نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۸ شماره ۴ صفحه‌های ۲۹ تا ۴۲ / سال ۱۳۹۷

تأثیر دانه‌بندی مواد بستر بر مسیر انتقال رسوب و الگوی فرسایش – رسوب‌گذاری در محل تلاقی رودخانه

رسول قبادیان[1]*، سارا قنبری[2]

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش:۹۷/۹/۲۵

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه رازی کرمانشاه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی:rsghobadian@gmail.com

چکیده

دانه‌بندی رسوبات موجود در بستر رودخانه می‌تواند نقش به‌سزائی در میزان فرسایش، رسوب‌گذاری و تغییرات مورفولوژی بستر و در نتیجه پایداری کناره رودخانه داشته باشد. هیدرولیک پیچیده جریان از یک سو و تغییرات ترکیبات مواد رسوبی کف رودخانه به‌صورت ذرات فرسایش یافته و یا ته‌نشین شده از سوی دیگر باعث ایجاد تغییراتی در الگوی فرسایش و رسوب در محل تلاقی رودخانه‌ها می‌شود. بررسی‌های موجود نشان می‌دهد، مطالعات آزمایشگاهی محدودی در این زمینه گرفته است. استفاده از مدل‌های عددی به‌رغم برخی محدودیت‌ها می‌توانند ابزاری مناسب و اقتصادی در این خصوص باشد. از این‌رو در تحقیق حاضر پس از واسنجی مدل عددی SSIIM1 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی دو کانال مستطیلی به زاویه اتصال ۶۰درجه، به بررسی تأثیر نحوه دانه‌بندی مواد بستر بر روی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پرداخته شد. برای این منظور چهار نوع دانه‌بندی با D_{50} یکسان ولی با انحراف معیار(σ_g) متفاوت در نظر گرفته شد و نتایج آنها به هم دیگر وبا دانه‌بندی یکنواخت مقایسه گردید. نتایج تحقیق حاکی از آن است که هرچه مواد بستر σ_g بزرگتری داشته باشند مقدار بیشینه عمق فرسایش کم‌تر می‌شود و موقعیت آن به گوشه پایین‌دست اتصال نزدیک‌تر است. هم‌چنین بیشینه ارتفاع رسوب‌گذاری با افزایش انحراف معیار افزایش می‌یابد. در ادامه تغییرات عرضی غلظت رسوب و مسیرهای انتقال رسوب بیشینه شناسایی شد.

واژه‌های کلیدی: الگوی فرسایش و رسوب، تلاقی رودخانه، دانه‌بندی غیریکنواخت، مدل SSIIM1

Impact of Bed Materials Grain Size Distribution on Sediment Transport Path and Erosion- Sedimentation Pattern at the River Confluence

R Ghobadian[1*], S Ghanbari[2]

Received: 15 September 2015 Accepted: 21 May 2016
[1-]Associate Prof., Dept. of Water Engin., Razi University, Kermanshah.
[2.] M.Sc Student of Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran
*Corresponding Author, Email: rsghobadian@gmail.com

Abstract

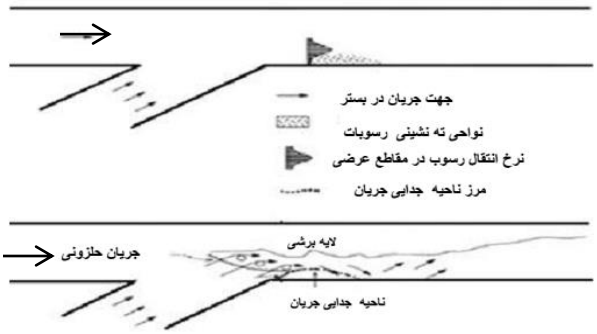
The grain size distribution of the riverbed materials plays an important role in the erosion, sedimentation, change of river morphology and riverbank stability. The complex hydraulic flow on the one hand and the changes in the composition of the sediment of the riverbed as the eroded or deposited particles on the other hand causes changes in the sedimentation and erosion patterns at the river confluences. The literature review shows that few experimental studies have been conducted on this topic. Although applying numerical models are entwined with some limitations, they could be used as the suitable and economical tools. In the present study, firstly the SSIIM1 model was calibrated by the measured data at the confluence of the two rectangular open channels with the crossing angle of 60° and then, the impact of riverbed materials' grain size distribution on sedimentation and erosion patterns was studied. In this regard, four types of grain size distribution with the same D_{50} and different standard deviation (σ_g) values were applied and their results were compared with each other and with uniform distribution, as well. The results illustrated that the maximum depth of erosion was decreased by increasing σ_g and its spatial location was closer to the downstream corner of channel confluences. Moreover, the maximum height of the sedimentation increased with increasing σ_g. In the following, the spanwise changes in sediment concentrations and paths of maximum sediment transport have been detected.

