

محاسبه‌ی توزیع عرضی انتقال رسوب در رودها با استفاده از مدل ریاضی شبه دو بعدی (مطالعه‌ی نمونه‌ای: رود قره‌سو)

عبدالرضا ظهیری^۱، جواد قلی‌نژاد^{۲*}، امیراحمد دهقانی^۳

چکیده

پیش‌بینی صحیح فراسنج‌های جریان و رسوب برای بهره‌برداری و مدیریت بهتر رودها از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه مدل‌های ریاضی شبه‌دو بعدی به عنوان یک راه‌حل بهینه و کارآمد، کاربرد گسترده‌ای را در مباحث آب و رسوب رودها یافته‌اند. در این مدل‌ها، تغییرات سرعت در عرض رودها به کمک حل عددی معادلات دیفرانسیل ناویر-استوکس و در شرایط جریان ماندگار و یکنواخت شبیه‌سازی می‌شود. در پژوهش حاضر با استفاده از مدل ریاضی شبه دو بعدی شیونو و نایت (۱۹۹۱)، توزیع عرضی سرعت جریان در رود قره‌سو محاسبه شده، سپس به کمک این نتایج و نیز با استفاده از روابط تجربی انتقال رسوب، توزیع عرضی رسوب کل و ظرفیت انتقال رسوب رود تعیین شدند. نتایج حاصله نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب مدل شبه دو بعدی در برآورد توزیع عرضی سرعت جریان با خطای نسبی ۸/۷ است. همچنین از میان روابط مختلف انتقال رسوب، روابط یانگ و ایگرز-وایت به ترتیب با متوسط خطای نسبی ۴۵ و ۶۷ درصد، دارای بیشترین دقت هستند. رابطه‌ی لارسن با متوسط خطای نسبی ۲۴۵ درصد، دارای دقت بسیار کمی است.

واژه‌های کلیدی: توزیع عرضی سرعت، توزیع عرضی رسوب کل، مدل ریاضی شبه دو بعدی، رود قره‌سو

^۱ دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، ایران

Email: javad_gholinejad@yahoo.com

^۳ دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

مقدمه

به دلیل اهمیت زیادی که تغییرات ریخت‌شناسی رود در طرح‌های ساماندهی، مهار سیلاب و طراحی سازه‌های آبی دارند، لازم است رفتار رودها در حالت طبیعی و همچنین در عکس‌العمل به اصلاحات و اقدامات مهندسی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. این مطالعات می‌تواند از طریق مدل فیزیکی، ریاضی و یا هر دو انجام گیرد. در مطالعات مهندسی رود به دلیل وقت‌گیر و پرهزینه‌تر بودن مدل‌های فیزیکی، مدل‌های ریاضی عمومی‌تر بوده و کاربرد آنها نیز در حال گسترش است. در حال حاضر مدل‌های یک‌بعدی، دو بعدی و سه بعدی زیادی برای حل مسائل مهندسی رود وجود دارند. مدل‌های یک بعدی اگرچه دارای فرضیات ساده کننده بیشتری بوده و معادلات آنها برای تعریف فرایندها و سازوکارهای پیچیده موجود در رودها کافی نیست ولی در صورت واسنجی مناسب، با وجود سادگی می‌توانند نتایج مفیدی را در اختیار کاربران قرار دهند (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

در اغلب طرح‌های مهندسی رود از قبیل ساماندهی رود روندیابی سیل، تعیین حد بستر و حریم رود و ... محاسبه مقادیر متوسط فراسنج‌های آبی مقطع رود (سرعت جریان، عمق آب و تنش برشی) کفایت می‌کند. این نتایج با استفاده از مدل‌های ریاضی یک‌بعدی نظیر HEC-RAS، MIKE-11، ISIS و HEMET قابل استخراج هستند. مشکل و محدودیت اصلی این مدل‌ها این است که متغیرهای آبی را فقط در جهت طولی محاسبه کرده و توزیع عرضی و عمقی متغیرها را در نظر نمی‌گیرند. همچنین، از نظر دقت نیز دارای محدودیت هستند. در برخی موارد، نظیر مطالعات انتقال رسوب، تعیین بازه‌های فرسایشی و رسوب‌گذار در عرض رود، تعیین موقعیت آبگیرهای جانبی در قوس رود و نیز طرح‌های مهار فرسایش سواحل، توزیع عرضی یا عمقی فراسنج‌های سرعت جریان و تنش برشی اهمیت بیشتری دارند. به این منظور در این طرح‌ها، استفاده از مدل‌های ریاضی دوبعدی و یا سه‌بعدی اجتناب‌ناپذیر است. این مدل‌ها، اگرچه فیزیک و سازوکار جریان را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کنند، اما به دلیل نیاز به اطلاعات دقیق مرزهای جریان، ضرایب ثابت و اندازه‌گیری میدان سرعت جریان در جهات طولی و عرضی و مهمتر از آن، حجم بالای حافظه‌ی رایانه، فقط برای بازه‌های کوتاه رود

و در مجاورت سازه‌های آبی (نظیر آبگیرها، ایستگاه‌های آبکشی، سرریزها، آب‌سکن‌ها، پایه‌های پل و ...) قابل استفاده هستند. به همین دلیل در سال‌های اخیر توجه محققان به مدل‌های ریاضی شبه دو بعدی معطوف شده است. این مدل‌ها مشابه مدل‌های دو و سه‌بعدی بر اساس معادلات ناویر-استوکس پایه‌گذاری شده‌اند، اما از نظر کاربردی از سادگی بیشتری برخوردارند. متغیرهای آبی جریان (مثل سرعت و تنش برشی) در این مدل‌ها عموماً به صورت نیمرخ عرضی و به شکل متوسط در عمق محاسبه می‌شوند.

