

مدل ریاضی دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در مقاطع مرکب مستقیم

محمد رضا کریمی^۱، عبدالرضا ظهیری^{۲*}، مهدی مفتاح هلقی^۳، امیراحمد دهقانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۲۱

چکیده

شناخت شرایط انتقال رسوبات از دیرباز مورد توجه مهندسان هیدرولیک بوده است. بیش‌ترین تغییرات مورفولوژی رودخانه در شرایط سیلاب اتفاق افتاده و معمولاً رودخانه‌ها به فرم مقاطع مرکب ظاهر می‌شوند. به همین دلیل هیدرولیک جریان و رسوب در آن‌ها متفاوت از مقاطع عادی است. میزان حمل رسوب معلق در رودخانه، تابعی مستقیم از سرعت جریان است. با توجه به تغییرات شدید سرعت جریان در مقاطع مرکب، قطعاً تغییرات حمل رسوب در عرض و عمق رودخانه‌ها در شرایط سیلاب متغیر خواهد بود. با توجه به این واقعیت، بهتر است برای محاسبه ظرفیت حمل رسوب در رودخانه‌ها، به‌جای استفاده از سرعت متوسط از سرعت‌های نقطه‌ای استفاده شده و در فرمول‌های تجربی انتقال رسوب (مانند انگلوند-هانسن، آیکرز-وایت و ...) برای هر سطح از جریان جایگذاری شوند. در این پژوهش، ابتدا با حل عددی یک معادله دیفرانسیل به فرم پواسون، توزیع دوبعدی سرعت جریان در عرض و عمق یک مقطع مرکب آزمایشگاهی محاسبه شد و سپس از این توزیع سرعت، ظرفیت حمل رسوب به‌صورت نقطه‌ای برآورد گردید. از مجموع این ظرفیت‌های نقطه‌ای، ظرفیت کل حمل رسوب برای کانال به‌دست آمد. در روش انگلوند - هانسن در حالت استفاده از سرعت متوسط جریان و تنش برشی کل بستر، خطای متوسط و مجذور میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۵۸٪ و ۳/۶۳ گرم بر ثانیه به‌دست آمد اما با جایگذاری مقادیر نقطه‌ای سرعت جریان و تنش برشی بستر، مقادیر خطا به ۱۵٪ و ۱/۷۱ گرم بر ثانیه کاهش یافت. در روش آیکرز - وایت مقادیر خطا در حالت استفاده از سرعت متوسط جریان به ترتیب برابر ۱۶۴٪ و ۹/۳۶ گرم بر ثانیه به‌دست آمد که در حالت استفاده از سرعت‌های نقطه‌ای این مقادیر خطا به ۳۰٪ و ۱/۸۶ گرم بر ثانیه تقلیل یافت.

واژه‌های کلیدی: انتقال رسوب، توزیع سرعت، دشت سیلابی، کانال اصلی، مقطع مرکب

مقدمه

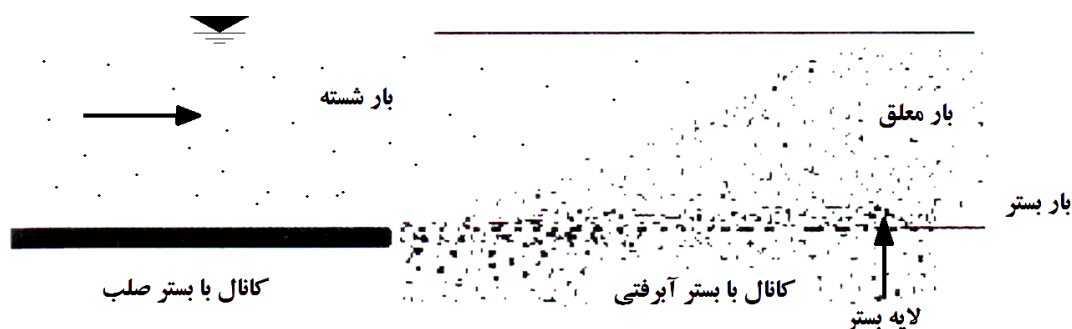
تعیین مقدار رسوب حمل شده توسط رودخانه‌ها از جنبه‌های مختلفی مانند: تغییر مورفولوژی رودخانه‌ها، اثرگذاری بر سازه‌های احداث شده پایین دست و... دارای اهمیت است. در طرح‌های مهندسی رودخانه با هدف بهره‌برداری از منابع آب نظیر سازه‌های تنظیم و انحراف جریان، سدهای مخزنی و ایستگاه‌های پمپاژ، بار رسوبی رودخانه از جمله عوامل مهم و تاثیرگذار در تعیین مشخصه‌های هندسی سازه و عمر مفید آن‌ها تلقی می‌شود. در شکل ۱ نمونه-

ای از فرآیند انتقال رسوب توسط جریان آبراهه قابل مشاهده است. به لحاظ اهمیت و نقش پدیده انتقال رسوب در عرصه‌های مختلف مهندسی، تعیین کمیت بار رسوبی از دیرباز مورد توجه متخصصین مسایل رودخانه‌ای قرار گرفته است. براساس بررسی‌های انجام شده تاکنون بیش از ۳۰ معادله تجربی انتقال رسوب توسط محققین مختلف ارائه گردیده است (شفاعی بجستان، ۱۳۸۹). به لحاظ پیچیدگی‌های حاکم بر فرآیند انتقال، امکان معرفی یک معادله واحد جهانی برای تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها میسر نیست. در این رابطه می‌توان به مدل خطی و پخشی پیش‌بینی پروفیل بستر توسط سونی و همکاران، استفاده از سری فوریه و روش تابع خطا در تحلیل معادله رسوب‌گذاری توسط گیل، استفاده از روش باقی‌مانده‌ها در تحلیل معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی توسط جارامیلو و جین، بررسی روش‌های مزدوج توسط چادری، حل معادلات سن-ونان-اکسندر در حالات بحرانی توسط لین و آلتینکار و شبیه‌سازی سیلاب‌های شدید در رودخانه‌های طبیعی توسط والرئو اشاره نمود (Soni et al., 1980 ; Lyn and Altinkar., 2002 ; Gill., 1983 ; Jaramilo and Jain., 1984 ; Chaudhry., 1998 ; Valerio., 2003).

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
 - ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
 - ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
 - ۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
- (*)- ایمیل نویسنده مسئول: (Email: zahiri.arez@gmail.com)

حقی آبی به تخمین ظرفیت دبی در مجاری مرکب روباز با استفاده از روش ریاضی مارس پرداختند. پارسایی و همکاران در زمینه تخمین ظرفیت دبی در مجاری مرکب روباز با استفاده از روش استنتاج فازی تطبیقی عصبی (ANFIS) تحقیقاتی انجام دادند. همچنین پارسایی و همکاران، در پژوهشی دیگر در زمینه برآورد دبی در مقاطع مرکب با استفاده از روش تقسیم کانال به چند بخش (DCM) و برآورد جریان با استفاده از همبستگی بین مقاطع تقسیم شده مطالعاتی را انجام دادند. (Parsaie and Haghiabi., 2017; Parsaie et al., 2017a) (Parsaie et al., 2017 b)

در مورد برآورد بار بستر رودخانه‌ها در دهه‌های اخیر کوشش‌های بسیاری صورت گرفته است، ولی با توجه به محدودیت شناخت نسبت به مکانیسم و فرم مختلط حرکت ذرات، تاکنون روشی جامع ارائه نشده است. روابط انتقال رسوب پیشنهادی مانند: میر-پیتر و مولر، انیشتین و چنگ، اغلب بر اساس همبستگی آماری و ترکیبی از روش‌های تحلیلی، فرض‌های منطقی و اطلاعات تجربی توسعه یافته‌اند (Einstein., 1950; Meyer-Peter and Muller., 1984; Cheng., 2002). در زمینه هیدرولیک جریان در رودخانه و آبراهه‌ها، پارسایی و



شکل ۱ - حرکت رسوبات در کانال‌ها و رودخانه‌ها (شفاعی بجستان، ۱۳۸۹).

حمل شده نیز به دست آمد. سپس جواب‌های حاصل شده از دو این روش با یکدیگر و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شدند (Kean et al., 2009).

