مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد نوزدهم، شماره چهارم، ۱۳۹۱
http://jwsc.gau.ac.ir

شبیه‌سازی یک و شبه‌دوبعدی جریان‌های سیلابی در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه گرگان‌رود ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا)

جواد قلی‌نژاد[۱]، *عبدالرضا ظهیری[۲] و امیراحمد دهقانی[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی عمران آب وعضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، ایران، [۲]استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۶/۱۲

چکیده

یکی از اقدامات اولیه در پروژه‌های مدیریت سیلاب، تحلیل هیدرولیک جریان در رودخانه‌های سیلابی به کمک مدل‌های ریاضی است. در این صورت، علاوه‌بر صرفه‌جویی در زمان و هزینه، حل توزیع سرعت جریان در عرض رودخانه و تنش برشی و نیز محاسبات انتقال رسوب با دقت مناسبی قابل انجام است. تاکنون مدل‌های ریاضی یک‌بعدی به‌صورت گسترده توسط مهندسان هیدرولیک در طرح‌های مهندسی رودخانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اخیراً نیز کاربرد مدل‌های ریاضی شبه‌دوبعدی توسعه‌یافته است. هر دو این مدل‌ها دارای محدودیت‌ها و برتری‌های خاصی است که باید در تحلیل نتایج به‌دست آمده مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله با واسنجی مدل‌های ریاضی یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی، کارایی آن‌ها در حل توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه گرگان‌رود (در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا) مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که متوسط خطای تخمین توزیع سرعت در عرض رودخانه به کمک مدل‌های یک و شبه‌دوبعدی به‌ترتیب حدود ۱۳/۲ و ۷/۵ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل ریاضی یک‌بعدی، مدل ریاضی شبه‌دوبعدی، توزیع عرضی سرعت، جریان ثانویه، دشت‌های سیلابی

*مسئول مکاتبه: zahiri_reza@yahoo.com

مقدمه

در هنگام وقوع سیل در بیش‌تر رودخانه‌های آبرفتی، آب از مجرای اصلی سرریز شده و وارد دشت‌های کناری می‌شود. در این حالت، مقطع رودخانه از شکل عادی و ساده (برای عبور دبی پایه رودخانه) خارج شده و شکل یک مقطع مرکب را به خود می‌گیرد. مقاطع مرکب با توجه به شکل خاص خود، کاربرد گسترده‌ای در طراحی شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، کانال‌های انتقال آب، مقاطع لای‌روبی رودخانه‌ها، کانال‌های سیلاب‌بر، سرریزهای تخلیه و مجاری فاضلاب‌رو دارند. بررسی‌های پژوهش‌گران مختلف در مقاطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی نشان می‌دهد که تخمین دبی جریان عبوری از این مقاطع به سادگی میسر نیست. در این حالت با ورود جریان از مقطع اصلی به دشت‌های سیلابی، گردابه‌هایی در مرز تماس این دو بخش ایجاد شده و جریان‌های چرخشی طولی و عرضی را به‌وجود می‌آورد. در اثر این پدیده، بخشی از مومنتوم (انرژی جنبشی) جریان از مقطع اصلی به دشت‌های سیلابی منتقل شده و باعث کاهش سرعت جریان در مقطع اصلی و افزایش سرعت در دشت سیلاب می‌شود. عامل مهم این پدیده، اختلاف عمق جریان و ضریب زبری در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی است (شیونو و نایت، ۱۹۸۸).

روش‌های زیادی برای تحلیل هیدرولیک جریان در کانال‌های باز وجود دارد. بسیاری از این روش‌ها مانند روابط دارسی- ویسباخ، شزی و مانینگ برای مقاطع ساده مناسب بوده اما برای مقاطع مرکب مستقیم و پیچانرود دارای محدودیت می‌باشند. بنابراین، مدل‌های ریاضی یک‌بعدی معمول در مهندسی هیدرولیک جریان و رسوب (HEC-RAS، MIKE11 و ISIS) که مبتنی بر روابط مانینگ یا شزی است، برای تحلیل جریان در رودخانه‌های با مقطع مرکب قابل اعتماد نیستند. در این مدل‌ها از روش تجزیه قائم مقطع مرکب[1] برای محاسبه دبی جریان سیل استفاده می‌شود که محدودیت اصلی این روش، در نظر نگرفتن تنش برشی ایجاد شده در مرز تماس مقطع اصلی و دشت سیلابی است. با صرف‌نظر کردن از این تنش، خطای زیادی در محاسبه دبی جریان به‌ویژه در رودخانه‌های طبیعی به‌وجود می‌آید (مارتین و میرز، ۱۹۹۱).

با توجه به خطای مدل‌های ریاضی مبتنی بر تقسیم مقطع مرکب در محاسبه دبی جریان در دشت‌های سیلابی، پژوهش‌گران مختلف مدل‌های ریاضی یک‌بعدی اصلاحی، دوبعدی و سه‌بعدی زیادی را ارایه نموده‌اند. از میان روش‌های یک‌بعدی اصلاحی، روش‌های کوهیرنس‌آکرز (۱۹۹۲) و تبادل دبی (بوسمار

1- Vertical Divided Channel Method (VDCM)

و زک، ۱۹۹۹) دارای اعتبار بیش‌تری هستند. این روش‌ها اگرچه دارای دقت خوبی در تخمین دبی سیلاب می‌باشند اما این محدودیت جدی را دارند که علاوه‌بر پیچیدگی محاسبه‌ها، قابلیت حل توزیع عرضی سرعت در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی را ندارند. از سوی دیگر، مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، اگرچه فیزیک جریان در مقاطع مرکب را به‌خوبی بیان می‌نمایند، اما از نظر کاربردی دارای محدودیت هستند. از جمله این محدودیت‌ها، نیاز به داده‌های متعدد برای واسنجی مدل ریاضی، زمان اجرای طولانی و پیچیدگی روش‌های حل است. به همین دلیل، اخیراً استفاده از مدل‌های ریاضی شبه‌دوبعدی در طرح‌های مدیریت سیل در دشت‌های سیلاب کاربرد گسترده‌ای یافته است. این مدل‌ها به‌عنوان یک پل ارتباطی بین مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی است، یعنی ضمن دارا بودن سادگی مدل‌های یک‌بعدی، پیچیدگی مدل‌های دوبعدی را نداشته و قابلیت حل توزیع سرعت و تنش برشی در عرض رودخانه را دارند.