در اغلب طرح‌های مهندسی رود علاوه بر مطالعه‌ی هیدرولیک جریان، بررسی رفتار رسوب‌های رود نیز بسیار مهم و تاثیرگذار است. مثلاً، احداث سدها، پل‌ها، آبگیرهای جانبی و بندهای انحرافی و نیز عملیات لایروبی رودها کاملاً با خصوصیات جریان و رسوب رود مرتبط است. برای بررسی رفتار و حرکت رسوب، مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی زیادی به کمک محققین انجام شده و از نتایج تحلیل آنها، روابط و معادلات تجربی فراوانی برای محاسبه نرخ انتقال رسوب در رودها ارائه شده‌اند. همچنین مدل‌های ریاضی زیادی به منظور بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودها ارائه شده‌اند.

تاکنون مطالعات بسیار کمی در زمینه‌ی شبیه‌سازی توزیع غلظت رسوب در عرض رودها صورت گرفته است. ایوب‌زاده و ظهیری (۱۳۸۲) با استفاده از رابطه رسوبی ایکرز- وایت (۱۹۷۳) و حل تحلیلی مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱)، رابطه‌ی سنج رسوب را برای رود میناب در استان هرمزگان شبیه‌سازی نمودند. نتایج این تحقیق به دلیل نبودن داده‌های غلظت رسوب مناسب در عرض رود میناب کاملاً رضایت‌بخش نبود. همچنین به دلیل حل تحلیلی مدل ریاضی، کاربرد آن در رودهای دیگر بسیار مشکل است. هو و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از حل معادله پخش (دیفیوژن) در عرض نهر مرکب، توزیع غلظت رسوب معلق را در عرض یک نهر آزمایشگاهی به خوبی شبیه‌سازی نمودند. با توجه به بررسی منابع به نظر می‌رسد که در مورد برآورد توزیع عرضی انتقال رسوب کل در رودهای طبیعی تحقیقی صورت نگرفته باشد. به همین منظور در این تحقیق، یک مدل ریاضی شبه-دوبعدی برای حل همزمان سرعت جریان و غلظت رسوب کل در عرض رود ارائه شده است. اساس این مدل،

منظم به راحتی قابل استفاده است. برای رودهای طبیعی با هندسه نامنظم، روش‌های عددی تفاضل‌های محدود، اجزاء محدود و حجم محدود قابل استفاده است که در این مقاله از حل تفاضل محدود استفاده شده است. برای این حل باید توزیع عرضی ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ، و نیز ضریب بدون بعد لزجت جریان آشفته معلوم باشند. مقادیر ضریب اصطکاک با واسنجی مدل ریاضی بر اساس تغییر ضریب زبری در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به دست می‌آیند. ضریب بدون بعد لزجت جریان تلاطمی (λ) در مسائل مهندسی رود معمولاً طبق توصیه‌ی محققان مختلف برابر با ۰/۰۷ در نظر گرفته می‌شود (نایت و آپریل، ۱۹۹۶).

حل عددی مدل ریاضی

قبل از حل عددی مدل، ابتدا باید معادله‌ی دیفرانسیلی گسسته‌سازی شود. با اندکی ساده‌سازی و فرض $V = u_d^2$ ، شکل گسسته‌ی معادله‌ی دیفرانسیل فوق با استفاده از روش تفاضل‌های محدود به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} & \rho g H_i S_0 - \rho \left(\frac{f}{8} \right)_i V_i \sqrt{1 + \frac{1}{S^2}} + \\ & \rho \lambda H_i^2 \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{f}{8}} \right)_i \left(\frac{V_{i+1} - 2V_i + V_{i-1}}{\Delta y^2} \right) \\ & + \rho \lambda H_i^2 \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{f}{8}} \right)_{i+1} - \left(\sqrt{\frac{f}{8}} \right)_{i-1}}{2\Delta y} \right] \times \quad (2) \\ & \left(\frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2\Delta y} \right) + \rho \lambda \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{f}{8}} \right)_i \times \\ & \left[\frac{(H^2)_{i+1} - (H^2)_{i-1}}{2\Delta y} \right] \left(\frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2\Delta y} \right) = 0 \end{aligned}$$

که اندیس i نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی هر گره محاسباتی و Δy گام محاسباتی است. در شکل ۱، نحوه‌ی گره‌بندی میدان حل در عرض رود نشان داده شده است. با توجه به شرایط مرزی مسئله (سرعت‌های صفر برای دو گره ابتدا و انتهای محاسبه‌ها) و معلوم بودن

معادله‌ی ناویر-استوکس است که به کمک شیونو و نایت (۱۹۹۱) به صورت متوسط در عمق تبدیل شده و برای حل توزیع سرعت در عرض رود کاربردی شده است. همچنین برای محاسبه‌ی غلظت رسوب در عرض رود، از روابط تجربی محققان مختلف و نیز نتایج توزیع عرضی سرعت به دست آمده از مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱) استفاده شد. مزیت مهم این تحقیق، ارزیابی دقت نتایج مدل با استفاده از داده‌های صحرایی توزیع غلظت رسوب کل در عرض رود قره‌سواست.

مواد و روش‌ها

مبانی مدل ریاضی

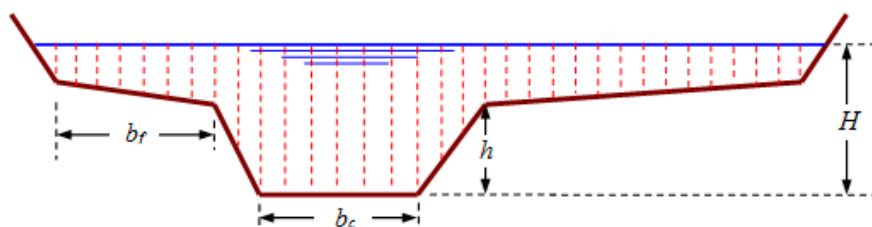
شیونو و نایت (۱۹۹۱) برای حل توزیع عرضی سرعت جریان در مقاطع مرکب، معادله‌ی دیفرانسیلی زیر را ارائه نمودند:

$$\begin{aligned} & \rho g H S_0 - \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{S^2}} + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} u_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} [H (\rho \overline{UV})_d] \quad (1) \end{aligned}$$