مواد و روش‌ها

معادلات اساسی حاکم بر حرکت سیال، معادلات حرکتی ناویه استوکس می‌باشند. این معادلات شامل ۴ معادله و چهار مجهول هیدرولیکی شامل: عمق جریان (یا فشار) و سه مولفه سرعت جریان می‌باشد. در شرایط واقعی کانال‌ها و رودخانه‌ها، جریان سه‌بعدی بوده و سرعت دارای سه مولفه می‌باشد (سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی به ترتیب u ، v و w). هر کدام از این سرعت‌ها نیز در سه جهت طولی، جانبی و قائم تغییر می‌کنند. بدیهی است که حل عددی این معادله به فرم کامل آن، از نظر محاسباتی حجیم بوده و به شرایط مرزی و اولیه پیچیده‌ای نیاز دارد. معادلات ناویه استوکس برای بیان تغییرات سرعت متوسط در جهت جریان، u ، در یک آبراهه مستقیم به صورت رابطه ۱ خلاصه می‌شوند (Darby., 1998):

$$gS_0 - \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

در معادلات تجربی تخمین رسوب، شرایط هیدرولیکی جریان از جمله سرعت نقش بسیار مهمی داشته و تعیین دقیق میزان آن، نتایج بهتری را در اختیار محققین قرار می‌دهد. از سوی دیگر در روابط ارائه شده، سرعت میانگین مقطع محاسبه و در معادلات جایگذاری می‌گردد حال آن‌که سرعت متوسط به ویژه در مقاطع مرکب و وجود دشت‌های سیلابی نمی‌تواند نماینده مناسبی برای آبراهه باشد. در مقاطع مرکب به دلیل اختلاف شدید سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، تقریباً تمامی رسوبات توسط جریان در مجرای اصلی رودخانه منتقل شده و عملاً میزان بسیار کمی از رسوبات توسط دشت‌های سیلابی حمل می‌شوند (میرباقری و همکاران، ۱۳۸۶).

در این مقاله به جای سرعت متوسط جریان در روابط تجربی انتقال رسوب، از توزیع دوبعدی سرعت به صورت نقطه‌ای استفاده شده است. در ابتدا مقطع عرضی آبراهه شبکه‌بندی گردید. سپس از معادله دیفرانسیلی کین و همکاران و تلفیق آن با سرعت دیواره، سرعت نقطه‌ای برای هر گره محاسبه گردید. در ادامه برای هر گره محاسباتی، روابط تجربی انتقال رسوب به کار گرفته شد. در انتها تمامی وزن رسوبات محاسبه شده با یکدیگر جمع شده و وزن کل رسوب حمل شده در آبراهه محاسبه گردید. همچنین از توزیع دوبعدی سرعت به دست آمده، دبی جریان و نیز سرعت متوسط مقطع محاسبه شد و با جایگذاری آن در روابط تجربی انتقال رسوب، میزان رسوب

ضریب لزجت گردابه‌ای است. ضریب لزجت گردابه‌ای برخلاف ضریب لزجت سینماتیکی سیال، تابع مشخصات هیدرولیکی و هندسی کانال یا رودخانه بوده و با تغییر شرایط جریان و شدت تلاطم، مقدار این ضریب نیز تغییر می‌کند. رابطه مستقیمی بین تنش برشی با این ضریب وجود دارد و به صورت رابطه ۴ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\varepsilon = \kappa u_* y \left(1 - \frac{y}{H} \right) \quad (4)$$

که در آن y موقعیت نقطه موردنظر از بستر، H عمق کل جریان، u_* سرعت برشی و κ ضریب ثابت فان کارمن (۰/۴۰۸) است. مطابق رابطه فوق در جداره کانال‌ها و نیز در سطح آزاد آب، مقدار ضریب لزجت گردابه‌ای صفر است. مقدار حداکثر این ضریب در مرکز کانال یا رودخانه است. همچنین این ضریب در مجرای اصلی رودخانه بسیار بزرگ‌تر از مقدار آن در دشت‌های سیلابی است.

سرعت دیواره‌ها

با گسسته‌سازی معادله ریاضی پیشنهادی به کمک روش تفاضلات محدود و به‌کارگیری مشتق مرکزی به سبب مجاورت گره حل موردنظر با چهار گره اطراف خود (در میدان حل دوبعدی) زمینه حل معادله فراهم می‌شود. با توجه به شکل ۲، سرعت در مرزهای کف و جداره‌ها صفر می‌باشد که با اعمال این شرایط مرزی در محاسبه گره‌های مجاور مرزها، خطای سرعت محاسباتی در این ناحیه زیاد خواهد بود. برای کاهش این خطا، در مجاورت بستر کانال و در چند گام اول از محاسبات (در حدود ۱ سانتی‌متر)، معادله توزیع قائم سرعت انیشتین (سرعت دیواره) استفاده می‌شود (Kean et al., 2009). بنابراین سرعت‌های نقطه‌ای در منطقه جریان آشفته کانال از رابطه ۳ و در مجاورت کف کانال، از سرعت‌های دیواره بر حسب صاف یا زبر بودن کف محاسبه می‌شوند. سرعت‌های جریان در نزدیکی بسترهای زبر و صاف به‌ترتیب از روابط ۵ و ۶ به‌دست می‌آیند (Julien., 2010).

$$u = 5.75 u_* \log \left(\frac{30.2z}{\Delta} \right) \quad (5)$$

$$u = 5.75 u_* \log \left(\frac{9u_* z}{g} \right) \quad (6)$$

که Δ ضریبی است که به ضخامت زیر لایه ورقه‌ای، زبری بستر و یا دانه‌بندی مصالح آبراهه وابسته است. مقدار این ضریب در رودخانه‌های طبیعی و نیز کانال‌های با بستر زبر به کمک واسنجی به‌دست می‌آید. θ نیز لزجت سینماتیکی سیال است.

نوع بستر در کانال اصلی و دشت سیلابی برای آزمایش‌های صورت گرفته با توجه به عدد رینولدز برشی و ضخامت زیرلایه ورقه‌ای تعیین می‌شود. برای محاسبه این دو پارامتر معادلات ۷ و ۸

که در آن u سرعت متوسط در جهت جریان، v سرعت متوسط در جهت عرضی، w سرعت متوسط در جهت قائم، t زمان، x جهت طولی، y جهت عرضی، z جهت قائم، p فشار، ρ جرم حجمی سیال، S_0 شیب طولی آبراهه، ε لزجت گردابه‌ای یا دیفیوژن تلاطمی جریان و g شتاب ثقل می‌باشند که تمامی پارامترها به صورت متریک است. در این معادله، لزجت گردابه‌ای به منظور دخالت اثر تبادل مومنتوم ناشی از نوسانات سرعت (مازاد بر سرعت متوسط جریان) به علت تلاطم جریان بکار رفته است (Kean and Smith., 2004).

با توجه به پیچیدگی حل عددی معادله فوق و نیز با توجه به این‌که در رودخانه‌ها و حتی کانال‌ها، سرعت‌های عرضی و عمقی (v و w) نسبت به سرعت در جهت جریان (u) ناچیز می‌باشند و همچنین با ماندگار و یکنواخت فرض کردن شرایط جریان، آن‌گاه معادله ۲ به-دست خواهد آمد:

$$gS_0 + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2)$$

معادله ۲ یک معادله دیفرانسیل جزئی بیضی‌گون از نوع پواسون است که سرعت طولی جریان را در دو جهت عرضی و قائم بیان می‌کند. ضریب ε در این معادله، ضریب پخش یا دیفیوژن تلاطمی است. برای حل این معادله، فقط به اعمال شرایط مرزی نیاز است (اعمال سرعت صفر در جداره‌ها و گرادیان سرعت صفر یا تنش برشی صفر در سطح آزاد آب). گسسته‌سازی معادله دیفرانسیل فوق به کمک روش تفاضلات محدود انجام شد. به دلیل مشکلات ناشی از بیان اثرات جریان متلاطم توسط مفهوم لزجت گردابه‌ای، فقط حل تقریبی این معادله امکان‌پذیر است (Kean et al., 2009). در این معادله فرض شده است که لزجت گردابه‌ای در دو جهت عرضی و قائم ثابت است:

$$u_{i,j} = \frac{gS_0 \Delta y^2 \Delta z^2}{2\varepsilon (\Delta z^2 + \Delta y^2)} + \frac{\varepsilon (\Delta z^2 (u_{i-1,j} + u_{i+1,j}) + \Delta y^2 (u_{i,j-1} + u_{i,j+1}))}{2\varepsilon (\Delta z^2 + \Delta y^2)} \quad (3)$$

در روابط فوق Δy و Δz به‌ترتیب گام محاسبات مکانی در راستای عرضی و قائم هستند که مقدار این دو پارامتر می‌تواند یکسان یا متفاوت باشد. با تعیین مقادیر مشخصی برای گام‌های محاسبات در جهت عمقی و عرضی، شبکه‌بندی (گره‌بندی) میدان حل انجام می‌شود. با اعمال پارامترهای ورودی شامل هندسه مجرا، عمق آب، شیب طولی و زبری، مقادیر مجهول سرعت در گره‌های محاسباتی به‌دست خواهد آمد. محاسبات موردنیاز برای این حل عددی در نرم‌افزار اکسل و در محیط VBA کدنویسی شده است.