اولین بار شیونو و نایت (۱۹۸۸) با ارایه یک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی براساس انتگرال‌گیری در عمق از معادلات ناویه- استوکس و حل تحلیلی آن، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی کف کانال در مقاطع مرکب را مدل‌سازی نمودند. در این مدل، از اثر جریان ثانویه صرف‌نظر شده بود. با این فرض، اگرچه توزیع عرضی سرعت به‌خوبی شبیه‌سازی شد اما توزیع عرضی تنش برشی مرزی با خطای زیادی همراه بود. وارک و همکاران (۱۹۹۰) مدل شبه‌دوبعدی ساده‌ای را برای حل توزیع عرضی دبی در مقاطع مرکب ارایه نمودند. شیونو و نایت (۱۹۹۱) با اصلاح مدل ریاضی خود، اثر جریان ثانویه را نیز در نظر گرفتند. این مدل تاکنون کاربردهای زیادی در حل مسایل هیدرولیک جریان و رسوب در کانال‌ها و رودخانه‌های سیلابی داشته است (نایت و همکاران، ۱۹۸۹؛ ظهیری و همکاران، ۲۰۰۹). لامبرت و سلین (۱۹۹٦) مدلی شبه‌دوبعدی براساس طول اختلاط پرانتدل برای حل توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب ارایه دادند. این مدل تنها به‌صورت محدود در چند مقطع مرکب آزمایشگاهی کاربرد داشته است. اروین و همکاران (۲۰۰۰) مدل ریاضی شبه‌دوبعدی تحلیلی مشابه مدل شیونو و نایت برای مقاطع مرکب مستقیم و پیچانرود ارایه نمودند. نتایج واسنجی و کاربرد این مدل ریاضی نشان داد که اثر جریان‌های ثانویه در مقاطع مرکب آزمایشگاهی با مسیر پیچانرود حدود ۱۰ برابر مقدار متناظر آن در مقاطع مرکب با مسیر مستقیم می‌باشد. عمران و همکاران (۲۰۰۷) هیدرولیک جریان و رسوب مقاطع ساده مستطیلی را با مدل ریاضی شیونو و نایت (۱۹۹۱) مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که مدل یاد شده قابلیت مدل‌سازی جریان و رسوب معلق را به‌صورت هم‌زمان

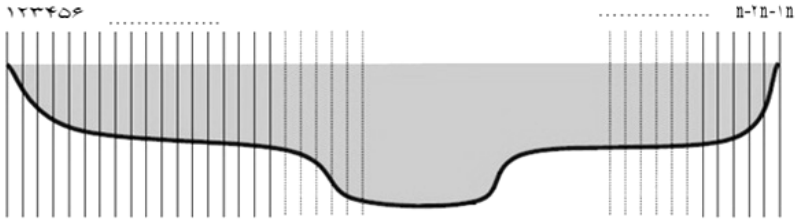
دارد. ظهیری و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از حل عددی تفاضل‌های محدود مدل ریاضی شیونو و نایت (۱۹۸۸)، توزیع عرضی سرعت در رودخانه کارون (ایستگاه هیدرومتری ملاثانی) را با در نظر گرفتن یک زبری برای کل عرض رودخانه شبیه‌سازی نمودند. تانگ و همکاران (۲۰۱۰) با حل تحلیلی مدل ریاضی شیونو و نایت (۱۹۹۱) که در آن اثر نیروی دراگ به‌منظور تأثیر پوشش گیاهی در دشت‌های سیلابی دخالت داده شده بود، توزیع عرضی سرعت را شبیه‌سازی نمودند. هو و همکاران (۲۰۱۰) با ارایه یک مدل شبه‌دوبعدی تحلیلی، توزیع عرضی سرعت جریان و غلظت رسوب معلق را در یک کانال آزمایشگاهی شبیه‌سازی نمودند. رضایی و نایت (۲۰۱۱) با اعمال اصلاحاتی در مدل شیونو و نایت، آن را برای مقاطع مرکب غیرمنشوری مورد استفاده قرار دادند. یانگ و همکاران (۲۰۱۲) با ارایه یک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی در یک مقطع مرکب مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند.

با بررسی مطالعات بالا مشخص می‌شود که بیش‌تر این پژوهش‌ها در کانال‌های آزمایشگاهی و یا رودخانه‌های با هندسه منظم انجام شده و از اثر جریان‌های ثانویه صرف‌نظر شده است. در این پژوهش کارایی مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت (۱۹۹۱) برای حل توزیع عرضی سرعت جریان در یک رودخانه طبیعی مورد بررسی قرار گرفته و اثر جریان‌های ثانویه بر هیدرولیک جریان نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نتایج این مدل با یک مدل یک‌بعدی و نیز مدل ریاضی HEC-RAS مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

مبانی مدل ریاضی یک‌بعدی: مدل یک‌بعدی مورد استفاده در این پژوهش با فرض معلوم بودن عمق و دبی جریان، توزیع عرضی سرعت را محاسبه می‌کند. از توزیع عرضی سرعت می‌توان دبی جریان در هر بخش از رودخانه و نیز انتقال رسوب معلق را برآورد نمود. به این منظور ابتدا مطابق شکل ۱، مقطع عرضی رودخانه به تعداد دلخواهی از المان‌های کوچک تقسیم می‌شود. سپس گره‌های محاسباتی در عرض مقطع و در مرز المان‌ها مشخص می‌شود. در این شکل چند گره از گره‌های ابتدایی و انتهایی مقطع رودخانه نشان داده شده است. با افزایش تعداد گره‌های محاسباتی، می‌توان دقت نتایج محاسبات را افزایش داد. سرعت جریان در اولین و آخرین گره به‌دلیل شرط نبود لغزش[1]، برابر صفر فرض می‌شود.

