

## بررسی تأثیر نسبت دبی و زاویه اتصال بر آبشستگی موضعی تلاقی کانال‌های روباز فرسایشی با استفاده از مدل SSIIM1

رسول قبادیان<sup>1\*</sup> - مهسا بصیری<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 1393/04/27

تاریخ پذیرش: 1393/09/15

### چکیده

جریان و انتقال رسوب نقش مهمی در تغییر شکل محل تلاقی کانال‌های روباز فرسایشی دارند. در این تحقیق با استفاده از مدل عددی SSIIM1 ابتدا الگوی جریان و سپس الگوی فرسایش و رسوبگذاری در یک تلاقی 60 درجه شبیه‌سازی و با داده‌های اندازه‌گیری صحت سنجی شد. نتایج نشان داد تطابق خوبی بین سرعت‌های افقی محاسبه شده توسط مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی به غیر از چند نقطه در داخل ناحیه جداشدگی جریان وجود دارد. همچنین نتایج صحت سنجی رسوب نشان داد که مدل توانایی نسبتاً خوبی در پیش‌بینی موقعیت و مقدار حداکثر عمق فرسایش دارد (خطایی کمتر از 10 درصد) ولی ارتفاع رسوب‌گذاری را بیشتر از مقدار آزمایشگاهی برآورد می‌کند. پس از اطمینان از نتایج مدل به بررسی تأثیر زاویای اتصال 60، 90 و 135 درجه در دو نسبت دبی 0/5 و 0/66 بر الگوی فرسایش و رسوب پرداخته شد. نتایج نشان داد در یک زاویه مشخص به ازای نسبت دبی‌های انتخابی بین مقادیر فرسایش اختلاف وجود دارد که با افزایش زاویه تلاقی مشهودتر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تپه رسوبگذاری، چاله فرسایشی، شبیه‌سازی عددی، ناحیه جداشدگی

### مقدمه

جداشدگی و مقادیر سرعت در محدوده تلاقی انجام شده است. تیلور (15) اولین دانشمندی بود که با در نظر گرفتن یکسری فرضیات رابطه عمق نسبی در محل تلاقی را ارائه نمود. گورام و همکاران (8) با مطالعه بر روی یک اتصال با زوایای 30، 60 و 90 درجه که در آن پهنای کانال اصلی 500 میلی‌متر و شاخه فرعی دارای دو عرض متفاوت 300 و 500 میلی‌متر بود روابطی را برای محاسبه ابعاد ناحیه جدا شدگی جریان در شرایط زیر بحرانی و انتقالی ارائه نمودند. مطالعات آزمایشگاهی بست و رید (2) بر روی یک تلاقی با چهار زاویه اتصال متفاوت 15، 45، 70 و 90 درجه با پهنای یکسان 15 سانتی متر نشان داد که با افزایش نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل طول و پهنای ناحیه جداشدگی جریان افزایش می‌یابد ولی به ازای نسبت‌های دبی مختلف اندیس شکل ناحیه جداشدگی (نسبت پهنای به طول ناحیه جداشدگی) حول مقدار میانگین 0/19 باقی می‌ماند. جباری صاحب‌اری و همکاران (10) به بررسی آزمایشگاهی الگوی فرسایش و رسوبگذاری در محل تلاقی کانال‌های روباز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش عرض کانال فرعی چاله فرسایشی به سمت دیواره روبرویی محل اتصال در کانال اصلی حرکت می‌کند و در نسبت دبی‌های بزرگ‌تر چاله فرسایشی به سمت کانال فرعی

محل تلاقی رودخانه‌ها و کانال‌های فرسایشی یکی اجزاء مهم هر شبکه رودخانه‌ای می‌باشد. درک درست از ساختار جریان تولید شده در این ناحیه برای پیش‌بینی فرسایش و رسوبگذاری در محدوده تلاقی بسیار مهم است. فرسایش رودخانه‌ها چه در جداره و چه در بستر باعث عدم پایداری آن‌ها شده که منجر به مشکلاتی از جمله از بین رفتن زمین‌های حاصلخیز، پر شدن سدها و تاسیسات موجود بر روی رودخانه، اثر منفی بر آبخوان‌ها و سطح آب زیرزمینی می‌گردد. رسوبگذاری رودخانه‌ها نیز موجب آبرفتگی بیشتر زمین‌های اطراف رودخانه، عدم بهره برداری مناسب پل‌ها و سازه‌های تقاطعی، پر شدن دهانه آبرگیرها و عدم انتقال آب می‌شود. از آنجایی که پیدایش چاله‌های فرسایشی و مناطق رسوبگذاری ارتباط مستقیم با وضعیت جریان در محدوده تلاقی دارد از اینرو مطالعاتی برای بررسی خصوصیات جریان از جمله تغییرات عمق جریان، ابعاد ناحیه

1 و 2- دانشیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه  
\* - نویسنده مسئول: (Email: r\_ghobadian@razi.ac.ir)

بررسی عددی الگوی جریان و رسوب در تلاقی رودخانه‌ها پرداختند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که مدل عددی آن‌ها با خطایی در حدود 7 و 77 درصد به ترتیب حداکثر ارتفاع و عرض پهنه رسوب گذاری در محل تلاقی پیش‌بینی می‌کند. موسلی (12) با انجام آزمایشات بر روی فلوم کوچک آزمایشگاهی به محاسبه عمق فرسایش در محل تلاقی رودخانه‌ها و عوامل تاثیرگذار بر آن پرداخت. او با ثابت در نظر گرفتن زاویه تلاقی (60 درجه) رابطه‌ای برای بدست آوردن حداکثر عمق آبستتگی بر اساس دبی کانال‌های اصلی و فرعی و بار رسوبی ارائه کرد. بست (3) در تلاقی رودخانه‌ای در شمال انگلستان اثر نسبت دبی کانال فرعی به اصلی و زاویه اتصال را بر مورفولوژی بستر محل تلاقی را مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که با افزایش زاویه اتصال و نسبت دبی نفوذ دماغه آبستتگی کانال اصلی به داخل اتصال کاهش می‌یابد. برقی و جباری (5) الگوی رسوب و فرسایش روی یک اتصال 90 درجه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که حداکثر عمق آبستتگی در ابتدای ناحیه جداشدگی جریان اتفاق می‌افتد و حداکثر عمق آبستتگی با کاهش قطر متوسط مصالح بستر، نسبت دبی کانال اصلی به دبی کل و عرض شاخه فرعی افزایش می‌یابد. تونگ هوان و همکاران (16) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی به مطالعه الگوی جریان و رسوبگذاری در یک تلاقی 90 درجه تحت نسبت دبی‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی که آب شاخه فرعی صاف و زلال باشد، حداکثر آبستتگی موضعی در نزدیکی ناحیه لایه‌های برشی پایین دست تلاقی اتفاق می‌افتد.