ضریب لزجت گردابه‌ای

مسئله مهم در حل عددی معادله ۲، تعیین مقادیر مناسب برای

ارایه شده است:

$$C_{st} = \frac{G_s d_{50}}{h} \left(\frac{V}{u_*} \right)^n G_{gr} \quad (13)$$

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (14)$$

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{[g(G_s - 1)d_{50}]^{0.5}} \times \left[\frac{V}{\sqrt{32 \log \left(\frac{10h}{d_{50}} \right)}} \right]^{1-n} \quad (15)$$

$$d_{gr} = d_{50} \left[\frac{g(G_s - 1)}{g^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

که در این روابط A, n, C, m ضرایبی هستند که به عدد بی بعد قطر ذره رسوب d_{gr} وابسته بوده و مقدار به دست آمده برای این عدد در تحقیق حاضر ۲/۷۲ و برای ضرایب ذکر شده در مقطع مورد نظر به- ترتیب برابر ۰/۲۸، ۰/۷۵، ۰/۰۳۳ و ۴/۸۹ می‌باشند. بار کل رسوب به صورت رابطه ۱۷ قابل محاسبه است.

$$Q_{st} = 10^6 Q C_t \quad (17)$$

معادله تعادل قدرت جریان

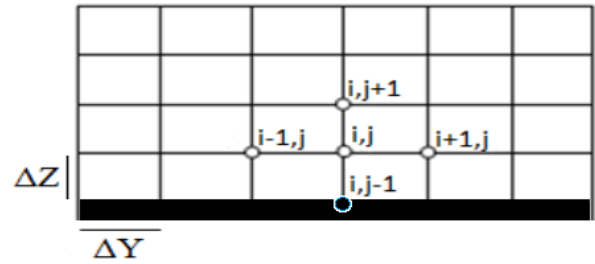
قوانین استخراج شده تجربی در زمینه رسوب سبب شد دانشمندی مانند بگنولد (۱۹۶۶) رویکرد نظری بیش‌تری را در این راستا اتخاذ کنند که پایه این نظریه بر قدرت جریان استوار است. ورنیک (۱۹۹۵) معادله تعادل قدرت را پیشنهاد نمود (رابطه ۱۸) (Fraselle et al., 2010):

$$(\rho_s - \rho_l) g \omega_s C_{st} R = \rho_l \eta_{st} C_* u_*^2 (u_*^2 - u_{*c}^2) \quad (18)$$

که در آن ρ_1 و ρ_s به ترتیب چگالی رسوب و آب، g شتاب ثقل، ω_s سرعت سقوط ذرات رسوبی، C_{st} غلظت ذرات معلق، R شعاع هیدرولیکی مقطع جریان، C_* ضریب غیرمستقیم شزی $\eta_{st} (C/g^{1/2})$ راندمان تعلیق ذرات رسوب، u_{*c} سرعت برشی آستانه حرکت ذرات بستر می‌باشد.

روش حل

در بحث سرعت، برای شروع محاسبات، ابتدا سرعت دیواره طبق روابط ۵ یا ۶ در بستر کانال تعریف می‌شود. با توجه به وجود زبری-های مختلف بستر در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی و نیز اندرکنش و انتقال مومنتوم جریان بین این دو مجرا، مقطع عرضی کانال موردنظر به سه بخش مختلف تقسیم‌بندی شده و سرعت‌های برشی با توجه به شعاع هیدرولیکی (عمق جریان) در هر بخش از



شکل ۲- میدان حل معادله سرعت در نزدیکی بستر کانال

$$\delta = \frac{11.6g}{\sqrt{gRS}} = \frac{11.6g}{u_*} \quad (7)$$

$$Re^* = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (8)$$

در معادلات فوق δ ضخامت زیرلایه ورقه‌ای و Re^* عدد رینولدز برشی می‌باشد. حالت بستر صاف در شرایط $Re^* < 4$ و $k_s < \frac{1}{3} \delta$ اتفاق می‌افتد. در حالت بستر زیر نیز $Re^* > 70$ و $k_s > 6\delta$ می‌باشد.

معادلات انتقال رسوب

تاکنون معادلات تجربی انتقال رسوب زیادی ارایه شده‌اند. با توجه به کارایی مناسب معادلات انگلند - هانسن (۱۹۶۷) و ایگرز و وایت (۱۹۷۳) نسبت به سایر معادلات، این دو معادله در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند (امامی، ۱۳۸۹). معادله انگلوند-هانسن (۱۹۶۷) برای تعیین بار کل رسوب به صورت رابطه ۹ و ۱۰ ارایه می‌شود.

$$\frac{q_{st}}{[g(G_s - 1)d_{50}]^{0.5}} = \frac{0.13\gamma V^2}{S_0 \times h} \times T_*^{2.5} \quad (9)$$

$$T_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} \quad (10)$$

که d_{50} قطر میانه ذرات رسوبی، γ ، γ_s به ترتیب وزن مخصوص آب و رسوب، h عمق آب، q_{st} دبی رسوب در واحد عرض آبراهه و T_* عدد شیلدز می‌باشد. بار کل رسوب از رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$Q_{st} = 100bq_{st} \quad (11)$$

که b عرض مجرا (متر) و Q_{st} بار کل (گرم بر ثانیه) می‌باشد (رابطه ۱۲).

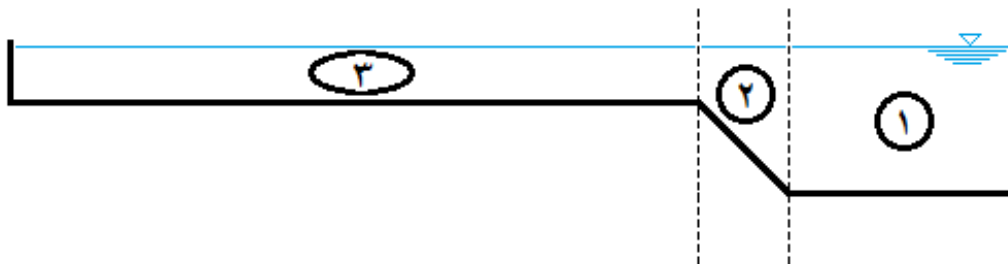
$$C_{st} = \frac{Q_{st}}{G_w} \quad (12)$$

در این رابطه C_{st} غلظت وزنی بار کل و G_w دبی وزنی آب است. روش ایگرز - وایت برای تعیین بار کل به صورت رابطه ۱۳ تا ۱۶

میانگین کل مقطع، سرعت‌های نقطه‌ای برآورد شده از حل معادله دوبعدی سرعت (رابطه ۳) و همچنین به جای تنش برشی کل بستر، تنش برشی نقطه‌ای برای هر گره با توجه به وزن ستون آب در بالای تراز آن طبق رابطه ($\tau = \gamma DS$) محاسبه و در معادلات انگلند - هانسن و آیکرز - وایت قرار داده شد. به عبارتی برای محدوده هر گره یک معادله نوشته خواهد شد و مقدار غلظت وزنی رسوب در هر گره محاسبه خواهد شد. سپس با داشتن سرعت در هر نقطه برای هر گره فرمول دبی جریان ($Q=au$) نوشته می‌شود که مساحت هر گره از ضرب گام عمودی در گام افقی محیط حل به دست می‌آید (گام افقی \times گام عمودی $a =$). از ضرب دبی جریان هر گره در میزان غلظت وزنی رسوب به دست آمده برای آن گره، مقدار رسوب انتقال یافته در گره مورد بررسی به دست خواهد آمد. در انتها از مجموع وزن رسوب در تمامی گره‌های محاسباتی، وزن کل رسوب انتقالی از آبراهه حاصل می‌شود.

