                        | ۷۵          | ۱۳۷۳۲                | ۸۶                   | ۱۲۵۷۸                | ۱۸۴                       | ۳۲          |
| ۱۷۲۰                 | ۶                    | ۱۵۷۰                 | ۴۲                        | ۷۶          | ۲۸۰۳۹                | ۲۵۴                  | ۲۴۹۱۲                | ۱۶۴                       | ۳۳          |
| ۱۵۲۷                 | ۵                    | ۱۳۸۳                 | ۳۸                        | ۷۷          | ۱۱۰۷۰                | ۳۵۸                  | ۸۵۹۳                 | ۱۵۰                       | ۳۴          |
| ۱۵۱۸                 | ۳                    | ۱۳۸۱                 | ۳۵                        | ۷۸          | ۴۴۵                  | ۲۱                   | ۳۲۰                  | ۳۱                        | ۳۵          |
| ۱۴۴۵                 | ۵                    | ۱۳۱۰                 | ۳۹                        | ۷۹          | ۳۵۵                  | ۲۰                   | ۲۵۲                  | ۳۹                        | ۳۶          |
| ۱۷۷۱                 | ۸                    | ۱۶۱۵                 | ۵۲                        | ۸۰          | ۹۱۰                  | ۲۵                   | ۷۴۲                  | ۵۶                        | ۳۷          |
| ۳۱۹۹                 | ۳۳                   | ۲۸۶۷                 | ۸۸                        | ۸۱          | ۲۷۵۳                 | ۱۳۷                  | ۲۰۰۲                 | ۱۱۰                       | ۳۸          |
| ۵۶۷۳۹                | ۵۹۹                  | ۵۱۶۵۷                | ۴۸۷                       | ۸۲          | ۱۹۳۶۶                | ۲۵۶                  | ۱۶۸۲۸                | ۲۳۷                       | ۳۹          |
| ۶۵۶۴                 | ۲۲۳                  | ۵۰۱۴                 | ۱۱۹                       | ۸۳          | ۱۱۴۹۰۶۶              | ۱۸۷۸                 | ۱۱۰۳۷۴۳              | ۱۲۸۲                      | ۴۰          |
| ۹۲۹۸                 | ۲۴۳                  | ۷۴۴۳                 | ۱۴۴                       | ۸۴          | ۲۱۶۱۹۸               | ۸۱۳                  | ۲۰۳۸۹۸               | ۶۹۱                       | ۴۱          |
| ۴۰۸۹                 | ۲۴۱                  | ۲۹۴۲                 | ۹۱                        | ۸۵          | ۹۵۹۷۸۷               | ۲۰۳۵                 | ۹۰۶۵۸۳               | ۸۱۵                       | ۴۲          |
| ۱۶۱۵                 | ۷۴                   | ۱۲۲۹                 | ۶۲                        | ۸۶          | ۵۴۲۶                 | ۷۳                   | ۴۷۰۹                 | ۱۲۵                       | ۴۳          |

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 (۸۰ نمونه) | $Q_b = 0.006Q^{1/68}$<br>$R^2 = 0.82$ | $Q_s = 0.017Q^{2/15}$<br>$R^2 = 0.88$ | $Q_t = 0.021Q^{2/14}$<br>$R^2 = 0.79$ |
| حمیدیه، بر روی رودخانه کرخه (۸۶ نمونه) | $Q_b = 0.001Q^{2/21}$<br>$R^2 = 0.73$ | $Q_s = 0.09Q^{2/32}$<br>$R^2 = 0.95$  | $Q_t = 0.10Q^{2/30}$<br>$R^2 = 0.90$  |

$Q$  = 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 (اندازه گیری شده و محاسبه شده) در مقابل دبی جریان رودخانه ایست فورک

حمیدیه نشان داد که نسبت بار بستر به بار معلق ثابت نبوده و مقدار آن بین صفر تا حداکثر ۱۱ درصد متغیر است.