علیرغم مطالعات آزمایشگاهی بسیاری که در تلاقی کانال‌های روباز با زوایای اتصال مختلف انجام شده است، کمتر به مطالعه عددی و شبیه‌سازی رسوب در محل تلاقی پرداخته شده است. در این تحقیق کارایی مدل عددی SSIIM1 در شبیه‌سازی جریان و به ویژه رسوب در یک تلاقی 60 درجه بررسی شد. سپس به تاثیر نسبت دبی و زاویه اتصال بر آبستتگی موضعی در محدوده تلاقی مورد مطالعه قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از مدل عددی SSIIM1 برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در تلاقی دو کانال مستطیلی روباز استفاده شد. مدل مذکور از یک شبکه ساختار استفاده می‌کند. همان‌گونه که در شکل 1 نشان داده شده است هندسه میدان مورد مطالعه در این تحقیق به گونه‌ای تعریف شده که در نواحی نزدیک به دیواره که گرادیان‌ها شدیدتر می‌باشد (به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر) شبکه‌بندی ریزتری مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که خود نرم افزار SSIIM1 قادر به تولید فایل هندسه محدوده نیست و در تحقیق

کشیده شده و عمق فرسایش به عمق جریان نزدیک می‌شود. قبادیان و همکاران (7) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی به بررسی تاثیر زوایای اتصال 60، 75 و 90 بر الگوی رسوب در کانال‌های مستطیلی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش زاویه اتصال حداکثر عمق فرسایش و ارتفاع تپه رسوبگذاری افزایش می‌یابد. همتی و همکاران (9) به بررسی میزان تاثیر اختلاف رقوم کف دو کانال بر میزان آبستتگی بستر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد اختلاف بستر نسبت به حالتی که اختلافی در کف وجود ندارد، برای نسبت دبی‌های کمتر از یک باعث کاهش ابعاد چاله فرسایشی می‌گردد. قبادیان (6) با انجام آزمایش‌های متعددی به بررسی تاثیر همزمان پارامترهای نسبت دبی، عدد فرود ذره، زاویه اتصال و نسبت پهنای بر روی حداکثر عمق نسبی فرسایش و ارتفاع نهایی رسوبگذاری پرداخت و روابط زیر را برای بدست آوردن حداکثر عمق فرسایش و ارتفاع رسوبگذاری ارائه کرد.

$$\frac{D_s}{B_3} = 0.126 \ln(Q_r) + 0.212 \ln(F_g) + 0.077 B_r^{-0.745} \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.831} \quad (1)$$

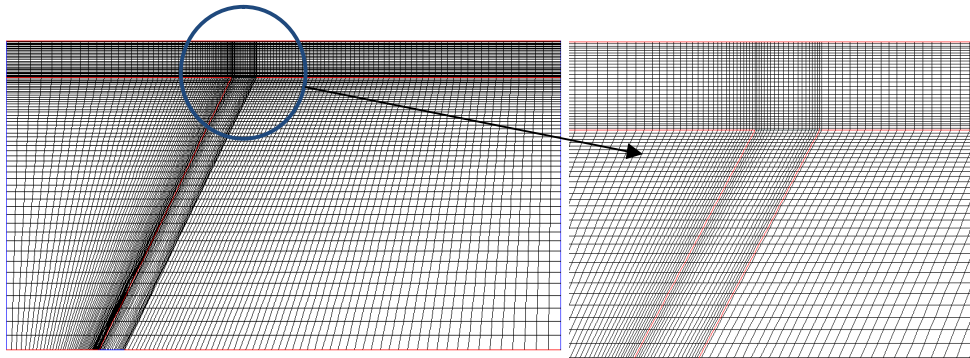
$$\frac{H_{se}}{B_3} = 0.13 Q_r^{1.648} - 0.089 F_g^{0.815} + 0.232 B_r^{0.006} + 0.043 \left(\frac{\theta}{90}\right)^{2.037} \quad (2)$$

که در آن:  $D_s$  حداکثر عمق فرسایش،  $B_3$  پهنای کانال اصلی در پایین دست،  $Q_r$  نسبت دبی،  $F_g$  عدد فرود ذره،  $B_r$  نسبت پهنای،  $\theta$  زاویه تلاقی و  $H_{se}$  ارتفاع نهایی رسوبگذاری می‌باشد.

بلوچی و همکاران (1) با استفاده از یک مدل فیزیکی و دستگاه کالیبره شده تزریق رسوب، پارامترهای بی بعد موثر را استخراج کردند و سپس به بررسی تاثیر عدد فرود ذره پایاب و دبی رسوب بر روی حداکثر عمق آبستتگی در محل تلاقی رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش عدد فرود ذره پایاب و با ثابت در نظر گرفتن نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل، حداکثر عمق فرسایش بستر نیز افزایش می‌یابد. محمدی (11) به بررسی تاثیر شعاع گردشگری لبه اتصال در محل یک تلاقی 60 درجه بر روی الگوی رسوب پرداخت. نتایج آزمایش او نشان داد با افزایش شعاع گردشگری لبه پایین دست اتصال، حداکثر عمق آبستتگی و ارتفاع تپه رسوبگذاری بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

رستمی و همکاران (13) با استفاده از نرم افزار CCHE2D به

حاضر فایل Koordina توسط برنامه‌ای به زبان VB برای مدل تهیه شده است.



شکل 1- مش ساخته شده برای محدوده مورد مطالعه  
Figure 1- Provided mesh for studied area

ورودی در نظر گرفته شده است. این شرایط برای سرعت‌ها بکار برده می‌شود و اغلب مشکل است که از آن برای اغتشاش استفاده شود. معمولاً از یک مدل اغتشاش ساده ( $v_t = 0.11u^*h$ ) یا ( $v_t = 0.067u^*h$ ) برای تعیین لزجت گردابی در مقطع ورودی استفاده می‌شود. با معلوم بودن سرعت می‌توان تنش برشی ( $\tau$ ) را در بستر ورودی حدس زد. پس از آن انرژی جنبشی اغتشاش  $k$  در بستر ورودی تعیین می‌شود:

$$k = \frac{\tau}{\rho \sqrt{c'_\mu}} \quad (7)$$

با استفاده معادله ( $v_t = C'_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$ ) و لزجت داده شده و  $k$  در بستر مقدار  $\varepsilon$  در بستر ورودی نیز تعیین می‌گردد. اگر فرض شود که  $k$  از بستر تا سطح آب به صورت خطی تغییر می‌کند از معادله (7) و پروفیل لزجت گردابی توزیع قائم  $\varepsilon$  محاسبه می‌گردد. در مرز خروجی شرایط گرادیان صفر برای تمام پارامترها به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. سطح آب با استفاده از روش سرپوش ثابت به همراه گرادیان صفر برای همه متغیرها تعیین شده است. موقعیت سرپوش ثابت و جابجایی آن به عنوان تابعی از زمان و میدان جریان، بوسیله فشار و الگوریتم برنولی محاسبه می‌شود. الگوریتم بر اساس میدان فشار است که از معادله برنولی در امتداد سطح آب استفاده می‌کند تا این که موقعیت سطح آب را بر اساس نقطه مرجع ثابتی که حرکت نمی‌کند (در این تحقیق انتهای پایین دست کانال اصلی) محاسبه می‌شود. از قانون دیوار برای مرزهای زیر به عنوان شرط مرزی در بستر و دیوارها استفاده شد:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{30y}{k_s}\right) \quad (8)$$

### معادلات حاکم بر میدان جریان

در مدل مذکور معادلات ناویر - استوکس برای جریان آشفته در یک فضای سه بعدی به منظور محاسبه سرعت جریان با روش احجام محدود منفصل و حل می‌شوند:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (4)$$

$$j = 1, 2, 3$$

که در آن  $U$  سرعت متوسط،  $\rho$  وزن واحد حجم آب،  $P$  فشار،  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر است که اگر  $i = j$  باشد برابر است با یک و در غیر این صورت معادل صفر است و  $x = x$  بعد عمومی مسافت است. آخرین جمله در معادله (4) تنش رینولدز است که اغلب با تقریب بوزینسک مدل می‌شود:

$$\overline{\rho u_i u_j} = \rho v_t \left( \frac{\delta U_i}{\partial x_j} + \frac{\delta U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \cdot \delta_{ij} \quad (5)$$

که در آن  $v_t$  لزجت گردابی و  $k$  انرژی جنبشی اغتشاش است. لزجت گردابی بستگی به انرژی جنبشی اغتشاش  $k$  و اتلاف اغتشاش  $\varepsilon$  دارد:

$$v_t = C'_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

در مدل SSIIM1 مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  با استفاده از مدل‌های دو معادله ای  $k - \varepsilon$  استاندارد بدست می‌آیند.