رابطه $u_* = \sqrt{gRS_0}$ محاسبه می‌گردد. نحوه تقسیم‌بندی کانال مرکب در شکل ۳ نشان داده شده است. در اینجا به دلیل تقارن، فقط یک نیمه از کانال در نظر گرفته شده است. در ناحیه ۱ (مجرای اصلی) عمق جریان ثابت بوده و با توجه به زیر بودن کف کانال در این ناحیه، سرعت دیواره از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. در ناحیه ۲ (شیب جانبی مقطع اصلی) بستر صاف و سرعت دیواره از رابطه ۵ به دست می‌آید. در ناحیه ۳ (دشت سیلابی) عمق جریان ثابت است اما با توجه به پوشش چمن مصنوعی کف، سرعت دیواره از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. در این رابطه مقدار ضریب Δ به کمک واسنجی مدل ریاضی حدود $0/006$ متر به دست آمده است.

در بحث رسوب، معادلات انتقال رسوب بیان شده توسط محققین فوق بر پایه سرعت متوسط مقطع و همچنین تنش برشی کل بستر استوار است. این در حالی است که توزیع عرضی سرعت و تنش برشی دارای اهمیت بیش‌تری است. براین اساس به جای استفاده از سرعت



شکل ۳ - تقسیم‌بندی عرض مقطع مرکب بر اساس مشخصات هندسی و هیدرولیکی کانال مورد مطالعه

کف کانال (h_s) برابر $0/025$ متر می‌باشد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از سرعت‌سنج صوتی (ADV) استفاده شد. مشخصات این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است (Fraselle et al., 2010).

نتایج و بحث

آزمون استقلال شبکه محاسباتی

در مدل‌سازی ریاضی برای روش‌های حل عددی آزمونی به نام استقلال شبکه تعریف شده است. معیار انتخاب شبکه بهینه بدین گونه است که با تغییر ابعاد شبکه از گام‌های بزرگ‌تر به کوچک‌تر، نتایج دبی جریان (دبی کل، دبی مقطع اصلی و دشت سیلابی) و یا توزیع عرضی سرعت‌های محاسبه شده از هر مرحله، با یکدیگر مقایسه شده و تغییرات در اندازه شبکه تا مرحله‌ای ادامه می‌یابد که در نتایج تغییرات محسوسی ایجاد نشود.

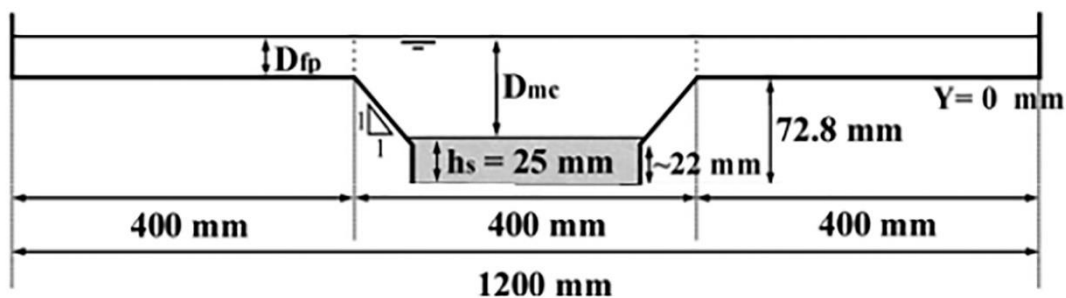
داده‌های مورد استفاده

برای ارزیابی دقت مدل مورد استفاده در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی فراسل و همکاران استفاده شد. این آزمایش‌ها در یک کانال مرکب به طول ۱۰ متر، عرض $1/2$ متر (شامل یک مقطع اصلی دوزنقه‌ای به عرض فوقانی $0/4$ متر و دو دشت سیلابی مستطیلی به عرض $0/4$ متر)، عمق مقطع اصلی $0/0508$ متر و شیب جانبی مقطع اصلی $1:1$ و شیب طولی کانال $0/0019$ انجام شده است. نمای عرضی کانال آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. در ۱۰ آزمایش صورت گرفته از دو نوع زبری کف برای دشت سیلاب استفاده شده است، در حالت بستر صاف از ورقه‌های فولادی صیقلی و در حالت بستر زبر از ورقه‌های مشبک فولادی به ضخامت $0/7$ میلی‌متر و به ابعاد حفره‌های ۸ میلی‌متر مربع در هر $2/5$ متر از مسیر جریان به عنوان زبری دشت سیلابی و کاهنده سرعت و همچنین تله رسوبی استفاده شد. در این آزمایش‌ها بستر مقطع اصلیا رسوباتی به قطر متوسط (D_{50}) معادل $0/091$ میلی‌متر پوشانده شد. ارتفاع رسوبات در

جدول ۱- شرایط آزمایشگاهی کانال مورد استفاده

| مقطع | ضریب مانینگ | | دبی کل (لیتر بر ثانیه) | عمق آب در کانال اصلی (میلی متر) | دبی کانال اصلی (لیتر بر ثانیه) | غلظت رسوب در کانال اصلی (گرم بر ثانیه) | |
|------------------|-------------|----------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|----------------|
| | n_{mc} | n_{fp} | | | | | |
| آزمایش ۱ (Exp.1) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۲ | ۷/۶ | ۶۱ | ۵/۷۳ | ۰/۳ | دشت سیلابی صاف |
| آزمایش ۲ (Exp.2) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۲ | ۹/۱ | ۶۲ | ۶/۰۷ | ۰/۴ | |
| آزمایش ۳ (Exp.3) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۲ | ۱۰ | ۶۴/۶ | ۵/۸۲ | ۰/۴۶ | |
| آزمایش ۴ (Exp.4) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۲ | ۱۵ | ۷۰/۵ | ۷/۶۶۵ | ۰/۷۵ | |
| آزمایش ۵ (Exp.5) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۲ | ۲۰ | ۷۷/۲ | ۱۰/۰۶ | ۱ | |
| آزمایش ۱ (Exp.1) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۶ | ۷/۴ | ۶۲/۵ | ۵/۶۲ | ۰/۳۷ | دشت سیلابی زبر |
| آزمایش ۲ (Exp.2) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۶ | ۹/۰۹ | ۶۵/۳ | ۶/۴۳ | ۰/۴۴ | |
| آزمایش ۳ (Exp.3) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۶ | ۱۱ | ۷۰/۴ | ۶/۸۲ | ۰/۴۵ | |
| آزمایش ۴ (Exp.4) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۶ | ۱۴ | ۷۴/۶ | ۸/۵۴ | ۰/۳۸ | |
| آزمایش ۵ (Exp.5) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۶ | ۲۰ | ۸۲/۲ | ۱۰/۰۶ | ۰/۹۵ | |

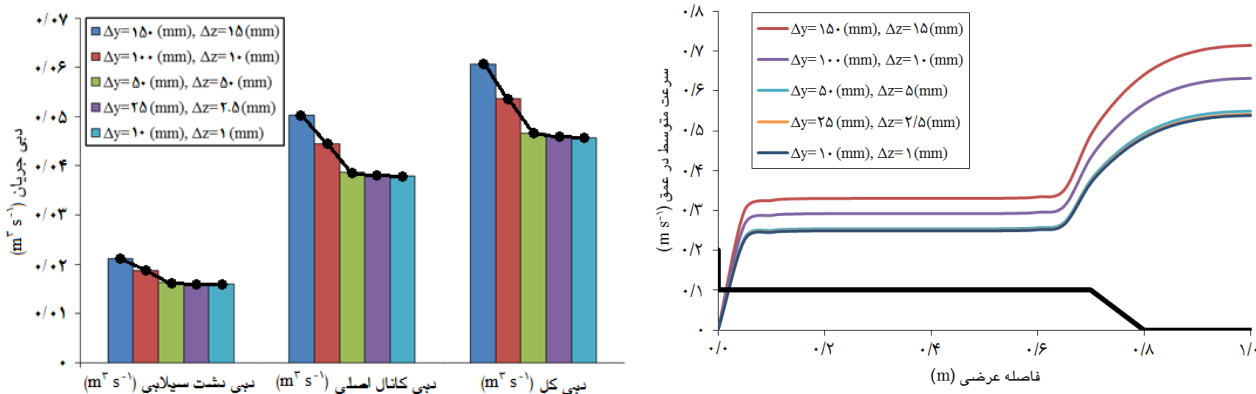
* مخفف واژه لاتین دشت سیلابی و mc مخفف کانال اصلی می باشد



شکل ۴- نمای عرضی کانال آزمایشگاهی با مقطع مرکب

معناداری در مقادیر دبی‌های جریان و سرعت‌های متوسط عرضی ایجاد نشد که بیانگر همگرایی نتایج و برقراری استقلال شبکه است. بدیهی است که این شبکه با حجم محاسبات کمتر و مدت زمان اجرای بسیار کم‌تر نسبت به شبکه‌های ۴ و ۵، دارای نتایجی تقریباً معادل با نتایج این دو شبکه خواهد بود.