Keywords: Erosion and sedimentation pattern, River confluence, Bed material grain size distribution, *SSIIM1* Model

مقدمه

در محل تلاقی کانال‌ها جریان عبوری از محور مرکزی تلاقی پس از برخورد با یکدیگر به سمت بستر منحرف می‌شوند و این جریان پس از برخورد با بستر باعث جابه‌جایی ذرات توسط جریان و در نتیجه آبشستگی اتفاق می‌افتد. الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری و همچنین نرخ تقریبی انتقال رسوب در شکل۱ ارائه شده است. تیلور(۱۹۴۴)، به‌عنوان اولین محقق به‌صورت آزمایشگاهی و تئوری به بررسی تلاقی آبراهه‌ها با زاویه‌های °135 و °45 پرداخت. این محقق مدلی یک-بعدی برای محاسبه نسبت بین عمق‌های جریان بالادست و پایین‌دست محل تلاقی با صرفنظر از اثرات اصطکاک و با فرض برابری عمق جریان در آبراهه‌های بالادست ارایه داد. با در نظر گرفتن همین فرضیات وبر و گریتد(۱۹۶۶)، آزمایش‌هایی بر روی تلاقی کانال‌های روباز با زوایه‌های اتصال °30، °60 و °90 انجام دادند ومدل پیشنهادی تیلور(۱۹۴۴) را اصلاح نمودند. موسلی (۱۹۷۶)، با انجام آزمایش در یک فلوم کوچک آزمایشگاهی، نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی به دبی کل رسوبی بستگی دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش بارکل رسوب بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. بالاچاندر و کلز(۱۹۹۸)، تغییرات زمانی آبشستگی موضعی بستر با دانه‌بندی یکنواخت را مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که بیشینه عمق آبشستگی به صورت یک رابطه نمایی با زمان تغییر می‌کند. بست(۱۹۸۸) اثر نسبت دبی کانال فرعی به اصلی و زاویه اتصال را بر مورفولوژی بستر محل تلاقی مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که با افزایش زاویه اتصال و نسبت دبی نفوذ دماغه

آبشستگی کانال اصلی به داخل اتصال کاهش می‌یابد.آبشستگی در اثر اندرکنش شرایط جریان و حرکت مصالح بسترهای فرسایش پذیر صورت می‌گیرد. مصالح دانه‌ایی و سست توسط جریان آب سریع‌تر فرسایش می‌یابند در صورتی که مصالح چسبنده مقاومت بیشتری در مقابل فرسایش از خود نشان می‌دهند (ملویل و چیو ۱۹۹۹).



شکل ۱- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در محل تلاقی.