### شرایط مرزی جریان

شرایط مرزی دریچلت به عنوان شرایط مرزی برای جریان‌های

می‌باشد: تغییرات غلظت در طول زمان، انتقال بار معلق، سرعت سقوط ذره، انتشار بار معلق و تغییر بار بستر. کمبود کلی معادله پیوستگی رسوب وقتی که بار بستر اضافه شود بر اساس معادله زیر بدست می‌آید:

$$\rho_s \frac{\partial c}{\partial t} + \rho_s U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + \rho_s w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial q_{b,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b,y}}{\partial y} = \rho_s \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial m}{\partial x_j} \quad (13)$$

رسوبگذاری بار بستر در دو جهت  $x$  و  $y$  اتفاق می‌افتد. برای بدست آوردن  $m$ ، معادله (13) بر روی همه سلول‌های کف و با استفاده از روش حجم کنترل انتگرال گرفته می‌شود. موقع حل معادله مذکور مقدار  $m$  نامشخص است و سرعت‌ها قبلاً بر اساس معادله سنت و نانت و معادله آشفنگی  $k - \varepsilon$  بدست آمده است. غلظت در سلول‌های کف بر اساس معادله (10)، برای بقیه سلول‌ها بر اساس معادله (11) محاسبه می‌شود. بار بستر طبق رابطه (12) بدست می‌آید. مقدار  $m$  بر چگالی رسوبات بستر تقسیم شده تا حجم رسوبگذاری در هر گام زمانی بدست آید. فرسایش و رسوبگذاری بر اساس این روش مدل می‌شوند.

ارتفاع فرم بستر ( $\Delta$ ) بر اساس معادله ون راین بدست می‌آید.

$$\frac{\Delta}{h} = 0.11 \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0.3} \left( 1 - e^{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{2\tau_c} \right]} \right) \left( 25 - \left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right] \right) \quad (14)$$

زبری موثر ( $k_s$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_s = 3d_{90} + 1.1\Delta(1 - e^{25\Delta/\lambda}) \quad (15)$$

که در آن:  $\lambda$  طول فرم بستر است که برابر  $7/3 h$  است. زبری بستر محاسبه شده در قانون دیوار برای حل معادلات رینولدز متوسط و ناویر-استوکس استفاده می‌شود.

### شرایط مرزی رسوب

غلظت رسوب در حالت تعادل از رابطه (10) برای نزدیک‌ترین سلول به کف به عنوان شرط مرزی کف در نظر گرفته می‌شود. دیگر شرط مرزی برای غلظت رسوب عبارتند از مقدار معلوم غلظت برای مزر بالادست و شرط گرادیان صفر برای سطح جریان، خروجی و دیوارهای کناری. در این تحقیق که تنها شبیه سازی فرسایش و رسوبگذاری موضعی در محل تلاقی مورد توجه است هیچ گونه تزریق رسوب لحاظ نشده است همچنین حرکت رسوب بصورت بار بستر و بار معلق در کانال‌های بالا دست تلاقی مشاهده نشد. معیار وان راین برای شروع تعلیق ذرات رسوب ( $Z < 5$ ) نیز این موضوع را به اثبات می‌رساند که حرکت رسوب به صورت بار معلق وجود ندارد:

که در آن:  $u$ : سرعت،  $u^*$ : سرعت برشی،  $k$ : ضریب ثابت معادله  $0/4$ ،  $y$ : فاصله از دیوار تا مرکز سلول و  $k_s$ : زبری است.

### معادلات حاکم بر محاسبات انتقال رسوب

مدل عددی SSIIM مقدار بار معلق را با استفاده از معادله جابجایی-پخش برای غلظت رسوب ( $c$ ) محاسبه می‌کند:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

که در آن:  $c$ : غلظت رسوب،  $w$ : سرعت سقوط ذره رسوب،  $z$ : بعد در جهت عمودی،  $\Gamma$ : ضریب دیفیوژن است که برابر با لزجت گردابی است که از معادله  $k - \varepsilon$  بدست می‌آید.

رابطه (9) روی همه سلول‌ها بجز نزدیک‌ترین سلول بستر حل می‌شود. سلول‌هایی که در آن غلظت در شرایط تعادل باشد از رابطه وان راین (17) بدست می‌آید:

$$c_{bed} = 0.015 \frac{d}{a} \frac{(\tau_b - \tau_c)^{1.5}}{\tau_c} \left( d \left( \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right)^{1/3} \right)^{0.3} \quad (10)$$

که در آن:  $d$ : قطر ذره رسوب،  $a$ : سطح مرجع،  $\tau_b$ : تنش برشی کف،  $\tau_c$ : تنش برشی بحرانی در کف برای حرکت ذره رسوب بر اساس دیاگرام شیلدز،  $\rho_s$  و  $\rho_w$ : جرم حجمی آب و رسوب،  $v$ : ویسکوزیته آب،  $g$ : شتاب گرانش و  $c_{bed}$ : غلظت بار بستر می‌باشند. مقدار  $a$  برابر با اندازه زبری یا نصف اندازه فرم بستر یا هر کدام که بزرگتر باشد. غلظت رسوب برای نزدیک ترین سلول به بستر از رابطه راس (14) میان‌یابی یا برون‌یابی می‌شود:

$$\frac{c_z}{c_{bed}} = \left( \frac{h - z}{z} - \frac{a}{h - a} \right)^z \quad (11)$$

که در آن:  $h$ : عمق آب،  $z$ : فاصله از کف تا مرکز سلول کف و  $c_z$ : غلظت رسوب در فاصله  $z$  از کف می‌باشد.

برای تعیین بار بستر نیز از رابطه وان راین استفاده می‌شود:

$$\frac{q_b}{d^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{d^{0.3} \left[ \left( \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right) \right]^{0.1}} \quad (12)$$

که در آن:  $q_b$ : بار بستر و سایر پارامترها قبلاً در رابطه (10) معرفی شده‌اند.

تغییرات کف بر اساس معادله پیوستگی رسوب برای نزدیک‌ترین سلول‌ها در کف که به آن‌ها سلول‌های کف گفته می‌شود محاسبه می‌شود. کمبود کلی پیوستگی رسوب در سلول کف جمع این تغییرات

در نظر گرفته شد. بدین ترتیب طول کانال اصلی و فرعی به ترتیب 6/2886 و 3 متر می‌باشد. کانال فرعی در 2/55 متری از بالادست کانال اصلی به آن وصل می‌شود. سیستم مختصات نیز به این صورت است: جهت مثبت x به طرف پایین دست کانال اصلی، جهت مثبت y در جهت کانال فرعی و جهت مثبت z به سمت بالا و محل مبدا مختصات در گوشه بالا دست اتصال می‌باشد. اطلاعات کامل مدل آزمایشگاهی در جدول 1 آمده است.

### نتایج

#### صحت سنجی جریان

قبل از شبیه‌سازی رسوب، توانایی مدل برای شبیه‌سازی جریان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی قبادیان (6) برای زاویه 60 درجه ارزیابی شد.

مطالعات قبلی نشان داده است که اندازه شبکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی نتایج خروجی از مدل دارد. شبکه مطلوب شبکه ای است که مقادیر خروجی از مدل وابسته به اندازه شبکه نباشد و تا حد امکان فضا و زمان کمتری از کامپیوتر را به خود اختصاص دهد. بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط بایرون و همکاران (4) بزرگ‌ترین اندازه شبکه ای که برای آن مقادیر حداکثر و حداقل سرعت، فشار و انرژی جنبشی اختلاط در محدوده 10 درصد پارامترهای بدست آمده از حل شبکه ریز قرار داشته باشند، شبکه مطلوب می‌باشد. در این تحقیق نهایتاً شبکه‌بندی (12 × 81 × 131) به ترتیب در امتداد x, y و z به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد (شکل 1). علاوه بر این ارتفاع سلول‌ها در جهت قائم متغیر در نظر گرفته شد. سلول‌های با ارتفاع کوچک‌تر نزدیک بستر انتخاب شدند. همچنین طی مراحل واسنجی عدد استریکلر که عکس ضریب زبری مانینگ است و یک پارامتر مهم ورودی به مدل می‌باشد برابر 78 انتخاب شد. به ازای شبکه بهینه و ضریب زبری اشاره شده مدل با گام زمانی یک ثانیه، تعداد تکرار داخلی 15 و شرایط جریان اشاره شده در جدول (1) اجرا شد.

$$z = \frac{w_s}{\beta k u^*} \quad (16)$$

که در آن:  $w_s$  سرعت سقوط ذره،  $\beta$  ضریبی ست که معمولاً برابر 1 در نظر گرفته می‌شود،  $k$  ثابت ون کارمن که برابر 0/4 فرض می‌شود و  $u^*$  سرعت برشی بستر است. به بیان دیگر این پارامتر اندرکنش نیروی روبه بالا (upward) ناشی از آشفتگی جریان و نیروی روبه پایین (downward) ناشی از وزن ذره را نشان می‌دهد. در این تحقیق  $z = 8/38$  محاسبه شد و طبق روابط مربوط به پارامتر تعلیق اگر  $z > 5$  باشد عملاً هیچ دانه رسوبی به صورت بار معلق مشاهده نمی‌شود.