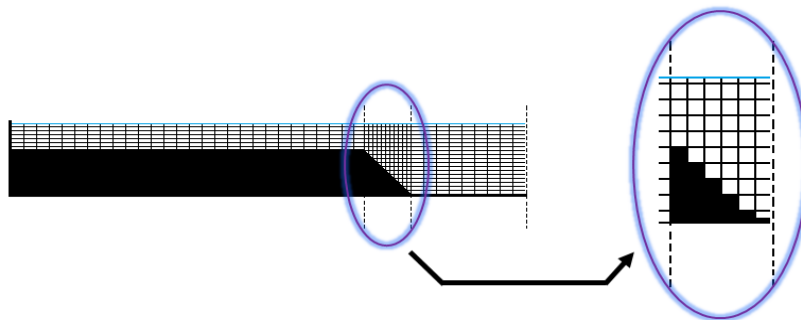
برای نمونه، مراحل محاسباتی تغییر در ابعاد شبکه حل برای آزمایش شماره ۴ با بستر زبر در شکل ۵ نشان داده شده است. در این پژوهش محاسبات در پنج مرحله و با اندازه‌های متفاوت برای گام‌های مکانی عرضی و قائم انجام و نتایج هر شبکه با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۵). مشاهده شد که از شبکه ۳ با گام‌های مکانی (۵۰ میلی‌متر در جهت عرضی (Δy) و ۵ میلی‌متر در جهت قائم (Δz)) به بعد تغییر



شکل ۵- نمایش مقایسه گام‌های محاسباتی در جهت عرضی و قائم برای آزمایش ۴

به گرادیان شدید سرعت جریان بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی و نیز تبادل مومنتوم بین این دو بخش و نیز برای حل دقیق‌تر جریان (کاهش خطای محاسبات) ابعاد گام‌های بهینه در جهت عرض (Δy) کاهش پیدا کرد و مقدار آن برای این بخش ۲ میلی‌متر تعیین شد.

هم‌چنین ناحیه دوم کانال مرکب موردنظر به صورت مورب می‌باشد و مجرای اصلی دارای شیب جانبی است. بنابراین و به دلیل آن که شبکه‌بندی میدان حل به صورت متعامد می‌باشد، این بخش از کانال به صورت پلکانی تعریف شده است (شکل ۶). هم‌چنین با توجه



شکل ۶ - نمایش شبکه‌بندی میدان حل در مقطع عرضی کانال به تفکیک ناحیه‌ها

به دست آمده و افزایش میزان لزجت گردابه‌ای در آزمایش‌های بستر زبر نسبت به بستر صاف مشهود است. با توجه به پیچیدگی‌های هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب، مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق تا حدود زیادی کارآمد بوده و توزیع سرعت را به خوبی برآورد نموده است.

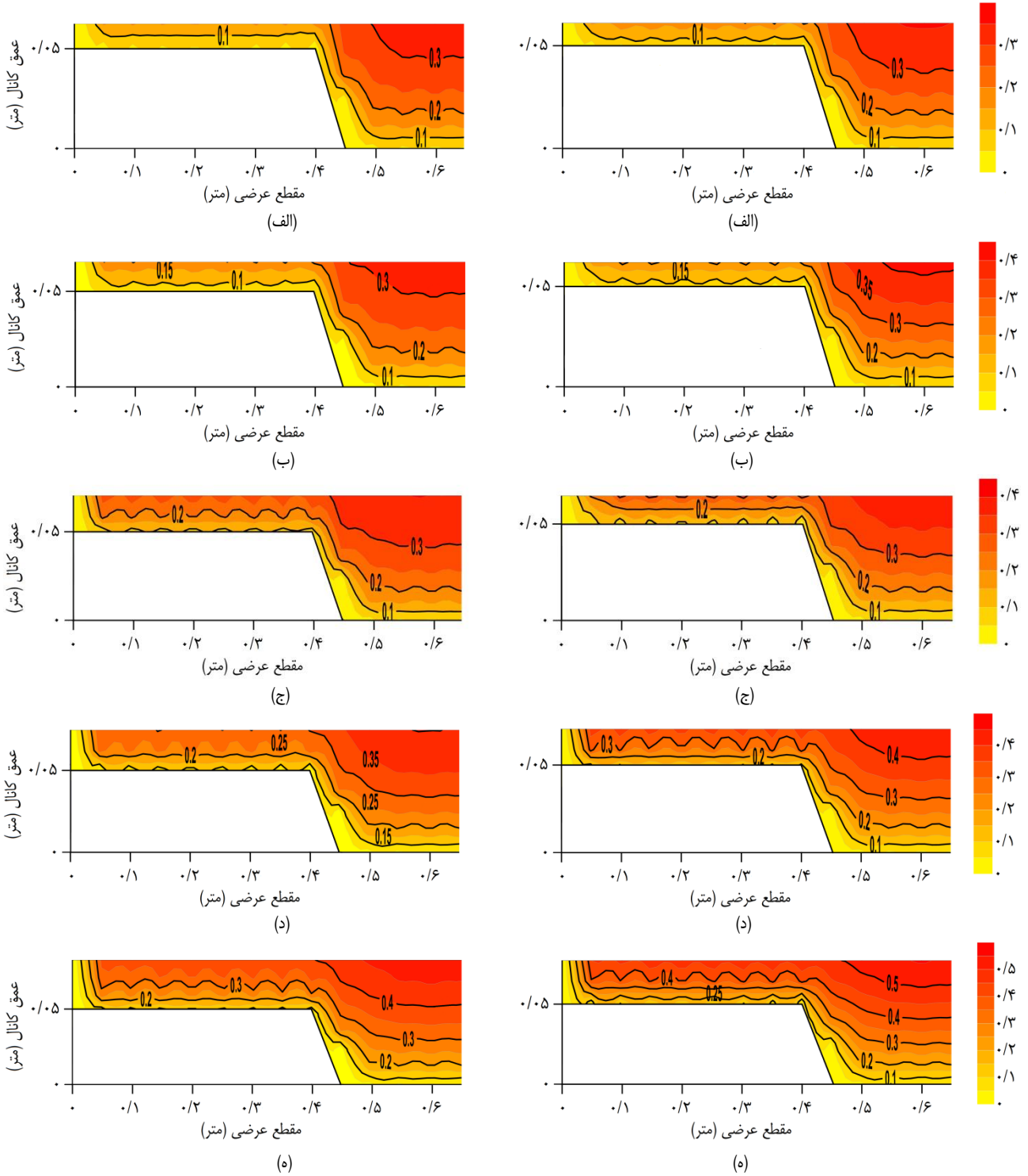
معمولاً علاوه بر توزیع دوبعدی سرعت در کانال‌ها، توزیع عرضی سرعت در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز دارای اهمیت است. در شکل ۹ نتایج محاسباتی پروفیل عرضی سرعت جریان در ۲ آزمایش شده است (آزمایش ۴ و ۵ با بستر زبر). تقریباً در هر ۲ حالت مورد بررسی، دقت نتایج محاسباتی خوب است. در آزمایش ۴ به دلیل عمق کم جریان در دشت سیلاب و در نتیجه تشدید انتقال مومنتوم بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، ناحیه حفاصل این دو بخش دارای پیچیدگی زیادی بوده و خطای مدل ریاضی تا حدودی افزایش یافته است. این در حالی است که با افزایش عمق جریان و کاهش انتقال مومنتوم در ناحیه حفاصل (آزمایش ۵)، دقت مدل ریاضی به نحو موثری بهبود یافته است. به طور کلی دقت مدل ریاضی در برآورد سرعت جریان هم در مقطع اصلی و هم در دشت‌های سیلابی در هر دو حالت بستر صاف و زبر قابل قبول می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی دوبعدی سرعت جریان

