

## انتخاب مناسب ترین روش های برآورد بار معلق و بار بستر در رودخانه اهرچای (بالادست سد ستارخان)

سعید صمدیان فرد<sup>۱</sup>، محمد علی قربانی<sup>۲</sup>، رسول حسینیلر<sup>۳</sup>، علی حسینزاده دلیر<sup>۲</sup> و داود فرسادیزاده<sup>۲</sup>

### چکیده

بررسی میزان رسوبات در رودخانه ها یکی از مسایل مهم در مهندسی رودخانه می باشد. برای تخمین میزان بار معلق و بار بستر روابط متعددی ارائه شده اند، ولی پیچیدگی پدیده انتقال رسوب باعث شده است که روش های متعددی توسعه داده شوند. در این پژوهش به منظور گزینش مناسب ترین روش های برآورد بار معلق و بار بستر، مشخصات هیدرولیکی و هندسی رودخانه اهرچای در ایستگاه هیدرومتری اورنگ در بالادست سد ستارخان و هم زمان با آن بار معلق با استفاده از بطری های نمونه برداری و بار بستر نیز با استفاده از دستگاه هلی اسمیت در دو حالت مواقع سیلابی و عادی رودخانه اندازه گیری و سپس در آزمایشگاه های مرتبط، میزان بار معلق و بستر تعیین گردیدند. از چهار روش معتبر برای محاسبه میزان بار معلق و از هشت روش پرکاربرد برای محاسبه میزان بار بستر استفاده گردید که براساس نتایج به دست آمده از مقادیر مشاهداتی و مقایسه آن با روش های محاسباتی، روش میر پیترو و مولر با جذر میانگین مربع خطای ۷/۷۸۶۲۸ برای محاسبه بار بستر و روش چانگ، سایمونز و ریچاردسون با جذر میانگین مربع خطای ۸۶۱/۲۶۹ جهت محاسبه بار بستر پیشنهاد گردیده است.

واژه های کلیدی: انتقال رسوب، بار بستر، بار معلق، رودخانه اهرچای، هلی اسمیت

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۳. کارشناس ارشد سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی. تبریز

## مقدمه

حسن‌زاده برای رودخانه آجی‌چای (ایستگاه ونیار) دو معادله تجربی با ضریب همبستگی بسیار بالا جهت محاسبه بار معلق این رودخانه برای فصل‌های پرآبی و کم آبی ارائه نموده است (حسن‌زاده، ۱۳۷۸). خوجینی و هاشمی‌نژاد با بررسی رسوب‌دهی حوضه آبخیز طالقان نتیجه‌گیری کرده‌اند که ۸۹٪ رسوبات حوضه در فصل بهار حمل می‌گردد (خوجینی و هاشمی‌نژاد، ۱۳۷۷). لطیفی و حسن‌زاده با بررسی مقادیر رسوب انتقالی در پنج ایستگاه هیدرومتری روی رودخانه گاماسیاب و سرشاخه‌های اصلی آن، به کمک معادلات انتقال رسوب و با آزمون چند روش به این نتیجه رسیدند که روش تلفیق دبی متوسط روزانه جریان و منحنی سنجه تک‌خطی کم‌ترین میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب تبیین را نسبت به سایر روش‌ها دارا می‌باشد (لطیفی و حسن‌زاده، ۱۳۸۵). نخجیری و گلماهی در مقاله‌ای تحت عنوان «سنجش و گزینش مناسب‌ترین روش‌های برآورد بار بستر رودخانه‌ها» به گزینش مناسب‌ترین روش‌های برآورد بار بستر رودخانه‌ها، از طریق مقایسه مقادیر محاسباتی با مقادیر اندازه‌گیری شده پرداختند، و در نهایت روش میر-پیترو و مولر را برای محاسبه بار بستر پیشنهاد نمودند (نخجیری و گلماهی، ۱۳۸۲). البته در کشورهای دیگر نیز پژوهش‌های بی‌شماری در این زمینه صورت پذیرفته است که به ذکر چند مورد اکتفا می‌شود.

کرافورد چندین روش را برای محاسبه پارامترهای منحنی سنجه رسوب مقایسه کرده و در نهایت نتیجه گرفته است که مدل خطی تغییر یافته (مدل توانی لگاریتمی شده) نسبت به روش‌های غیرخطی ارجحیت دارد (کرافورد، ۱۹۹۱). مطالعاتی توسط موسسه تحقیقات بیابان‌های آمریکا تحت عنوان «آنالیز بار معلق در رودخانه Truckee میانی» انجام گرفته است. هدف پروژه برآورد بار رسوب در رودخانه Truckee در کالیفرنیا و توصیف مختصات رسوب و تغییرپذیری آن براساس بار کل و تعیین ماکزیمم مقدار رسوب و زمان بوده است (گایل، ۲۰۰۴). نلسون و بوت با بررسی‌هایی که در حوضه آبریز رودخانه ایساکو انجام داده‌اند، تولید رسوب سالیانه این رودخانه را حدود ۶۴۰۰ تن در سال

هر ساله هزاران تن مواد جامد از سطح حوضه‌های آبریز، توسط آب شسته شده و از محلی به محل دیگر انتقال می‌یابد. فرسایش و انتقال مواد رسوبی از جهات مختلفی مورد توجه قرار می‌گیرد که از مهم‌ترین آنها از بین رفتن اراضی حاصل‌خیز کشاورزی و پر شدن مخازن سدها و بندها و کانال‌های آبیاری می‌باشد. برآورد مقدار رسوب موجود در رودخانه‌ها (آورد رسوب رودخانه‌ها) یکی از عوامل مهم موثر در تعیین طول عمر سدها، دوره بهره‌برداری از تاسیسات مربوطه و همچنین ظرفیت کانال‌های آبیاری، تونل‌های آب‌رسانی، تاسیسات پایین‌دست سدها و بالاخره شناخت و تنظیم تغییرات بستر و کناره رودخانه‌ها می‌باشد. (امامی، ۱۳۷۹)

با توجه به اهمیت مسئله رسوب و تاثیراتی که این فرایند در پهنه اکولوژی و محیط زیست گذاشته است پژوهش‌های بسیار وسیعی در سراسر دنیا بر روی این موضوع انجام شده است، متخصصان علم هیدرولیک از یک سو و صاحب‌نظران علوم هیدرولوژی و آبخیزداری از جهات مختلف این فرآیند را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند و سعی بر این داشته‌اند که تا حد امکان مسئله فرسایش و رسوب را تحت کنترل درآورده و از اثرات سوء آن بکاهند و می‌توان گفت که اکثر این مطالعات نیز با موفقیت روبرو بوده‌اند.

