

ارزیابی معادلات برآورد بار بستر در رودخانه‌های استان گلستان با استفاده از نرم افزار توسعه یافته STE

رضایتیموری^۱، امیراحمد دهقانی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۳
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۲۴
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۵-۲۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۲۷

کلمات کلیدی:

مدل ریاضی شبه دویعدی
ظرفیت انتقال رسوب
روابط تجربی رسوبی
حمل رسوب
بار کف

خلاصه: تخمین مناسب دبی جریان و رسوب در رودخانه‌ها به عنوان اطلاعات پایه برای بسیاری از طرح‌ها و پروژه‌های مهندسی رودخانه دارای اهمیت است. برای محاسبه بار بستر در رودخانه‌ها، روابط تجربی و نیمه تجربی زیادی توسعه یافته‌اند که بسته به شرایط هیدرولیکی و مشخصات رسوب در هر رودخانه، ممکن است برخی از این روابط نتایج بهتری ارائه نمایند. در این تحقیق با توسعه یک نرم افزار کاربر پسند، توانایی ۲۷ رابطه موجود در برآورد بار بستر رودخانه‌های استان گلستان (چهل چای، خرمالو و سوسرا) که در آنها بار بستر اندازه‌گیری می‌شود، مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم بذکر است که در این نرم‌افزار قابلیت استفاده از مدل‌های شبه دو بعدی در محاسبه توزیع عرضی سرعت و استفاده در روابط بار رسوبی نیز وجود دارد. همچنین این نرم‌افزار قادر به افزایش دقت محاسبات بار رسوبی با محاسبه ضرایب کالیبراسیون در رودخانه مورد مطالعه می‌باشد. نتایج نشان داد که با استفاده از نرم‌افزار توسعه یافته، بهترین روش برای برآورد بار بستر در رودخانه‌های مورد مطالعه با استفاده از روابط تجربی و نیمه تجربی موجود، روش یانگ می‌باشد. در این حالت فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو برای رودخانه‌های چهل چای، خرمالو و سوسرا بترتیب ۴۳/۸، ۵۰ و ۳۰/۸ می‌باشد. همچنین با استفاده از مدل‌های شبه دو بعدی، نسبت ناجوری بین نیم تا دو برای رودخانه‌های چهل چای، خرمالو و سوسرا، بترتیب ۶/۳، ۶ و ۸ درصد افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که با استفاده از یک ضریب کالیبراسیون می‌توان دقت تعداد زیادی از روش‌ها در رودخانه‌های مورد مطالعه را افزایش داد.

۱- مقدمه

ولی با وجود گذشت سالها تحقیق و بررسی، هنوز رابطه‌ای که بتواند این مهم را برآورده کند، وجود ندارد. اصولاً این که انتظار داشته باشیم به چنین رابطه‌ای دست یابیم امری غیر ممکن است چرا که شرایط هیدرولیکی و آزمایشگاهی که هر یک از روابط انتقال در آن شکل می‌گیرند، نمی‌تواند برای همه مناطق و شرایط پاسخگو باشد. برای دستیابی به رابطه‌ای که میزان برآورد بهتری ارائه دهد، باید شرایط منطقه مورد مطالعه را با شرایط و فرضیاتی که هر یک از روابط در آن شکل گرفته‌اند، به دقت مقایسه و بررسی کرد تا شاید بتوان به جواب مناسب‌تر و منطقی‌تری که به واقعیت نزدیک باشد، دست یافت. لذا

مهندسی هیدرولیک طی دو قرن اخیر، حرکت مواد رسوبی در رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند، چرا که رفتار مواد رسوبی، در هیدرولیک رودخانه و تغییر مورفولوژی آن حایز اهمیت است. برآورد رسوب و تعیین رابطه‌ای که بتواند دقیق‌ترین مقدار را محاسبه نماید، همواره یکی از مهم‌ترین مسایل در زمینه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، برای مدیریت بهتر منابع آب و آبهای ذخیره شده در مخازن سدها بوده است. تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته *نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.dehghani@gau.ac.ir



را ارائه می دهد. فرمولهایی که بر اساس روش تنش برشی استوار شده اند، کمترین قابلیت اعتماد را دارند. این نتایج نشان می دهند که اگر چه روش رگرسیونی صرف، بر اساس فرآیند های فیزیکی انتقال رسوب پایه ریزی نشده است، ولی چنانچه داده های کافی با شرایط هیدرولیکی و رسوبی مناسب در این روش بکار روند، تحلیل رگرسیونی می تواند به ارائه فرمولهای مفیدی منجر شود [۷]، [۸].

Gomez (1989) به ارزیابی ۱۲ معادله ی بار بستر در بستر های شنی پرداخت و نتیجه گرفت که اگر هدف، به دست آوردن اطلاعات کلی در زمینه انتقال بار های رسوبی باشد و همچنین اطلاعات هیدرولیکی کمی در دست باشد، گزینه ی مناسب رابطه بگنولد می باشد [۹].

دی وریس^۶ (۱۹۹۳) مطالعه ای بر روی صحت بعضی از معادلات پیش بینی بار کف، با مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده حمل رسوب با استفاده از اطلاعات پترسون و هاوولز^۷ که در سال ۱۹۷۳ جمع آوری شده بودند [۱۰]، انجام دادند. نتایج برای نسبت ناجوری در فاصله نیم تا دو نشان می دهد که معادلات ساده ای مانند انگلاند و هانسن و ون راین نرخ حمل رسوب را بخوبی و یا حتی بهتر از معادلات پیچیده ای مانند وایت و همکاران و کریم و کندی برآورد می کنند [۱۱].

وو و یو^۸ (۲۰۰۱) مقایسه ای بین ۱۶ معادله با استفاده از ۱۷ سری از اطلاعات آزمایشگاهی انجام داد. بر طبق مطالعات ایشان، معادلات یانگ، انگلاند و هانسن و ایکرز و وایت بهترین معادلات هستند در حالیکه معادلات اینشتین، بگنولد (۱۹۶۶) و لارسن بدترین ها می باشند و بقیه معادلات در این بین قرار می گیرند [۱۲].

امید و همکاران (۲۰۱۱) نیز با استفاده از داده های اندازه گیری شده صحرایی از رودخانه های چهل چای، خرمالو، نرماب، سوسرا و قره سو واقع در استان گلستان، به بررسی دقت ۱۰ معادله نرخ انتقال بار بستر پرداخته اند. نتایج این پژوهش نشان داد که برای رودخانه چهل چای معادلات ایکرز و وایت، مییر-پیتر و مولر و ون راین نتایج خوبی با دانه بندی مواد بستر می دهند. برای رودخانه ی خرمالو ون راین، مییر-پیتر و مولر و ایکرز و وایت بطور قابل قبولی نرخ حمل بار کف را در محدوده اطلاعات صحرایی محاسبه می کنند. برای رودخانه

برای سهولت کار و افزایش سرعت و دقت در امر محاسبات و همچنین مقایسه و بررسی دقیق تر نتایج بدست آمده با استفاده از روش های مختلف نیاز به نرم افزاری دقیق و سریع با محیط کاربری مناسب برای این مهم احساس می شود.

در سال ۱۸۷۹، مهندس جوان فرانسوی Paul Francois (Dominique Du Boys., 1879) مدل انتقال رسوب خود را به صورت اصول نظری ارائه داد. Armin (1888-1969) Schoklitsch را می توان به عنوان اولین محقق نام برد که به صورت جدی به بررسی و آزمون رابطه دو بویز^۱ پرداخت و برای ضریب ثابت در معادله دو بویز با توجه به آزمایش های خود مقادیری را پیشنهاد داد [۱]. اهمیت معادله دو بویز پس از ورود به ایالات متحده، جایی که رودخانه های بزرگتری نسبت به فرانسه دارد، بیش از پیش نمایان شد و از آن پس رابطه دو بویز به عنوان اولین مدل انتقال رسوب سر مشق بسیاری از محققین برای بررسی انتقال بار های رسوبی قرار گرفت. تلاش ها برای یافتن بهترین و مناسب ترین معادله چه به صورت کلی و یا اختصاصی (برای یک رودخانه ی خاص) آغاز شد و محققین بسیار زیادی به بررسی دقت این معادلات با اندازه گیری های صحرایی پرداختند. با این وجود تا برآورد دقیق بار رسوبی رودخانه ها فاصله زیادی باقی است و نیاز به بررسی های بیشتر احساس می شود [۲]. هرچند برخی دیگر از محققین بر این باورند که برآورد بار رسوبی با خطایی کم تر از ۲۰۰ درصد، به دلیل پیچیدگی های این فرایند امکان پذیر نیست [۳].

مقایسه ای توسط انجمن آلمانی منابع آب و اصلاح اراضی^۲ و وتر^۳ (۱۹۸۸) بر روی داده های هفت رودخانه برای ارزیابی دقت ۱۹ فرمول انتقال انجام گرفت [۴]. مقایسه های انجام شده نشان داد، که با در نظر گرفتن تمام داده ها، فرمول رگرسیونی پیشنهاد شده توسط کریم^۴ و کندی^۵ (۱۹۹۰) بطور کلی دارای بهترین مطابقت با اندازه گیری ها است. این امر تا حدی معلول دامنه وسیع داده های بکار رفته در تحلیل رگرسیونی کریم و کندی می باشد. برطبق نظر این انجمن اگر مقایسه به دامنه اندازه ی ذرات ماسه محدود شود، فرمول بگنولد [۵] و یانگ [۶] بهترین مطابقت با نتایج اندازه گیریها

- 1 Du Boys
- 2 German Association for Water Resources and Land Improvement
- 3 Vetter
- 4 Karim
- 5 Karim and Kennedy

6 De Vries
7 Peterson and Howells
8 Wu and Yu

در شرایط متفاوت دبی جریان (کم آبی تا سیلاب) برآورد نمود. نتایج ارائه شده توسط مدل‌های شبه دویبعدی مزیت عمده ای نسبت به نتایج مدل‌های یک بعدی دارند. در ضمن با واسنجی این مدل در مقاطع رودخانه ای دارای ایستگاه هیدرومتری، می توان توزیع عرضی سرعت و تنش برشی را برای هر عمق دلخواه جریان محاسبه نمود. از مزایای این روش می توان به شرایط ویژه در هنگام وقوع سیلاب که اندازه گیری سرعت ها، کاری خطرناک و وقتگیر است، اشاره نمود. همچنین تعیین نقاط فرسایشی و رسوب گذار در عرض رودخانه، محاسبه دبی رسوب معلق و بار بستر، تعیین الگوی فرسایش یا رسوب گذاری در عرض رودخانه، طراحی مقاطع پایدار رودخانه، شبیه سازی انتقال مواد آلاینده و انجام عملیات لایروبی رودخانه ها امکانپذیر خواهد شد. مدل‌های شبه دویبعدی همخوانی خوبی با فرآیند محاسبات معمول دبی جریان در رودخانه ها داشته و در صورت واسنجی مناسب، نتایج کاربردی خوبی دارند. فرآیند اندازه گیری و تحلیل داده های سرعت جریان (به کمک دستگاه سرعت سنج مولینه) و غلظت رسوب (به کمک دستگاه های نمونه بردار) در رودخانه ها، تقریباً مشابه فرآیند تئوری حاکم بر مدل‌های ریاضی شبه دویبعدی است به طوری که هم در طبیعت و هم در مدل ریاضی، پارامترهای جریان و رسوب به صورت متوسط در عمق محاسبه شده و تغییرات آن ها در عرض رودخانه ارائه می شود. تاکنون مطالعات کمی در زمینه محاسبه توزیع غلظت رسوب در عرض رودخانه ها صورت گرفته و اغلب مطالعات با استفاده از مدل های ریاضی یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی انجام شده است. شفاعی بجستان و استاد عسکری (۲۰۰۰) نشان دادند که رابطه تصحیح شده انیشتین قابلیت خوبی در تخمین بار بستر در ایستگاه اهواز دارد. در این پژوهش، برای حل هم زمان سرعت جریان و غلظت رسوب در عرض رودخانه کارون از تلفیق مدل ریاضی شبه دویبعدی شیونو و نایت^۲ (۱۹۹۱) و روابط تجربی رسوب ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف استفاده شده است. با واسنجی و صحت سنجی این مدل ریاضی در محدوده وسیعی از دبی های جریان در رودخانه کارون در محل ایستگاه هیدرومتری ملاثانی، کارایی آن در تخمین دبی جریان و دبی کل رسوب رودخانه ارزیابی شده است. مقایسات گسترده ای در مورد دقت معادلات گوناگون انتقال توسط محققین مختلف انجام گرفته است [۱۶].