برای محاسبه توزیع دوبعدی سرعت جریان ابتدا باید میدان حل که شامل مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی است شبکه‌بندی شود. در این مقاله از گام‌های مکانی ۵۰ میلی‌متر در جهت عرضی و ۵ میلی‌متر در جهت قائم استفاده شد. سپس به کمک حل عددی معادله دیفرانسیل ۲ و با توجه به مقادیر لزجت گردابه‌ای در هر گره محاسباتی و نیز سرعت‌های دیواره، توزیع دوبعدی سرعت جریان محاسبه شد. نتایج توزیع دوبعدی سرعت محاسباتی به صورت منحنی‌های هم‌سرعت در هر ۱۰ آزمایش مورد بررسی برای بستر صاف و زبر به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در همه آزمایش‌ها، تاثیر وجود دشت سیلاب در کاهش سرعت جریان در مقطع اصلی دیده می‌شود. به دلیل اثر متقابل جریان بین مقطع اصلی و دشت سیلاب، منحنی‌های هم‌سرعت در ناحیه اتصال این دو بخش از مقطع مرکب با تغییرات شدیدی مواجه شده‌اند. این تغییرات در شرایط عمق کم جریان در دشت سیلاب و نیز در حالت بستر زبر بسیار شدیدتر است. در این شرایط با توجه به کاهش سرعت جریان در دشت سیلاب و در نتیجه افزایش گرادیان سرعت بین مجرای اصلی و دشت سیلابی، انتقال مومنتوم نیز افزایش یافته و آشفتگی جریان در مرز تماس تشدید می‌شود. این موضوع با توجه به نتایج

جدول ۲ - نتایج آماریمدل ریاضی پیشنهادی توزیع عرضی سرعت برای آزمایش‌های ۴ و ۵ با بستر زبر

| پارامترهای آماری | | آزمایش |
|------------------|-------|---------------------------|
| %MAPE | RMSE | |
| ۱/۸ | ۰/۰۲۲ | آزمایش ۴ - دشت سیلابی زبر |
| ۱/۱ | ۰/۰۱۳ | آزمایش ۵ - دشت سیلابی زبر |

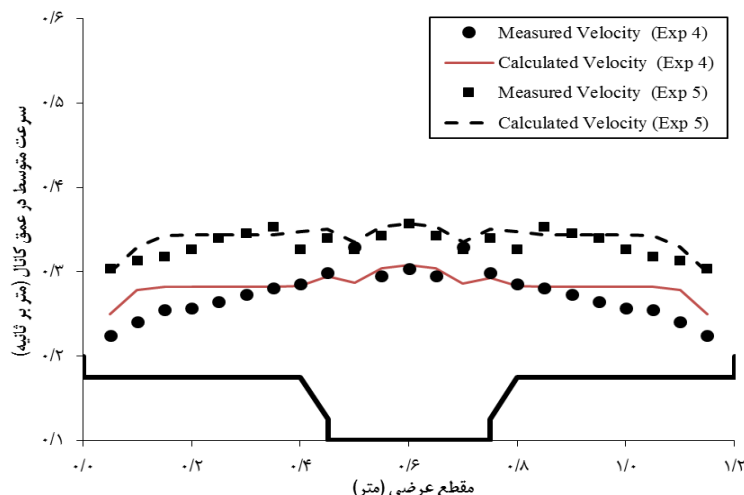


شکل ۸- نتایج توزیع دوبعدی سرعت در آزمایش با بستر زبر:

الف) آزمایش ۱، ب) آزمایش ۲، ج) آزمایش ۳، د) آزمایش ۴،
ه) آزمایش ۵

شکل ۷- نتایج توزیع دوبعدی سرعت در آزمایش با بستر صاف:

الف) آزمایش ۱، ب) آزمایش ۲، ج) آزمایش ۳، د) آزمایش ۴،
ه) آزمایش ۵



شکل ۹- نتایج میانگین سرعت مقطع عرضی جریان برای آزمایش‌های ۴ و ۵ با بستر زبر

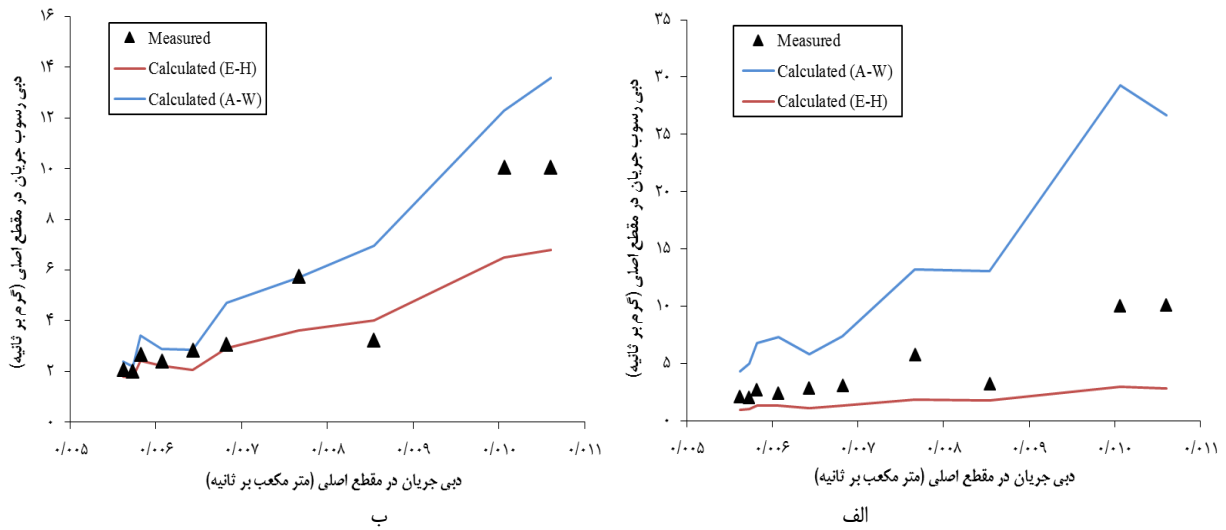
و همچنین تنش برشی بستر افزایش می‌یابد و ضرب این دو عامل در یکدیگر که به قدرت جریان معروف است نیز زیاد می‌شود. این تاثیر سبب افزایش قدرت حمل رسوبات به وسیله جریان شده و میزان غلظت رسوب جریان زیاد می‌گردد. در نمودارهای شکل ۱۱ اثر هم-زمان افزایش دبی و به تبع آن قدرت جریان بر میزان رسوبات حمل شده نشان داده شده است.

در شکل ۱۲ مقادیر رسوب حمل شده از روابط انگلند-هانسن و آیکرز- وایت در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در دو حالت استفاده از سرعت متوسط جریان و سرعت‌های نقطه‌ای، برای بررسی بهتر هر دو در یک نمودار به نمایش درآمده است. مطابق این شکل، اعمال روش پیشنهادی باعث افزایش دقت نتایج شده است به طوری که نتایج این روش دارای پراکندگی کم‌تری پیرامون خط نیم‌ساز ۴۵ درجه نسبت به روش معمول در محاسبات رسوب شده است. با توجه به داده‌ها، ضریب تبیین برای روش محاسبات نقطه‌ای حدود ۰/۷ و برای روش محاسبات معمول (اعمال سرعت متوسط جریان) حدود ۰/۳۲ می‌باشد. پارامترهای آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای متوسط نسبی (AE) و حداکثر خطای نسبی (ME) برای کل داده‌ها در هر دو روش این پژوهش محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است. با بررسی داده‌های آماری مشخص است که با اعمال روش پیشنهادی، خطای معادلات رسوب به کار رفته در این تحقیق به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