تونگ هوان و همکاران(۲۰۱۵)، با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی به مطالعه الگوی جریان و رسوب‌گذاری در یک تلاقی ۹۰ درجه تحت نسبت دبی‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی که آب شاخه فرعی صاف و زلال باشد، بیشینه آبشستگی موضعی در نزدیکی ناحیه لایه‌های برشی پایین دست تلاقی اتفاق می افتد. گایلن- لودنا و همکاران(۲۰۱۵) با استفاده از مدل آزمایشگاهی توسعه فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی کانال‌های روباز شیب‌دارغیرهم‌کف را بررسی نمودند. درآزمایش گایلن-لودنا و همکاران(۲۰۱۵) تزریق رسوب غیریکنواخت متفاوت از بالادست هر دو کانال اصلی و فرعی انجام شد. پس از رسیدن به تعادل، بررسی توزیع مکانی دانه‌بندی مواد بستر نشان داد بین مواد بستری که از کانال فرعی می‌آیند با آن‌هایی که از کانال اصلی به محل تلاقی می‌رسند جداشدگی رخ داده است. شیندفسل و همکاران(۲۰۱۵-الف) تأثیر شکل مقطع کانال را بر الگوی جریان در محل تلاقی ۹۰ درجه را با مدل OpenFOAM بررسی کردند. نتایج شیندفسل و همکاران(۲۰۱۵) نشان داد موقعیت لایه اختلاط بین جریان‌های ورودی و لایه برشی بین ناحیه جداشدگی و مقطع انقباض جریان با تغییر شکل مقطع کانال تغییر می کند. در تحقیقی دیگر شیندفسل و همکاران(۲۰۱۵-ب) در شرایطی که دبی کانال فرعی غالب و بیش از ۹۰ درصد دبی کل باشد، الگوی جریان در محل تلاقی کانال‌های روباز با بستر ثابت و زاویه اتصال ۹۰ درجه را بررسی کردند. نتایج شیندفسل و همکاران(۲۰۱۵) نشان داد جریان کانال فرعی خود را به ساحل مقابل می‌رساند و یک ناحیه چرخشی درجریان کانال اصلی بالادست تلاقی ایجاد می‌کند که خود باعث تغییر شدید در توزیع سرعت می‌شود. لیو وهمکاران(۲۰۱۵) انتقال رسوب و مورفولوژی بستر در محل تلاقی کانال با زوایای مختلف اتصال و نسبت‌های دبی مختلف توسط یک سری فلوم آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که نسبت رسوب انتقال یافته با افزایش نسبت دبی و زایه تلاقی افزایش می‌یابد.

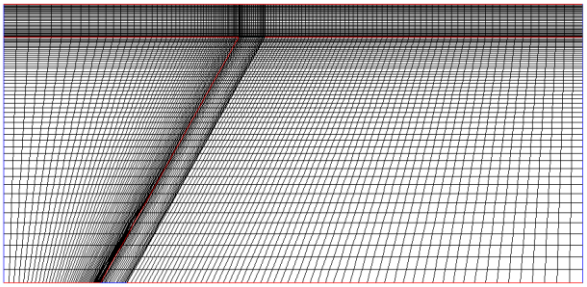
قبادیان و بجستان(۲۰۰۷)، به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و رسوب در محل تلاقی کانال‌ها پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که بیشینه عمق فرسایش در محل تلاقی رخ می‌دهد و با افزایش عدد فرود ذره در پایین‌دست وهم‌چنین افزایش نسبت دبی عمق چاله فرسایشی افزایش می‌یابد. برقعی و همکاران(۱۳۸۱) با بررسی الگوی رسوب و فرسایش روی یک اتصال ۹۰ درجه نشان دادند که بیشینه عمق آبشستگی در ابتدای ناحیه جداشدگی جریان اتفاق می‌افتد و بیشینه عمق آبشستگی با کاهش قطر متوسط مصالح بستر، افزایش می‌یابد. محمدی(۱۳۹۰)، به بررسی تأثیر گردشدگی لبه اتصال در محل تلاقی بر روی الگوی رسوب‌گذاری پرداخت. نتایج نشان داد با افزایش نسبت دبی و عدد فرود ذره مقدار بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. بلوچی (۱۳۹۱)، به منظور بررسی تأثیر آورد رسوب بر الگوی رسوب در محل تلاقی رودخانه‌ها، آزمایش‌هایی را انجام داد. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که در شرایط آب زلال گسترش چاله فرسایشی بعد از گذشت مدت زمانی به بیشینه خود می‌رسد و ثابت می‌گردد. اما در حالت بستر متحرک و در تمامی آورد رسوب‌ها، بیشینه عمق آبشستگی بعد از گذشت مدت زمانی به طور