1- No Slip Condition



شکل ۱- گره‌های محاسباتی برای محاسبه توزیع عرضی سرعت.

بعد از تقسیم مقطع رودخانه به المان‌های کوچک‌تر، ظرفیت انتقال هر یک از المان‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_i = \frac{۱}{n_i} A_i R_i^{۲/۳} \qquad (۱)$$

که در آن، K_i: ظرفیت انتقال، A_i: مساحت هر المان، R_i: شعاع هیدرولیکی هر المان و n_i: ضریب زبری مانینگ در هر المان است. سپس شیب انرژی کل مقطع رودخانه از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^{۲} \qquad (۲)$$

که در آن، Q: دبی کل جریان سیل و K: ظرفیت انتقال کل رودخانه است. ظرفیت انتقال کل مقطع از مجموع همه ظرفیت‌های انتقال المان‌ها به‌دست می‌آید. در نهایت سرعت جریان در هر گره از فرمول مانینگ به‌دست می‌آید:

$$u_i = \frac{K_i S_f^{۱/۲}}{A_i} \qquad (۳)$$

نحوه واسنجی مدل یک‌بعدی به این صورت است که با معلوم بودن مقطع عرضی، شیب طولی رودخانه، عمق جریان، دبی جریان و توزیع عرضی سرعت برای یک واقعه سیل، ضریب زبری مانینگ در عرض رودخانه با مطابقت دادن نتایج محاسباتی از رابطه ۳ و داده‌های مشاهداتی به‌دست می‌آید. با واسنجی این مدل و استفاده از ضریب زبری مانینگ به‌دست آمده، توزیع عرضی سرعت برای هر عمق و دبی جریان قابل حل است.

مبانی مدل ریاضی شبه‌دوبعدی: شیونو و نایت (۱۹۹۱) برای حل توزیع عرضی سرعت جریان در مقاطع مرکب، معادله دیفرانسیلی زیر را ارائه نمودند:

$$\rho g H S_{\cdot} - \rho \frac{f}{۸} U_d^{۲} \sqrt{\left(1+\frac{1}{s^{۲}}\right)} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho \lambda H^{۲} \sqrt{\frac{f}{۸}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y}\right) = \frac{\partial}{\partial y}\left[H\left(\rho \overline{UV}\right)_d\right] \qquad (٤)$$

که در آن، U_d: سرعت متوسط در عمق، H: عمق جریان در هر نقطه از رودخانه، s: شیب جانبی کف یا ساحل رودخانه، f: ضریب اصطکاک دارسی- ویسباخ، λ: ضریب بدون بعد لزجت جریان آشفته، ρ: جرم حجمی آب، $S_{\cdot}$: شیب طولی رودخانه، g: شتاب ثقل، y: فاصله در جهت عرضی و $\overline{U}$ و $\overline{V}$: متوسط زمانی سرعت‌های جریان به‌ترتیب در جهت‌های طولی و عرضی می‌باشند. جمله سمت راست رابطه ٤ اثر جریان‌های ثانویه[1] را نشان می‌دهد. برای دخالت جریان ثانویه در حل معادله بالا، پژوهش‌گران مختلف فرضیات ساده‌کننده‌ای را ارایه نموده‌اند (شیونو و نایت، ۱۹۹۱؛ اروین و همکاران، ۲۰۰۰؛ گهی و همکاران، ۲۰۰۳؛ کردی و همکاران، ۲۰۱۱). ساده‌ترین فرض را شیونو و نایت (۱۹۹۱) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در مقاطع مرکب با مسیر مستقیم و با مقیاس بزرگ، به‌صورت زیر و به‌صورت تابعی از تنش برشی بستر پیشنهاد داده‌اند:

$$\frac{\partial H(\rho \overline{UV})_d}{\partial y} = \beta_s \rho g S_0 H \qquad (۵)$$

که در آن، ضریب β_s در مقطع اصلی در شرایط جریان عادی و سیلابی به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۱۵ و برای دشت‌های سیلابی برابر ۰/۲۵- پیشنهاد شده است (آبریل و نایت، ۲۰۰٤).

رابطه ٤ یک معادله دیفرانسیل معمولی غیرخطی از نوع مقادیر مرزی است که فقط دارای یک مجهول است (u_d در عرض رودخانه). این معادله اگرچه حل تحلیلی دارد، اما حل تحلیلی آن فقط برای کانال‌ها قابل استفاده است. برای رودخانه‌های طبیعی با هندسه نامنظم، روش‌های عددی پرتاب، تفاضل‌های محدود، اجزاء محدود و حجم محدود قابل استفاده است که در این مقاله از حل تفاضل محدود استفاده شده است. دلیل این انتخاب این است که معمولاً برای حل عددی معادله‌های دیفرانسیل مسایل مربوط به مکانیک سیالات و هیدرولیک، روش تفاضل محدود هم از سادگی بیش‌تری برخوردار بوده و هم دقت مناسبی داشته است. روش اجزاء محدود دارای پیچیدگی بیش‌تری بوده و برای هندسه‌های نامنظم و پیچیده کاربرد بیش‌تری دارد. این روش بیش‌تر برای مدل‌سازی محیط‌های جامد (مثل خاک، پی، سازه‌های بتنی و فلزی و...) استفاده شده و در زمینه سیالات و مهندسی آب کاربردهای محدودی داشته است.