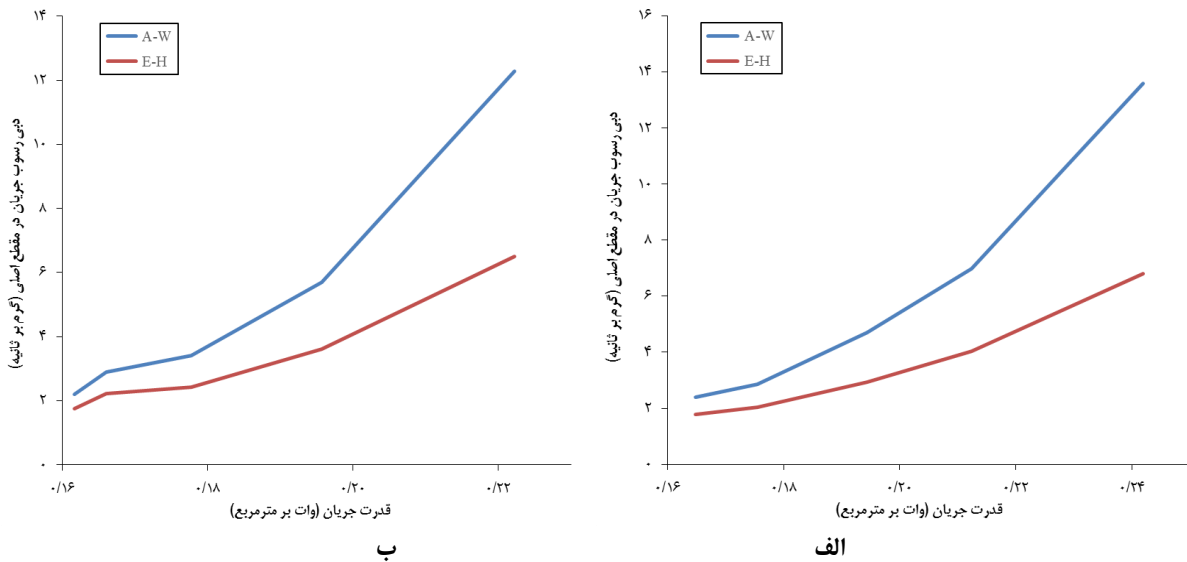
نتایج معادلات انتقال رسوب

برای تمامی ده آزمایش صورت گرفته با دشت سیلابی صاف و زبر، در شکل ۱۰ منحنی‌های دبی جریان-دبی رسوب مقطع اصلی برای دو رابطه تجربی انگلند-هانسن و آیکرز-وایت و بر اساس دو روش سرعت متوسط مقطع و سرعت‌های نقطه‌ای، بدست آمده و با منحنی‌های داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شد. با توجه به این که سرعت جریان در مجرای اصلی عامل تعیین‌کننده انتقال رسوبات معلق و بستر در شرایط سیلاب است، در این شکل، دبی جریان مقطع اصلی مدنظر قرار گرفت. همان‌طور که از شکل ۱۰-الف مشخص است در دبی‌های کم جریان، هر دو معادلات انتقال رسوب نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند اما با افزایش دبی جریان و ورود آب به دشت‌های سیلابی، دبی‌های رسوب به‌دست آمده از این روابط از مقادیر مشاهداتی فاصله می‌گیرند. در حالت استفاده از سرعت‌های نقطه‌ای (شکل ۱۰-ب)، نتایج نشان می‌دهد که دقت دبی‌های رسوب به‌دست آمده برای هر دو معادله انتقال رسوب افزایش یافته است.

در نمودارهای ۱۱ توزیع رسوب به صورت تابعی از قدرت جریان به‌دست آمده از رابطه ۱۸ در مقطع اصلی آبراهه نمایش داده شده است. در این شکل‌ها با افزایش دبی جریان در تمامی آزمایشات صورت گرفته میزان قدرت جریان افزایش یافته است. قدرت جریان یا توان رود در حقیقت میزان انرژی مصرف شده در واحد سطح بستر رودخانه می‌باشد. با افزایش دبی در آبراهه اصلی مقدار سرعت جریان



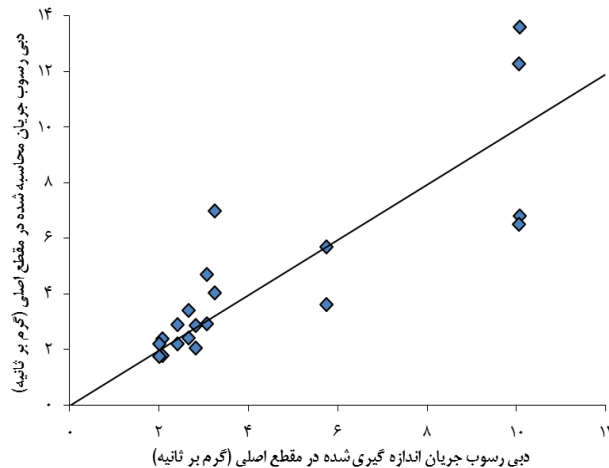
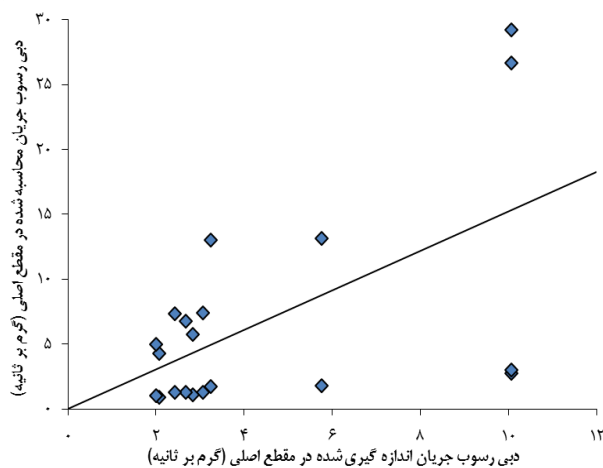
شکل ۱۰- مقایسه میزان دبی رسوب محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مقطع اصلی کانال بر اساس دبی جریان در مجرای اصلی: (الف) محاسبات بر مبنای سرعت متوسط جریان (ب) محاسبات بر مبنای سرعت‌های نقطه‌ای جریان



شکل ۱۱ - نمایش دبی رسوب جریان به صورت تابعی از دبی و قدرت جریان در مجرای اصلی. (الف) آزمایش با بستر صاف معادله (A-W)، (ب) آزمایش با بستر زبر معادله (A-W) (ج) آزمایش با بستر صاف معادله (E-H) (د) آزمایش با بستر زبر معادله (E-H).

جدول ۳- مقایسه نتایج آماری روش پیشنهادی با روش سرعت میانگین مقطع

| پارامترهای آماری | | | روش محاسبه دبی رسوب جریان | معادله مورد استفاده |
|------------------|-------|------|---------------------------|----------------------|
| %ME | %AE | RMSE | | |
| ۱۹/۵ | ۲۹/۸ | ۱/۸۶ | سرعت‌های نقطه‌ای | ایکرز-وایت (۱۹۷۳) |
| ۶۰/۸ | ۱۶۴/۵ | ۹/۳۶ | متوسط سرعت | |
| ۲۷/۳ | ۱۵/۶ | ۱/۷۱ | سرعت‌های نقطه‌ای | انگلد - هانسن (۱۹۶۷) |
| ۱۵۱/۱ | ۵۷/۹ | ۳/۶۳ | متوسط سرعت | |



شکل ۱۲- مقایسه غلظت‌های رسوب اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجرای اصلی:
الف) محاسبات بر مبنای سرعت متوسط مقطع ب) محاسبات بر مبنای سرعت‌های نقطه‌ای

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر مدلی پیشنهادی برای محاسبه سرعت جریان در آبراهه‌ها و مجاری روباز ارائه شد. با حل عددی آن به روش تفاضل محدود و استفاده از سرعت‌های دیواره، توزیع دوبعدی سرعت محاسبه شد و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده موید تطابق رضایت‌بخش مقادیر به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی است. سپس در گام دوم و از مقادیر سرعت به دست آمده و جایگذاری در روابط انتقال رسوب، میزان رسوب حمل شده توسط جریان محاسبه شد. نکته مهم و حایز اهمیت در این تحقیق که از نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود، قرارگیری سرعت نقطه‌ای محاسبه شده از مدل و جایگذاری تنش برشی هر سطح در روابط انتقال رسوب برای هر شبکه از جریان، در محیط حل آبراهه مورد بررسی به‌جای استفاده از روش سرعت و تنش کل می‌باشد. که با استفاده از این روش همان‌طور که در نتایج مشهود است خطای محاسبات کاهش یافته و موجب بهبود عملکرد آن گشته است. در ادامه نتیجه‌گیری این تحقیق می‌توان روش پیشنهادی را علاوه بر کانال‌ها در رودخانه‌ها نیز مورد ارزیابی و آزمایش قرار داد بدین منظور بهتر است ابتدا به کمک یک یا چند سری اندازه‌گیری میدان سرعت جریان (به کمک مولینه)، ضریب Δ را بر اساس مطابقت میدان سرعت محاسباتی از مدل ریاضی پیشنهادی و میدان سرعت مشاهداتی واسنجی نمود. سپس طبق روش ذکر شده در این پژوهش سرعت میدان حل را محاسبه نمود. همچنین با در نظر گرفتن این مهم که بار معلق تابعی مستقیم از سرعت جریان می‌باشد، در این تحقیق ابتدا مدلی برای محاسبه سرعت ارائه شد می‌توان این‌طور بیان داشت و نتیجه‌گیری نمود که روش پیشنهادی برای برآورد رسوبات معلق که بیش‌تر تابعی از سرعت جریان است