متناوب کاهش و افزایش می‌یابد. موسوی وهمکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل عددی CCHE2D نشان دادند که عمده فرسایش رخ داده در کانال اصلی مربوط به محدوده تلاقی وپایین دست آن می‌باشد که به‌سمت کناره مقابل محل تلاقی تمایل دارد. عدیوی و همکاران (۱۳۹۳) با مطالعه آزمایشگاهی پایداری مصالح سنگچین بستر در محل تلاقی رودخانه ها رابطه ای را برای برآورد عدد پایداری استخراج کردند. نتایج آنها نشان داد با افزایش نسبت دبی و کاهش اندازه سنگچین عدد پایداری کاهش می یابد.

با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی و به‌ویژه مطالعه عددی اندکی که در خصوص تغییر دانه‌بندی مصالح بستر روی الگوی فرسایش وآبشستگی در محل تلاقی رودخانه‌ها انجام شده است، در تحقیق حاضر با بکارگیری مدل عددی SSIIM1 در شبیه سازی رسوب در تلاقی ۶۰ درجه به تأثیر غیریکنواختی دانه‌بندی رسوبات بستر بر آبشستگی موضعی در محدوده تلاقی پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

هندسه میدان مورد مطالعه که در شکل ۲ نشان داده شده، به‌گونه‌ای می‌باشد که در نواحی نزدیک به دیواره گرادیان‌ها شدیدتر می‌باشد (به منظور شبیه‌سازی دقیق-تر) 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 حاضر فایل Koordina توسط برنامه‌ای به زبان VB برای مدل تهیه شده است.



شکل ۲- مش ساخته شده برای محدوده مورد مطالعه.

در مدل مذکور معادلات ناویراستوکس برای جریان آشفته در یک فضای سه‌بعدی به‌منظور محاسبه سرعت جریان با روش حجم محدود، منفصل و حل می‌شوند:

$$\frac{\partial U_j}{\partial X_j}=0 \qquad [۱]$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(-P\delta_{ij}-\rho\overline{u_i u_j})$$
$$j=1,2,3 \qquad [۲]$$

که در آن U سرعت متوسط، ρ وزن واحد حجم آب، P فشار، δ_{ij} دلتای کرونکر است که اگر $i=j$ باشد برابر است با یک و در غیر این صورت معادل صفر است و x= بعد عمومی مسافت است. آخرین جمله در معادله۲ تنش رینولدز است که اغلب باتقریب بوزینسک مدل می شود:

$$\rho\overline{u_i u_j}=\rho\upsilon_t\left(\frac{\delta U_i}{\partial x_j}+\frac{\delta U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho.k.\delta_{ij} \qquad [۳]$$

که در آن υ_t لزجت گردابی و k انرژی جنبشی اغتشاش است. لزجت گردابی بستگی به انرژی جنبشی اغتشاش k و اتلاف اغتشاش ε دارد:

$$\upsilon_t=C'_\mu\frac{K^2}{\varepsilon} \qquad [۴]$$

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

شرایط مرزی جریان

شرایط مرزی دریچلت به‌عنوان شرایط مرزی برای جریان‌های ورودی در نظر گرفته شده است. این شرایط معمولاً از یک مدل اغتشاش ساده $(\nu_t=0.11u^*h)$ یا $(\nu_t=0.067u^*h)$ برای تعیین لزجت گردابی در مقطع ورودی استفاده می‌شود.

در مرز خروجی شرایط گرادیان صفر برای تمام پارامترها به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. همچنین از قانون دیوار برای مرزهای زبر به عنوان شرط مرزی در بستر و دیوارها استفاده شد.