که u_d سرعت متوسط در عمق، H عمق جریان در هر نقطه از رود، S شیب جانبی کف و ساحل رود، f ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ، λ ضریب بدون بعد لزجت جریان آشفته، ρ جرم حجمی آب، S_0 شیب طولی رود، g شتاب گرانش، y فاصله در جهت عرضی، \overline{UV} میانگین زمانی سرعت‌های جریان به ترتیب در راستای طول و عرض رود هستند. عبارت سمت راست معادله‌ی (۱) اثر جریان‌های ثانویه را نشان می‌دهد. این جریان‌ها در عرض نهر توسعه یافته و در طول نهر منتقل می‌شوند. طبق مطالعات انجام شده، اثر جریان‌های ثانویه در مقاطع آزمایشگاهی کوچک و نیز در قوس رودها دارای اهمیت بوده و باید در نظر گرفته شود (اروین و همکاران، ۲۰۰۰)، اما برای رودهای با عرض زیاد، این جریان‌ها قدرت خود را از دست داده و تقریباً مستهلک می‌شوند. معادله‌ی (۱) یک معادله‌ی دیفرانسیل معمولی غیرخطی از نوع مقادیر مرزی بوده و فقط دارای یک مجهول است (u_d در عرض رود). این معادله حل تحلیلی دارد، اما حل تحلیلی آن فقط برای نهرهای با مقطع

ها، هیچ کدام از معادلات تجربی انتقال رسوب قادر به شبیه‌سازی دقیق فرسایش و رسوب‌گذاری در تمامی رود-ها و یا حتی بازه‌های مختلف یک رود نیستند (یانگ، ۱۹۹۶). به همین دلیل، باید برای هر رود با توجه به خصوصیات هیدرولیکی جریان و رسوب آن، و نیز بر اساس داده‌های صحرایی، مناسب‌ترین معادله انتخاب شود (ون‌راین، ۱۹۸۹). محققان مختلف روابط زیادی را برای محاسبه

هندسه‌ی مقطع عرضی، تراز سطح آب و شیب کف رود، و نیز فرض مقادیری برای ضریب زبری مانینگ و ضریب لزجت تلاطمی (ورودی‌های مدل ریاضی)، مدل ریاضی به صورت عددی حل شده و برای هر گره، سرعت متوسط در عمق محاسبه می‌شود. در این مدل مقادیر سرعت در گره‌های محاسباتی به‌صورت هم‌زمان و با حل یک ماتریس به‌دست می‌آیند. طبق مطالعات صورت گرفته، و نیز با توجه به پیچیدگی فرایندهای هیدرولیک جریان و رسوب در رود-



شکل ۱- گره‌های محاسباتی برای محاسبه توزیع عرضی سرعت.

جدول ۱- روابط تجربی انتقال رسوب استفاده شده در این تحقیق.

رابطه	نام محقق/محققان
$Q_t = QC \frac{d_{50}}{R} \left(\frac{V}{u_*} \right)^n \left(\frac{F_g}{A} - 1 \right)^m$	ایکرز-وایت (۱۹۷۳)
$Q_t = 0.05Q \frac{G_s}{G_s - 1} \frac{VS_0}{\sqrt{(G_s - 1)gd_{50}}} \frac{RS_0}{(G_s - 1)d_{50}}$	انگلوند-هانسن (۱۹۶۷)
$\log C_t = I + J \log \left(\frac{VS_0}{w} \right)$	
$I = 5.165 - 0.153 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0.297 \log \frac{u_*}{w}$	یانگ (۱۹۹۶)
$J = 1.780 - 0.360 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0.480 \log \frac{u_*}{w}$	
$Q_t = 0.084\gamma_w Q \left(\frac{d_{50}}{R} \right)^{1.167} \left(\frac{\tau'_b}{\tau_{cr}} - 1 \right) \Psi$	لارسن (۱۹۵۸)
$Q_t = B \left[\frac{\left(\frac{\sqrt{f}}{8} \frac{V}{\sqrt{gDS_0}} \right)^2 \gamma_w DS_0 - 0.047(G_s \gamma_w - \gamma_w) d_{50}}{0.25 \left(\frac{\gamma_w}{g} \right)^{0.5} \left(\frac{G_s \gamma_w - \gamma_w}{G_s \gamma_w} \right)^{\frac{2}{3}}} \right]^{1.5}$	میر-پیتر-مولر (۱۹۴۸)

در جدول فوق Q_t بده کل رسوب، Q بده جریان، u_* سرعت برشی، V سرعت متوسط جریان، R شعاع آبی، d_{50} قطر میانه رسوب‌ها، F_g عدد حرکت رسوب، ضرایب n ، A و m و ضرایب روش ایکرز-وایت، C_t غلظت رسوب (ppm)، w سرعت سقوط ذرات، v لزجت جنبشی آب، γ_w وزن مخصوص آب، G_s چگالی ویژه رسوب، τ'_b وابستگی دانه‌بندی به تنش برشی بستر، τ_{cr} تنش برشی بحرانی، Ψ فرانسج نسبت سرعت ذرات، γ_s وزن مخصوص رسوب، D عمق جریان، S_0 شیب طولی رود، B عرض رود، f' ضریب اصطکاک داری-ویسباخ هستند.

قرار داد و کارایی آنها را مشخص نمود. انجمن مهندسين ارتش آمريكا (۱۹۹۰) نیز در يك بررسی مقایسه‌ای، روابط انتقال رسوب را بر اساس میزان انطباق با نتایج به-دست آمده از اندازه‌گیری صحرایی و آزمایشگاهی رده-بندی نموده است. بر این اساس، روابط یانگ (۱۹۹۶)، ایگز-وایت (۱۹۷۳)، لارسن (۱۹۵۸) و انگلوند-هانس (۱۹۷۶) به ترتیب رتبه‌های ۱ تا ۴ را کسب نمودند.