گرچه اخیراً در ایران پژوهش‌های زیادی در مورد رسوب صورت گرفته است، ولی به دلیل گستردگی و پیچیدگی موضوع و همچنین عواقب سوئی که این فرآیند در بردارد، هنوز هم جای کار و تحقیق برای مسئله رسوب وجود دارد. در این بخش چکیده‌ای از پژوهش‌هایی که در دهه‌های اخیر در این زمینه انجام گردیده، آورده شده است.

پرتانی و مجدزاده با بررسی روش‌های برآورد بار معلق رودخانه قزل اوزن و مقایسه آن‌ها، معادله مناسب برای هر ایستگاه بر روی این رودخانه را انتخاب کرده و پس از واسنجی معادلات، یک معادله نهایی برای محاسبه بار معلق رودخانه قزل اوزن با تعیین ضرایب واسنجی ارائه نمودند (پرتانی و مجدزاده، ۱۳۸۵).

کالینسک)، مبتنی بر شیب انرژی (روش‌های میر- پیتر و میر- پیتر و مولر)، مبتنی بر دبی (روش شاکلیچ، معادله اول و دوم) و مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی (روش‌های روتنر و کیسی) اشاره نمود. در این پژوهش سعی گردیده است جهت تدقیق مطالعات، از هر رهیافت دو روش متداول و مهم انتخاب و جهت محاسبه بار بستر استفاده شود. برای محاسبه بار معلق نیز از روش‌های لین و کالینسک، اینشتین، بروکس و چانگ، سایمونز و ریچاردسون استفاده شده است. از ارائه توضیحات بیشتر روش‌ها، به دلیل حجیم نشدن مقاله خودداری شده و فقط به معرفی روابط مذکور اکتفا می‌شود.

### روش‌های محاسباتی بار معلق

#### روش لین و کالینسک

لین و کالینسک در سال ۱۹۴۱، روشی را به‌منظور محاسبه بار معلق ارائه دادند.

$$q_{sw} = qC_a P_L \exp\left(\frac{15 \omega a}{U_* D}\right) \quad (1)$$

که در آن،  $q$ : دبی جریان آب در واحد عرض آبراهه  $(ft^3 / (s.ft))$ ،  $q_{sw}$ : دبی وزنی مواد معلق در آب در واحد عرض آبراهه  $(Lb / (s.ft))$ ،  $C_a$ : غلظت مواد معلق در فاصله  $a$  از بستر آبراهه  $(ppm)$ ،  $\omega$ : سرعت سقوط متناظر با قطر  $d_{50}$   $(ft/s)$ ،  $D$ : عمق جریان  $(ft)$ ،  $a$ : سطح مبنا می‌باشد  $(ft)$  (امامی، ۱۳۷۹).

#### روش اینشتین

اینشتین در سال ۱۹۵۰، رابطه زیر را ارائه داد:

$$q_{sw} = 11.6 U_*' C_a a \left[ 2.3 \log\left(\frac{30.2 D}{\Delta}\right) I_1 + I_2 \right] \quad (2)$$

که در آن،  $q_{sw}$ : دبی وزنی مواد معلق در واحد عرض آبراهه  $(Lb / (s.ft))$ ،  $U_*'$ : سرعت برشی ناشی از ذرات  $(ft/s)$ ،  $C_a$ : غلظت مواد معلق در فاصله  $a$  از بستر آبراهه  $(ppm)$ ،  $a$ : سطح مبنا  $(ft)$ ،  $D$ : عمق جریان  $(ft)$ ،  $\Delta$ ،  $I_1$ ،  $I_2$ : ضرایب مربوطه می‌باشد (امامی، ۱۳۷۹).

برآورد نموده و رسوب‌گذاری ویژه را نیز ۴۴ تن بر کیلومتر مربع در سال تخمین زده‌اند (نلسون و بوت، ۲۰۰۲). توماس اعلام می‌دارد که روش‌های متداول به‌وسیله منحنی‌های سنجه رسوب و منحنی تداوم جریان، رسوب را در حدود ۵۱٪ پایین‌تر برآورد می‌کنند (توماس، ۱۹۸۵). ویلکاک روش کاربردی برای برآورد نرخ انتقال رسوب در رودخانه‌هایی با بستر شنی ارائه کرده است. در این پژوهش پس از ذکر مشکلات نمونه‌گیری دستی و سختی آن و همچنین دقت کم آن، فرمولی برای برآورد رسوب پیشنهاد شده است. در به‌دست آوردن فرمول از چند نمونه رسوب مشاهداتی دستی برای کالیبراسیون فرمول استفاده شده است. فرمول پیشنهادی مستقل از وسیله نمونه‌گیری و اندازه‌گیری رسوب بوده و همچنین مستقل از اندازه و قطر شن‌های بستر رودخانه است (ویلکاک، ۲۰۰۱).

فقدان مطالعات برآورد بار رسوبی توام با اندازه‌گیری‌های صحرائی و همزمان بار معلق و بار بستر از یک سو و اهمیت مدیریت بهینه سد ستارخان از سوی دیگر، نویسندگان این مقاله را واداشت تا گامی هر چند ناچیز در راستای رفتارشناسی رودخانه اهرچای در انتقال رسوب بردارند. بدین منظور هدف عمده این پژوهش انتخاب مناسب‌ترین روش‌های محاسباتی میزان رسوبات با استفاده از مدل‌های ریاضی- هیدرولیکی و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده صحرائی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در مطالعات مربوط به رسوب رودخانه‌ای از دو روش محاسباتی و اندازه‌گیری جهت برآورد بار معلق و بستر رودخانه‌ها استفاده می‌گردد. در روش‌های محاسباتی نیاز به برخی از داده‌ها از جمله عمق آب، سرعت آب، شیب بستر، عرض مقطع و دانه‌بندی ذرات بستر می‌باشد.