معادلات حاکم بر انتقال رسوب

مدل عددی SSIIM1 مقدار بار معلق را با استفاده از معادله جابجایی‌پخش برای غلظت رسوب (c) محاسبه می‌کند.

$$\frac{\partial c}{\partial t}+U_j\frac{\partial c}{\partial x_j}+w\frac{\partial c}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial c}{\partial x_j}\right) \quad [۵]$$

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

رابطه ۵ روی همه سلول‌ها بجز نزدیک‌ترین سلول بستر حل می‌شود. سلول‌هایی که در آن غلظت در شرایط تعادل باشد از رابطه وان‌راین بدست می‌آید:

$$c_{bed}=0.015\frac{d}{a}\frac{\left(\frac{\tau_b-\tau_c}{\tau_c}\right)^{1.5}}{\left(d\left(\frac{(\rho_s-\rho_w)g}{\rho_w\nu^2}\right)^{1/3}\right)^{0.3}} \quad [۶]$$

که در آن: d قطر ذره رسوب، a سطح مرجع، τ_b تنش برشی کف، τ_c تنش برشی بحرانی در کف برای حرکت ذره رسوب بر اساس دیاگرام شیلدز، ρ_w و ρ_s جرم حجمی آب و رسوب، υ 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 نزدیک‌ترین سلول به بستر از رابطه راس ۷ میان‌یابی یا برون‌یابی می‌شود:

$$\frac{c_z}{c_{bed}}=\left(\frac{h-z}{z}-\frac{a}{h-a}\right)^z \quad [۷]$$

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

برای محاسبه بار بستر نیز از رابطه وان‌راین استفاده می شود:

$$\frac{q_b}{d^{1.5}\sqrt{\frac{(\rho_s-\rho_w)g}{\rho_w}}}=0.053\frac{\left[\frac{\tau-\tau_c}{\tau_c}\right]^{1.5}}{d^{0.3}\left[\left(\frac{(\rho_s-\rho_w)}{\rho_w\nu^2}\right)\right]^{0.1}} \quad [۸]$$

که در آن: q_b بار بستر و سایر پارامترها قبلاً در رابطه ۵ معرفی شده‌اند.

تغییرات کف بر اساس معادله پیوستگی رسوب برای نزدیک‌ترین سلول‌ها در کف که به آن‌ها سلول‌های کف گفته می‌شود محاسبه می‌شود. کاهش کلی پیوستگی رسوب (m) در یک سلول کف بر اساس معادله زیر بدست می‌آید:

$$\rho_s\frac{\partial c}{\partial t}+\rho_s U_j\frac{\partial c}{\partial x_j}+\rho_s W_s\frac{\partial c}{\partial x_3}+\frac{\partial q_{b,x_1}}{\partial x_1}+\frac{\partial q_{b,x_2}}{\partial x_2}= \quad [۹]$$

$$\rho_s\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial c}{\partial x_j}\right)+\frac{\partial m}{\partial x_j} \qquad j=1,2,3$$

برای بدست آوردن m ، از معادله ۹ بر روی همه سلول-های کف و با استفاده از روش حجم کنترل انتگرال گرفته می‌شود. نهایتاً با تقسیم m بر ρ_s تغییر حجم رسوب سلول کف در هر گام زمانی محاسبه می‌شود.