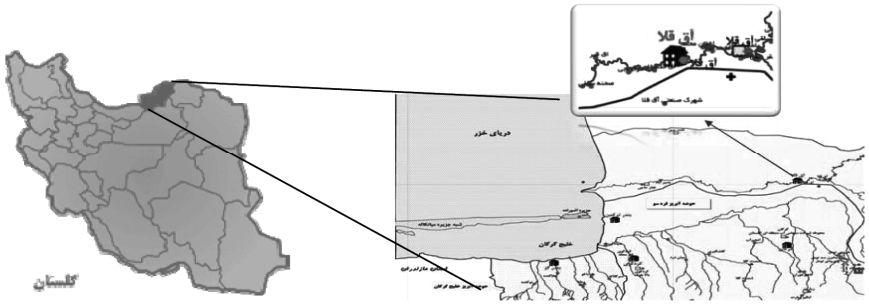
1- Secondary Flow

برای حل معادله دیفرانسیل ٤، باید توزیع عرضی ضریب اصطکاک دارسی- ویسباخ و نیز ضریب بدون بعد لزجت جریان آشفته معلوم باشند. مقادیر ضریب اصطکاک با واسنجی مدل ریاضی براساس تغییر ضریب زبری در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست می‌آیند. از طرف دیگر، ضریب بدون بعد لزجت توسط پژوهش‌گران مختلف در کل عرض رودخانه و به‌صورت ثابت، ۰/۰۷ در نظر گرفته شده است (نایت و آبریل، ۱۹۹٦).

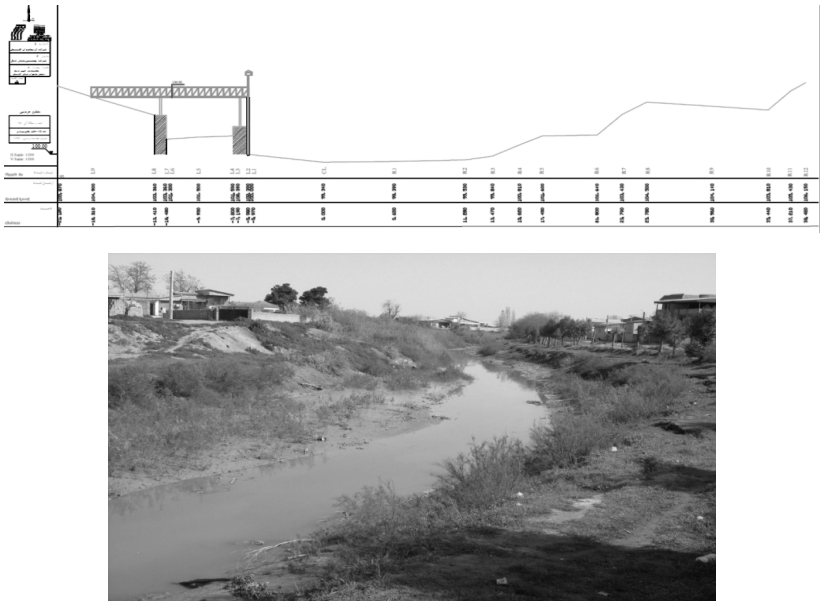
برتری مهم مدل شبه‌دوبعدی بالا نسبت به مدل یک‌بعدی این است که در مدل شبه‌دوبعدی، دبی جریان مجهول بوده و از حل توزیع سرعت در عرض رودخانه محاسبه می‌شود. در حقیقت هدف از ارایه مدل ریاضی شیونو و نایت، محاسبه دبی جریان سیل است در حالی‌که هدف از مدل ریاضی یک‌بعدی، تعیین توزیع عرضی سرعت با فرض معلوم بودن دبی جریان است.

برای حل مدل ریاضی شبه‌دوبعدی ابتدا مطابق شکل ۱، عرض رودخانه به تعدادی گره محاسباتی تفکیک شده و برای هر گره، سرعت متوسط در عمق جریان محاسبه می‌شود. دو گره ابتدا و انتهای محاسبات، صفر است. بر خلاف مدل یک‌بعدی، در مدل شبه‌دوبعدی مقادیر سرعت در گره‌های محاسباتی به‌صورت هم‌زمان و با حل یک ماتریس به‌دست می‌آیند.

منطقه مورد مطالعه: رودخانه گرگان‌رود در استان گلستان واقع شده است. طول این رودخانه ۲۷۰ کیلومتر و وسعت حوزه آبریز آن بیش از ۱۰۰۰۰ کیلومترمربع است. میزان آورد جریان سالانه این رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا بیش از ۸۰۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. در شکل ۲ موقعیت رودخانه مورد مطالعه در کشور و استان گلستان و در شکل ۳، مقطع عرضی رودخانه در محل ایستگاه و نمایی از رودخانه در پایین‌دست ایستگاه نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایی از رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا.



شکل ۳- نمایی از مقطع عرضی و وضعیت پوشش گیاهی رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا.