#### روش‌های محاسباتی

تاکنون روابط و معادلات متعددی برای تخمین میزان بار بستر رودخانه‌ها ارائه گردیده است، که می‌توان به رهیافت‌های مبتنی بر تنش برشی (روش‌های شیلدز و

## روش بروکس

رابطه بروکس از لحاظ فرضیات پایه و شکل کلی

تا حدی شبیه به رابطه اینشتین است:

(۳)

$$q_{sw} = C_{md} q \left[ 1 + \frac{U_*'}{KV} \int_E \left( \frac{1-y}{y} \right)^{z_1} dy + \frac{U_*'}{KV} \int_E \left( \frac{1-y}{y} \right)^{z_2} Lny dy \right]$$

که در آن،  $q$ : دبی جریان آب در واحد عرض

آبراهه  $(ft^3/(s.ft))$ ،  $q_{sw}$ : دبی وزنی مواد معلق در

واحد عرض آبراهه  $(lb/(s.ft))$ ،  $C_{md}$ : غلظت رسوب

در رقوم  $y = \frac{1}{2} D$ ،  $D$ : عمق جریان  $(ft)$ ،

$V$ : سرعت حرکت آب می‌باشد  $(ft/s)$  (امامی، ۱۳۷۹).

## روش چانگ، سایمونز و ریچاردسون

چانگ، سایمونز و ریچاردسون در سال ۱۹۶۵

رابطه زیر را ارائه دادند:

$$q_{sw} = \gamma DC_a \left( VI_1 - \frac{2U_*'}{k} I_2 \right) \quad (۴)$$

که در آن،  $q_{sw}$ : دبی وزنی مواد معلق در واحد عرض

آبراهه  $(lb/(s.ft))$ ،  $C_a$ : غلظت مینا  $(ppm)$ ،  $\gamma$ :

وزن مخصوص آب  $(lb/ft^3)$ ،  $D$ : عمق جریان در

آبراهه  $(ft)$ ،  $V$ : سرعت حرکت آب  $(ft/s)$ ،  $U_*'$ :

سرعت برشی  $(ft/s)$  و  $K$ : ثابت فون کارمن

$(K = 0.4)$  می‌باشد (امامی، ۱۳۷۹).

## روش‌های محاسباتی بار بستر

## روش میر-پیتر

میر پیتر در سال ۱۹۳۴ با بسط مطالعات

آزمایشگاهی وسیع خود بر روی پدیده انتقال رسوب

رابطه زیر را به منظور محاسبه بار بستر ارائه داد:

$$\frac{0.4 q_b^{2/3}}{d} = \frac{q^{2/3} S}{d} - 17 \quad (۵)$$

که در آن،  $q_b$ : دبی وزنی بار بستر در واحد

عرض آبراهه  $(lb/(s.ft))$ ،  $q$ : دبی جریان آب در

واحد عرض آبراهه  $(ft^3/(s.ft))$ ،  $S$ : شیب طولی

آبراهه،  $d$ : قطر مشخصه دانه‌ها می‌باشد  $(ft)$  (شفاعی

بجستان، ۱۳۸۴).

## روش میر-پیتر و مولر

۱۴ سال پس از آن که میر-پیتر رابطه خویش را

ارائه نمود، توانست با همکاری مولر شکل کامل‌تری از

فرمول مورد بحث را ارائه دهد:

(۶)

$$\gamma \left( \frac{K_S}{K_r} \right)^{3/2} RS = 0.047(\gamma_S - \gamma)d + 0.25\rho^{1/2} q_b^{2/3}$$

که در آن،  $\gamma_S$  و  $\gamma$ : به ترتیب وزن مخصوص

رسوب و آب  $(lb/ft^3)$ ،  $R$ : شعاع هیدرولیکی  $(ft)$ ،  $S$ :

شیب خط انرژی،  $d$ : متوسط قطر دانه‌ها  $(ft)$ ،  $\rho$ :

جرم مخصوص آب  $(lb.s^2/ft^2)$ ،  $q_b$ : نرخ انتقال بار

بستر در واحد زمان در واحد عرض آبراهه یا به عبارتی

دبی وزنی رسوب  $(lb/(s.ft))$  و  $S \left( \frac{K_S}{K_r} \right)$ : بخشی از

شیب خط انرژی کل، که بر اثر مقاومت دانه‌ها در برابر

جریان به وجود می‌آید و در حرکت بار بستر موثر است

(شفاعی بجستان، ۱۳۸۴).

## روش شاکلیچ (معادله اول)

شاکلیچ در ارتباط با محاسبه بار بستر، از دبی

آبراهه استفاده کرده است و بر این مبنا در سال ۱۹۳۴،

فرمول اول خود را به صورت زیر ارائه داد:

$$q_b = 7000 \frac{S^{3/2}}{d^{1/2}} (q - q_c) \quad (۷)$$

که در آن،  $q_b$ : بار بستر  $(Kg/s/m)$ ،  $d$ : قطر

دانه‌ها  $(mm)$ ،  $q$ : دبی آب در واحد عرض

آبراهه  $(m^3/(s.m))$  و  $q_c$ : دبی بحرانی در واحد عرض

آبراهه در آستانه حرکت رسوب  $(m^3/(s.m))$  است.

دبی بحرانی در آبراهه‌ای با بستر ماسه‌ای (با

چگالی ۲/۶۵) از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$q_c = \frac{0.00001944 d}{S^{4/3}} \quad (۸)$$

که در آن،  $S$ : شیب بحرانی آبراهه و  $d$ : قطر دانه‌ها

می‌باشد  $(mm)$  (شفاعی بجستان، ۱۳۸۴).