شرایط مرزی رسوب

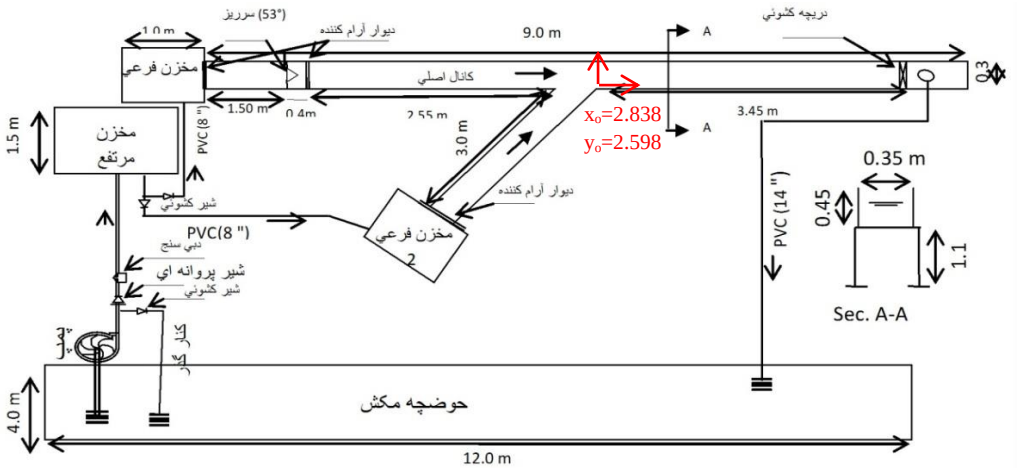
غلظت رسوب در حالت تعادل از رابطه ۸ برای نزدیک-ترین سلول به کف به عنوان شرط مرزی کف در نظر گرفته شد. دیگر شرایط مرزی برای رسوب عبارتند از مقدار معلوم غلظت برای مرز بالادست و شرط گرادیان صفر برای سطح جریان، خروجی و دیوارهای کناری. در این تحقیق شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری موضعی در محل تلاقی مورد توجه بوده و هیچ گونه تزریق رسوب از مرزهای بالادست لحاظ نشده است.

مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از داده‌های مدل آزمایشگاهی قبادیان(۱۳۸۵) که در شکل ۳ آورده شده است، استفاده شد. در مدل آزمایشگاهی مذکور، فلوم اصلی به طول ۹ متر و عرض ۰/۳۵ متر می‌باشد. در ۲ متر اول ارتفاع مفید فلوم اصلی ۰/۷۵ متر و در بقیه طول آن ۰/۴۵ متر می‌باشد. کانال فرعی دارای طول ۳ متر ، پهنای ۰/۲۵ متر و ارتفاع مفید ۰/۴۵ متر می‌باشد. هر دو فلوم بدون شیب

و افقی هستند. دبی ورودی کل سیستم توسط یک دستگاه سرعت سنج با دقت ۰/۰۱ ± لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. کانال فرعی با زاویه ۶۰ درجه به کانال اصلی متصل شده است.

در شبیه سازی عددی کانال اصلی بعد از دیوار آرام کننده جریان در نظر گرفته شد. بدین‌ترتیب طول کانال اصلی و فرعی به‌ترتیب ۶/۲۸۸۶ و ۳ متر می‌باشد. کانال فرعی در ۲/۵۵ متری از بالادست کانال اصلی به آن وصل می‌شود.



شکل۳- نمایی از مدل آزمایشگاهی قبادیان(۱۳۸۵).

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 پایین‌دست اتصال می باشد.