ی نرماب نیز معادلات انگلاند و هانسن، ون راین و اینشتین با استفاده از دانه بندی مواد کف نتایج خوبی دادند. برای رودخانه ی سوسرا معادلات انگلاند و هانسن و اینشتین و رودخانه ی قره سو بترتیب معادلات فرایلینک، ون راین و مییر- پیتر و مولر نتایج رضایت بخشی با دانه بندی مواد بستر می دهند [۱۳].

حداد چی و همکاران (۲۰۱۱)، با اندازه گیری بار رسوبی رودخانه نوده (با بستر شنی) توسط دستگاه نمونه بردار هلی اسمیت؛ به بررسی ۱۳ معادله ی شناخته شده ی بار بستر پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که روابط ون راین، میر- پیتر و مولر و ایکرز و وایت، مقدار بار بستر را مناسب تر از سایر روابط پیش بینی می کنند [۱۴]. دهقانی و همکاران (۲۰۱۴)، نیز با استفاده از داده های اندازه گیری شده صحرائی از دو رودخانه ی کورا و آرا واقع در کشور مالزی، به بررسی دقت ۱۲ معادله ی نرخ انتقال بار بستر پرداخته اند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که معادله های میر- پیتر و مولر (۱۹۴۸)، جولین (۲۰۰۲) و ویلسون (۱۹۹۶) به ترتیب، نتایج مناسب تری نسبت به سایر معادلات ارائه می دهند و از بین معادلات برآورد بار بستر، معادله ی میر- پیتر و مولر (۱۹۴۸) که در آن ۶۱/۴ درصد از داده ها در دامنه ی نسبت ناچوری بین ۰/۵ تا ۲ قرار می گیرند، بهترین نتایج را برای رودخانه های محدوده ی مطالعاتی ارائه می دهد [۱۵].

از سال ۱۹۸۶ تاکنون تلاشهای بسیاری توسط پژوهشگران مختلف صورت گرفته است تا یک مدل ریاضی مناسب با حداقل پیچیدگی و داده های ورودی اندک برای شبیه سازی هیدرولیک جریان و رسوب در رودخانه ها ارائه شود. با توجه به آشفتگی بودن جریان در رودخانه ها، تغییرات سرعت جریان در عمق قابل توجه نبوده و معمولاً از انتگرال گیری عمقی سرعت در رودخانه ها استفاده می شود. به عبارت بهتر به دلیل اختلاط جریان و تبادل مومنتوم بین ذرات آب با سرعت های مختلف، پروفیل سرعت پرتی می شود و سرعت ذرات در اعماق مختلف به هم نزدیکتر می شود. به اینگونه مدل ها، مدل‌های شبه دویبعدی یا توزیع عرضی^۱ گفته می شود. بنابراین در این مدل ها، توزیع سرعت و پارامترهای دیگر جریان و رسوب در عرض رودخانه محاسبه می شوند. با محاسبه توزیع عرضی سرعت و غلظت رسوب در رودخانه ها می توان ظرفیت آبدگری رودخانه ها را

تحلیل گر شبه دو بعدی مانند مدل شیونو ونایت است و قادر به محاسبه دبی جریان و توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه‌ها و کانال‌ها با استفاده از پارامترهایی نظیر سطح مقطع جریان، ضریب زبری مانینگ، شیب انرژی جریان و لزجت گردابه‌ای می‌باشد. لازم به ذکر است ضریب زبری مانینگ و شیب انرژی تنها با داشتن دو پارامتر نظیر عمق جریان و دبی مربوطه با استفاده از نرم افزار STE قابل واسنجی و صحت سنجی می‌باشند.

لذا با توجه به توانایی‌ها و قابلیت‌های نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق ارزیابی روش‌های برآورد بار بستر با هر دو مدل یک بعدی و شبه دو بعدی شیونو ونایت انجام گردیده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مواد و روشها

۱-۲ - نرم‌افزار STE

با توجه به پیچیدگی‌های زیاد محاسبات هیدرولیکی و هیدرولیک رسوب و همچنین پارامترهای مختلف مورد نیاز در این محاسبات، تعداد دفعات تکرار این محاسبات برای داده‌های مختلف رسوبی در ایستگاه‌ها و رودخانه‌های مختلف و از همه مهم تر اهمیت دقت و اجتناب از اشتباهات محاسباتی، نیاز به استفاده از کامپیوتر و برنامه‌های کامپیوتری را محسوس تر می‌کند لذا توسعه نرم‌افزاری کاربردی و کاربر پسند با هدف راحت تر کردن دسته بندی داده های ورودی، محاسبه پارامترهای اولیه مورد نیاز (مانند شعاع هیدرولیکی جریان، شیب انرژی، اطلاعات دانه بندی و غیره)، محاسبات هیدرولیکی و برآورد بار رسوبی (بستر، معلق و کل) و از همه مهم تر بالا بردن دقت و اجتناب از خطا های محاسباتی همراه با کم کردن زمان مورد نیاز برای محاسبات می‌باشد.

با استفاده از کامپیوتر و نرم افزار های کامپیوتری به راحتی قادر به حل عددی معادله مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت که با انتگرال گیری عمقی از معادله ناویه- استوکس در شرایط جریان ماندگار حاصل شده است [۲۳]، خواهیم بود و تغییرات سرعت طولی جریان در عرض رودخانه قابل محاسبه شده و با استفاده از روش های مختلف بر آورد بار رسوب قادر به مدلسازی نرخ حرکت بار رسوبی در عرض رودخانه ها خواهیم شد.

نرم افزار Sediment Transport Estimator (STE) که با

ایوب زاده و ظهیری (۲۰۰۵) با استفاده از رابطه رسوبی ایکرز- وایت (۱۹۷۳) [۱۷] و حل تحلیلی مدل شیونو ونایت، رابطه سنجه کل رسوب را برای رودخانه میناب در استان هرمزگان شبیه سازی نمودند. به دلیل حل تحلیلی مدل ریاضی در این پژوهش، فرآیند انجام محاسبات رسوبی بسیار طولانی گزارش شده است. هو و همکاران (۲۰۱۰) [۱۸] با استفاده از حل معادله پخشیدگی در عرض کانال مرکب، توزیع غلظت رسوب معلق در عرض یک کانال آزمایشگاهی را به خوبی شبیه سازی نمودند. اغلب مطالعات پژوهشگران مختلف در زمینه انتقال رسوب رودخانه کارون به منظور شبیه سازی وضعیت رسوب گذاری یا فرسایش در طول رودخانه بوده است. در این ارتباط عباسی (۲۰۰۷) [۱۹] به کمک مدل شبکه عصبی مصنوعی، ظرفیت رسوب معلق عبوری از ایستگاه های هیدرومتری اهواز و فارسیات را محاسبه نموده و وضعیت رودخانه کارون در این فاصله را رسوب گذار عنوان نمود [۲۰].

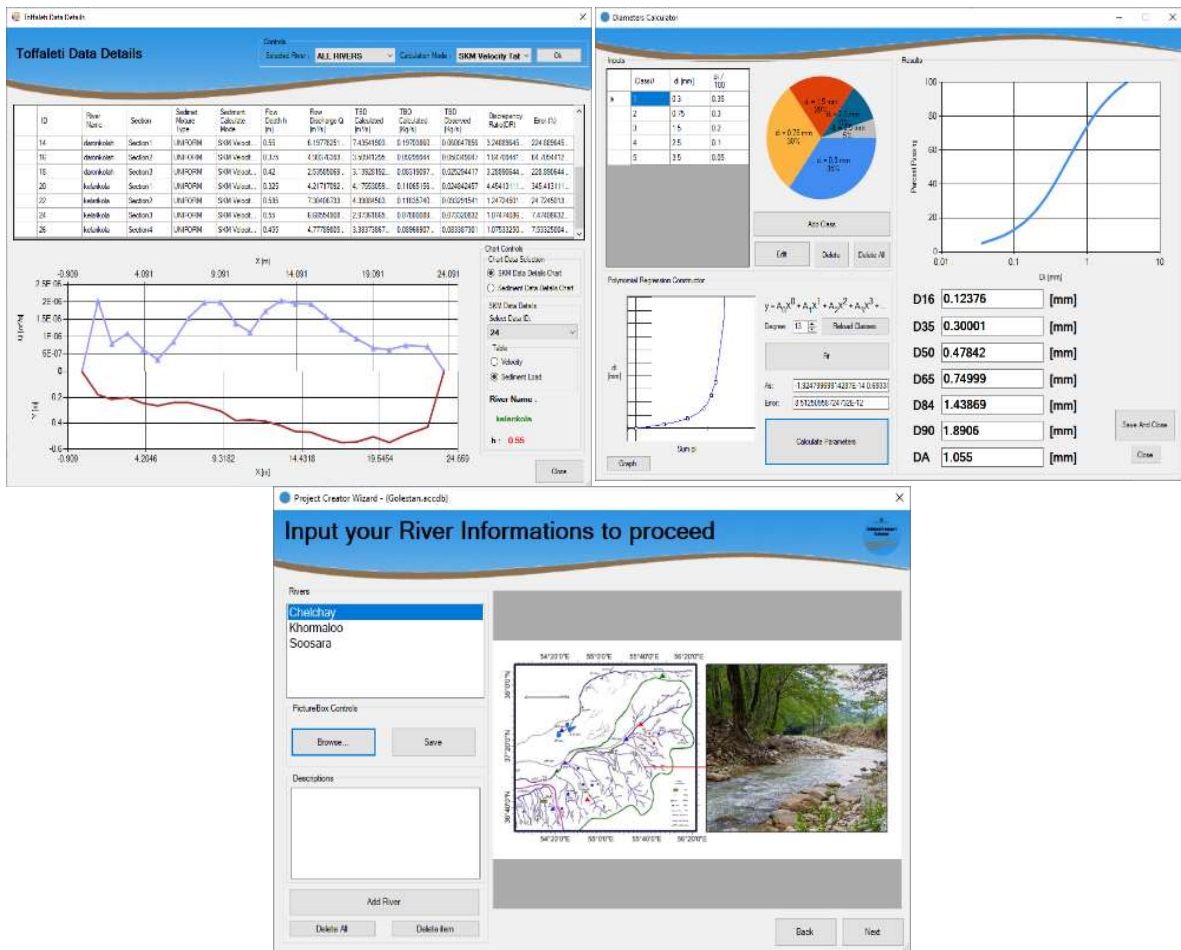
ظهیری و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل ریاضی GSTARS حمل و ته نشینی رسوب را در طول رودخانه کارون حدفاصل ایستگاه های هیدرومتری اهواز تا فارسیات را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که روابط رسوبی ایکرز- وایت، توفالتی و انگلوند- هانسن تغییرات پروفیل طولی بستر رودخانه را با دقت به نسبت خوبی برآورد میکنند [۲۱].

ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر ضریب زبری متغیر بر صحت پیشبینی تراز سطح آب در رودخانه کارون را به کمک مدل ریاضی FASTER بررسی نمودند. نتایج نشان داد که انتخاب ضریب مانینگ ثابت، نمی تواند پروفیل سطح آب را به صورت مناسبی به ازای تمامی دبیهای مختلف جریان (از پایه تا سیلابی) شبیه سازی نماید [۲۲].

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار توسعه یافته توسط نویسندگان مقاله، به نام (Sediment Transport Estimator) (STE) که نرم‌افزاری کاربردی و کاربر پسند و به زبان برنامه نویسی VB.NET و در محیط ویندوز طراحی شده است، معادلات برآورد بار بستر در رودخانه‌های چهل چای، خرمالو و سوسرا مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نرم افزار STE مجهز به تحلیل گره‌های یک بعدی (سرعت متوسط) مانند مدل انگلوند - هانسن^۱ (۱۹۶۷) و مدل ون راین^۲ (۱۹۸۴) و

1 Engelund and Hansen

2 Van Rijn



شکل ۱: محیط کاربری نرم افزار STE

Fig. 1: STE User form

تعداد و برای هر رودخانه تعریف شده امکان ثبت بی نهایت سری های مختلف دانه بندی^۲ و ایستگاه های محاسباتی، سطح مقطع و پارامترهای مربوط به آن^۳ می باشد (شکل ۱).

• امکان تعریف دانه بندی های یکنواخت و غیر یکنواخت و تغییر روند محاسبات بار رسوبی مناسب با نوع دانه بندی
• امکان دریافت Size Fractions برای هر سری دانه بندی و محاسبه قطر های مختلف دانه بندی توسط برازش خط رگرسیونی با درجات بالا (شکل ۱)

• امکان واسنجی شیب انرژی رودخانه با استفاده از دو پارامتر عمق و دبی جریان

• امکان محاسبه دبی در عمق های مختلف جریان و ارائه منحنی

زبان VB.NET در محیط Microsoft Visual Studio تنظیم و برنامه نویسی شده است قابلیت ها و امکانات زیر را برای کاربران خود فراهم می کند:

• امکان دسته بندی، ذخیره سازی، فراخوانی، اصلاح و ایجاد تغییرات برای تمامی داده های هر پروژه و ایجاد فایل های دیتابیس برای هر پروژه با پسوند (accdb) که اطلاعات ذخیره شده در این نوع فایل هم از طریق خود نرم افزار و هم از طریق نرم افزار Microsoft Access قابل فراخوانی و اصلاح می باشند.

• امکان گلچین و انتخاب روش های مورد نیاز برای برآورد بار رسوبی

• امکان تعریف رودخانه های متعدد در هر پروژه به همراه ذخیره سازی عکس و اطلاعات متنی مربوط به هر رودخانه بدون محدودیت

2 Sediment Series
3 Section Series

1 Access Database File

جدول ۱: معادلات بر آورد بار بستر بکار رفته در نرم افزار STE

Table 1: Bed load sediment estimator in STE software

اشیدا و میشیو ^۱ (۱۹۷۲)	دو بویز ^۱ (۱۸۷۹)
انگلاند و فردزو ^۱ (۱۹۷۶)	کیسی (۱۹۳۵)
ون راین ^۱ (۱۹۸۴)	شیلدز ^۱ (۱۹۳۶)
ون راین احتمالاتی (۱۹۸۷)	میبر - پیتر و مولر (۱۹۴۸) (۲ حل متفاوت)
پارکر و همکاران ^۱ (۱۹۸۲)	شوکلچ ^۱ (۱۹۵۰)
میزی و همکاران ^۱ (۱۹۸۴)	اینشتین (۱۹۵۰)
خصوصیات بستر ون راین (۱۹۸۴)	تجربی اینشتین - براون (۱۹۵۰)
یانگ ^۱ (۱۹۸۴)	روتندر ^۱ (۱۹۵۹)
ساماگا و همکاران ^۱ (۱۹۸۶)	یالین ^۱ (۱۹۶۳)
نیلسن ^۱ (۱۹۹۲)	انگلاند و هانسن ^۱ (۱۹۶۷)
خصوصیات بستر نیلسن (۱۹۹۲)	ایکرز و وایت ^۱ (۱۹۷۳)
ونگ و پارکر ^۱ (۲۰۰۶)	بگنولد (۱۹۶۶)
Bathurst (2006)	توفالتی ^۱ (۱۹۶۷)

روش از روش‌های محاسبات بار بستر این نرم افزار قادر به مدلسازی نرخ حرکت بار رسوبی در عرض رود خانه با استفاده از نتایج تحلیل گر مدل شیونو ونایت هستند. (شکل ۱).

این نرم افزار قادر است دبی رسوبی بدست آمده از روش‌های مختلف را برای هر داده ورودی با دبی رسوبی مشاهده شده و دریافت شده از کاربر طبق رابطه $DR = \frac{q_{calculated}}{q_{observed}}$ مقایسه و نسبت ناچوری را محاسبه و ثبت کند و همچنین طبق فرمول $Error = \left| \frac{q_{calculated}}{q_{observed}} - 1 \right| \times 100$ خطای محاسباتی را محاسبه و ثبت می کند و در نهایت پس از اتمام محاسبات بار رسوبی در صفحه ی نهایی، نرم افزار قادر خواهد بود نتایج را ارزیابی و بهترین روش ها را به کاربر گزارش دهد (شکل ۱). (در این دو رابطه $q_{calculated}$ دبی بار رسوبی محاسبه شده و $q_{observed}$ دبی بار رسوبی اندازه گیری شده می باشد)

در قسمت مربوط به ارزیابی روش ها، نرم افزار نتایج بدست آمده از محاسبات را در ۶ دامنه از نسبت های ناچوری یا خطای محاسباتی به انتخاب کاربر مورد بررسی و ارزیابی قرار می دهد به این صورت که هر روش محاسبه بار بستر در چند سری داده موفق به محاسبه بار بستر و بدست آوردن نسبت ناچوری در دامنه مورد نظر کاربر، شده است. در قسمت ارزیابی روش‌ها از طریق دقت محاسباتی ملاک نرم

دبی اشل برای هر Section تعریف شده رودخانه با استفاده از دو تحلیل گر یک بعدی (سرعت متوسط) مدل انگلوند - هانسن و مدل ون راین و یک تحلیل گر شبه دو بعدی مدل شیونو ونایت. به کمک مدل شیونو ونایت نرم افزار قادر به محاسبه دبی جریان و توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه ها و کانال‌ها با استفاده از پارامترهایی نظیر سطح مقطع جریان، ضریب زبری مانینگ، شیب انرژی جریان و لزجت گردابه ای می باشد که لازم به ذکر است ضریب زبری مانینگ و شیب انرژی تنها با داشتن دو پارامتر نظیر عمق جریان و دبی مربوطه قابل واسنجی و صحت سنجی می باشند. همچنین با داشتن سرعت‌های اندازه گیری شده در عرض یک مقطع از رودخانه، نرم افزار STE قادر خواهد بود با کمک بخش Eddy Viscosity Optimizer خود پارامتر لزجت گردابه ای مربوط به مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت را بهینه سازی کرده و سرعت های عرضی بدست آمده و در نهایت خروجی مدل شیونو ونایت را به آنچه در واقعیت اتفاق می افتد بسیار نزدیک تر و خطای محاسبات را کاهش دهد.

۲۷ روش محاسبه بار بستر در این نرم افزار کد نویسی شده است (جدول ۱). از این تعداد روشها، ۱۰ روش قادر به استفاده مستقیم از Size Fractions هستند که برای بالا بردن دقت محاسبات بار بستر در رودخانه‌هایی با دانه بندی غیر یکنواخت تنظیم شده اند. ۱۷

که سرعت در آن نقطه باید به دست آید. اندیس d در رابطه بالا بیانگر حالت متوسط در عمق یا میانگین عمقی^۱ سرعت است.

رابطه دیفرانسیلی (۱) دارای ۳ ضریب واسنجی می باشد (f ، λ و Γ) که باید با توجه به شرایط هندسی و هیدرولیکی رودخانه به دست آیند. ضریب لزجت تلاطمی (λ) در محدوده ۰,۰۷ تا ۰,۵۰ متغیر بوده و به طور متوسط مقدار آن در رودخانه ها حدود ۰,۱۱ گزارش شده است. از طرف دیگر، مطالعات مختلف نشان داده است که مدل‌های ریاضی، به این ضریب حساس نبوده و در نظر گرفتن یک ضریب ثابت در کل مقطع عرضی، نتایج رضایت بخشی را برای توزیع عرضی سرعت جریان ارائه می دهد همچنین جیسون^۲ (۲۰۱۱) [۲۴] بر اساس نتایج پژوهش های نزو و رودی^۳ (۱۹۸۶) [۲۵] و نیز شریفی^۴ (۲۰۰۹) [26]، نتیجه گیری نمود که $\frac{K}{6} \cong 0.07$ (که K ثابت فان کارمن^۵ بوده و حدود ۰,۴۱ می باشد) است. آبریل و نایت^۶ (۲۰۰۴) [27] از همین مقدار برای محاسبات خود در رودخانه سورن در انگلستان استفاده نمودند. مطالعات لیائو و نایت^۷ (۲۰۰۷) [۲۸] نیز نشان داده است که در محاسبات مدل شیونو و نایت، ضریب لزجت تلاطمی تقریباً بی اهمیت بوده و می توان بدون از دست دادن دقت، از روابط کلاسیک استفاده نمود به همین دلیل در این پژوهش، برای ضریب لزجت جریان متلاطم مقدار ثابت ۰,۰۷ در نظر گرفته شده است.

روش‌های زیادی برای حل عددی رابطه دیفرانسیلی (۱) ارائه شده است. در نرم افزار STE از روش تفاضل‌های محدود استفاده شده است. در این تحقیق پس از حل این معادله برای تک تک نمونه برداری‌ها توسط نرم‌افزار توسعه یافته، توزیع سرعت در عرض سطح مقطع بدست آمده و با جایگذاری مقادیر بدست آمده به جای سرعت متوسط و عمق مربوط به سرعت بدست آمده در عرض به جای عمق متوسط مقطع در روابط محاسبه بار بستر و تکرار محاسبات به تعداد داده‌های توزیع عرضی سرعت بدست آمده از مدل شیونو ونایت، توزیع عرضی بار رسوبی بستر بر حسب متر مربع بر ثانیه بدست خواهد آمد، این مقادیر دو به دو در عرض متوسط‌گیری شده در فاصله بین

افزار نسبت ناچوری میانگین و نزدیک به ۱ می باشد.