نرخ انتقال رسوب ارائه نموده‌اند که بعضی از روابط مهم در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در جدول ۲ نیز شرایط و محدوده‌ی کاربرد این روابط ارائه شده است. با توجه به محدوده‌ی وسیع کاربرد این روابط، انتظار می‌رود که نتایج به‌دست آمده از این معادلات حتی برای یک ایستگاه نیز بسیار متفاوت باشد. یانگ (۱۹۹۶) در یک بررسی فراگیر، عملکرد معادلات انتقال رسوب را برای چند نهر آزمایشگاهی و رود طبیعی مورد تجزیه و تحلیل

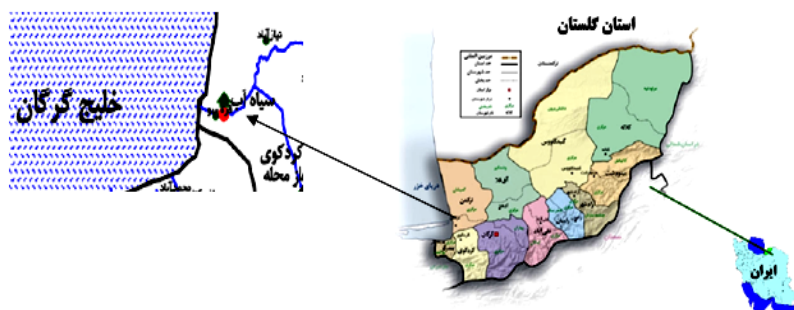
جدول ۲- محدوده‌ی کاربرد روابط تجربی انتقال رسوب استفاده شده در این تحقیق.

رابطه رسوبی	قطر متوسط رسوب (میلی‌متر)	چگالی ویژه رسوب	سرعت جریان (متر)	عمق جریان (متر)	شیب انرژی (متر)	عرض کانال (متر)
آکرز-وایت	-	۱-۲/۷	۰/۲۱-۰/۱۶	۰/۰۳-۰/۴۲	۰/۰۰۰۶-۰/۰۳۷	۰/۰۷-۱/۲۱
انگلوند-هانس	۰/۱۹-۰/۹۳	-	۰/۱۹-۰/۹۳	۰/۰۵۷-۰/۴	۰/۰۰۰۵۵-۰/۰۱۹	-
لارسن (صحرایی)	۰/۸۰-۰/۷	-	۰/۲-۰/۳۷۷	۰/۲-۰/۶۴	۰/۰۰۰۲-۰/۰۰۸	۱۹/۲-۱۱۰۰
لارسن (آزمایشگاهی)	۰/۰۱۱-۰/۲۹	-	۰/۷-۰/۴	۰/۰۹-۱/۰۹	۰/۰۰۰۲۵-۰/۰۲۵	۰/۰۷-۱/۰۱
میر-پیتز-مولر	-	۱/۲۵-۴	۰/۲۱-۲/۸۶	۰/۰۹-۱/۸	۰/۰۰۰۴-۰/۰۲	۰/۱۵-۲/۰۱
یانگ (صحرایی-شنی)	-	-	۰/۴۲-۱/۵۵۴	۰/۲۴-۰/۲۲	۰/۰۰۱۲-۰/۰۲۹	۰/۱۳-۵۳۳
یانگ (صحرایی-ماسه‌ای)	-	-	۰/۲۴-۱/۹۴	۰/۱۲-۱/۵۲	۰/۰۰۰۴۳-۰/۰۲۸	۰/۱۳-۵۳۳

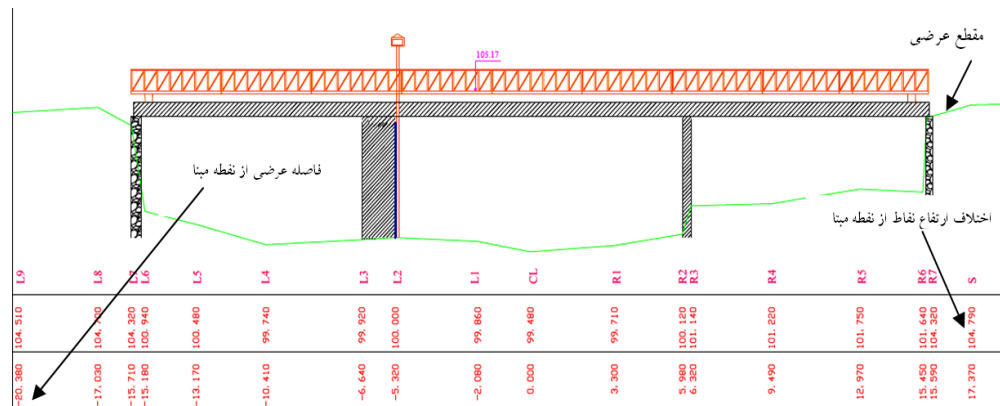
حوضه‌ی آبریز قره‌سو با مساحت ۱۶۱۰ کیلومتر مربع حدود ۸ درصد از مساحت کل استان گلستان را تشکیل می‌دهد. در شکل ۳ مقطع عرضی رود قره‌سو همراه با تراز هندسی بستر رود نشان داده شده است. در شکل ۴ نیز نمایی از وضعیت رود در محل ایستگاه آبسنجی قره‌سو و وضعیت پوشش گیاهی در مقطع اصلی آن ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی مصالح بستر رود قره‌سو در محل ایستگاه آبسنجی در شکل ۵ ارائه شده است. قطر میانه این رسوبات حدود ۰/۴ میلی‌متر برآورد می‌شود.

منطقه‌ی مورد مطالعه

رود قره‌سو در استان گلستان واقع شده است. طول این رود ۵۰ کیلومتر و متوسط آبدهی سالانه آن حدود ۶۲/۵ متر مکعب بر ثانیه است. در شکل ۲ موقعیت رود مطالعه شده در کشور و استان گلستان نشان داده شده است. شیب طولی این رود در محل ایستگاه قره‌سو حدود ۰/۰۱۴، و عرض مقطع رود در شرایط جریان پایه و غیرسیلابی حدود ۶ متر است که در شرایط سیلاب تا ۲۵ متر نیز افزایش می‌یابد. بیشینه‌ی بده جریان ثبت شده در این رود، ۴۷/۶ مترمکعب بر ثانیه بوده که در سیل تیرماه ۱۳۷۷ اتفاق افتاده است.