## روش شاکلیچ (معادله دوم)

شاکلیچ در سال ۱۹۴۳ معادله دوم خود را به

صورت زیر ارائه داد:

و  $\gamma$ : به ترتیب وزن مخصوص رسوب و آب می باشد  
 $(lb/ft^3)$  (امامی، ۱۳۷۹).

### روش کالینسک

کالینسک در سال ۱۹۴۷ فرض خود را مبتنی بر رابطه زیر قرار داد:

$$u_s = b(u - V_c) \quad (13)$$

که در آن،  $u, u_s$ : به ترتیب سرعت لحظه‌ای دانه‌های رسوب و آب  $(ft/s)$ ،  $V_c$ : سرعت بحرانی جریان آب  $(ft/s)$  و  $b$ : ضریب ثابتی است که نزدیک به واحد است.

در نهایت کالینسک نتیجه گرفت که  $\frac{q_b}{U_* d}$

تابعی از  $\frac{\tau_c}{\tau}$  می باشد. که در آن  $q_b$ : دبی وزنی بار بستر در واحد عرض آبراهه  $(lb/(s.ft))$ ،  $U_*$ : سرعت برشی  $(ft/s)$ ،  $d$ : قطر ذرات رسوب  $(ft)$ ،  $\tau$ : تنش برشی  $(lb/ft^2)$  و  $\tau_c$ : تنش برشی بحرانی  $(lb/ft^2)$  می باشد (امامی، ۱۳۷۹).

### روش کیسی

کیسی رابطه خود را بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی به صورت زیر ارائه داد:

$$q_b = 0.367 S^{\%} (q - q_c) \quad (14)$$

$$q_c = 6.5 \times 10^{-6} \frac{d_{50}^{1.8}}{S^{1.2}} \quad (15)$$

که در آن،  $q_b$ : دبی وزنی بار بستر در واحد عرض آبراهه  $(m^3/(s.m))$ ،  $q$ : دبی جریان در واحد عرض آبراهه  $(m^3/(s.m))$ ،  $S$ : شیب خط انرژی،  $d_{50}$ : قطر متوسط ذرات بستر می باشد  $(mm)$  (شفاعی بجستان، ۱۳۸۴).

### روش‌های اندازه‌گیری بار معلق و بار بستر

برای اندازه‌گیری بار معلق از متداول‌ترین روش یعنی بطری نمونه‌برداری و در عرض ایستگاه هیدرومتری به فواصل معین (۲، ۵ و ۷ متری) از ساحل چپ انجام گرفته است. به منظور نمونه‌برداری مطمئن و مناسب بار معلق نکات ذیل مورد توجه قرار گرفته است:

$$q_b = 250.0 \times S^{\%} (q - q_c) \quad (9)$$

و  $q_c$  دبی بحرانی از معادله‌ی زیر به دست می آید:

$$q_c = 0.26 (G_s - 1)^{\%} \frac{d^{\%}}{S^{\%}} \quad (10)$$

که در آن،  $G_s$  چگالی مخصوص ذرات بستر بوده و سایر پارامترها هم‌چون معادله اول شاکلیچ تعریف می گردند (شفاعی بجستان، ۱۳۸۴).

### روش روتنر

روتنر در سال ۱۹۵۹ معادله‌ای را به منظور تعیین دبی بار بستر به صورت تابعی از پارامترهای هیدرولیکی آبراهه و براساس تحلیل برازش منحنی‌های مختلف بر روی نتایج آزمایشگاهی انجام شده ارائه داد. وی با در نظر گرفتن اثر ضریب زبری نسبی  $\left(\frac{d_{50}}{D}\right)$  بر دبی رسوب رابطه زیر را به منظور محاسبه دبی بار بستر پیشنهاد کرد:

$$q_b = \gamma_s [(G_s - 1) g D^3]^{1/2} \times \left\{ \frac{V}{[(G_s - 1) g D]^{1/2}} \left[ 0.667 \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{2/3} + 0.14 \right] - 0.778 \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{2/3} \right\}^3 \quad (11)$$

که در آن،  $q_b$ : دبی وزنی بار بستر در واحد عرض آبراهه  $(lb/(s.ft))$ ،  $\gamma_s$ : وزن مخصوص دانه‌های رسوب  $(lb/ft^3)$ ،  $G_s$ : چگالی دانه‌های رسوب (با مقدار متعارف ۲.۶۵)،  $D$ : متوسط عمق جریان  $(ft)$ ،  $V$ : سرعت متوسط جریان می باشد  $(ft/s)$  (امامی، ۱۳۷۹).

### روش شیلدز

شیلدز در سال ۱۹۳۶ در ضمن مطالعات خود در مورد آستانه حرکت ذرات رسوب، معادله نیمه تجربی خود را در زمینه محاسبه بار بستر به صورت زیر ارائه داد:

$$\frac{q_b \gamma_s}{q \gamma S} = 10 \frac{\tau - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d} \quad (12)$$

که در آن،  $q$ : دبی جریان در واحد عرض آبراهه  $(ft^3/(s.ft))$ ،  $q_b$ : دبی وزنی بار بستر در واحد عرض آبراهه  $(lb/(s.ft))$ ،  $\tau$ : تنش برشی  $(\tau = \gamma DS)$ ،  $d$ : قطر ذرات رسوب  $(ft)$ ،  $\gamma_s$ :