در نرم‌افزار STE روشی برای افزایش دقت محاسبات در رودخانه مورد مطالعه طراحی و تنظیم شده است.

در این روش نرم‌افزار برای تک تک روش های فعال شده توسط کاربر وارد یک عملیات جست و جو شده و با گامی که کاربر انتخاب میکند اقدام به محاسبه یک ضریب با رعایت به ترتیب دوشرط ذیل خواهد کرد. (لازم به ذکر است نرم‌افزار با بررسی اعداد محاسبه شده توسط روش مورد بررسی در عملیات، بازه احتمالی وجود بهترین ضریب را بدست آورده و زمان محاسبات را کاهش میدهد.)

الف) درصد فراوانی در بازه نسبت ناچوری انتخاب شده بیشتر یا مساوی ضریب قبلی باشد. (مرحله اول ضریب ۱ در نظر گرفته می‌شود) ب) نسبت ناچوری متوسط به یک نزدیک تر شده باشد.

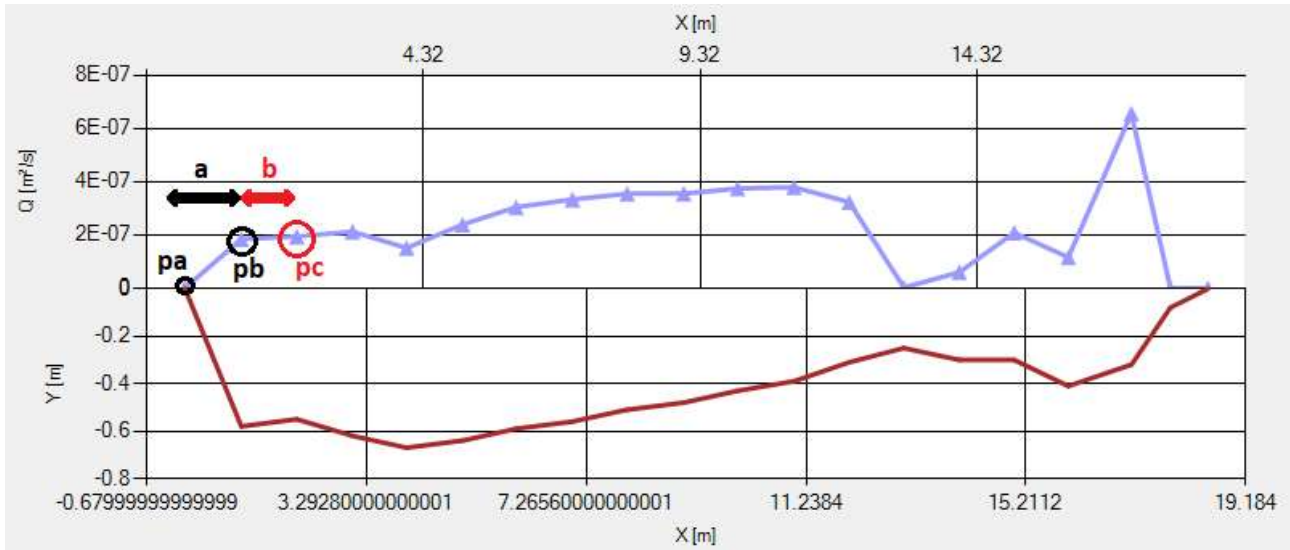
۲-۲- مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت

تاکنون مدل های ریاضی دوبعدی زیادی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است شیونو و نایت (۱۹۹۱) برای اولین بار مدلی ریاضی برای محاسبه توزیع عرضی سرعت در رودخانه ها ارائه نمودند. در این مدل ساده که با انتگرال گیری عمقی از معادله ناویر-استوکس در شرایط جریان ماندگار و با دخالت اثر جریانهای ثانویه حاصل شده است، تغییرات سرعت طولی جریان در عرض رودخانه به صورت زیر قابل مدلسازی است:

$$\rho g H S_0 - \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{S^2}} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right\} = \Gamma = \frac{\partial H (\rho \overline{UV})_d}{\partial y} \quad (1)$$

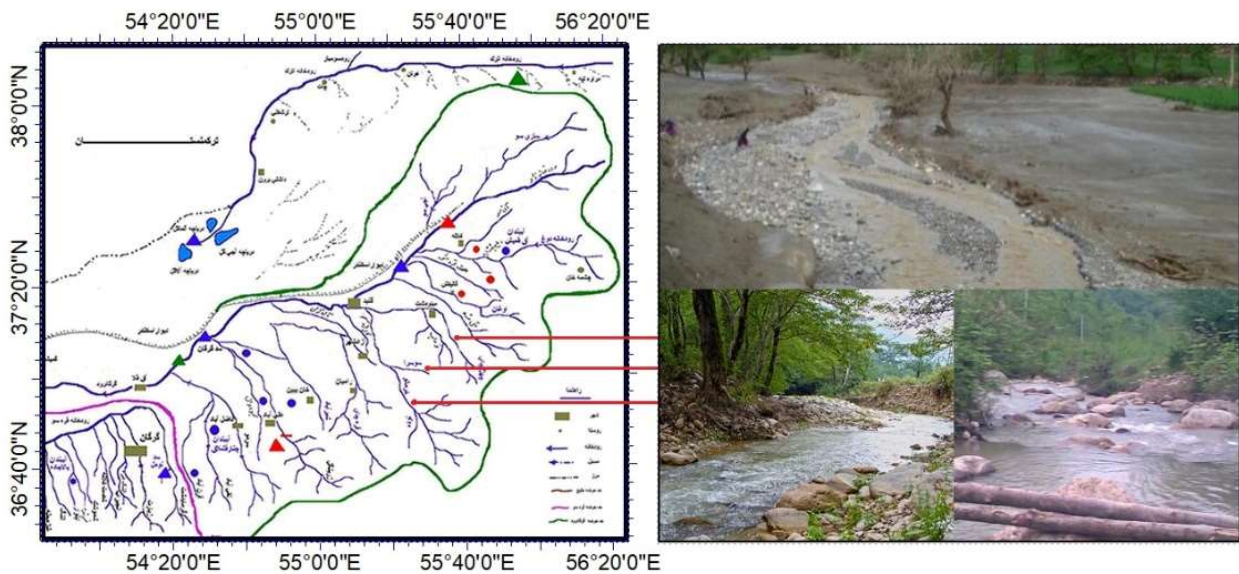
که در آن، ρ جرم حجمی آب ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$)، g شتاب ثقل ($\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)، H عمق جریان (m)، S_0 شیب طولی بستر، f ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ، u_d سرعت متوسط در عمق ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)، S شیب جانبی کانال یا رودخانه، λ ضریب بدون بعد لزجت تلاطمی جریان، Γ جمله یا عبارت جریان های ثانویه و عرض مقطع می باشد

1 Depth-Averaged
2 Jeson
3 Nezu and Rodi
4 Sharifi
5 Von Karman
6 Abril and Knight
7 Liao and Knight



شکل ۲: توزیع عرضی دبی بار بستر همراه با مقطع رودخانه رسم شده توسط نرم افزار STE

Fig. 2: Distribution of bed load discharge across the river with cross section plotted by STE software



شکل ۳: محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر

Fig. 3: Study area of present study

شده عمل شده است:

$$Q_b \left(\frac{m^3}{s} \right) = \left(\frac{P_a + P_b}{2} \times a \right) + \left(\frac{P_b + P_c}{2} \times b \right) + \dots \quad (2)$$

یکدیگر ضرب شده، حاصل جمع این مقادیر برابر با دبی بار رسوبی کل مقطع بر حسب متر مکعب بر ثانیه حاصل از روش شبه دو بعدی شیونو ونایت خواهد بود. تمامی مراحل گفته شده بصورت اتوماتیک و کالیبره شده برای روش هایی که در مسیر محاسبات خود از پارامتر سرعت متوسط استفاده می کنند توسط نرم افزار STE انجام شده است. به عنوان مثال در شکل (۲) و رابطه (۲) طبق توضیحات نوشته

جدول ۲: اطلاعات هیدرولیکی و هندسی داده ها در رودخانه چهل چای

Table 2: Hydraulic characteristics and geometric data in Chehel-Chay river

شیب	قطر میانگین (d_a) میلیمتر	قطر (d_{90}) میلیمتر	قطر میانه (d_{50}) میلیمتر	دما (سانتیگراد)	دبی رسوب (کیلو گرم بر ثانیه)	عرض سطح آزاد آب (متر)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)	شعاع هیدرولیکی (متر)	سرعت جریان (متر بر ثانیه)
۰/۰۱۷۵									بیشینه
	۲.۱۶	۷.۸	۱.۴	۱۳	۰.۱۵۵	۱۱	۴.۷۲۲	۰.۲۸۷	۱.۰۲
									کمینه
	۰.۶۹۹	۱.۶۵	۰.۷	۱۸	۰.۰۰۰۱۵۴	۶.۲۵	۰.۴۸۷	۰/۱۴۳	۰.۳۹

جدول ۳: اطلاعات هیدرولیکی و هندسی داده ها در رودخانه خرمالو

Table 3: Hydraulic characteristics and geometric data in Khormaloo river

شیب	قطر میانگین (d_a) میلیمتر	قطر (d_{90}) میلیمتر	قطر میانه (d_{50}) میلیمتر	دما (سانتیگراد)	دبی رسوب (کیلو گرم بر ثانیه)	عرض سطح آزاد آب (متر)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)	شعاع هیدرولیکی (متر)	سرعت جریان (متر بر ثانیه)
۰/۰۱۴۲									بیشینه
	۱۶	۶۰	۱۱	۱۳.۵	۱۰.۱۹	۱۸.۹۵	۹.۷	۰.۳۳۳	۱.۴۲۱
									کمینه
	۰.۴۲	۱.۶۵	۰.۲۷	۲۴.۵	۰.۰۰۲۱۲	۳.۴۷	۰.۹۲۱	۰.۲۵۸	۰.۶۹۸

جدول ۴: اطلاعات هیدرولیکی و هندسی داده ها در رودخانه سوسرا

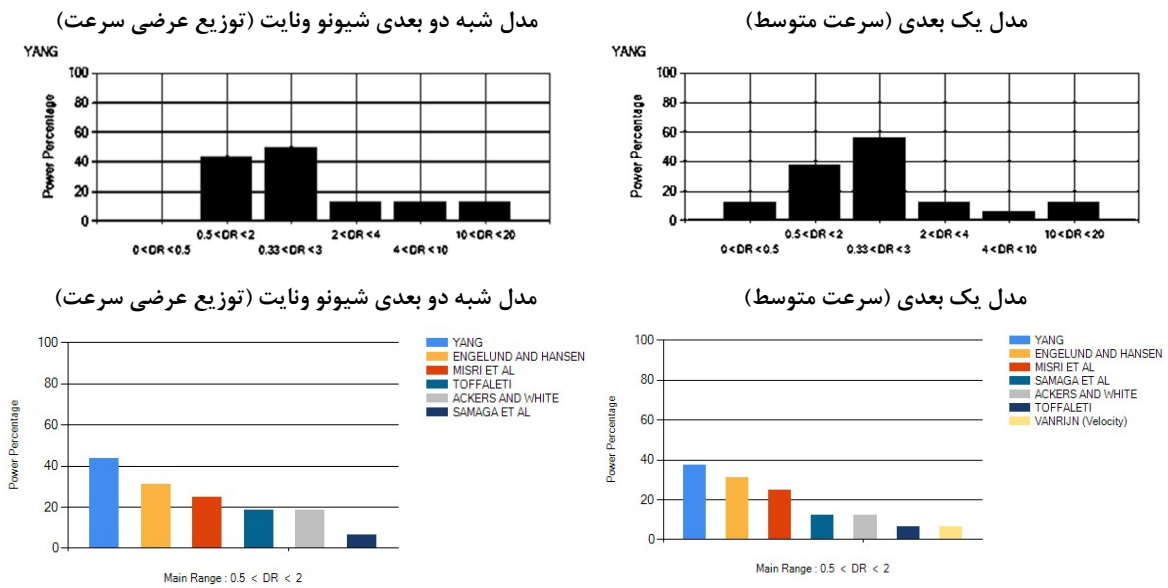
Table 4: Hydraulic characteristics and geometric data in Soosra river