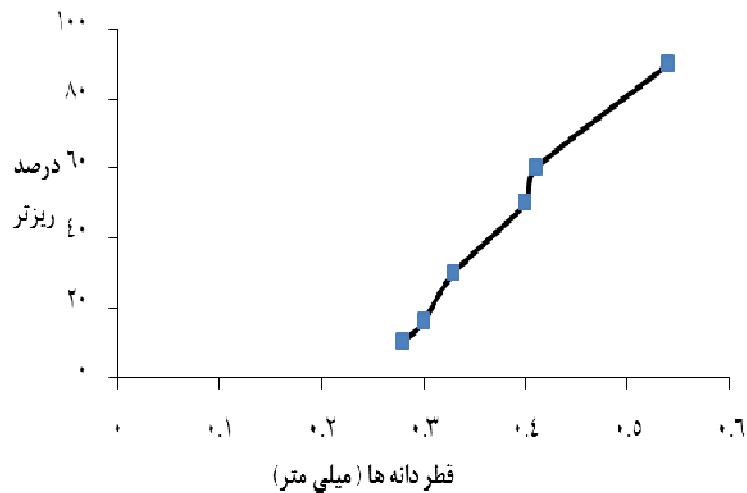
شکل ۲- موقعیت رود قره‌سو در ایستگاه آبسنجی قره‌سو.



شکل ۳- نمایی از مقطع عرضی رود در محل ایستگاه آبرسانی قره‌سو.



شکل ۴- وضعیت پوشش گیاهی رود در محل ایستگاه قره‌سو.



شکل ۵- نمودار دانه‌بندی مصالح بستر رود قره‌سو در محل ایستگاه قره‌سو.

شیب طولی رود، داده‌های ورودی مدل ریاضی هستند. با توجه به وضعیت ظاهری رود در محل ایستگاه از نظر تراکم پوشش گیاهی، درجه‌ی انحناء و ... یک ضریب زبری فرضی برای رود انتخاب می‌شود. سپس با محاسبه ضرایب اصطکاک دارسی (f) در عرض رود، توزیع عرضی سرعت جریان به کمک مدل ریاضی محاسبه می‌شود. توزیع عرضی سرعت به دست آمده از مدل ریاضی با توزیع عرضی سرعت اندازه‌گیری در رود مقایسه شده و بر اساس میزان مطابقت این دو توزیع، ضریب زبری اصلاح می‌شود. این کار تا حصول همگرایی (رسیدن به حداقل مجذور مربعات خطای مدل ریاضی) ادامه می‌یابد. در شکل ۶ نتایج واسنجی مدل شبه‌دوبعدی برای ۲ بده جریان مختلف نشان داده شده است. این نتایج بر اساس ضریب زبری مانینگ بهینه‌ی رود (حدود ۰/۰۷۵) به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو بده، میزان مطابقت نتایج محاسباتی و مشاهداتی قابل قبول است. با مقایسه آماری نتایج بدست آمده از مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نقطه‌ای جریان، مشخص شد که متوسط خطای مطلق و میانگین جذر مربعات خطا در این مرحله به ترتیب حدود ۹/۶ درصد و ۰/۰۵ متر بر ثانیه هستند. لازم به ذکر است که در رودهای طبیعی با پوشش گیاهی، ضریب زبری مانینگ تابع عمق جریان، تراکم و نوع پوشش گیاهی، دانه‌بندی مصالح کف و سواحل رود، نامنظمی شکل مقطع عرضی و مسیر رود و نیز شکل بستر است. با این وجود در این تحقیق برای سادگی و نیز با توجه به شرایط رود قره‌سو در محل ایستگاه که دارای پوشش گیاهی در بستر و سواحل رود است، از یک ضریب زبری ثابت برای کل محدوده‌ی عرض رود استفاده شد.

برای اطمینان از دقت مدل ریاضی شبه‌دوبعدی در بده‌های جریان غیر از محدوده‌ی واسنجی، باید صحت-سنجی (اعتبارسنجی) مدل نیز انجام شود. در شکل ۷ نتایج محاسبات توزیع عرضی سرعت به ترتیب برای بده جریان ۱/۴ و ۲/۴ مترمکعب بر ثانیه نشان داده شده است. در این مرحله، ضریب زبری مانینگ برای کل مقطع عرضی ۰/۰۷۵ در نظر گرفته شد. حداکثر خطای نسبی، متوسط خطای مطلق و میانگین جذر مربعات خطای مدل ریاضی برای محاسبه‌ی توزیع عرضی سرعت در این مرحله به ترتیب حدود ۹ درصد، ۷/۸ درصد و ۰/۰۳۴ متر

شاخص‌های ارزیابی دقت مدل ریاضی

برای ارزیابی دقت نتایج مدل ریاضی هیدرولیک جریان و رسوب، لازم است از شاخص‌های آماری معتبری از قبیل میانگین جذر مربعات خطا ($RMSE$) و متوسط خطای مطلق (MAE) استفاده شود. این معیارها از روابط ریاضی زیر قابل محاسبه هستند:

$$MAE = \frac{\sum \frac{|X - Y|}{X} \times 100}{N} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{N}} \quad (۴)$$

که X مقدار اندازه‌گیری شده، Y مقدار محاسباتی، \bar{X} و \bar{Y} به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و محاسباتی و N تعداد نمونه‌های ارزیابی هستند. همچنین برای مطالعات رسوب از شاخص‌های خاصی مثل نسبت ناجوری^۱ (DR) نیز استفاده می‌شود:

$$DR = \frac{X}{Y} \quad (۵)$$

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی

مهمترین فراسنج برای واسنجی مدل‌های ریاضی هیدرولیک جریان در رودها، ضریب زبری مانینگ است. به این منظور، چند نمونه از داده‌های اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت در بده‌های مختلف در ایستگاه آبسنجی قره‌سو انتخاب شدند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از دستگاه سرعت‌سنج OTT آلمانی مدل C31 استفاده شده است. برای عمق‌های کمتر از یک متر، سرعت در ۰/۶ عمق جریان (از سطح آب) و برای عمق‌های بیش از یک متر، سرعت‌های نقاط ۰/۲ و ۰/۸ عمق جریان اندازه‌گیری شده است. با توجه به عرض رود، معمولاً اندازه‌گیری سرعت در فواصل یک متری در عرض رود انجام شده است.