شکل ۱: نمونه بردار بار بستر هلی اسمیت مورد استفاده

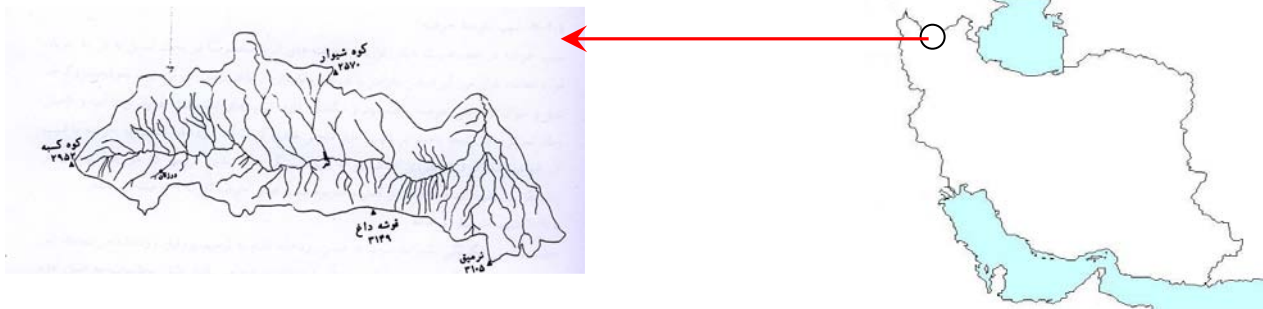
### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز اهر در شمال شرقی شهرستان تبریز با مساحتی بالغ بر ۲۴۲۶/۵ کیلومتر مربع و به‌عنوان یکی از بزرگترین حوضه‌های آبریز داخل استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این حوضه بین مختصات جغرافیایی  $۳۷^{\circ}۱۸'$  طول شرقی و  $۴۶^{\circ}۲۱'$  الی  $۳۸^{\circ}۴۴'$  عرض شمالی گسترش یافته و از لحاظ ارتفاعی بین ارتفاعات کوه کسبه با ارتفاع ۳۱۴۹ متر و محل ورود به رودخانه قره سو به ارتفاع ۸۷۵ متر قرار گرفته است. این حوضه از شمال به جنگل‌های ارسباران، از شرق به رودخانه قره سو، از غرب به ارتفاعات کوه کسبه و از جنوب به حوضه آجی چای محدود می‌گردد. حوضه آبریز اهر دارای چهار ایستگاه هیدرومتری به اسامی کاسین، اورنگ، اشدلق و تازه کند است، که ایستگاه اورنگ به دلیل داشتن خصوصیات فیزیکی ثابت و نزدیکی به محل سد ستارخان، در این پژوهش انتخاب گردید. این ایستگاه در طول جغرافیایی  $۴۶^{\circ}۵۲'$  و عرض  $۳۸^{\circ}۳۹'$  و ارتفاع ۱۴۴۵ متر واقع شده است. مساحت حوضه آبریز تا محل ایستگاه اورنگ ۸۴۰ کیلومتر مربع است. در شکل شماره (۲) موقعیت حوضه مورد مطالعه در سطح کشور و منطقه ترسیم و ارائه شده است.

الف) با عنایت به اینکه میزان رسوب معلق تابع سرعت و درجه آشفتگی جریان است، لذا نمونه‌برداری در طول زمان کافی انجام گرفته است. ب) در طرز نمونه‌برداری دقت شده تا از رسوب کف در امان بماند. از تعریفی که از بار بستر شده به خوبی معلوم است که اندازه‌گیری بار بستر به سادگی بار معلق نیست. نمونه‌بردار هلی اسمیت<sup>۱</sup> جزو معتبرترین نوع نمونه‌بردار بار بستر می‌باشد، که در این مطالعه نیز از آن استفاده شده است (شکل ۱). در نمونه‌بردار هلی اسمیت، سطح مقطع آن به تدریج از دهانه ورودی به سمت داخل افزایش می‌یابد و همین عامل باعث مکش در مدخل نمونه‌بردار می‌شود. وزن تقریبی هلی اسمیت مورد استفاده آن جهت تماس با کف رودخانه و همچنین مقاومت در برابر جریان‌های سیلابی در حدود ۴۵ کیلوگرم بوده است.

نحوه کاربرد نمونه‌بردار هلی اسمیت بدین ترتیب بوده است که با استفاده از پل تلفریک موجود در ایستگاه در هر نوبت بار بستر در سه مقطع (فواصل ۲، ۵ و ۷ متر از ساحل چپ) و در سه تکرار در مدت زمان ۱۵-۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شده و از میانگین کل آن‌ها به‌عنوان شاهد استفاده گردیده است.

برای برآورد بار رسوبی معلق و بستر در تاریخ‌های ۸۴/۲/۱۹، ۸۵/۱/۳۱، ۸۶/۱/۲۹، ۸۶/۱/۳۰، ۸۶/۲/۵، ۸۶/۲/۱۱، ۸۶/۲/۲۲ و ۸۶/۲/۲۶ پروفیل عرضی و طولی رودخانه در نقطه کنترل و در ایستگاه اورنگ با عملیات نقشه‌برداری، سرعت و دبی جریان با استفاده از مولینه در فواصل معین از ساحل چپ تعیین شدند. در آزمایشگاه تخصصی رسوب سنجی پس از انجام مراحل همچون عبور دادن از کاغذ صافی، خشک کردن، تعیین وزن مرطوب و خشک، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی، منحنی دانه‌بندی به دو روش هیدرومتری (برای بار معلق) و استفاده از الک‌ها (برای بار بستر) و قطرهای مشخصه رسوبات در تاریخ‌های نمونه‌برداری تعیین شدند که در ستون آخر جدول (۱) و (۳) مقادیر مشاهداتی رسوب آورده شده است.