شیب	قطر میانگین (d_a) میلیمتر	قطر (d_{90}) میلیمتر	قطر میانه (d_{50}) میلیمتر	دما (سانتیگراد)	دبی رسوب (کیلو گرم بر ثانیه)	عرض سطح آزاد آب (متر)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)	شعاع هیدرولیکی (متر)	سرعت جریان (متر بر ثانیه)
۰/۰۰۱۷۶۷									بیشینه
	۰.۵۳	۱.۲	۰.۴	۱۱	۰.۰۷۰۲	۶	۳.۸۳	۰.۴۶۱	۱.۰۲۵
									کمینه
	۱.۳۴	۳.۹	۰.۹۸	۲۰	۰.۰۰۰۱۷	۲.۲۶	۰.۱۶۶	۰.۰۸۲	۰.۲۸۲

۳-۲ - منطقه مورد مطالعه

واقع در ۲۷ کیلومتری جنوب شرقی مینودشت سرچشمه گرفته و شاخه های متعدد آن در حوالی روستای دروک بهم پیوسته و سپس به شمال غربی تغییر مسیر می دهد. این رودخانه در مسیر خود تا رسیدن به مینودشت، روستاهای دروک، عروسک، حسن کل، لف افرا و آرام را مشروب می سازد و تا محل تفرجگاه شهر مینودشت بنام تنگه،

رودخانه چهل چای واقع در شمال شرق ایران می باشد. سرشاخه های چهل چای در بخش میانی حوزه آبریز رودخانه گرگان رود و جنوب شهرستان مینودشت قرار دارد. رودخانه چهل چای از شاخه های مهم رودخانه گرگان رود بوده و از دامنه های کوه نرمدار



شکل ۴: تغییرات فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو برای رابطه‌های مختلف (رودخانه چهل‌چای)

Fig. 4: Variation of computed bedload frequency against discrepancy ratios for superior methods (Chehel-Chay)

است. تفاوت عمده این نمونه بردار با مدل های بزرگ آن قابلیت حمل آن به درون رودخانه با دست می باشد. نمونه بردار دستی دارای یک دسته‌ی بلند دو متری است که متصدی رسوب برداری با ورود به داخل رودخانه اقدام به جمع آوری بار کف می کند. برای اندازه گیری سرعت نیز از سرعت سنج آت^۲ استفاده شده است. ۱۶ سری نمونه برداری برای رودخانه چهل چای، ۱۶ سری برای رودخانه خرمالو و ۱۳ سری برای رودخانه و سوسرا انجام گرفته است. برخی از مشخصات هیدرولیکی و هندسی مقاطع این رودخانه ها در جدولهای ۲ تا ۴ ارائه شده است. برای نمونه برداری عرض بستر رودخانه متناسب با اندازه آن به سه قسمت مساوی یا بیشتر از نظر میزان دبی تقسیم شود. از میان هر قسمت پس از تعیین فاصله آن نسبت به مبدا شاخص در ساحل، دو بار نمونه بار کف گرفته شود. در صورت وجود اختلاف زیاد بین مقدار نمونه ها نمونه برداری تکرار شود. مدت زمان قرار گرفتن نمونه بردار در بستر رودخانه متناسب با میزان بار کف خواهد بود و زمان لازم بصورت تجربی بدست می آید. اما زمان تقریبی برای بیرون کشیدن نمونه بردار پر شدن ۳۰ درصد حجم نمونه بردار است.

۳- نتایج و بحث

برای بیان بهتر دقت معادلات از فراوانی نسبت ناجوری استفاده

مسیر آن کاملاً کوهستانی است. مساحت حوزه بالادست این رودخانه ۲۷۲ کیلومتر مربع است. رودخانه دارای کف شنی و شیب حدود ۱/۷ درصد است. از ویژگی‌های مهم این رود شیب بسیار بالای آن است که در نتیجه تنش برشی زیادی را بوجود می آورد.

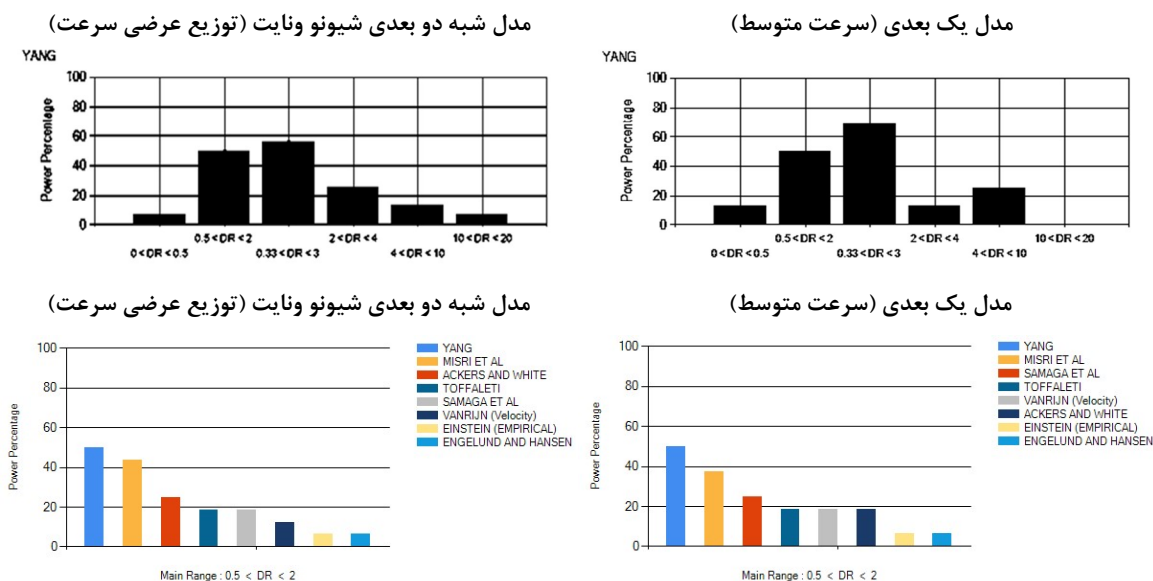
رودخانه خرمالو از دو شاخه نهر فرعی تیل‌آباد و وامنان تشکیل می‌شود، مسیر آن آبرفتی بوده و پس از عبور از غزنوی، فارسیان قانچی، رودبار قشلاق و نوده در ضلع جنوبی روستای نوده با کانال سوسرا یکی شده و پس از عبور از نوده خاندوز و روستاهای قزلجه آق‌امام در ضلع جنوبی گنبد به رودخانه چهل‌چای می‌پیوندد.

رودخانه ی سوسرا از ارتفاعات جنگل پری و اوش دره سرچشمه گرفته و پس از عبور از دره پریشیب و جنگلی به روستای سوسرا رسیده و نهایتاً به رودخانه خرمالو می‌ریزد.

موقعیت رودخانه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل (۳) ارائه شده است.

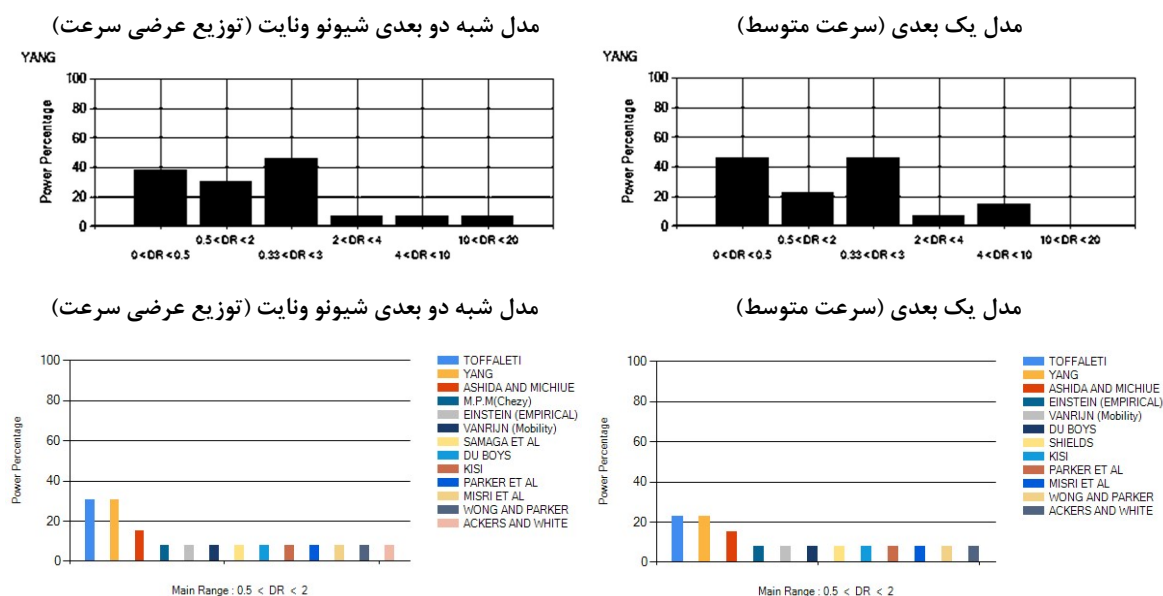
۳-۲- نمونه برداری

داده های تحقیق حاضر از نتایج طرح تحقیقاتی امید و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است [۱۳]. برای اندازه گیری های صحرائی بار کف از نمونه بردار هلی اسمیت دستی (BLSH)^۱ استفاده شده



شکل ۵: تغییرات فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو برای رابطه‌های مختلف (رودخانه خرمالو)

Fig. 5: Variation of computed bedload frequency against discrepancy ratios for superior methods (Khormaloo)



شکل ۶: تغییرات فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو برای رابطه‌های مختلف (رودخانه سوسرا)

Fig. 6: Variation of computed bedload frequency against discrepancy ratios for superior methods (Soosra)

و همکاران حدود ۲۵ درصد محاسبه می‌کند. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت باعث افزایش دقت روش یانگ و توفالیتی در رودخانه چهل‌چای شده است و فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو را در روش یانگ از ۳۷,۵ درصد به ۴۳,۸ درصد رسانده است. با توجه به اهمیت فراوان انتقال