داده‌های هندسه‌ی مقطع عرضی، تراز سطح آب و

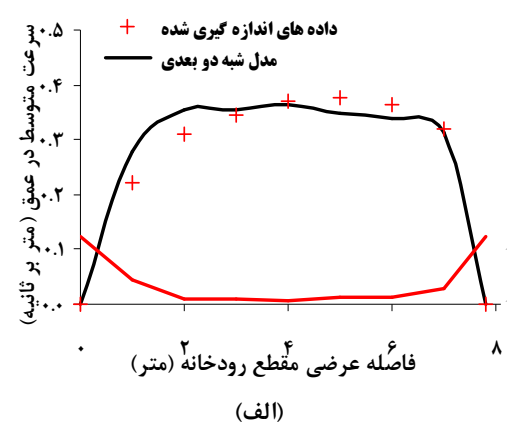
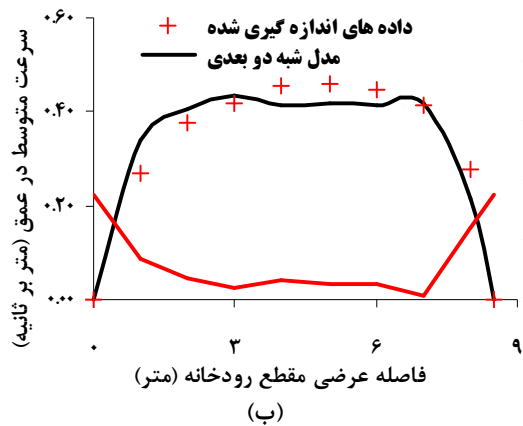
^۱ discrepancy ratio

واقع (بیش از ۲ برابر) پیش‌بینی نموده است در حالی‌که رابطه میر-پیتز-مولر (۱۹۴۸) در بیش از ۷۵ درصد از موارد، بده رسوب را بسیار کمتر از واقع (کوچکتر از ۰/۲۵ برابر) محاسبه نموده است. با توجه به این نتایج، روابط یانگ (۱۹۹۶) و ایکرز-وایت (۱۹۷۳) با متوسط خطای ۴۵ و ۶۷ درصد، بیشترین دقت و رابطه لارسن (۱۹۵۸) با خطای ۲۴۵ درصد، کمترین دقت را دارا هستند. روابط انگلوند-هانسن (۱۹۷۶) و میر-پیتز-مولر (۱۹۴۸) نیز با خطای متوسط ۹۷/۵ و ۸۰ درصد دارای دقت مناسبی نیستند. بر اساس نتایج نسبت ناجوری در شکل ۱۲، مشخص می‌شود که روابط یانگ و ایکرز-وایت به ترتیب در ۸۴ و ۷۵ درصد موارد، بده رسوب را در محدوده ۰/۵-۲ مباحث رسوبی، قابلیت مناسب آنها را نشان می‌دهد.

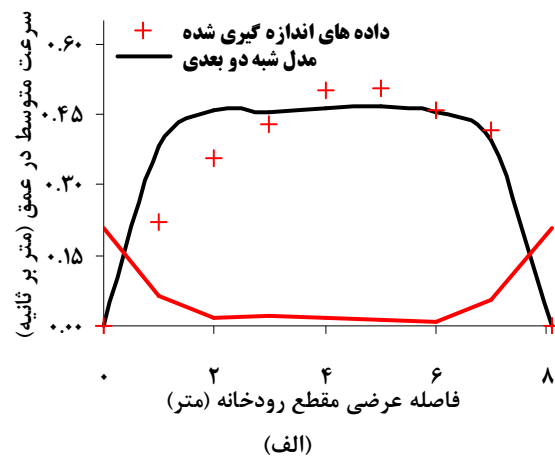
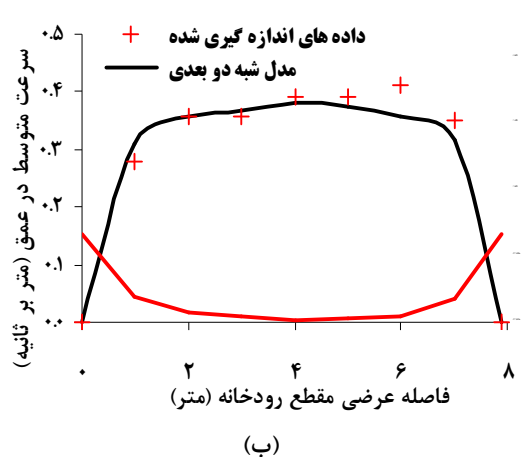
بر ثانیه به دست آمد. خطای متوسط مدل شبه‌دو بعدی برای محاسبه‌ی بده جریان حدود ۲/۴ درصد به دست آمد.