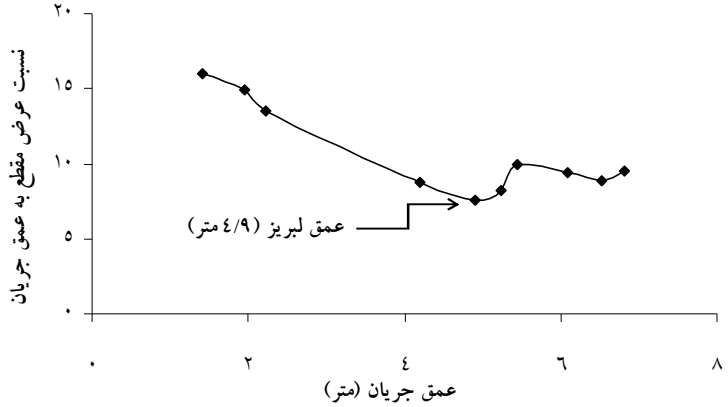
شیب طولی رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری ۰/۰۰۱ و عمق لبریز آن ۵ متر می‌باشد. در حالت سیلاب، جریان از مقطع اصلی خارج شده و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود. در این حالت عرض فوقانی سطح آب از حالت عادی که حدود ٢٤ متر می‌باشد به حدود ۵۸ متر افزایش می‌یابد. با توجه به عبور رودخانه از مناطق مسکونی در ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا، اهمیت مدیریت سیل در دشت‌های سیلابی و کاهش خطرات ناشی از وقوع سیل بیش از پیش آشکار می‌شود. با توجه به‌وجود پوشش گیاهی در دشت‌های سیلابی، انتظار می‌رود ضریب زبری رودخانه بالا باشد.

نتایج و بحث

تعیین عمق لبریز مقطع اصلی جریان: طبق تعریف، عمق مقطع پر یا عمق لبریز[1] عمقی است که در آن، آب از مجرای اصلی رودخانه خارج شده و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود. این وضعیت در رودخانه‌های طبیعی که هندسه نامنظمی دارند به‌صورت دقیق قابل شناسایی نیست. در مورد این موضوع، نظرات و

1- Bankful Level

یافته‌های زیادی وجود دارد. معمولاً در بسیاری از بحث‌های هیدرولوژی، دبی با دوره بازگشت ۵-۱/۵ سال به‌عنوان دبی مقطع پر در نظر گرفته می‌شود که در بیش‌تر این موارد از دبی با دوره بازگشت ۲-۱/۵ سال استفاده می‌شود. این ایده در بسیاری از رودخانه‌ها به‌ویژه رودخانه‌های بزرگ آبرفتی صادق نیست به همین دلیل ضریبی از این دبی به‌عنوان دبی مقطع پر (معمولاً ۱/۳-۰/٦) در نظر گرفته می‌شود (پیکاپ و وارنر، ۱۹۷٦). بعضی از پژوهش‌گران از روش‌های هیدرولیکی استفاده نموده‌اند. در یکی از روش‌های ساده، نمودار تغییرات عمق جریان در مقابل نسبت عرض به عمق جریان رسم شده و نقطه کمینه این منحنی به‌عنوان عمق مقطع پر درنظر گرفته می‌شود (ولمان، ۱۹۵۵؛ پیکاپ و وارنر، ۱۹۷٦). نتایج این روش برای مقطع عرضی رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه آق‌قلا در شکل ٤ نشان داده شده است. بر این اساس عمق لبریز این رودخانه حدود ٤/۹ متر می‌باشد.



شکل ٤- تعیین عمق لبریز رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا.

واسنجی مدل‌های ریاضی: مهم‌ترین پارامتر برای واسنجی مدل‌های ریاضی هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها، ضریب زبری مانینگ است. به این منظور، چند سری از داده‌های اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت در دبی‌های عادی و سیلابی رودخانه گرگان‌رود در ایستگاه آق‌قلا مورد نیاز است. داده‌های هندسه مقطع عرضی، عمق جریان و شیب کف رودخانه (یا شیب سطح آب) به‌عنوان داده‌های ورودی مدل ریاضی می‌باشند. در مرحله واسنجی، ابتدا یک واقعه غیرسیلابی (دبی در حد دبی پایه رودخانه) در نظر گرفته می‌شود به‌طوری‌که جریان وارد دشت‌های سیلابی نشده باشد. سپس با انتخاب یک

ضریب زبری فرضی برای مقطع اصلی، توزیع عرضی سرعت جریان به کمک مدل ریاضی محاسبه می‌شود. توزیع عرضی سرعت به‌دست آمده باید با توزیع عرضی سرعت اندازه‌گیری شده مطابقت داشته باشد. به این منظور و برای افزایش سرعت محاسبات، از فرآیند بهینه‌سازی استفاده می‌شود، به این صورت که ضریب زبری مانینگ آن‌قدر تغییر داده می‌شود که مجموع مربعات خطای سرعت‌های محاسباتی و مشاهداتی حداقل شود. در شکل ۵ نتایج واسنجی مدل‌های ریاضی یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی برای دو دبی جریان غیرسیلابی نشان داده شده است.

در مرحله دوم واسنجی، ضرایب زبری دشت‌های سیلابی مشخص می‌شود. به این منظور با استفاده از توزیع عرضی سرعت در دبی‌های سیلابی (که جریان وارد دشت‌های سیلابی شده است) و به کمک فرآیند بهینه‌سازی، مقادیر این ضرایب مانینگ برآورد می‌شود. در این مرحله، از ضریب مانینگ مقطع اصلی مرحله قبل استفاده می‌شود. در شکل ۵ نتایج واسنجی مدل‌های ریاضی یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی در شرایط سیلابی نشان داده شده است.

با توجه به شرایط رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه آق‌قلا که دارای پوشش گیاهی در کناره‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی بوده و عرض رودخانه در هنگام وقوع سیل نیز زیاد است، در نظر گرفتن یک ضریب زبری ثابت برای مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی برای همه عمق‌های جریان امکان‌پذیر نیست. در این شرایط ضریب زبری مانینگ تابع عمق جریان، تراکم و نوع پوشش گیاهی، دانه‌بندی مصالح کف و سواحل رودخانه و نیز فرم بستر است که برای سادگی، در این پژوهش فقط پارامتر عمق جریان در نظر گرفته شده است. با انجام فرآیند واسنجی مدل ریاضی، روابط زیر با ضریب تبیین ۰/۹٤ و ۰/۹۸ به‌ترتیب برای ضریب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه گرگان‌رود به‌دست آمده است:

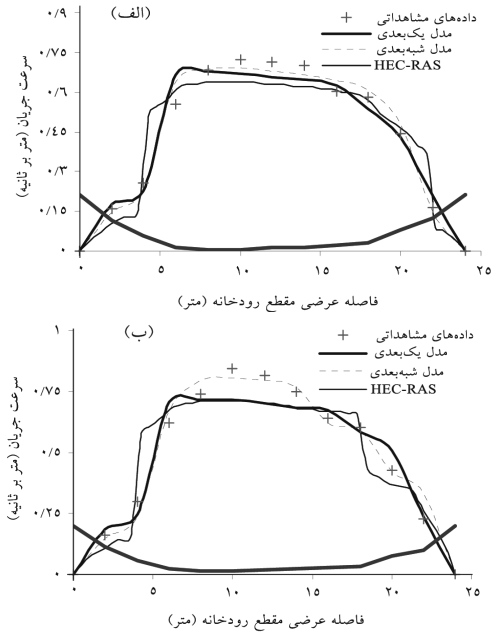
$$n_c = ۰/۰۰۹۳H + ۰/۰۷۳۹ \qquad (٦)$$

$$n_f = ۰/۱۵۰۲(H - h) + ۰/۰٤٤۸ \qquad (۷)$$

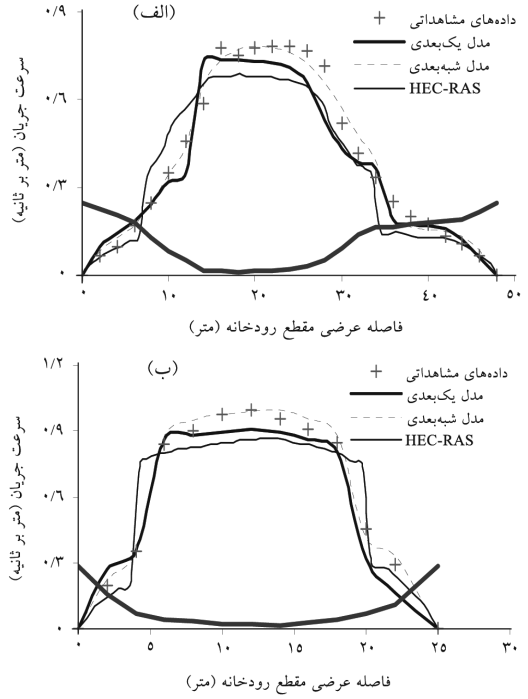
که در آن، n_c و n_f به‌ترتیب ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه است. بدیهی است رابطه ۷ فقط برای عمق‌های جریان بزرگ‌تر از عمق لبریز رودخانه (٤/۹ متر) صادق است. بررسی نتایج ارایه شده در شکل‌های ۵ و ٦ نشان می‌دهد که مدل ریاضی شبه‌دوبعدی دقت بهتری دارد. در این شکل‌ها نتایج مدل ریاضی HEC-RAS نیز ارایه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج این مدل نسبت به هر دو مدل مورد استفاده در این پژوهش از دقت کم‌تری برخوردار است.

صحت‌سنجی مدل‌های ریاضی: برای اطمینان از دقت نتایج مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی در دبی‌های جریان غیر از محدوده واسنجی، باید صحت‌سنجی مدل انجام شود. در شکل ۷ نتایج محاسبات توزیع عرضی سرعت برای دبی جریان ۷٤/۵ مترمکعب بر ثانیه نشان داده شده است. در این مرحله، ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی براساس رابطه‌های ٦ و ۷ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر به‌ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۱۷ به‌دست آمده است. خطای حل توزیع عرضی سرعت برای مدل شبه‌دوبعدی حدود ۳/۲ درصد و برای مدل یک‌بعدی حدود ۵/۳ درصد است. خطای مدل شبه‌دوبعدی برای محاسبه دبی جریان حدود ٤ درصد می‌باشد.

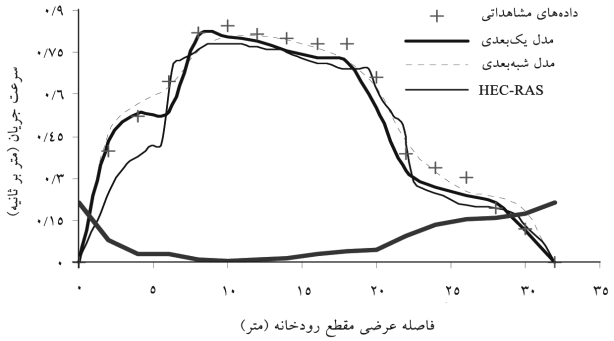
در شکل ۸ نتایج محاسباتی رابطه دبی- اشل رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا به کمک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت در مقایسه با رابطه واقعی این رودخانه ارایه شده است. مشاهده می‌شود که دقت مدل ریاضی مناسب می‌باشد. حداکثر خطای برآورد دبی جریان به کمک مدل ریاضی حدود ٦ درصد است.



شکل ۵- نتایج توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه گرگان‌رود (ایستگاه آق‌قلا) به‌دست آمده از مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی در مرحله واسنجی (دبی غیرسیلابی یا پایه): الف) دبی ۳۵/۱٤ مترمکعب بر ثانیه و ب) دبی ۳۸/۵ مترمکعب بر ثانیه.