می‌شود. در شکل‌های ۶,۵,۴ بازه‌های نسبت ناجوری در محور افقی و درصد فراوانی آن در محور عمودی نشان داده شده است. مطابق نتایج شکل (۴)، در رودخانه چهل‌چای رابطه یانگ فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو را حدود ۴۰ درصد و انگلوند - هانسن حدود ۳۰ درصد محاسبه می‌کند. این مقدار فراوانی را معادله میزری

جدول ۵: مقادیر درصد ناجوری برای روشهای مختلف برآورد بار بستر رودخانه چهل چای

Table 5: The values of discrepancy ratios for different bed load estimators (Chehel-Chay)

مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت (توزیع عرضی سرعت)				مدل یک بعدی (سرعت متوسط)			
	درصد			درصد			
میانگین R	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	معادلات	میانگین R	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	معادلات
۱۴.۰۹	۵۰	۴۳.۸	یانگ	۱۲.۰۷	۵۶.۲	۳۷.۵	یانگ
۱۱۶.۵۷	۴۳.۸	۳۱.۲	انگلاند و هانسن	۱۰۰.۸۴	۵۶.۲	۳۱.۲	انگلاند و هانسن
۲۲.۹۳	۳۷.۵	۲۵	میزری و همکاران	۲۴.۵۷	۳۱.۲	۲۵	میزری و همکاران
۹.۴۸	۳۷.۵	۱۸.۸	توفالتی	۵۷۳.۳۲	۱۲.۵	۱۲.۵	ساماگا و همکاران

جدول ۶: مقادیر درصد ناجوری برای روشهای مختلف برآورد بار بستر رودخانه خرمالو

Table 6: The values of discrepancy ratios for different bed load estimators (Khormaloo)

مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت (توزیع عرضی سرعت)				مدل یک بعدی (سرعت متوسط)			
	درصد			درصد			
میانگین R	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	معادلات	میانگین R	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	معادلات
۲.۷۴	۵۶.۲	۵۰	یانگ	۲.۴۸	۶۸.۸	۵۰	یانگ
۲.۲	۵۶.۲	۴۳.۸	میزری و همکاران	۲.۳۶	۶۲.۵	۳۷.۵	میزری و همکاران
۷۹.۱۱	۳۷.۵	۲۵	ایکرز و وایت	۴۷.۷۹	۳۱.۲	۲۵	ساماگا و همکاران
۱.۱۳	۳۷.۵	۱۸.۸	توفالتی	۰.۹۵	۳۱.۲	۱۸.۸	توفالتی
۱۵.۱۹	۱۸.۸	۱۸.۸	ساماگا و همکاران	۳۷.۹۸	۲۵	۱۸.۸	ون راین
۴۵.۶۸	۱۸.۸	۱۲.۵	ون راین	۷۵.۰۴	۳۷.۵	۱۸.۸	ایکرز و وایت

جدول ۷: مقادیر درصد ناجوری برای روشهای مختلف برآورد بار بستر رودخانه سوسرا

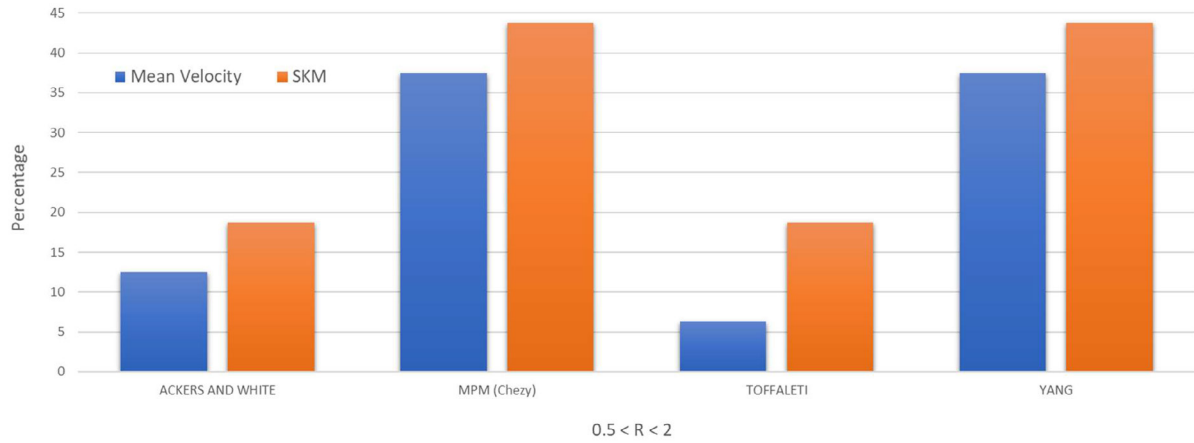
Table 7: The values of discrepancy ratios for different bed load estimators (Soosra)

مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت (توزیع عرضی سرعت)				مدل یک بعدی (سرعت متوسط)			
	درصد			درصد			
میانگین R	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	معادلات	میانگین R	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	معادلات
۸.۶۷	۵۳.۸	۳۰.۸	توفالتی	۷.۰۹	۵۳.۸	۲۳.۱	توفالتی
۱۳.۱۲	۴۶.۲	۳۰.۸	یانگ	۱۱.۴۵	۴۶.۲	۲۳.۱	یانگ
۲۱۷۳.۹۶	۱۵.۴	۱۵.۴	اشیدا و میشیو	۲۱۷۳.۹۶	۱۵.۴	۱۵.۴	اشیدا و میشیو
۴۹.۲۶	۷.۷	۷.۷	میر-پیتر و مولر	۴۹.۲۶	۷.۷	۷.۷	میر-پیتر و مولر

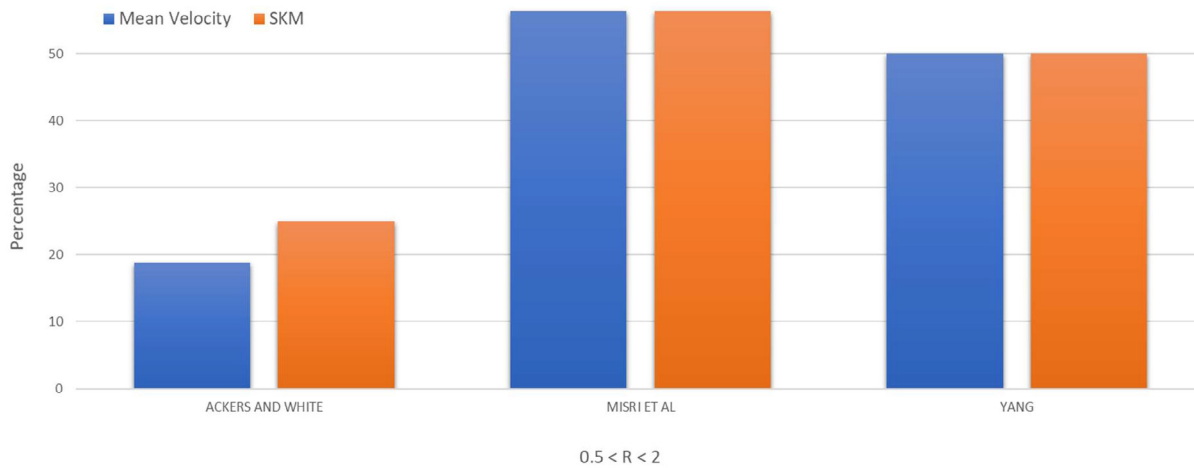
و نایت هیچ داده ای در محدوده نسبت ناجوری بین ۰/۵ تا ۲ قرار نخواهد گرفت.

در رودخانه خرمالو مطابق شکل (۵)، رابطه یانگ فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو را حدود ۵۰ درصد و میزری و همکاران حدود ۳۸ درصد محاسبه می کند. این مقدار فراوانی را معادله ساماگا و همکاران حدود ۲۵ درصد محاسبه می کند. همانطور که در شکل (۵)

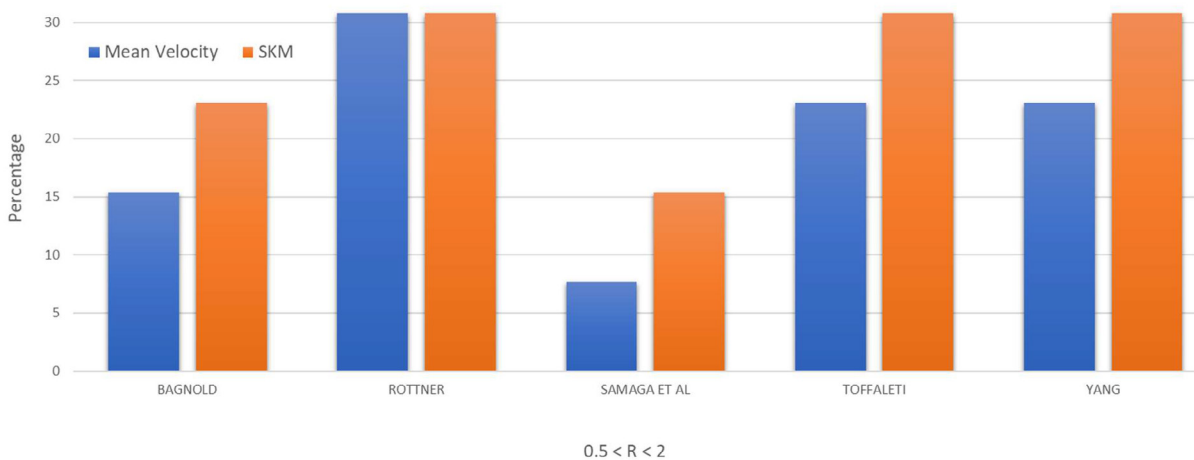
رسوب در شرایط سیلاب و نیز صعوبت عملیات اندازه گیری سرعت جریان و دبی رسوب در این شرایط، کاربرد مدل ریاضی شیونو و نایت در رودخانه چهل چای قابل توصیه است. همین طور مطابق شکل مشخص است که با توجه به تدقیق محاسبات پروفیل عرضی سرعت، توزیع بار بستر در عرض رودخانه با دقت بالاتری محاسبه می شود. نگاهی به نتایج نشان می دهد که با بکارگیری مدل ریاضی شیو



شکل ۷: فراوانی نسبت ناچوری نیم تا دو بر حسب درصد بر اساس فرمول های مختلف پس از انجام عملیات کالیبراسیون (رودخانه چهل چای)
Fig. 7: The variation of percentage of discrepancy ratio for different bed load transport formula after Calibration (Chehel-Chay)



شکل ۸: فراوانی نسبت ناچوری نیم تا دو بر حسب درصد بر اساس فرمول های مختلف پس از انجام عملیات کالیبراسیون (رودخانه خرمالو)
Fig. 8: The variation of percentage of discrepancy ratio for different bed load transport formula after Calibration (Khormaloo)



شکل ۹: فراوانی نسبت ناچوری نیم تا دو بر حسب درصد بر اساس فرمول های مختلف پس از انجام عملیات کالیبراسیون (رودخانه سوسرا)
Fig. 9: The variation of percentage of discrepancy ratio for different bed load transport formula after Calibration (Soosra)

جدول ۸: مقادیر درصد ناجوری و ضرایب کالیبراسیون برای پنج روش برتر عملیات کالیبراسیون رودخانه چهل چای

Table 8: The values of discrepancy ratios and Calibrations Coefficient for the top five methods of calibration operation (Chehel-Chay)

مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت (توزیع عرضی سرعت)						مدل یک بعدی (سرعت متوسط)					
میانگین R		0.5 < R < 2		ضریب کالیبراسیون ن	معادلات	میانگین R		0.5 < R < 2		ضریب کالیبراسیون ن	معادلات
بدون ضریب	با ضریب	بدون ضریب	با ضریب			بدون ضریب	با ضریب	بدون ضریب	با ضریب		
۱۴۰۰۹	۹۰۱۹	۰	۴۳۰۷	۰۰۰۱۵۹	میبر - پیتر و مولر	۴۹۸۰۲	۸۰۸۸	۰	۳۷۰۵	۰۰۰۱۷۸۱	میبر - پیتر و مولر
۶۳۱۰۹	۱۰۰۸۲	۶۰۲	۳۱۰۲	۰۰۰۱۷۱۲	ساماگا و همکاران	۵۷۳۰۳۲	۱۰۰۲۱	۱۲۰۵	۳۱۰۲	۰۰۰۱۷۸۱	ساماگا و همکاران
۱۱۶۰۵	۳۷۰۶۵	۳۱۰۲	۳۱۰۲	۰۰۰۳۲۳۰۲	انگلاند و هانسن	۱۰۰۰۸۴	۳۹۰۲۴	۳۱۰۲	۳۱۰۲	۰۰۰۳۸۹۱۹	انگلاند و هانسن
۲۲۰۹۳	۰۰۰۴۱	۲۵	۲۵	۰۰۰۱۷۸	میزی و همکاران	۲۴۰۵۷	۰۰۰۴۰۸	۲۵	۲۵	۰۰۰۱۶۶۱	میزی و همکاران
۸۳۴۰۶	۱۰۰۰۹	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۱۲	خصوصیات بستر ون	۸۳۴۰۶	۱۰۰۰۹	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۱۲	خصوصیات بستر ون
۵۶۲۰۴	۰۰۰۶۴	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۱۱	روتتر	۴۹۱۰۱	۰۰۰۶۰۹	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۱۲۴	روتتر
۱۴۰۷۴	۱۰۰۶۵	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۰۱۷	اینشتین	۱۵۰۷۹	۱۰۰۷۵	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۰۱۱	اینشتین
۱۶۸۲۱۶	۴۰۱۴	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۰۰۴	یالین	۱۶۸۲۱۶	۴۰۱۴	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۰۰۴	یالین
۵۴۸۸۱	۶۰۵۶	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۰۱۱	اینشتین و براون	۵۴۸۸۱	۶۰۵۶	۰	۱۸۰۷	۰۰۰۰۰۱۱	اینشتین و براون
۱۳۲۰۴	۱۰۰۰۶	۰	۱۲۰۵	۰۰۰۰۷۶	ون راین	۹۸۰۰۹	۱۰۰۱۴	۰	۱۲۰۵	۰۰۰۱۱۷	ون راین

جدول ۹: مقادیر درصد ناجوری و ضرایب کالیبراسیون برای پنج روش برتر عملیات کالیبراسیون رودخانه خرمالو

Table 9: The values of discrepancy ratios and Calibrations Coefficient for the top five methods of calibration operation (Khormaloo)

مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت (توزیع عرضی سرعت)						مدل یک بعدی (سرعت متوسط)					
میانگین R		0.5 < R < 2		ضریب کالیبراسیون ن	معادلات	میانگین R		0.5 < R < 2		ضریب کالیبراسیون ن	معادلات
بدون ضریب	با ضریب	بدون ضریب	با ضریب			بدون ضریب	با ضریب	بدون ضریب	با ضریب		
۲۰۲	۱۰۰۴۸	۴۳۰۸	۵۶۰۲۵	۰۰۰۴۷۶۴	میزی و همکاران	۲۰۳۶	۱۰۰۴۸	۳۷۰۵	۵۶۰۲۵	۰۰۰۴۴۴۶	میزی و همکاران
۳۹۰۱۷	۰۰۰۹۵۸	۰	۵۰	۰۰۰۲۴۴	خصوصیات بستر ون	۱۰۶۶۰۷	۰۰۰۹۲۵	۰	۵۰	۰۰۰۰۰۸۶	اینشتین
۲۰۷۴	۱۰۰۴۴	۵۰	۵۰	۰۰۰۵۲۷	یانگ	۳۹۰۱۷	۰۰۰۹۵۸	۰	۵۰	۰۰۰۲۴۴	خصوصیات بستر ون
۶۳۵۰	۰۰۰۹۱	۰	۴۳۰۷۵	۰۰۰۰۰۹۱	اینشتین	۲۰۴۸	۲۰۱۴۶	۵۰	۵۰	۰۰۰۸۶۶	یانگ
۷۴۰۱۵	۰۰۰۹۹۷	۰	۳۷۰۵	۰۰۰۱۳۴۵	روتتر	۶۵۰۱۳	۱۰۰۰۱	۰	۳۷۰۵	۰۰۰۱۵۳۸	روتتر
۶۳۰۴۱	۱۰۰۰۰	۰	۳۱۰۲۵	۰۰۰۱۵۷۹	میبر - پیتر و مولر	۵۵۰۰۴	۱۰۰۰۰	۰	۳۱۰۲۵	۰۰۰۱۸۰۵	میبر - پیتر و مولر
۴۱۵۲	۰۰۰۹۹۲	۰	۲۵	۰۰۰۰۰۲۳	اشیدا و میشیو	۴۱۵۲	۰۰۰۹۹۲	۰	۲۵	۰۰۰۰۰۲۳	اشیدا و میشیو
۴۴۳۰۱۴	۱۰۰۱۱	۰	۲۵	۰۰۰۰۲۲	کیسی	۴۴۳۰۱۴	۱۰۰۱۱	۰	۲۵	۰۰۰۰۲۲	کیسی
۲۷۵۰	۰۰۰۹۸۱	۰	۲۵	۰۰۰۰۰۳۵	پارکر و همکاران	۲۷۵۰	۰۰۰۹۸۱	۰	۲۵	۰۰۰۰۰۳۵	پارکر و همکاران
۳۷۶۰۷	۰۰۰۹۸۱	۰	۲۵	۰۰۰۰۲۶۰	بگنولد	۱۴۵۹	۱۰۰۳۲	۰	۲۵	۰۰۰۰۰۷	ونگ و پارکر

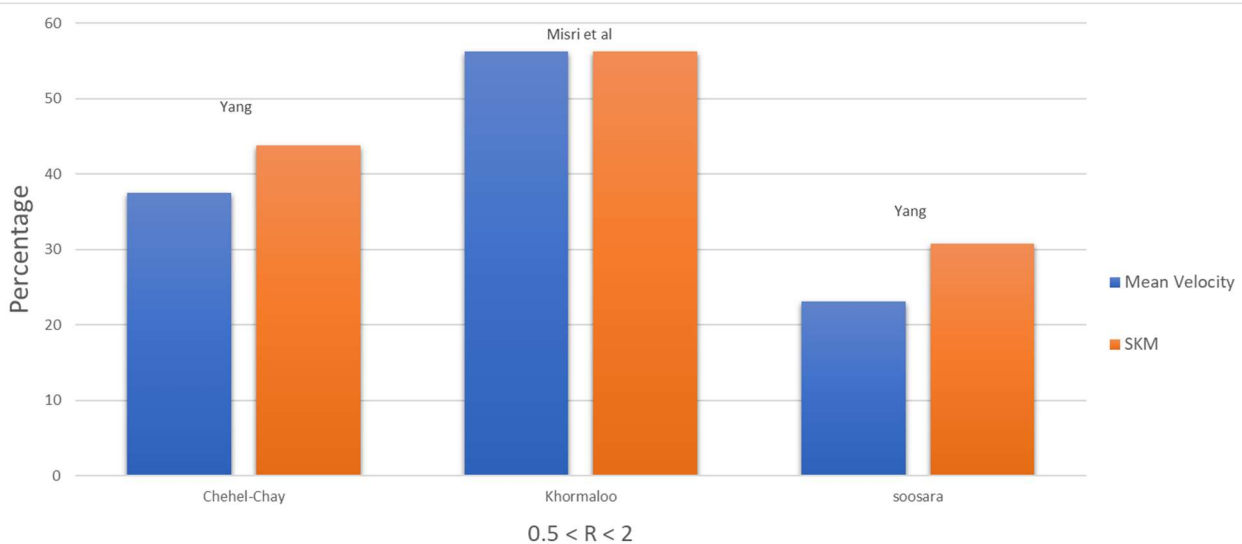
جدول ۱۰: مقادیر درصد ناجوری و ضرایب کالیبراسیون برای پنج روش برتر عملیات کالیبراسیون رودخانه سوسرا

Table 10: The values of discrepancy ratios and Calibrations Coefficient for the top five methods of calibration operation (Soosra)

مدل شبیه دو بعدی شیونو ونایت (توزیع عرضی سرعت)					مدل یک بعدی (سرعت متوسط)						
میانگین R		0.5 < R < 2		ضریب کالیبراسیون N	معادلات	میانگین R		0.5 < R < 2		ضریب کالیبراسیون N	معادلات
بدون ضریب	با ضریب	بدون ضریب	با ضریب			بدون ضریب	با ضریب	بدون ضریب	با ضریب		
۳۰۵.۷۵	۱.۵۵۳	۰	۳۰.۷	۰.۰۰۵۰۶	روتتر	۲۶۹.۵۲	۱.۵۷۷	۰	۳۰.۷	۰.۰۰۵۸۵	روتتر
۸۶۷	۸.۴۲	۳۰.۷	۳۰.۷	۰.۹۷۱۵	توفالتی	۵۰.۶۷	۰.۹۹۸	۷.۷	۲۳.۰	۰.۰۱۹۷۱	میزی و همکاران
۱۳.۱۲	۱۲.۳۲	۳۰.۷	۳۰.۷	۰.۹۳۹۵	یانگ	۰.۰۵	۱	۰	۲۳.۰	۲۱.۱۳۵	انگلاند و هانسن
۰.۰۶	۱	۰	۲۳.۰	۱۵.۶۱۱	انگلاند و هانسن	۴۵.۵۴	۰.۹۴۷	۰	۲۳.۰	۰.۰۲۰۸	ون راین
۴۷.۲۹	۱.۰۰۰	۷.۷	۲۳.۰	۰.۰۲۱۱۵	میزی و همکاران	۱۰۵۰.۵	۰.۹۴۵	۷.۷	۲۳.۰	۰.۰۰۰۹	شیلدز
۵۸.۸۶	۱.۰۰۰	۰	۲۳.۰	۰.۰۱۷	ون راین	۳۲۳.۱۹	۰.۳۸۷	۷.۷	۲۳.۰	۰.۰۰۱۲	کیسی
۱۲۸۶	۰.۹۰۰	۰	۲۳.۰	۰.۰۰۰۷	شیلدز	۸۷۴.۵۳	۰.۳۴۹	۰	۲۳.۰	۰.۰۰۰۴	Bathurst
۳۲۳.۱۹	۰.۳۹۳	۷.۷	۲۳.۰	۰.۰۰۱۲	کیسی	۳۶۵.۸۱	۰.۳۲۱	۰	۲۳.۰	۰.۰۰۰۸۷	خصوصیات بستر ون
۸۹۰	۰.۳۴۹	۰	۲۳.۰	۰.۰۰۰۴	Bathurst	۱۱.۴۵	۲.۱۰۱	۲۳.۰	۲۳.۰	۰.۱۸۳۵	یانگ
۳۸۲.۲	۰.۳۴۲	۰	۲۳.۰	۰.۰۰۰۸۹	بگنولد	۸۴۷.۷	۵.۸۶	۰	۲۳.۰	۰.۰۰۶۹۱	شوکلچ