گزینه مناسب‌تری می‌باشد. هم‌چنین در رودخانه و به‌خصوص در رودخانه‌های آبرفتی عمده بار انتقال یافته سهم بار معلق جریان می‌باشد که این مورد اهمیت اندازه‌گیری این نوع بار رسوبی و کاربردی بودن این پژوهش را نمایان می‌سازد. باید به این نکته اشاره داشت که با توجه به تاثیر فرم بستر در زبری و متغیر بودن آن با توجه به شدت جریان در آبراهه‌ها می‌توان گفت استفاده از این روش می‌تواند در رودخانه‌ها با شدت جریان‌های متغیر و در نتیجه آن زبری‌های متفاوت خطاهایی را در اندازه‌گیری سرعت ایجاد نماید از طرفی، دانه‌بندی بستر رودخانه‌های شنی از تغییرات بیش‌تری نسبت به رودخانه‌های ماسه‌ای برخوردار است و احتمال این‌که فرآیند واسنجی ضریب Δ از پیچیدگی بیش‌تری برخوردار شود، وجود دارد. به هر حال این موضوع باید به صورت دقیق‌تر و با دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی بیش‌تری مورد بررسی قرار گیرد و مشخص گردد که در کدام یک از انواع رودخانه نتایج بهتری حاصل خواهد شد. در انتهای نتیجه‌گیری از این پژوهش می‌توان با ایجاد تغییراتی در روش محاسبه این مدل، جریان‌های متغیر تدریجی را با دقت مناسبی محاسبه نمود. در جریان متغیر تدریجی، شیب سطح آب با شیب کف کانال یا آبراهه متفاوت است بنابراین در شرایطی که جریان متغیر تدریجی می‌باشد می‌توان به جای شیب کف کانال که در مدل پیشنهادی (با فرض شرایط جریان به صورت یکنواخت) استفاده شده است از شیب سطح آب استفاده نمود. برای این کار می‌توان شیب سطح آب را در محل مورد بررسی به کمک اندازه‌گیری تراز سطح آب در بازه‌های بالادست و پایین‌دست محل محاسبه نمود. بدیهی است در صورتی که از شیب سطح آب به‌جای شیب کف استفاده شود، مقادیر سرعت‌های جریان به واقعیت نزدیک‌تر خواهند بود. از دیگر

Jaramilo, W.F and Jain, S.C. 1984. Aggradation and degradation of alluvial channel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110.8: 1072-1085.

Julien, Y.P. 2010. *Erosion and Sedimentation* (Second Edition). Cambridge University Press, New York.

Kean, J.K., Kuhnle, R.A., Smith, J.D., Alonso, C.V., and Langendoen, E.J. 2009. Test of a Method to Calculate Near-Bank Velocity and Boundary Shear Stress. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135.7: 588-601.

Kean, J.W and Smith, J.D. 2004. Flow and boundary shear stress in channels with woody bank vegetation. Pp. 237-252. In: Simon A, Bennett SJ, (eds). *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. AGU, Washington, D.C.

Lyn, D.A and Altinkar, M. 2002. St. Venant- Exner equations for near-critical and critical flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128.6: 579-587.

Meyer-Peter, E and Muller, R. 1948. Formulas for Bed Load Transport. Pp. 39-64. *Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*. 7 June. TU Delft, Netherlands.

Parsaie, A and Haghiabi, A.H. 2017. Mathematical expression of discharge capacity of compound open channels using MARS technique. *Journal of Earth System Science*. 126:20-35.

Parsaie, A., Najafian, S., Omid, M.H and Yonesi, H. 2017 a. Stage discharge prediction in heterogeneous compound open channel roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*. 23.1: 49-56.

Parsaie, A., Yonesi, H and Najafian, S. 2017 b. Prediction of flow discharge in compound open channels using adaptive neuro fuzzy inference system method. *Flow Measurement and Instrumentation*. 54 .1: 288-297.

Soni, J.P., Garde, R.J and Raju, K.G.R. 1980. Aggradation in streams due to over loading. *Journal of the Hydraulic Division*. 106.1: 117-132.

Valerio, C. 2003. Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels. *Journal of Hydraulic Research*. 41.2: 167-177.

نتایج این مقاله علاوه بر کاهش خطا در محاسبات رسوب جریان می‌توان به مشخص نمودن غلظت رسوبات در هر تراز سطح آب به کمک روش پیشنهادی اشاره داشت که دانستن این مهم در طراحی آبرگیرها، محل نصب لوله‌های ایستگاه پمپاژ و سازه‌ای انحراف آب برای برداشت از رودخانه‌ها و کاهش بار رسوبات وارده به سازه‌های آبرگیری می‌تواند کمک شایانی به طراحان بنماید.

منابع

امامی، س.ا.، ۱۳۸۹. انتقال رسوب (ترجمه). انتشارات جهاد دانشگاهی (واحد صنعتی امیرکبیر).

شفاعی بجستان، م.، ۱۳۹۲. هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

میرباقری، س.ا.، بوداقیپور، س.، هاشمی منفرد، س.ا.، ۱۳۸۶. استفاده از مدل شبیه‌ساز رسوب در تعیین عمر مفید مخزن سد اکباتان. ۲: ۸۹ - ۹۶.

Chaudhry, M.H. 1998. Comparison of coupled and semi coupled numerical models for alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124.28: 794-802.

Cheng, N.S. 2002. Exponential formula for bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128.10: 942-946.

Darby, S.E. 1998. Modelling width adjustment in straight alluvial channels. *Journal of Hydrological Processes*. 12.8: 1299-1321.

Einsten, H.A. 1950. The bed - load function for sediment transportation in open channel flows, *Technical Bulletin*, No 1026, USDA, Soil Conservation Service, Washington D.C.

Fraselle, Q., Bousmar, D and Zech, Y. 2010. Experimental investigation of sediment deposition on floodplains. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Braunschweig, Germany, River flow. 823-830.

Gill, M.A. 1983. Diffusion model for aggradation. *Journal of Hydraulic Research*. 21.5: 355-367.

A two-Dimensional Model for the Simulation of the Flow and Sediment Transport in Straight Compound Channels

M.R. Karimi¹, A.R. Zahiri^{2*}, M.Meftah Hologhi³, A.A.Dehghani⁴

Received: Mar.18, 2018

Accepted: Jun.11, 2018

Abstract

Understanding the conditions of sediment transport has been of great interest by hydraulic engineers. The highest changes in the morphology of the rivers have occurred in flood conditions and the rivers usually appear in the form of compound sections. Hence, the flow hydraulics and sediment transport are quite different compared to those of simple sections. The amount of sediment transport in rivers is a direct function of the flow velocity. Due to the intense variations of the flow velocity in compound sections, the variations of sediment transport in lateral and vertical directions are quite different in flood conditions. Due to this fact, it is better to use point velocities instead of mean velocities for the calculation of the sediment transport capacity of the rivers and then replace these point values in the empirical formulas of sediment transport (e.g. Engelund-Hansen, Ackers-White, etc.). In this research, the two-dimensional distribution of flow velocity is first calculated in the width and depth of a straight laboratory compound section by numerically solving a partial differential equation in the form of Poisson. The obtained 2D velocity distribution is then used for computation of the sediment transport capacity. By the summation of these particle capacities, the total sediment transport capacity is obtained for the canal. For Engelund-Hansen formula at the case of using the mean flow velocity and total bed shear stress, the mean error and the root-mean-square error were obtained to be 58% and 3.63 g/s, respectively. However, by replacing the point velocities and shear stresses, the errors reduced to 15% and 1.71g/s, respectively. For Ackers-White formula, these values of errors were obtained 164% and 9.36 g/s for the case of using the mean flow velocity, while for the case of point velocities, the errors were 30% and 1.86 g/s, respectively.

Keywords:Compound channel, Floodplain, Main channel, Sediment transport, Velocity distribution

1- M.Sc. Graduate of Water Structures ,Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

2- Associate Professor, Department of water Engineering., Faculty of Soil and water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

3- Associate Professor, Department of water Engineering., Faculty of Soil and water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

4- Associate Professor, Department of water Engineering., Faculty of Soil and water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

(*Corresponding AuthorEmail: zahiri.areza@gmail.com)