### سپاسگزاری

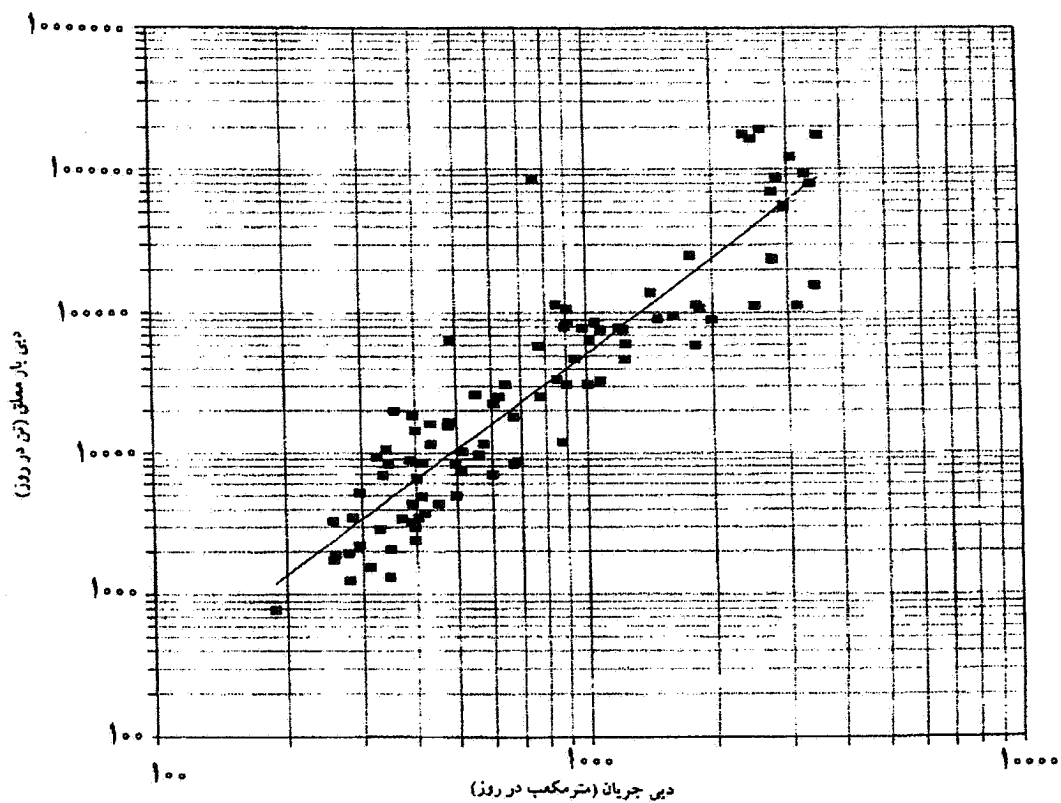
از اداره کل امور آب استان خوزستان به خاطر در اختیار دادن داده‌های آب‌سنجی مورد نیاز، و از شرکت مهندسی مشاور دزآب به خاطر تأمین بخشی از کمک‌های مالی این مطالعه تشکر و قدردانی می‌شود.

پیش بینی می‌کند.

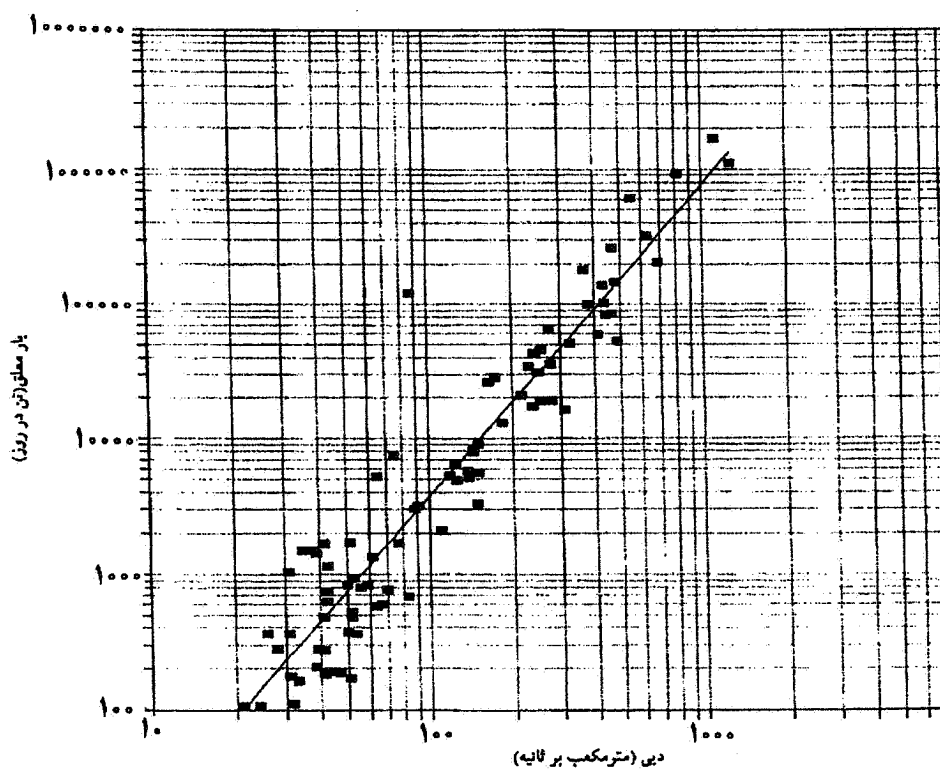
۲. ضریب  $\phi$  که توسط کلبی و همبری برابر ۰/۵ و ثابت در نظر گرفته شده است، در همه رودخانه‌ها ثابت نبوده و به دبی جریان بستگی دارد.

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 شده اینشتین در ایستگاه‌های اهواز و



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

منابع مورد استفاده

۱. استاد عسگری، م. ۱۳۷۶. بررسی عملکرد روش تصحیح شده ایشنتین 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 محاسبه انتگرال‌های ایشنتین. سومین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. دفتر فنی امور آب. ۱۳۷۶. محاسبه بار کل رسوب با استفاده از روش تصحیح شده ایشنتین (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.