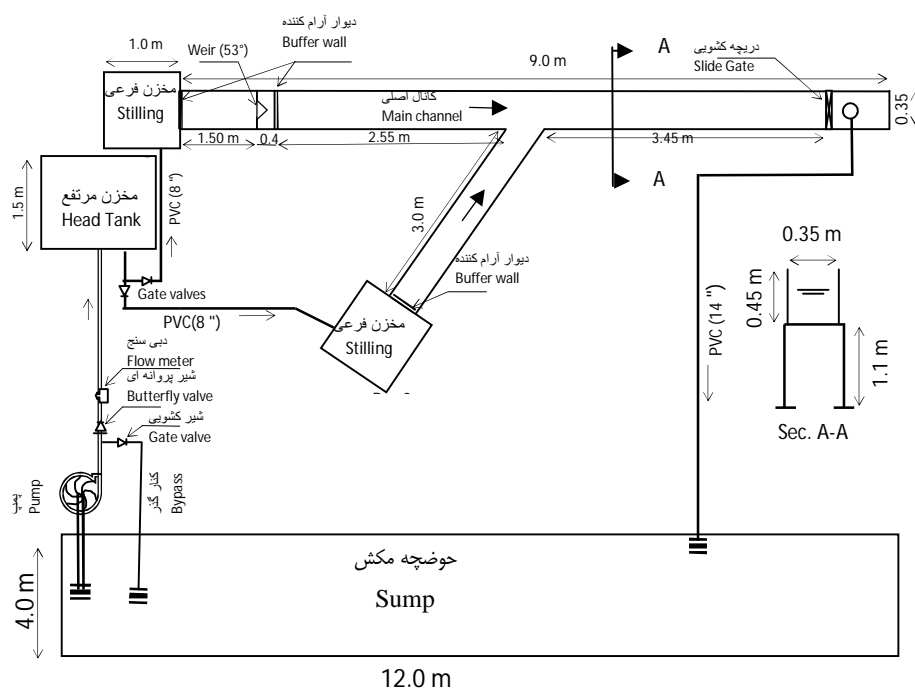
#### مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از داده‌های مدل آزمایشگاهی قبادیان (6) استفاده شد. در مدل آزمایشگاهی مذکور، فلوم اصلی به طول 9 متر و عرض 0/35 متر می‌باشد. در 2 متر اول ارتفاع مفید فلوم اصلی 0/75 متر و در بقیه طول آن 0/45 متر می‌باشد. کانال فرعی دارای طول 3 متر، پهنای 0/25 متر و ارتفاع مفید 0/45 متر می‌باشد. هر دو فلوم بدون شیب و افقی هستند. در انتهای بالا دست هر دو فلوم مخزن‌های آرام کننده به منظور کاهش انرژی جنبشی جریان ورودی نصب شده است. یک مخزن مرتفع دبی ثابت مورد نیاز برای هر دو فلوم را تامین می‌کند. دبی ورودی کل سیستم توسط یک دستگاه سرعت سنج با دقت  $\pm 0/01$  لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. دبی ورودی به کانال اصلی نیز با استفاده از سرریز مثلثی نصب شده در ابتدای آن اندازه‌گیری می‌شود. در انتهای کانال اصلی از یک دریچه کشویی به منظور تنظیم رقوم سطح آب پایاب استفاده می‌شود. کانال فرعی با زاویه 60 درجه به کانال اصلی متصل شده است. مقادیر سرعت جریان بصورت دوبعدی در محدوده تلاقی در یک شبکه 2 سانتی متری در 2 سانتی متری در اعماق مختلف از کف تا سطح جریان به فواصل 1/5 سانتی متری با دستگاه لیزری داپلر (LDV) اندازه‌گیری شده است. شکل 2 نمایی از فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی عددی کانال اصلی بعد از دیوار آرام کننده جریان

جدول 1- اطلاعات مدل آزمایشگاهی

Table 1- Data of experimental model

شرایط آزمایشگاهی Experimental condition	دبی کانال اصلی Main channel flow (lit/sec)	دبی کانال فرعی Lateral channel flow (lit/sec)	نسبت دبی Discharge ratio	عمق پایاب Tail water Depth (cm)	عرض کانال اصلی Main channel width (cm)	عرض کانال فرعی Lateral channel width (cm)	قطر متوسط ذره رسوب Grain size $D_{50}$ (mm)
جریان Flow	8.83	16.67	0.66	20	35	25	-
رسوب Sediment	10	10	0.5	12.76	35	25	1.95



شکل 2- نمایی از مدل آزمایشگاهی قبادیان (6)

Figure 2- View of the experimental model (Ghobadian[6])