نتایج و بحث

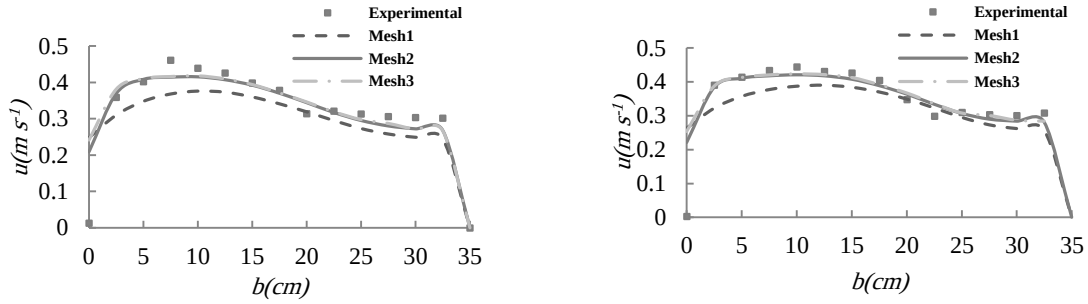
واسنجی مدل جریان

اطلاعات استفاده شده در مرحله واسنجی مدل جریان در جدول۱ ارائه شده است. مطالعات قبلی نشان داده است که اندازه شبکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی نتایج خروجی از مدل دارد. شبکه مطلوب شبکه‌ای است که مقادیر خروجی از مدل وابسته به اندازه شبکه نباشد. بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط بایرون و همکاران (۲۰۰۴) بزرگ‌ترین اندازه شبکه‌ای که برای آن مقادیر بیشینه و کمینه سرعت، فشار و انرژی جنبشی اختلاط در محدوده ۱۰ درصد پارامترهای بدست آمده از حل شبکه ریز قرار داشته باشند، شبکه مطلوب می‌باشد. در این تحقیق به منظور تعیین شبکه مطلوب تحلیل حساسیت اندازه شبکه برای شبکه ۱ (۱۱۵ × ۵۵ × ۸) ، شبکه ۲ (۸۱ × ۱۲ × ۱۳۱) و شبکه ۳ (۱۶۱ × ۹۱ × ۱۵) به ترتیب در امتداد x، y و z انجام گرفت. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص می‌باشد، شبکه ۲ بیشترین همخوانی را با داده‌های آزمایشگاهی دارد و کوچک‌تر شدن اندازه شبکه از حالت ۲ به ۳ باعث تغییر چندانی برای نمونه در مقادیر سرعت‌های عرضی نشده است.

در شکل۵ مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت طولی در فواصل مختلف از کف کانال اصلی و در مقاطع مشخصی در طول کانال اصلی نشان می‌دهد که مدل توانایی نسبتا قابل قبولی در پیش بینی سرعت افقی دارد، هرچند که مدل اندازه ناحیه جداشدگی جریان (ناحیه‌ای با سرعت منفی) را تا حدودی کوچک‌تر از مقدار اندازه‌گیری نشان می‌دهد. این اختلاف می‌تواند ناشی از ضعف مدل $k-\varepsilon$ در شبیه سازی جریان در نواحی چرخشی باشد.

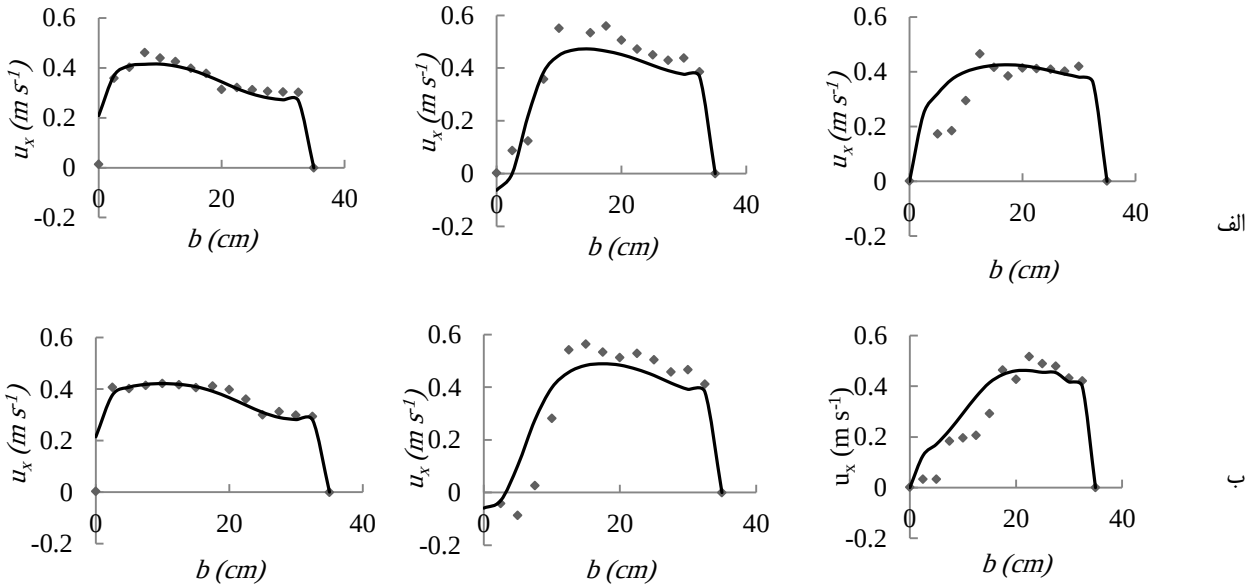
جدول۱- اطلاعات استفاده شده در مرحله واسنجی مدل جریان.