شکل ۲: موقعیت حوضه مورد مطالعه

### نتایج و بحث

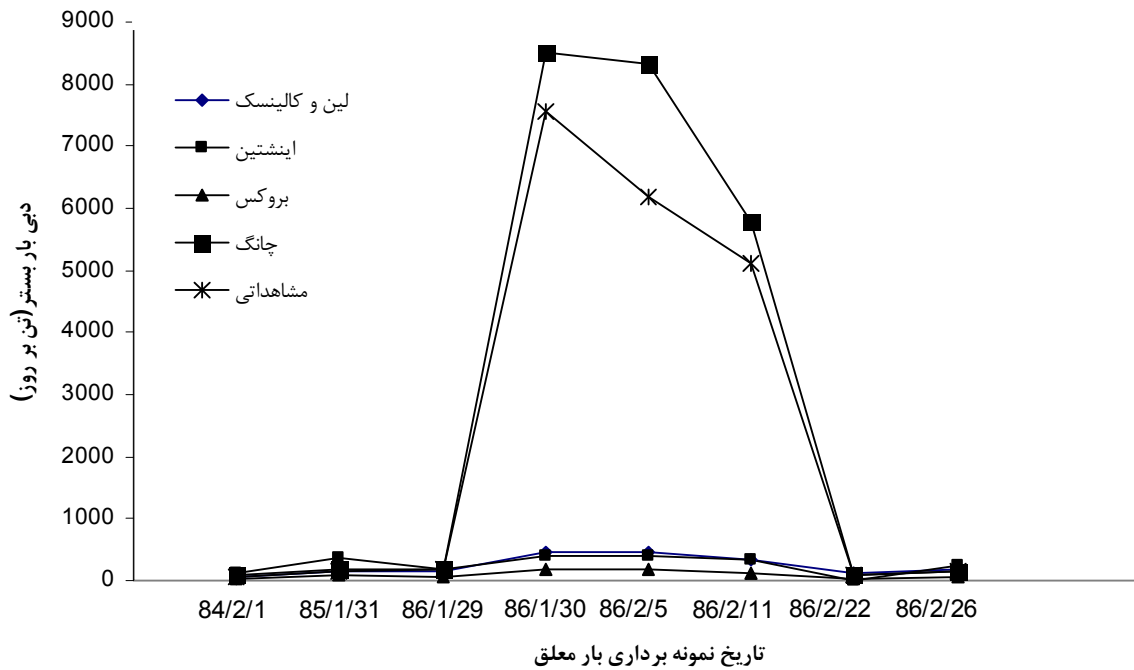
به منظور انتخاب و گزینش مناسب‌ترین روش یا روش‌های برآورد بار معلق در رودخانه اهرچای، براساس مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای رودخانه از جمله دبی، سرعت و مشخصات دانه‌بندی مواد بستر، میزان بار معلق با استفاده از چهار روش لین و کالینسک، اینشتین، بروکس، چانگ سایمونز و ریچاردسون محاسبه گردید، که نتایج محاسبات هر یک از روش‌ها در تاریخ‌های اندازه‌گیری شده، در جدول شماره (۱) آورده شده است. به‌منظور تدقیق هر چه بیشتر در انتخاب روش‌های محاسباتی، سعی گردید که نمونه‌برداری در دو حالت سیلابی و عادی رودخانه اندازه‌گیری شود. تاریخ‌های مواقع سیلابی و عادی اندازه‌گیری بار معلق در جدول (۱) منعکس شده است.

در شکل (۳) مقادیر محاسبه شده میزان بار معلق در مواقع سیلابی و عادی جریان رودخانه آورده شده است. در جدول (۲) نیز جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) جهت مقایسه آورده شده است. همان‌طور که از نمودارها نیز مشخص است در مواقع سیلابی و عادی رودخانه، روش چانگ نسبت به روش‌های دیگر دقت خوبی دارد. برای برآورد بار بستر نیز از هشت روش روتنر، میر-پتیر، شاکلیچ (معادله اول)، شاکلیچ (معادله دوم)، میر-پیترو مولر، شیلدز، کالینسک و کیسی استفاده شده که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین جهت بررسی بهتر در شکل (۴) نمودار تغییرات مقادیر بار بستر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی با روش‌های مختلف ارائه شده است. در جدول (۴) نیز مقادیر جذر میانگین مربعات خطا آورده شده است.

جدول ۱: نتایج برآورد بار معلق با استفاده از روابط ریاضی

تاریخ	$q$ ( $m^3/s.m$ )	D(m)	S	$d_{65}(m)$	لین و کالینسک ( $ton/day$ )	اینشتین ( $ton/day$ )	بروکس ( $ton/day$ )	چانگ ( $ton/day$ )	مشاهداتی ( $ton/day$ )
۸۴/۲/۱۹	۰/۱۲۲۶	۰/۲۹۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲۵	۶۷/۸	۱۱۶/۲	۱۷	۷۸/۴	۷۱
۸۵/۱/۳۱	۰/۲۸۸۳	۰/۳۲	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۲۴	۱۴۳/۷	۳۸۱/۵	۹۳/۵	۱۷۱	۱۶۸/۲
۸۶/۱/۲۹	۰/۲۶۶۳	۰/۳۷	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۲۷	۱۶۱/۹	۱۸۲/۲	۴۹/۸	۱۹۵/۷	۱۷۴/۳۵
۸۶/۱/۳۰*	۰/۵۰۷۲	۰/۴۳	۰/۰۱۳۲	۰/۰۰۲۶	۴۵۵/۲	۳۹۹/۹	۱۷۰/۶	۸۵۰/۱/۸	۷۵۷۲/۹
۸۶/۲/۵*	۰/۴۸۹۲	۰/۴۲	۰/۰۱۳۰	۰/۰۰۲۲	۴۴۶/۹	۳۹۴/۸	۱۶۹/۸	۸۳۲۲/۹	۶۱۷۳/۵
۸۶/۲/۱۱*	۰/۴۰۵۶	۰/۴۰	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۱۱	۳۳۹/۲	۳۳۷/۸	۱۱۴	۵۷۸۶/۸	۵۱۱۵/۳
۸۶/۲/۲۲	۰/۱۵۳۶	۰/۳۵	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۲۶	۱۰۸/۴	۲۳۸/۳	۲۸	۸۴/۷	۹۲/۴
۸۶/۲/۲۶	۰/۲۷۳۸	۰/۳۸	۰/۰۱۲۰	۰/۰۰۲۴	۱۸۱/۳	۲۴۸/۵	۵۶/۲	۱۵۹/۲	۱۶۳

\*مواقع سیلابی



شکل ۳: مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بار معلق رودخانه اهرچای

جدول ۲: مقادیر خطای  $RMSE$  روش‌های محاسباتی بار معلق نسبت به مقادیر مشاهداتی آن

روش‌های محاسباتی بار بستر	کالیسک	اینشتین	بروکس	چانگ
جذر میانگین مربعات خطا	۳۶۴۴/۶۶	۳۶۶۹/۹۱	۳۸۰۶/۱	۸۶۱/۲۶۹