### صحت سنجی رسوب

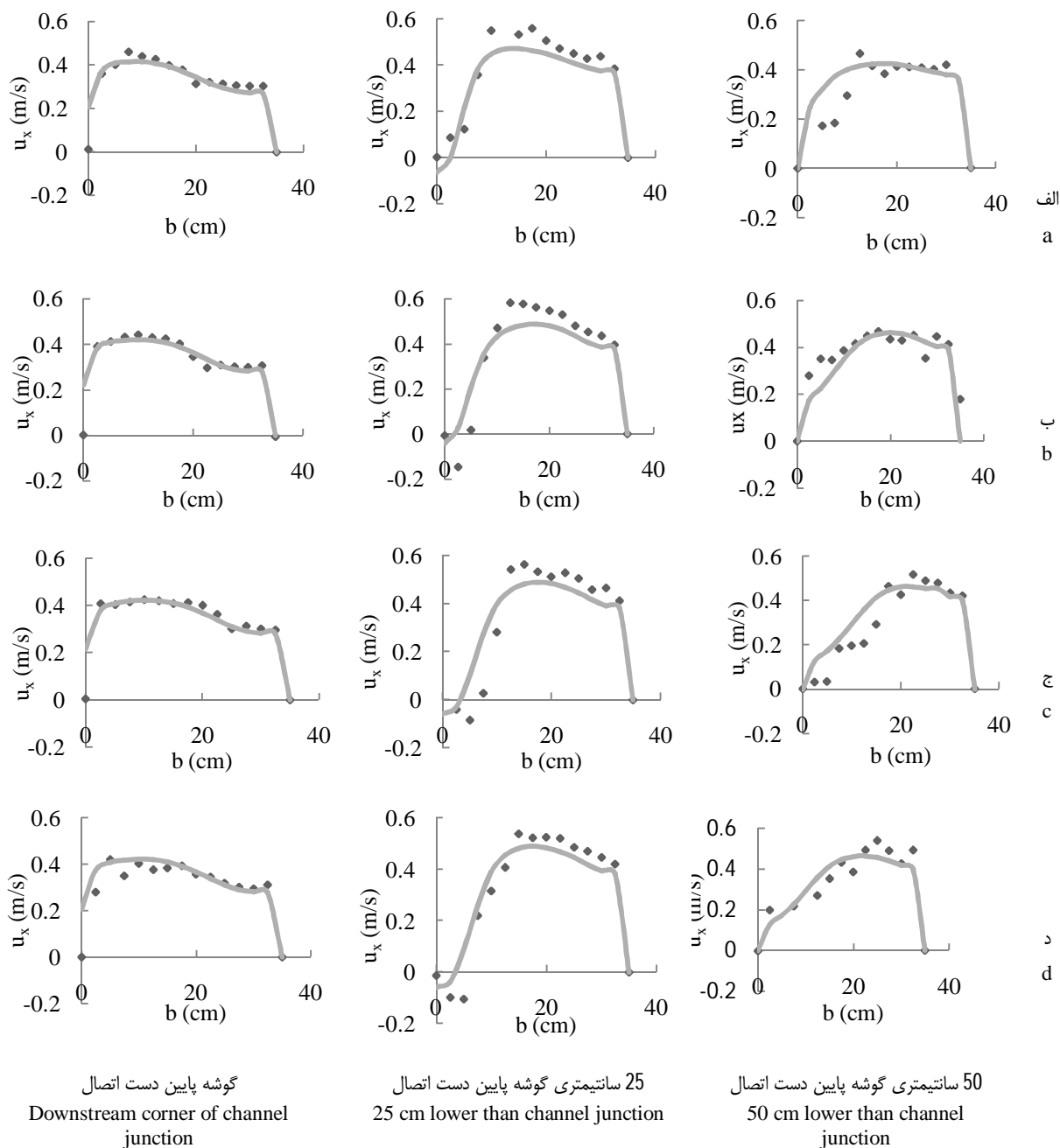
بعد از اطمینان از توانایی مدل در شبیه سازی جریان در تلاقی 60 درجه، شبیه سازی رسوب برای تلاقی مذکور انجام شد. واسنجی مدل برای شرایط رسوب نشان داد بهترین نتیجه زمانی حاصل شد که پارامتر شیلدز بحرانی  $0/04$  و زبری بستر دو برابر اندازه متوسط رسوب بستر باشد ( $k_s=2d_{50}$ ). در این حالت مدل با گام زمانی 5 ثانیه و تعداد تکرار 15 اجرا شد. نتایج نشان داد بلافاصله بعد از شروع شبیه سازی در محل اتصال عمل فرسایش با سرعت بالایی اتفاق می افتد. این عمل فرسایشی که در زمان اولیه از سرعت بالایی برخوردار است با گذشت زمان سرعت کاهشی به خود می گیرد تا به یک حالت تعادل برسد. شکل 5 رابطه عمق فرسایش نسبت به زمان را نشان می دهد. نظر به این که بعد از مدت 850 دقیقه الگوی فرسایش و رسوبگذاری به حالت تعادل رسیده است بنابراین نتایج مدل در این زمان برای مقایسه با داده های اندازه گیری شده انتخاب شد. مقایسه نتایج شبیه سازی رسوب توسط مدل با داده های اندازه گیری آزمایشگاهی نشان داد که مدل از توانایی تقریباً قابل قبولی در پیش بینی حداکثر عمق چاله فرسایشی و توانایی نسبتاً خوبی در پیش بینی ارتفاع نهایی رسوبگذاری دارد. شکل 6 الگوی کلی فرسایش و رسوبگذاری در محدوده تلاقی در کانال اصلی را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود هم در مدل عددی و هم داده های اندازه گیری یک ناحیه فرسایش در نزدیک محل ورود جریان فرعی به

در شکل 3 مقایسه پروفیل های عرضی سرعت طولی در فواصل مختلف از کف کانال اصلی و در مقاطع مشخصی در طول کانال اصلی نشان می دهد که مدل توانایی نسبتاً قابل قبولی در پیش بینی سرعت افقی دارد، هرچند که مدل اندازه ناحیه جداشدگی جریان (ناحیه ای با سرعت منفی) را تا حدودی کوچک تر از مقدار اندازه گیری نشان می دهد. این اختلاف می تواند ناشی از ضعف مدل  $k - \epsilon$  در شبیه سازی جریان در نواحی چرخشی باشد. ویراکون (18) نیز اشاره کرده است که مدل  $k - \epsilon$  در نواحی چرخشی ضعف دارد و ابعاد ناحیه چرخشی را کمتر از مقدار واقعی حدس می زند.

همچنین به منظور مقایسه کمی نتایج و بررسی دقت مدل در طی مرحله صحت سنجی مقادیر سرعت های اندازه گیری شده در مقابل مقادیر سرعت های محاسبه شده در نقاط مختلف محدوده تلاقی در شکل 4 نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر  $0/864$  و  $1/027$  بدست آمده است که نشان می دهد که مدل با دقت مناسبی توانایی شبیه سازی سرعت های اصلی جریان در محل تلاقی را دارد. جذر میانگین مربعات خطا نیز که مقدار آن برابر  $0/061$  برآورد شده است نیز همین مطلب را به اثبات می رساند. همانطور که از شکل مشخص است، بیشتر نقاط در محدود 90 درصد دقت قرار دارند.

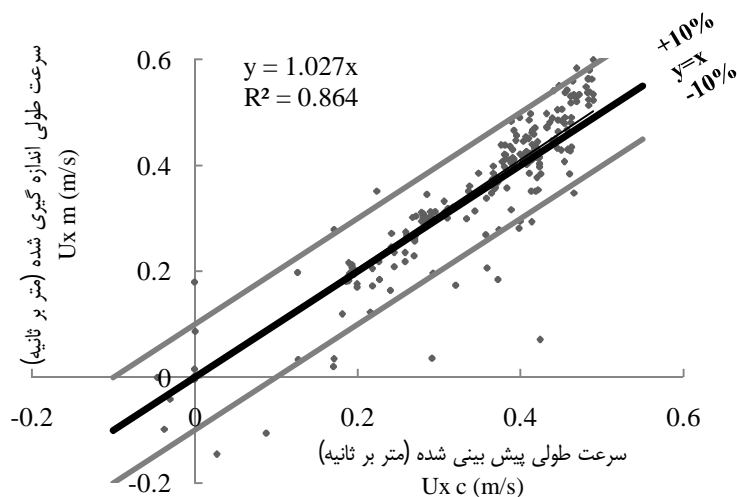
اصلی و یک ناحیه رسوبگذاری در محدوده ناحیه چرخشی جریان در پایین دست گوشه اتصال را نشان می دهند. حداکثر عمق فرسایش اندازه گیری شده (5/2- سانتی متر) با مقدار محاسبه شده توسط مدل

از نظر کلی مقداری اختلاف بین مقادیر حداکثر ارتفاع رسوبگذاری اندازه گیری شده و مقدار محاسبه شده توسط مدل وجود دارد.

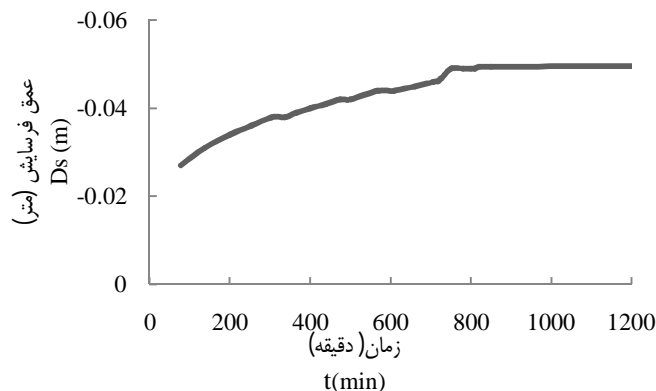


شکل 3- مقایسه پروفیل های عرضی سرعت طولی در مقاطع مختلف کانال اصلی الف) 1/5 سانتی متری از کف ب) 6/5 سانتی متری از کف ج) 16/5 سانتی متری از کف د) 20 سانتی متری از کف (نقاط توپر اندازه گیری، خط ممتد محاسباتی با مدل)

Figure 3- Comparasion of cross section longitudinal velocity profile at different sections of main channel a) 1.5 cm from bottom b) 6.5 cm from bottom c) 16.5 cm from bottom d) 20 cm from bottom (points for experimental data and lines for simulation)



شکل 4 - مقایسه سرعت‌های طولی پیش بینی شده با اندازه‌گیری شده  
Figure 4- Comparison of calculated and measured longitudinal velocities



شکل 5 - تغییرات عمق فرسایش نسبت به زمان  
Figure 5- The variation of scouring depth against time

بررسی تاثیر نسبت دبی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری پرداخته شد. در شکل 8 نتایج این بررسی آمده است. همان‌طور که از شکل مشخص می‌شود با افزایش نسبت دبی، عمق فرسایش و ارتفاع رسوبگذاری افزایش پیدا کرده است. افزایش دبی شاخه فرعی باعث افزایش سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی اغتشاش شده و همین امر باعث افزایش فرسایش و رسوبگذاری در محدوده تلاقی شده است. با افزایش نسبت دبی از 0/5 به 0/66 مقدار حداکثر عمق فرسایش از 4/7 سانتی‌متر به 5/3 سانتی‌متر افزایش یافته است در حالی که افزایش حداکثر ارتفاع تپه رسوب گذاری تنها 8 درصد بوده است. در حالت کلی افزایش نسبت دبی باعث توسعه ناحیه فرسایش و رسوب گذاری می‌شود و ناحیه فرسایش بیشتر به طرف ساحل مقابل کانال فرعی امتداد می‌یابد.