شبه‌سازی انتقال رسوب در رود

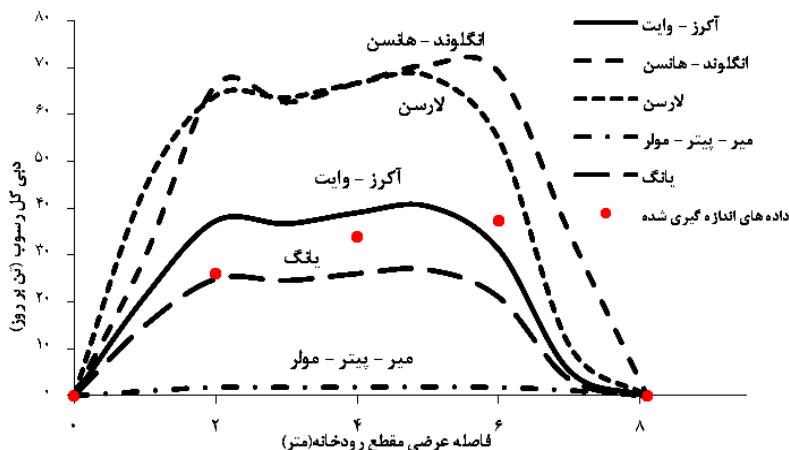
بعد از محاسبه‌ی توزیع عرضی سرعت در رود، مقادیر این سرعت‌ها در روابط تجربی انتقال رسوب وارد گردیده و بده کل رسوب محاسبه خواهد شد. نتایج این محاسبه، برای چند بده جریان در رود قره‌سو در شکل-های ۸ تا ۱۱ نشان داده‌اند. همچنین برای ارزیابی بهتر این نتایج، در شکل ۱۲ نتایج محاسبه شاخص ناجوری برای تمامی روابط رسوبی مورد استفاده نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود نتایج بده رسوب به دست آمده از روابط انتقال رسوب تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. مثلاً رابطه‌ی لارسن (۱۹۵۸) برای بیش از ۸۰ درصد موارد، بده رسوب را بسیار فراتر از



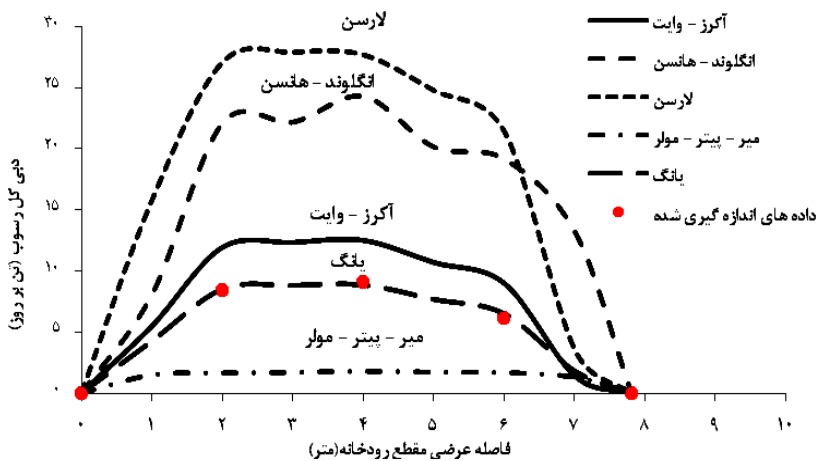
شکل ۶- مقایسه‌ی توزیع عرضی سرعت‌های محاسباتی و اندازه‌گیری رود قره‌سو در مرحله‌ی واسنجی مدل ریاضی (الف) بده جریان ۱/۳ مترمکعب بر ثانیه، (ب) بده جریان ۲/۲ مترمکعب بر ثانیه.



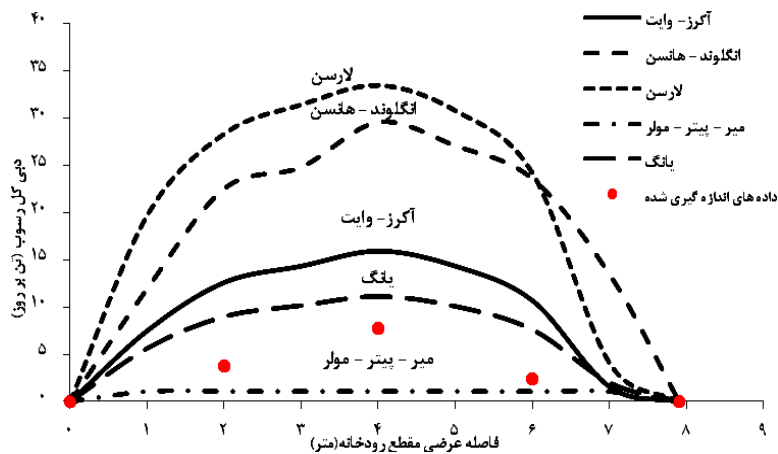
شکل ۷- مقایسه‌ی نتایج توزیع عرضی سرعت‌های محاسباتی و اندازه‌گیری رود قره‌سو در مرحله‌ی صحت‌سنجی مدل ریاضی، (الف) بده جریان ۲/۴ مترمکعب بر ثانیه، (ب) بده جریان ۱/۴ مترمکعب بر ثانیه.



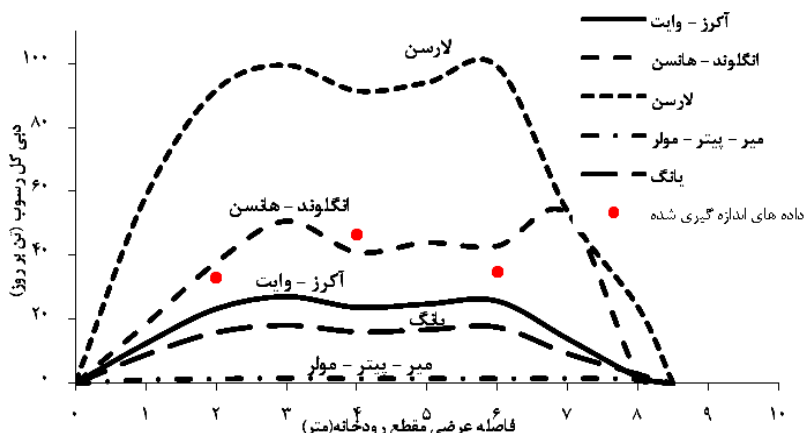
شکل ۸- مقایسه ی توزیع عرضی رسوب به دست آمده از روابط تجربی انتقال رسوب با مقادیر اندازه گیری شده (بده جریان ۲/۳۷ متر مکعب بر ثانیه).