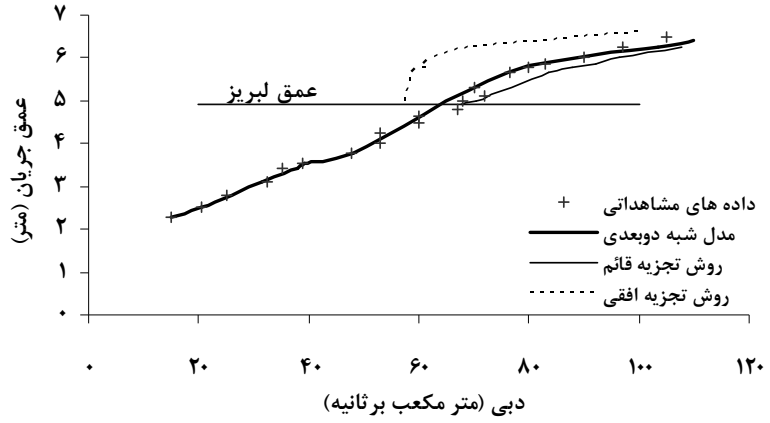


شکل ٦- نتایج توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه گرگان‌رود (ایستگاه آق‌قلا) به‌دست آمده از مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی در مرحله واسنجی (دبی سیلابی): الف) دبی ٤۷ مترمکعب بر ثانیه و ب) دبی ۹۷ مترمکعب بر ثانیه.



شکل ۷- نتایج توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه گرگان‌رود (ایستگاه آق‌قلا) به‌دست آمده از مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی در مرحله صحت‌سنجی (دبی سیلاب ۷٤/۵ مترمکعب بر ثانیه).

استخراج رابطه دبی- اشل رودخانه: با حل توزیع سرعت جریان در عرض رودخانه و انتگرال‌گیری عرضی از آن، می‌توان دبی کل جریان را محاسبه نمود. این کار برای چند تراز سطح آب در رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا انجام شده است. نتایج این محاسبه‌ها به کمک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت در مقایسه با منحنی مشاهداتی دبی- اشل رودخانه در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دقت نتایج این مدل در همه محدوده عمق جریان قابل‌قبول است به‌طوری‌که حداکثر و میانگین خطای برآورد دبی جریان به کمک این مدل به‌ترتیب حدود ۸ و ۲/۵ درصد است. در این شکل نتایج روش‌های تجزیه قائم و افقی مقطع مرکب نیز دیده می‌شود. همان‌طورکه مشاهده می‌شود روش تجزیه قائم همواره دبی را بیش‌تر از واقع و روش تجزیه افقی، همواره دبی جریان را کم‌تر از واقع برآورد می‌نماید. همچنین با افزایش عمق جریان در دشت‌های سیلابی، نتایج این روش‌ها به مقادیر واقعی دبی جریان نزدیک شده است. دلیل این مسأله این است که در این حالت، شکل رودخانه از مقطع مرکب به مقطع ساده نزدیک می‌شود. این نتایج با نتایج مطالعات پژوهش‌گران زیادی هم‌خوانی دارد (نایت و همکاران، ۱۹۸۹؛ ورم‌لیتون و مرت، ۱۹۹۰؛ مارتین و میرز، ۱۹۹۱؛ آکرز، ۱۹۹۲؛ بوسمار و زک، ۱۹۹۹).



شکل ۸- رابطه دبی- اشل رودخانه گرگان‌رود با استفاده از مدل ریاضی شبه‌دوبعدی.

تجزیه و تحلیل آماری نتایج: برای ارزیابی دقت نتایج مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی مورد استفاده در این پژوهش، پارامترهای آماری ضریب تبیین (R^2) و مجذور مجموع مربعات خطا (RMSE) برای نتایج سرعت‌های جریان محاسبه شده است. براساس این محاسبات مشخص شد که دقت نتایج مدل ریاضی شبه‌دوبعدی با R^2=۰/۹۷ و RMSE=۰/۰٤۷٦ نسبت به مدل یک‌بعدی با R^2=۰/۹٤ و RMSE=۰/۰۷٥٦ دارای دقت بسیار بیش‌تری است. همچنین مشخص شد متوسط خطای تخمین توزیع سرعت در عرض رودخانه در مدل‌های یک و شبه‌دوبعدی به‌ترتیب حدود ۱۳/۲ و ۷/۵ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، کارایی مدل‌های ریاضی یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی (هم‌زمان با اثر جریان ثانویه) در حل توزیع عرضی سرعت و برآورد دبی جریان سیلاب در رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا مورد بررسی قرار گرفته است. با واسنجی و صحت‌سنجی این مدل‌ها، یافته‌های زیر به‌دست آمده است:

۱- واسنجی مدل‌های ریاضی مورد استفاده در این پژوهش در رودخانه گرگان‌رود در ایستگاه آق‌قلا نشان داد که در نظر گرفتن یک ضریب زبری ثابت برای همه عمق‌های جریان امکان‌پذیر نیست. این مسأله به‌دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه قابل توجیه است. برای ضرایب زبری این بخش‌ها، روابط خطی ساده‌ای بر حسب عمق جریان ارایه شده است.

۲- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های ریاضی نشان می‌دهد که در همه شرایط، دقت نتایج مدل شبه‌دوبعدی در محاسبه توزیع عرضی سرعت و نیز دبی جریان بهتر از مدل یک‌بعدی است. تجزیه و تحلیل آماری نتیجه توزیع عرضی سرعت‌های محاسباتی نشان می‌دهد که دقت نتایج مدل ریاضی شبه‌دوبعدی با R^2=۰/۹۷ و RMSE=۰/۰٤۷٦ نسبت به مدل یک‌بعدی با R^2=۰/۹٤ و RMSE=۰/۰۷٥٦ بسیار بیش‌تر است. علاوه‌بر این، در مدل یک‌بعدی فرض می‌شود عمق و دبی جریان معلوم بوده و فقط توزیع عرضی سرعت محاسبه می‌شود، اما در مدل شبه‌دوبعدی، فقط عمق جریان معلوم است. بنابراین از جنبه کاربردی، مدل شبه‌دوبعدی برتری بیش‌تری دارد.