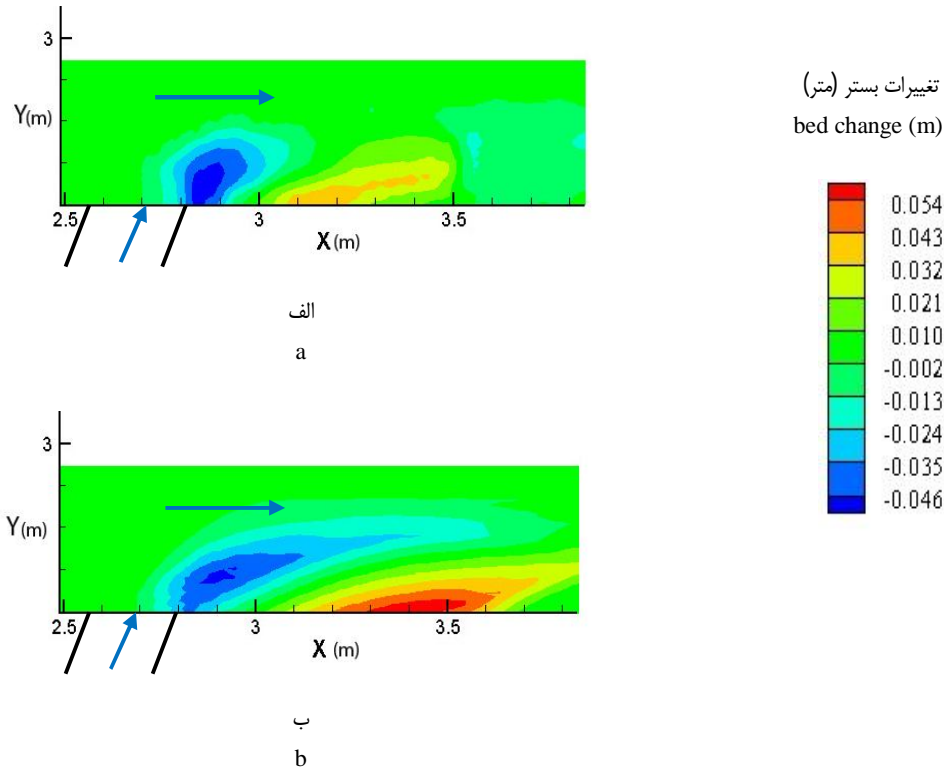
علت این اختلاف می‌تواند ناشی از ضعف رابطه وان رابن در برآورد حمل رسوب و خطای اندازه‌گیری باشد. لازم به ذکر است که نرم افزار SSIM1 تنها از رابطه مذکور برای انتقال بار بستر استفاده می‌کند.

همچنین به منظور مقایسه کمی و بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی فرسایش و رسوب، تغییرات بستر اندازه‌گیری شده در مقابل محاسبه شده در نقاط مختلف در شکل 7 نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر 0/738 و 0/878 بدست آمده است که نشان می‌دهد که مدل با دقت نسبتاً مناسبی توانایی شبیه‌سازی تغییرات بستر در محل تلاقی را دارد.

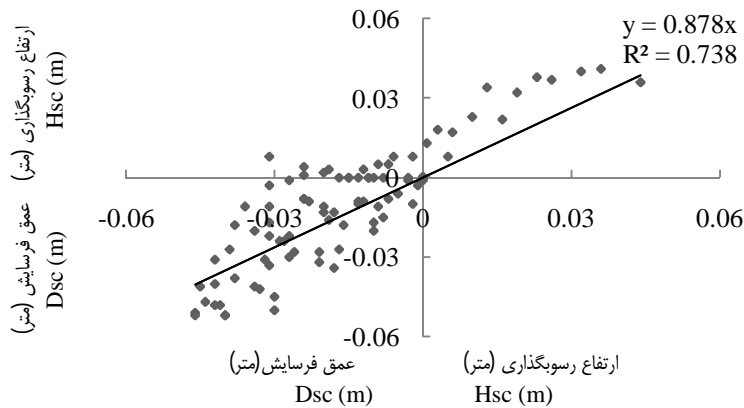
#### تأثیر نسبت دبی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری

پس از صحت‌سنجی مدل رسوب و اطمینان از نتایج آن به





شکل 6- مقایسه الگوهای فرسایش و رسوبگذاری (الف) مدل آزمایشگاهی (ب) شبیه سازی توسط مدل  
 Figure 6- Comparison of the scouring and sedimentation patterns for a) experimental data b) simulation

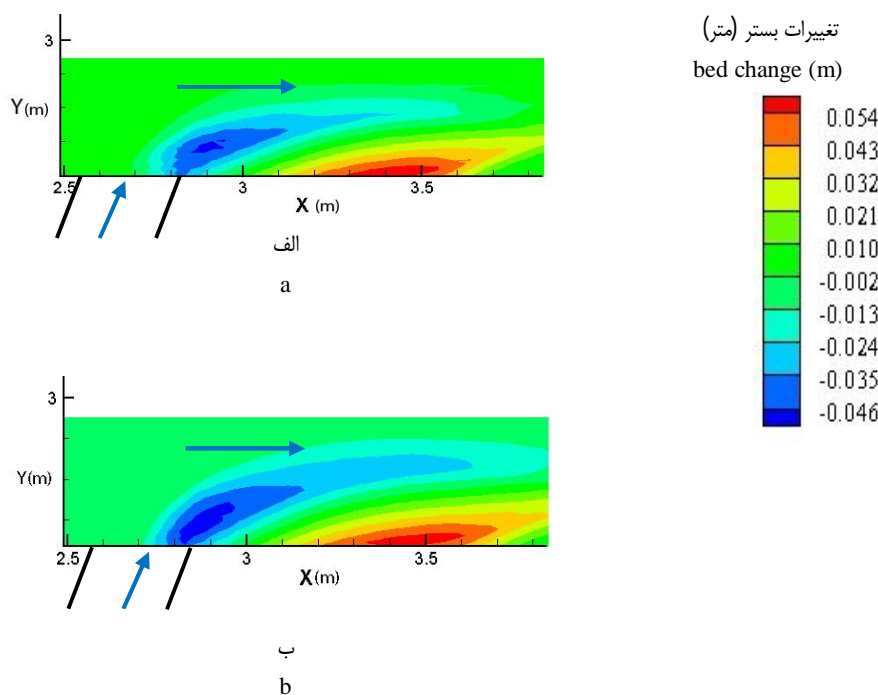


شکل 7- تغییرات بستر محاسبه شده و اندازه گیری شده  
 Figure 7- Comparison of calculated and measured bed changes

رسوبگذاری برای نسبت دبی 0/5 را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش زاویه اتصال عمق فرسایش به شدت افزایش یافته و ارتفاع رسوبگذاری تغییر کمتری داشته است ولی حجم رسوبگذاری بیشتر شده است. همچنین با افزایش زاویه اتصال فرسایش به طرف دیواره مقابل متمایل شده است.