جهت مقایسه بهتر نتایج روشهای مختلف با همدیگر، نتایج نسبت ناجوری برای روشهای مختلف در جدولهای ۵ تا ۷ ارائه شده است. پس از بدست آمدن نتایج اولیه اقدام به کالیبراسیون روش ها با استفاده از قابلیت کالیبراسیون نرم افزار توسعه یافته شده است. در شکل های ۷ تا ۹ نتایج بدست آمده برای روش ها بر حسب درصد فراوانی در بازه نسبت ناجوری نیم تا دو نشان داده شده است همچنین در جداول ۸ تا ۱۰ اطلاعات ۵ روش برتر بدست آمده در عملیات کالیبراسیون برای هر سه رودخانه ارائه شده است. با توجه به جداول ۸ تا ۱۰ ضرایب کالیبراسیون بدست آمده برای اکثر روش ها کوچکتر از ۱ بوده و می توان نتیجه گرفت این روش ها مقادیر بار رسوبی بستر را در رودخانه های مورد مطالعه کمتر از واقعیت برآورد می کنند. همچنین با توجه به قوت روش یانگ حتی پس از انجام عملیات کالیبراسیون در رودخانه های چهل جای و سوسرا و همچنین روش میزری و همکاران در رودخانه خرمالو، محاسبه بار رسوبی بستر در رودخانه های نام برده با ضرایب متوسط بدست آمده در جدول (۱۱) توصیه می شود.

نشان داده شده است مدل شبیه دو بعدی شیونو ونایت باعث افزایش دقت روش میزری و همکاران و ایکرز-وایت در رودخانه خرمالو شده است و فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو را در روش میزری و همکاران از ۳۸ درصد به ۴۴ درصد با نسبت ناجوری متوسط ۲.۲ و در روش ایکرز-وایت نیز نسبت ناجوری بین نیم تا دو را از ۱۸ درصد به ۲۵ درصد رسانده است. لذا با توجه به نتایج بدست آمده کاربرد مدل ریاضی شیونو و نایت در رودخانه خرمالو در شرایط سیلابی که اندازه گیری دبی و سرعت جریان مشکل می باشد قابل توصیه است. در رودخانه ی سوسرا نیز رابطه توفالتی و یانگ فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو را حدود ۲۳ درصد و رابطه ی اشیدا-میشیو حدود ۱۵ درصد محاسبه می کند. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است مدل شبیه دو بعدی شیونو ونایت باعث افزایش دقت روش توفالتی و یانگ در رودخانه سوسرا شده است و فراوانی نسبت ناجوری بین نیم تا دو را هم در روش توفالتی و هم در روش یانگ از ۲۳ درصد به ۳۱ درصد رسانده است. لذا باتوجه به نتایج بدست آمده، کاربرد مدل ریاضی شیونو و نایت در برآورد بار بستر رودخانه سوسرا توصیه می شود.



شکل ۱۰: فراوانی نسبت ناجوری نیم تا دو بر حسب درصد بر اساس فرمول‌های توصیه شده پس از انجام عملیات کالیبراسیون (هر سه رودخانه)

Fig. 10: The variation of percentage of discrepancy ratio for different bed load transport formula after Calibration (All rivers)

جدول ۱۱: روش‌های توصیه شده همراه با ضرایب متوسط کالیبراسیون برای رودخانه‌های مورد مطالعه

Table 11: Recommended methods with calibration coefficients for studying rivers

میانگین R		0.5 < R < 2		ضریب متوسط کالیبراسیون	معادله	رودخانه
مدل شبه دو بعدی	مدل یک بعدی	مدل شبه دو بعدی	مدل یک بعدی			
۱۳.۳۸	۱۱.۴۷	۴۳.۷۵	۳۷.۵	۰.۹۵	یانگ	چهل‌چای
۱۲.۴۶	۱۰.۸۷	۳۰.۷۶	۲۳.۰۷	۰.۹۵	یانگ	سوسرا
۱.۰۱	۱.۰۸	۵۶.۲۵	۵۶.۲۵	۰.۴۶	میزری و همکاران	خرمالو

۴- نتیجه‌گیری

و معادله‌ی یانگ که در آن ۴۲ درصد از داده‌ها(داده‌های هر سه رودخانه) در دامنه‌ی نسبت ناجوری بین ۰/۵ تا ۲ قرار می‌گیرند، بهترین نتایج را برای رودخانه‌های محدوده‌ی مطالعاتی با استفاده از سرعت متوسط جریان ارائه می‌دهد.

۲- با استفاده از مدل‌های شبه دو بعدی، نسبت ناجوری بین نیم تا دو برای رودخانه‌های چهل‌چای، خرمالو و سوسرا، بترتیب ۶/۳، ۶ و ۸ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت فراوان انتقال رسوب در شرایط سیلاب و نیز صعوبت عملیات اندازه‌گیری سرعت جریان و دبی رسوب در این شرایط و همچنین با توجه به نتایج بدست آمده از برآورد بار رسوبی توسط مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت کاربرد این مدل ریاضی در رودخانه‌های محدوده مطالعاتی قابل توصیه است

در این تحقیق، دقت برآورد بار رسوب در سه رودخانه چهل‌چای، خرمالو و سوسرا، بوسیله ۲۷ معادله از متداول‌ترین معادلات برآورد بار بستر با استفاده از مدل یک بعدی و شبه دو بعدی به کمک نرم افزار توسعه یافته توسط مولفین (STE)، ارزیابی گردید. هدف از این تحقیق ارائه‌ی مناسب‌ترین معادله برای برآورد بار رسوب بستر و ارزیابی کاربردی از مدل شبه دو بعدی شیونو ونایت در این رودخانه‌ها است. نتایج بدست آمده از ارزیابی این معادلات نشان می‌دهند که:

۱- معادله‌های یانگ، توفالتی، میزری و همکاران، ساماگا و همکاران، ایگرز-وایت، انگلوند-هانسن، میر-پیتر و مولر و ون راین به ترتیب، نتایج مناسب‌تری نسبت به سایر معادلات ارائه می‌دهند

- international association for hydraulic research, 2001, pp. 224-230.
- [13]-A. Haddadchi, M.H. Omid, A.A. Dehghani, Evaluation of bed load discharge formulas in alpine gravel bed rivers (Case study: Chehel-Chai river in Golestan province), *Journal of water and soil conservation (journal of agricultural sciences and natural resources)*, 18(3) (2011) .
- [14]-A. Haddadchi, M.H. Omid, A.A. Dehghani, Assessment of bed-load predictors based on sampling in a gravel bed river, *Journal of Hydrodynamics*, 24(1) (2012) 145-151.
- [15]-M. Tahmasebi Nasab, A.A. Dehghani, Evaluating the Accuracy of Conventional Methods Forestimating Bed-load Transport Rate Using Field Data, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(1) (2014) 116-126.
- [16]-M.S. Bajestan, M.O. Asgari, A mathematical model to evaluate the bed and total load by the modified Einstein procedure, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, (2000).
- [17]-P. Ackers, W.R. White, Sediment transport: new approach and analysis, *Journal of the Hydraulics Division*, 99(hy11) (1973).
- [18]-B. Wu, A. Molinas, P.Y. Julien, Bed-material load computations for nonuniform sediments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10) (2004) 1002-1012.
- [19]-S. Abbasi, Prediction of suspended sediment of Karun river using artificial neural network, M. Sc. Thesis in Water Engineering, Shahid Chamran University, (In Persian), 2007.
- [20]-S.A. Ayoubzadeh, A. Zahiri, Sediment rating curve in compound river channels using the envelope sections method, (2005).
- [21]-A. Zahiri, B. Shahinejad, S. Rostami, Simulation of karun river sedimentation using gstars 2.0 (a reach between ahwaz and farsiat hydrometric stations), (2009).
- [22]-N.G. Ebrahimi, S. Kashefipour, M. Fathi-Moghaddam, Investigating effect of variable roughness coefficient on the predicted water level of rivers, Case Study: Karoon River, *Watershed Management Research*, (2012).
- [23]-K. Shiono, D.W. Knight, Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel, *Journal of Fluid*
- به این منظور توصیه می شود در شرایط سیلاب از روابط یانگ برای رودخانه چهل چای و خرمالو و توفالتی برای رودخانه سوسرا پیشنهاد می شود.
- با اعمال ضریب کالیبراسیون ۰,۹۵ برای نتایج روش یانگ در رودخانه های چهل چای و سوسرا و ضریب کالیبراسیون ۰,۴۶ برای نتایج روش میزری و همکاران در رودخانه خرمالو نتایج دقیقتری بدست می آید.
- ۵- مراجع**
- [1]-A. Schoklitsch, *Handbuch des wasserbaues*, Springer-Verlag, 1950.
- [2]-V.A. Vanoni, Measurements of critical shear stress for entraining fine sediments in a boundary layer, (1964).
- [3]-L.C.v. Rijn, Sediment transport, part II: suspended load transport, *Journal of hydraulic engineering*, 110(11) (1984) 1613-1641.
- [4]-M. Vetter, Total sediment transport in open channels, 1989.
- [5]-R.A. Bagnold, An approach to the sediment transport problem from general physics, US government printing office, 1966.
- [6]-C.T. Yang, Unit stream power equation for gravel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12) (1984) 1783-1797.
- [7]-F. Karim, Bed material discharge prediction for nonuniform bed sediments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(6) (1998) 597-604.
- [8]-M.F. Karim, J.F. Kennedy, Menu of coupled velocity and sediment-discharge relations for rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(8) (1990) 978-996.
- [9]-B. Gomez, M. Church, An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers, *Water Resources Research*, 25(6) (1989) 1161-1186.
- [10]-A. Peterson, R. Howells, A compendium of solids transport data for mobile boundary channels, Department of Civil Engineering, University of Alberta, 1973.
- [11]-M. DeVries, Assessment of bed load formulas, 1993.
- [12]-H. Woo, K. Yu, Reassessment of selected sediment discharge formulas, in: *Proceedings of the congress-*

- open channel flow modelling, University of Birmingham, 2009.
- [27]-J. Abril, D. Knight, Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model, *Journal of Hydraulic Research*, 42(6) (2004) 616-629.
- [28]-H. Liao, D.W. Knight, Analytic stage-discharge formulas for flow in straight prismatic channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(10) (2007) 1111-1122.
- Mechanics, 222 (1991) 617-646.
- [24]-M.A. Jesson, The effect of heterogeneous roughness on conveyance capacity and application to the Shiono-Knight method, University of Birmingham, 2012.
- [25]-I. Nezu, W. Rodi, Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(5) (1986) 335-355.
- [26]-S. Sharifi, Application of evolutionary computation to

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Teimourey, A.A. Dehghani, *Assessment of bed load transport formula by using developed applied software (STE)(Case study: Chehel-chai, Khormaloo and Soosara rivers in Golestan province)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 2743-2760.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16122.6132](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16122.6132)