۳- با استخراج رابطه دبی- اشل رودخانه گرگان‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا به کمک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی مشخص شد که حداکثر و متوسط خطای نسبی تخمین دبی جریان به‌ترتیب ۸ و ۲/۵ درصد است.

منابع

1.Abril, J.B. 2002. Overbank flood routing analysis applying jointly variable parameter diffusion and depth-averaged flow finite element models. International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow, Belgium, Pp: 161-167.

2.Abril, J.B., and Knight, D.W. 2004. Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model. J. Hydr. Res. IAHR, 122: 6. 616-629.

3.Ackers, P. 1992. Hydraulic design of two-stage channels. Engrs. Wat. Marit. and Energy, 96: 247-257.

4.Ayyoubzadeh, S.A., and Zahiri, A. 2004. Numerical study of flood routing in compound channels, Int. Conference on Hydraulics of Dams and River Structures, Tehran, Iran, Pp: 353-358.

5.Ayyoubzadeh, S.A., and Zahiri, A. 2005. Development of sediment rating curves in compound river channels using enveloped section method, J. Engine. Technol. 21: 71-83. (In Persian)

6.Bousmar, D., and Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. J. Hydr. Engine. ASCE, 125: 7. 696-706.

7.Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., and Sellin, R.H.J. 2000. Two-Dimensional Solution for Straight and Meandering Overbank Flows, J. Hydr. Engine. 126: 9. 653-669.

8.Gahey, C., and Samuels, P.G. 2003. Methodology for conveyance estimation in two-stage straight, skewed and meandering channels, Proceedings of 15th IAHR Congress, Thessaloniki, Greece, Pp: 33-40.

9.Hu, C., Ju, Z., and Guo, Q. 2010. Flow movement and sediment transport in compound channels. J. Hydr. Res. IAHR, 48: 1. 23-32.

10.Knight, D.W., Shiono, K., and Pirt, J. 1989. Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. International Conference on Hydraulics and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters, England, Pp: 419-428.

11.Knight, D.W., and Abril, J.B. 1996. Refined calibration of a depth-averaged model for turbulent flow in a compound channel, Proc. Instn Civ. Engrs Water, Maritime & Energy, 118: 151-159.

12.Kordi, H., Gholinejad, J., Amini, R., and Zahiri, A. 2011. Comparison of 1-D and 2-D methods for computation of lateral velocity distribution in flooded rivers. 10th Iranian Hydraulic Conference, Gilan University, Rasht, (In Persian)

13.Lambert, M.F., and Sellin, R.H.J. 1996. Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. J. Hydr. Res. IAHR, 34: 381-394.

14.Martin, L.A., and Myers, R.C. 1991. Measurement of overbank flow in a compound river channel. Proc. Inst. Civ. Engrs, 91: 2. 645-657.

15.Omran, M., Atabay, S., and Knight, D.W. 2007. Modeling of sediment transport in simple rectangular channels using a depth-averaged approach. 32nd Congress of IAHR on Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics, Venice, Italy, Pp: 402-406.
16.Pickup, G., and Warner, R.F. 1976. Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge. J. Hydrol. 29: 51-75.
17.Rezaei, B., and Knight, D.W. 2011. Overbank flow in compound channels with nonprismatic floodplains. J. Hydr. Eng. 137: 8. 815-824.
18.Shiono, K., and Knight, D.W. 1988. Two-dimensional analytical solution for a compound channel. 3rd International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Japan, Pp: 503-510.
19.Shiono, K., and Knight, D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. J. Fluid Mech. 222: 617-646.
20.Tang, X., Knight, D.W., and Sterling, M. 2010. Analytical model for streamwise velocity in vegetated channels. Eng. and Comp. Mech. 164: 2. 91-102.
21.Wark, J.B., Samuels, P.G., and Ervine, D.A. 1990. A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels. International Conference on River Flood Hydraulics, London, UK, Pp: 163-172.
22.Wolman, M.G. 1955. The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania. USGS Professional, 271: 63.
23.Wormleaton, P.R., and Merrett, D.J. 1990. An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/floodplain sections. J. Hydr. Res. 28: 157-174.
24.Yang, K., Nie, R., Liu, X., and Cao, S. 2012. Modeling of depth-averaged velocity and boundary shear stress in rectangular compound channels with secondary flows. J. Hydr. Eng. (In Press)
25.Zahiri, A., Ayyoubzadeh, S.A., and Dahanzadeh, B. 2009. Numerical solution of velocity lateral distribution in rivers (Case study: Karoun river at Molasani station). J. Agric. Sci. Natur. Resour. 16: 2. 273-283. (In Persian)

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 19(4), 2013
http://jwsc.gau.ac.ir

One and quasi two dimensional simulation of flood flows in rivers (Case Study: Gorganrood River at Aq-Qalla hydrometric station)

J. Gholinejad[1], *A.R. Zahiri[2] and A.A. Dehghani[2]

[1]M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering and Member of Young Researcher Club, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, [2]Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 03/13/2012; Accepted: 09/02/2012

Abstract

Hydraulic flow analysis in rivers during floods by mathematical models is one of the initial activities for flood alleviation schemes. In this case, besides saving time and budget, the velocity and bed shear stress lateral distribution and sediment transport will be computed with suitable accuracy. One-dimensional mathematical models have been widely used by hydraulic engineers in river training works. Recently, application of quasi two-dimensional models is widespread. These two mathematical models have their individual limitations and strengths which should taking into account in interpretation of results. In this paper, by calibration of 1-D and quasi 2-D models, their ability in prediction of velocity lateral distribution in Gorganrood River at Aq-qalla hydrometric station are compared. This comparison showed that mean error of 1-D and quasi 2-D models in velocity lateral distribution are 9.5 and 4.5 percent, respectively.

Keywords: 1-D mathematical model, Quasi 2-D mathematical model, Velocity lateral distribution, Secondary flow, Floodplains

* Corresponding Author; Email: zahiri_reza@yahoo.com