### تأثیر زاویه بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری

بعد از شبیه سازی رسوب برای تلاقی 60 درجه ، به بررسی تأثیر زاویه تلاقی برای الگوی فرسایش و رسوبگذاری پرداخته شد. تأثیر زوایای 90 و 135 درجه نیز بر روی الگوی فرسایش و رسوبگذاری بررسی شد. شکل 9 تاثیر زاویه تلاقی بر روی الگوی فرسایش و



شکل 8 - تغییرات بستر برای نسبت دبی الف) 0/5 ب) 0/66  
Figure 8- Bed changes for discharge ratio a) 0.5 b) 0.66

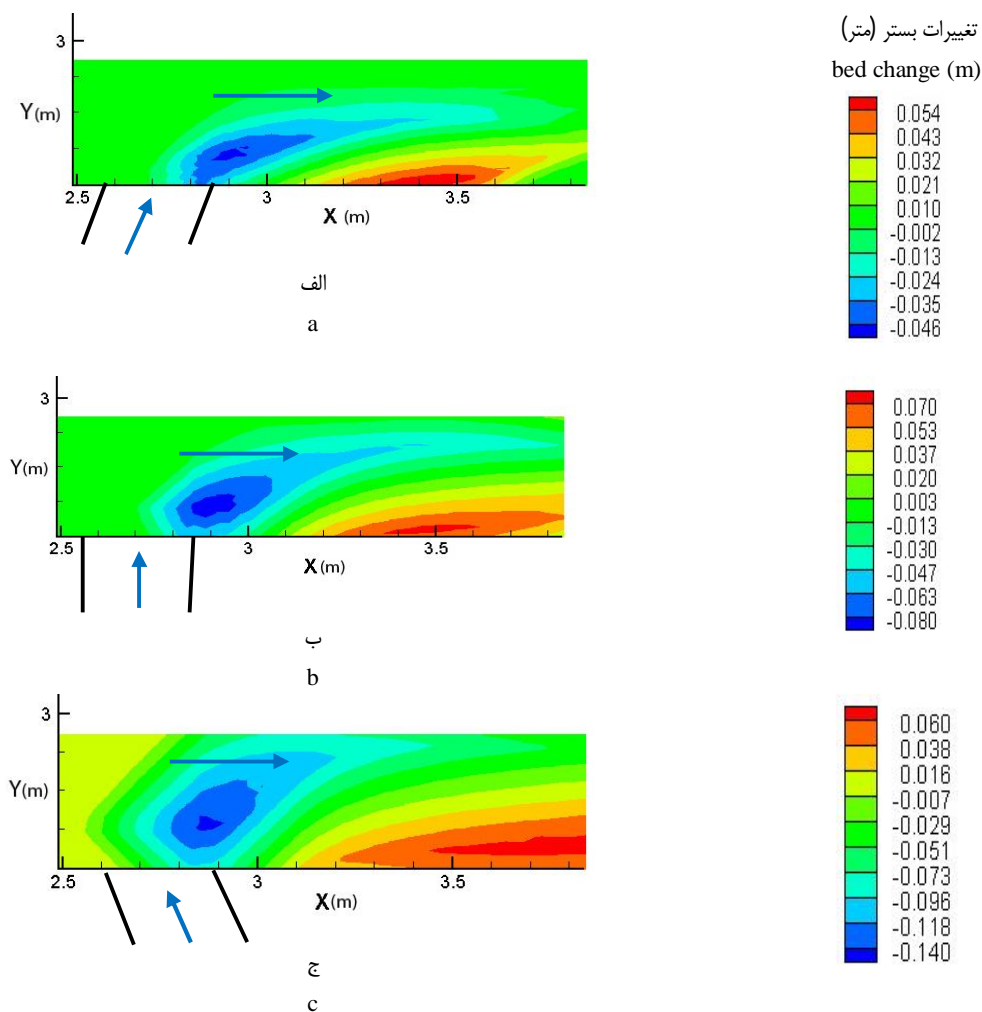
منفی) را تا حدودی کوچکتر از مقدار اندازه‌گیری نشان می‌دهد. نتایج صحت سنجی رسوب نشان داد الگوی فرسایش و رسوبگذاری بعد از مدت 850 دقیقه به حالت تعادل رسیده است. همچنین حداکثر عمق فرسایش اندازه‌گیری شده (5/2- سانتی‌متر) با مقدار محاسبه شده توسط مدل (4/7- سانتی‌متر) کمتر از 10 درصد خطا دارد. ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون بین مقادیر فرسایش و رسوبگذاری اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به ترتیب برابر 0/738 و 0/878 بدست آمده است که نشان می‌دهد که مدل با دقت نسبتاً مناسبی توانایی شبیه‌سازی تغییرات بستر در محل تلاقی را دارد.

بطور کلی نتایج نشان داد بطور کلی مدل SSIIM1 در شبیه‌سازی الگوی جریان در مقایسه با الگوی فرسایش و رسوبگذاری بهتر عمل می‌کند. بعد از صحت سنجی و اطمینان از نتایج مدل به بررسی تاثیر نسبت دبی و زاویه بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری پرداخته شد. نتایج نشان داد که نسبت دبی و عمق آبستگي با یکدیگر رابطه مستقیم دارند و با افزایش نسبت دبی عمق آبستگي افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که در یک زاویه مشخص به ازای نسبت دبی‌های 0/5 و 0/66 بین مقادیر فرسایش اختلاف وجود دارد. این اختلاف با افزایش زاویه تلاقی مشهود تر می‌باشد. به عبارتی در زوایای اتصال بزرگ‌تر تأثیر نسبت دبی بر افزایش عمق فرسایش بیشتر است.

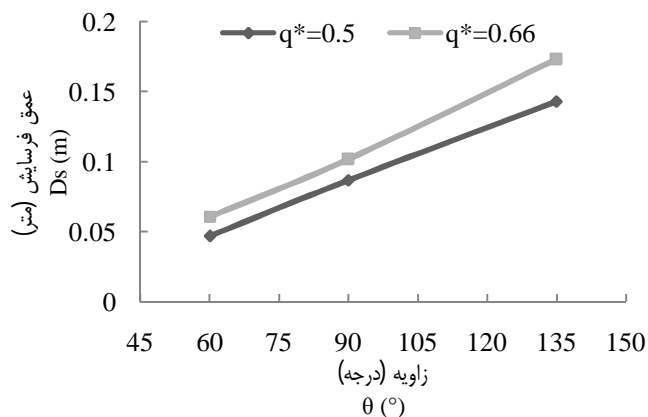
مقایسه تغییرات بستر برای نسبت دبی‌های 0/5 و 0/66 و برای زوایای مذکور در شکل 10 آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نسبت دبی و عمق آبستگي با یکدیگر رابطه مستقیم دارند و با افزایش نسبت دبی عمق آبستگي افزایش یافته است. با افزایش دبی شاخه فرعی تلاطم جریان بیشتر و ابعاد ناحیه جداشدگی افزایش می‌یابد. همین امر سبب آشفستگی و فرسایش بیشتر بستر می‌شود. در یک زاویه مشخص به ازای نسبت دبی‌های 0/5 و 0/66 بین مقادیر حداکثر عمق فرسایش اختلاف وجود دارد. این اختلاف با افزایش زاویه تلاقی مشهود تر می‌باشد. زاویه تلاقی نیز یکی از پارامترهایی است که باعث افزایش ابعاد ناحیه جداشدگی می‌شود، کاهش پهنای موثر عبور جریان و نهایتاً افزایش تنش برشی بستر که به تبع آن افزایش فرسایش را به دنبال دارد. همچنین آبستگي عمیق‌تر در نسبت دبی بالاتر برای هر زاویه اتصال اتفاق می‌افتد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق جریان و رسوب در یک تلاقی 60 درجه با استفاده از مدل عددی SSIIM1 شبیه‌سازی شد. نتایج صحت سنجی جریان نشان داد که مدل توانایی خوبی در پیش بینی سرعت‌های افقی جریان در اعماق مختلف و در مقاطع عرضی مشخصی را دارد، هرچند که مدل اندازه ناحیه جداشدگی جریان (ناحیه ای با سرعت