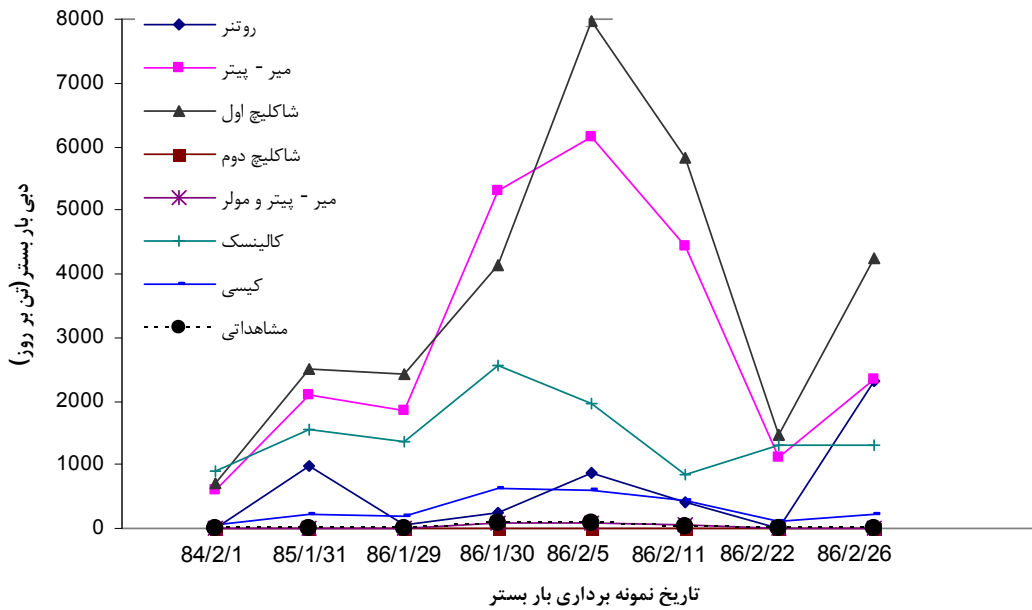
جدول ۳: نتایج برآورد بار بستر با استفاده از روابط ریاضی

تاریخ	$d_{50}$ (mm)	روتنر ( $ton/day$ )	میر- پیتر ( $ton/day$ )	شاکلیچ اول ( $ton/day$ )	شاکلیچ دوم ( $ton/day$ )	میر- پیتر و مولر ( $ton/day$ )	شیلدز ( $ton/day$ )	کالیسک ( $ton/day$ )	کیسی ( $ton/day$ )	مشاهداتی ( $ton/day$ )
۸۴/۲/۱۹	۱/۹	$۲/۳ \times 10^{-6}$	۵۸۹/۰	۷۱۱/۵	۴۳۴	۰/۰	۱۴۷۱۹	۹۰۵	۶۶/۵	۰/۳
۸۵/۱/۳۱	۲/۱	۹۶۹/۷۵	۲۰۹۸/۵	۲۴۹۵/۹	۱۴۵۳	۰/۲	۴۴۷۱۹	۱۵۵۶	۲۱۷/۸	۰/۹۶
۸۶/۱/۲۹	۲/۲	۴۴/۶	۱۸۳۸/۱	۲۴۲۴/۵	۱۲۴۱	۳/۰	۳۳۶۵۹	۱۳۵۶	۱۸۶/۰	۱/۴۸
۸۶/۱/۳۰	۲/۲	۲۵۰/۰	۵۲۹۷/۵	۴۱۲۶/۵	۴۲۲۸	۹۰/۸	۱۷۰۰۱۸	۲۵۶۶	۶۲۷/۰	۷۹/۸
۸۶/۲/۵	۱/۷	۸۸۲/۴	۶۱۴۲/۹	۸۰۱۱/۹	۴۱۰۶	۸۷/۵	۳۲۰۲۱۶	۱۹۶۰	۶۰۷/۰	۷۲/۲
۸۶/۲/۱۱	۰/۸۵	۴۱۸/۳	۴۴۳۹/۲	۵۸۰۹/۶	۳۰۲۰	۴۲/۹	۹۴۸۰۷	۸۴۲	۴۴۵/۰	۳۱/۷۸
۸۶/۲/۲۲	۲/۰	۰/۴	۱۱۰۹/۱	۱۴۷۳/۳	۷۷۰	۰/۸	۲۴۷۷۰	۱۳۱۹	۱۱۷/۰	۰/۶۷
۸۶/۲/۲۶	۱/۸	۲۳۰۳/۶	۲۳۳۵/۶	۴۲۴۱/۰	۱۵۱۰	۳/۴	۴۵۸۷۹	۱۳۱۵	۲۲۵/۰	۱/۵۹

جدول ۴: مقادیر خطای  $RMSE$  روش‌های محاسباتی بار بستر نسبت به مقادیر مشاهداتی آن

روش‌های محاسباتی بار بستر	روتنر	میر- پیتر	شاکلیچ اول	شاکلیچ دوم	میر پیتر و مولر	شیلدز	کالیسک	کیسی
جذر میانگین مربعات خطا	۹۴۰/۳۷۶	۳۵۰۵/۳۳	۴۲۶۵/۲۸	۲۴۷۷/۶۲	۷/۷۸۶۲۸	۱۳۵۲۸۶	۱۵۲۸/۵	۳۳۶/۳۵۶





شکل ۴: نمودار مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بار بستری رودخانه اهرچای

روش‌های روتنر، میر-پیتر، شاکلیج (معادله اول)، شاکلیج (معادله دوم)، میر-پیتر و مولر، شیلدز، کالینسک و کیسی نشان داد که روش میر-پیتر و مولر با داشتن حداقل خطای محاسباتی برآورد بهتری از بار بستری را از خود نشان می‌دهد. بنابراین روش میر-پیتر و مولر برای برآورد بار بستری پیشنهاد می‌شود. نخجیری و گلماهی نیز با بررسی روش‌های برآورد بار بستری رودخانه‌ها روش میر-پیتر و مولر را برای محاسبه بار بستری در شرایط اقلیمی رودخانه‌های ایران، پیشنهاد نموده‌اند (نخجیری و گلماهی، ۱۳۸۲). از آنجایی که چنین مطالعه‌ای نقش مهم و حیاتی در تخمین رسوبات وارده به مخزن سد ستارخان و بهبود مدیریت بهره‌برداری از آن را دارد، جهت تدقیق هر چه بیشتر این موضوع پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی سایر پژوهشگران، این محاسبات توأم با اندازه‌گیری‌های صحرائی در سرشاخه‌های رودخانه اهرچای انجام گرفته و رفتار حوضه در خصوص تولید بار رسوبی معلق و بار بستری تعیین گردد.

همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است روش میر-پیتر و مولر نسبت به سایر روش‌ها تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد و هم‌چنین خطای  $RMSE$  بسیار پایین‌تری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

### نتیجه‌گیری

با مقایسه مقادیر مشاهداتی (اندازه‌گیری شده) بار معلق و نتایج محاسبه شده، می‌توان دریافت که روش چانگ، سایمونز و ریچاردسون در مواقع سیلابی و عادی جریان رودخانه نتایج بهتری را از خود نشان داده‌اند. پرتانی و مجدزاده نیز با بررسی روش‌های برآورد بار معلق رودخانه قزل اوزن، روش بگنولد و روش چانگ را برای تخمین بار معلق این رودخانه توصیه نموده‌اند. طبیعی است که به علت تغییر شرایط منطقه‌ای و پارامترهای هیدرولوژیکی نتایج به‌دست آمده نمی‌توان نتیجه را به‌صورت کلی ارائه نمود. (پرتانی و مجدزاده، ۱۳۸۵). نتایج برآورد بار بستری با استفاده از

## منابع

- امامی، الف.، ۱۳۷۹. انتقال رسوب (ترجمه). انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۷۱۶ صفحه.
- پرتانی، ص. و مجدزاده، م.، ۱۳۸۵. بررسی روش‌های برآورد بار معلق رودخانه قزل اوزن و انتخاب معادله بهینه، مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه، دانشگاه شهیدچمران اهواز.
- حسن‌زاده، ی.، ۱۳۷۸. فرمول‌بندی دبی جامد رودخانه آجی‌چای، نشریه دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، سال یازدهم، شماره‌ی یازدهم، صفحه ۶-۲.
- خوجینی، ع. و هاشمی‌نژاد، م. ع.، ۱۳۷۷. بررسی رسوب‌دهی حوضه آبخیز طالقان، پژوهش و سازندگی، شماره ۹، صفحه ۱۰-۱۳.
- شفاعی بجستان، م.، ۱۳۸۴. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- لطیفی، الف. و حسن‌زاده، ی.، ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های مختلف برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها و انتخاب بهترین روش (مطالعه موردی رودخانه گاماسیاب)، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- نخجیری، ح.، گلماهی، ح.، ۱۳۸۲. سنجش و گزینش مناسب‌ترین روش‌های برآورد بار بستر رودخانه‌ها، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران. ۲۹ مهرماه لغایت ۱ آبان‌ماه، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، شیراز.
- Crawford, C. G. 1991. Estimation of suspended sediment rating curves and mean suspended sediment load, *Journal of hydrology*. Vol.129, PP.331-348.
- Gayle, L. 2004. Suspended sediment and turbidity patterns in the Middle Truckee River, California for the Period 2002 -2003. Division of Hydrologic Sciences, Desert Research Institute. No. 41196.
- Martin, Y. 2003. Evaluation of bed load transport formula using field evidence from the vedder river, British Columbia. *Journal of Geomorphology*. 53:75-95
- Pitlik, J., Wilcock, P. and Cui, Y. 2004. Manual for computing bed load transport in gravel bed streams.
- Thomas, R. B. 1985. Estimation total suspended sediment yield with probability sampling, *Journal of water resources research*. Vol.21, No.9, PP.1381-1388.
- Whitaker, A.C and Potts, D.F. 2007. Coarse bed load transport in a alluvial gravel bed stream, Dupuyer creek Montana, *Earth surf. Process, Land forms*, 1984-2004.
- Wilcock, P. 2001. Toward A practical method for estimating Sediment-transport rates in gravel-bed rivers, Department of Geography and Environmental Engineering, Johns Hopkins University, Baltiomor, USA.
- Wong, M and Parker, G. 2006. Reanalysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter and Muller using their own data base. *Journal of Hydrologic Engineering* . ASCE. 132(11):1159-1168.

## **Selection of Suitable Method to Estimate Suspended Load and Bed Load in Ahar Chai River (Upstream of Sattarkhan Dam).**

Samadian Fard<sup>1</sup>, S., Ghorbani<sup>2</sup>, M. A., Hoseiniler<sup>3</sup>, R., Hosein Zadeh Delir<sup>2</sup>, A. and Farsadi Zadeh<sup>2</sup>, D.

### **Abstract**

Investigating of sediment rate in rivers is one of the important aspects in river engineering. To estimate suspended load and bed load in streams several relations have been presented during past decades. But the complexity of the sediment transport phenomenon has been the reason why the different methods have been developed. In this research, in order to select the most suitable method to estimate suspended and bed load, the hydraulic and geometric specifications of Ahar Chai river in Orang hydrometry station simultaneously with the suspended load were measured in specific dates by the expert team, using the sampling bottles and bed load by the Helley Smith apparatus. Then, in related laboratories the suspended and bed load were determined. The suspended load rate was calculated by using four methods and the bed load rate was done by using eight methods. Finally, by using the obtained results, Chang, Simons and Richardson method to estimate the suspended load with root square error of (RMSE) 861.269 and Meyer-Peter & Muller method to estimate bed load with value of RMSE 7.78628, has been suggested.

**Keywords:** Ahar Chay, Bed load, Helley Smith, Sediment transport, Suspended load.

---

1. Former Graduate Student, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz  
2. Assistants professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz  
3. Msc, East Azarbayjan Regional Watercorp, Tabriz

-----