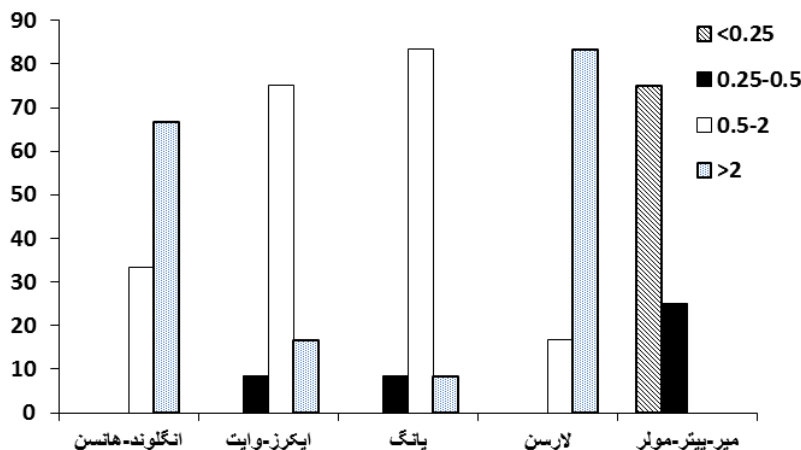
شکل ۹- مقایسه ی توزیع عرضی رسوب به دست آمده از روابط تجربی انتقال رسوب با مقادیر اندازه گیری شده (بده جریان ۱/۲۶ متر مکعب بر ثانیه).



شکل ۱۰- مقایسه ی توزیع عرضی رسوب به دست آمده از روابط تجربی انتقال رسوب با مقادیر اندازه گیری شده (بده جریان ۱/۴۳ متر مکعب بر ثانیه).



شکل ۱۱- مقایسه‌ی توزیع عرضی رسوب به‌دست آمده از روابط تجربی انتقال رسوب با مقادیر اندازه‌گیری شده (بده جریان ۲/۱۸ مترمکعب بر ثانیه).



شکل ۱۲- نتایج نسبت ناچوری برای محاسبه‌های به‌دست آمده از روابط انتقال رسوب در رود قره‌سو.

است که حاکی از کارایی مناسب مدل ریاضی است. متوسط خطای نسبی برای محاسبه‌ی بده کل جریان حدود ۲/۴ درصد است.

۳- نتایج محاسبه‌های انتقال رسوب در رود قره‌سو نشان داد که روابط یانگ (۱۹۹۶) و ایکرز-وایت (۱۹۷۳) با متوسط خطای نسبی ۴۵ و ۶۷ درصد، بیشترین دقت را دارا هستند. بر اساس نتایج نسبت ناچوری نیز مشخص شد که این دو رابطه در بیشترین درصد از موارد، بده رسوب را در محدوده مناسب ۲-۵/۰ برابر مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد نموده‌اند.

۴- با توجه به این که در مطالعات رسوبی، روابطی که بار رسوب بیشتری نسبت به مقادیر واقعی محاسبه می‌کنند از اولویت بیشتری برخوردارند، بنابراین رابطه ایکرز-وایت به عنوان رابطه نهایی قابل انتخاب است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، کارایی مدل ریاضی شبه‌دو بعدی شیونو و نایت (۱۹۹۱) در برآورد توزیع عرضی سرعت جریان و نیز دبی کل رسوب در رود قره‌سو (در محل ایستگاه قره‌سو) مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های مهم این تحقیق عبارتند از:

۱- با واسنجی مدل ریاضی در بده‌های مختلف جریان مشخص شد که ضریب زبری مانینگ ۰/۰۷۵ برای تمامی بده‌ها، نتایج رضایت‌بخشی ارائه می‌نماید. با توجه به وجود پوشش گیاهی انبوه در مقطع اصلی این رود، این مقدار ضریب زبری قابل توجیه است.

۲- متوسط خطای نسبی مدل ریاضی برای تخمین توزیع عرضی سرعت جریان در مراحل واسنجی و صحت-سنجی مدل به ترتیب ۹/۶ و ۷/۸ درصد به‌دست آمده

12) Yang, C. T. 1996. Sediment transport: theory and practice. Mc-Grow Hill companies, 396p.

13) Yang, C. T., Treviño, M. A. and Simões, F. J. M. 1998. User's manual for GSTARS2.0. USBR, Technical Service Center, Denver.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی و سپاس خود را از شرکت آب منطقه‌ای گلستان و گروه آب‌های سطحی آن اعلام می‌دارند.

منابع

- 1) Ackers, P. and White, W.R. 1973. Sediment transport: new approach and analysis. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 99(11): 2040-2060.
- 2) Ayyoubzadeh, A. and Zahiri, A. 2005. Application of envelope section method in investigation of sediment transport hydraulics in river compound channels using combined model of hydraulic-sediment. Modares Civil Engineering Journal, 21:71-93. (In Persian)
- 3) Engelund, F. and Hansen, E. 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- 4) Ervine, D. A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R. H. J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126(9):653-669.
- 5) Hu, C., Ju, Z. and Guo, Q. 2010. Flow movement and sediment transport in compound channels. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 48(1): 23-32.
- 6) Knight, D. W. and Abril, J. B. 1996. Refined calibration of a depth-averaged model for turbulent flow in a compound channel. Proceeding Civil Engineering of Water, Maritime & Energy, 118: 151-159.
- 7) Laursen, E. M. 1958. The total sediment load of streams. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 84(1): 1530-1536.
- 8) Meyer-Peter, E. and Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. 2nd International Association for Hydraulic Research, Stockholm, Sweden.
- 9) Shiono, K. and Knight, D. W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. Journal of Fluid Mechanics, 222: 617-646.
- 10) US Army Corps of Engineers. 1990. Waimea river sediment study (Kauai, Hawaii). Technical Report HL-90-3, Vicksburg, Mississippi.
- 11) Van Rijn, L. 1989. Handbook sediment transport by current waves. Delft Hydraulics, Netherlands.