شکل 9- تغییرات بستر در نسبت دبی  $q^* = 0.5$  (برای زوایای اتصال الف) 60 درجه ب) 90 درجه ج) 135 درجه  
 Figure 9- Bed changes for discharge ratio  $q^* = 0.5$  against confluence angle) 60° b) 90° c) 135°



شکل 10- تاثیر همزمان نسبت دبی و زاویه اتصال بر عمق آبشستگی  
 Figure 10- The effect of discharge ratio and confluence angle on scouring depth

- 1- Balochi B., and Shafaei-Bajestan M. 2012. Investigation of the effect of densimetric Froude number and sediment discharge on maximum scour depth at river confluences. Proceedings of the 5th national conference of watershed and soil & water resource management, Kerman, Iran. (in Persian)
- 2- Best J.L., and Reid I. 1984. Separation zone at open – channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 100(11): 1588–1594.
- 3- Best J.L. (1988). Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*, 35(3): 481–498.
- 4- Biron P.M., Ramamurthy A.S., and Han S. 2004. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 130(3): 243 – 253.
- 5- Borghei S.M., and Sahebari Jabbari A. 2010. Local scour at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4): 538–542.
- 6- Ghobadian R. 2007. Investigation of Flow, Scouring and Sedimentation at River- Channel Confluences. Ph.d thesis, Shahid Chamran University, Iran. (in Persian)
- 7- Ghobadian R., Shafaei-Bajestan M., and Azari A. 2008. Effects of Confluence Angle on Erosion and Sedimentation Pattern at River Confluence by Physical Model. *Agricultural Research*, 8(4):107-122. (in Persian with English abstract)
- 8- Gurram S.K., Karki K.S., and Hager W.H. 1997. Subcritical junction flow. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 123(5): 447–455.
- 9- Hemati, M. and Shafaei-Bajestan M. 2008. Investigation of scouring depth at bed discordance river confluence. Proceedings of the 4th national conference of civil engineering, Tehran, Iran. (in Persian)
- 10- Jabari Sahebari A., Borghei S.M. 2008. Experimental investigation of sedimentation and scouring pattern at channel junction. Proceedings of the 4th national conference of civil engineering, Tehran, Iran. (in Persian)
- 11- Mohamadi S. 2007. Investigation of the effect of downstream curved edge on sedimentation pattern at river confluence. Ms.c thesis, Shahid Chamran University, Iran. (in Persian )
- 12- Mosley M.P. 1976. An experimental study of channel confluences. *Journal. Of Geology*, 84: 535 – 562.
- 13- Rostami M., Habibi S., and Farahmand A. 2013. Numerical investigation of flow and sediment patterns at river confluences. Proceedings of the 9th International conference of river engineering, Ahvaz, Iran. (in Persian)
- 14- Rouse H. 1937. Modern concepts of mechanics of fluid turbulence. *Transaction ASCE*, 102(1965).
- 15- Taylor E.H. 1944. Flow characteristics at rectangular open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 109: 893–912.
- 16- Tong-huan L., CHEN L., and Beiling F. 2012. Experimental study on flow pattern and sediment transportation at a 90° open-channel confluence. *International Journal of Sediment Research*, 27(2): 178–187.
- 17- Van rijn L.C. 1978. Mathematical modeling of morphological process in case of suspended sediment transport. Ph.d thesis Delft University of technology.
- 18- Weerakoon S.B., Kawahara Y., and Tamia N. 1991. Three-dimensional flow structure in channel confluences of rectangular section. *Proc. 24th IAHR*.

## The Effect of Discharge Ratio and Confluence Angle on Local Scouring at 60 Degree Erodible Open Channel with SSIIM1 Model

R. Ghobadian<sup>1\*</sup> - M. Basiri<sup>2</sup>

Received: 18-07-2014

Accepted: 06-12-2014

**Introduction:** Flow and sediment transport has an important role in entrance deformation of open channel junctions. As water moved through a drainage network, it forced to converge at confluence. Due to increasing of water discharge and collision of converging flows, a complex three-dimensional and most highly turbulent location were occurred in the vicinity of the junction. Therefore a deep scour hole and point bar has developed in this area that caused the change in rivers morphology. Despite the large amount of research carried out on flow patterns in river confluences, only a few researches have focused on sediment transport.

**Materials and methods:** In this research three dimensional model (SSIIM1) was used to study of flow pattern and sediment and erosion pattern at 60 degree Junction. the Navier-Stokes equation of turbulent flow in a general three-dimensional geometry are solved to obtain the water velocity:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P\delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad , \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

Where  $U$  is average velocity,  $\rho$  is density of water,  $P$  is pressure, the Kronecker delta, which is 1 if  $i$  is equal to  $j$  and 0 otherwise and general space dimension. The last term is Reynolds stress, often modeled with the following equation:

$$\overline{\rho u_i u_j} = \rho \nu_t \left( \frac{\delta U_i}{\delta x_j} + \frac{\delta U_j}{\delta x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2)$$

Where  $\nu_t$  and  $k$  are eddy viscosity and turbulent kinetic energy respectively. Van Rijn's relations were used to calculate sediment suspended and bed load transport.

Dirichlet and zero gradients boundary conditions were used at inflow and outflow boundary respectively. fixed-lid approach was used to computed free surface by using zero gradient for all variables. The wall law for rough boundaries was also used as a boundary condition for bed and wall.

In equilibrium situation, The sediment concentration for the cell closet to the bed was specified as the bed boundary condition. Specified value was used for sediment concentration of other boundary conditions at upstream boundary and zero gradients for the water surface, outlet, and the sides. the only simulation of local scouring and sedimentation at confluence area was also considered.

The SSIIM1 model used structured grid and computer program to provide the required mesh and the experimental data was applied to validated model.

The experimental setup consisted of a main flume 9 m long with 75 cm depth for the first 2 m and 45 cm for remaining section and 35 cm wide, and a lateral flume 3m long, 45cm depth and 25 wide. Both flumes had a horizontal slope. An 11cm layer of uniform sediment ( $D_{50} = 1.95$  mm) was also laid on both channel beds.

**Results and discussion:** The results showed that the ability of model is relatively good to predict the position of the erosion and sedimentation pattern. The values of maximum scour depth for experimental test and simulation were 0.052 and 0.047 m respectively. However the maximum error to predict scouring depth value was about 10%. This difference could be due to the weakness of Van Rijn's equation to sediment transport and probably measured error. It must be noted that SSIIM1 only used the Van Rijn's equation for bed load transport.

The result Also showed that simulation and experimental test were similar and no sediment transport occurred in the tributary and main channel before the confluence. To investigate the effect of angle 60, 90 and 135 degrees and also discharge ratios of 0.5 and 0.66, the model was applied. A direct relationship was observed

1, 2- Associate Professor and Former Ms.c Student of Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Razi University, Kermanshah

(\* - Corresponding Author Email: r\_ghobadian@razi.ac.ir)

between discharge ratio and scouring depth . There was a difference between scouring of discharge ratio 0.5 and 0.66 on a specified angle and this difference was more obvious with increasing confluence angle. Figure 1 showed the effect of discharge and confluence angle on scouring depth.

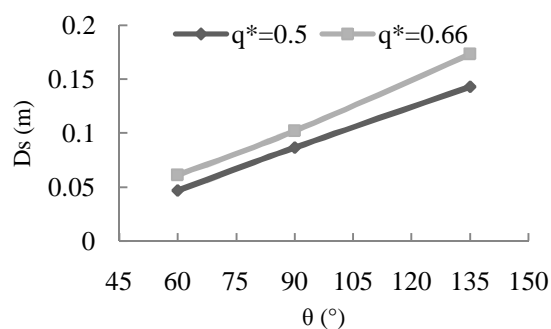


Figure 1- The effect of discharge ratio and confluence angle on scouring depth

**Keywords:** Erodible open channel, Erosion hole, Sedimentation bar, SSIIM1