شرایط آزمایشگاهی	دبی کانال اصلی(Ls^{-1})	دبی کانال فرعی (Ls^{-1})	نسبت دبی	عمق پایاب (cm)	عرض کانال اصلی (cm)	عرض کانال فرعی(cm)
شبیه سازی جریان	۸/۸۳	۱۶/۶۷	۰/۶۶	۰/۲	۳۵	۲۵



الف ب

شکل ۴- مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت طولی در گوشه پایین‌دست اتصال الف)۱/۵ سانتی‌متری از کف ب) ۶/۵ سانتی متری از کف



الف

ب

۷۵ سانتی‌متری گوشه پایین دست اتصال ۲۰ سانتی‌متری گوشه پایین دست اتصال گوشه پایین دست اتصال

شکل۵- مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت طولی در مقاطع مختلف کانال اصلی الف)۱/۵ سانتی‌متری ازکف ب) ۱۶/۵ سانتی-متری از کف (نقاط توپر اندازه‌گیری، خط ممتد محاسباتی با مدل).

ضعف عمومی این مدل اغتشاش ناشی از همگن درنظر گرفتن ادی ویسکوزیته می‌باشد. ویراکُون (۱۹۹۱) نیز اشاره کرده است که مدل $k-\varepsilon$ در نواحی چرخشی ضعف دارد و ابعاد ناحیه چرخشی را کم‌تر از مقدار واقعی حدس می‌زند.

واسنجی رسوب

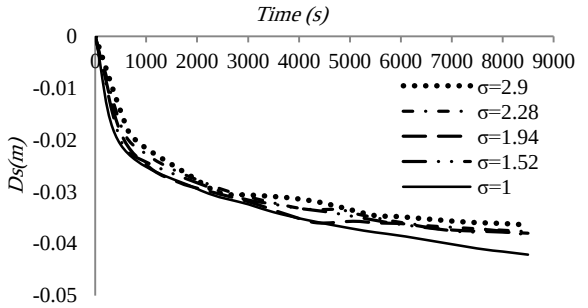
پس ازحصول اطمینان از توانایی مدل برای شبیه سازی جریان، شبیه سازی رسوب برای تلاقی مذکور انجام شد. مشخصات دبی و رسوب در کانال‌های اصلی و فرعی برای واسنجی مدل رسوب در جدول۲ ارائه شده است.

جدول۲- اطلاعات استفاده شده در مرحله وا سنجی رسوب.

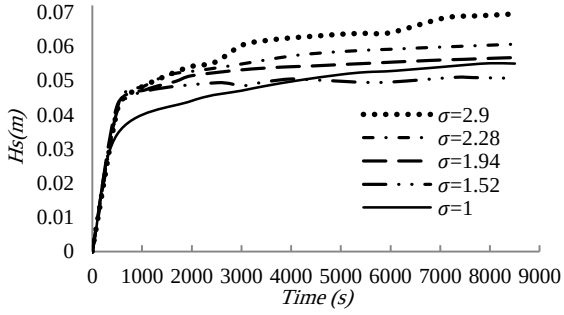
شرایط آزمایشگاهی	دبی کانال اصل(Ls^{-1})	دبی کانال فرعی(Ls^{-1})	نسبت دبی	عمق پایاب (cm)	عرض کانال اصلی (cm)	عرض کانال فرعی(cm)	قطر متوسط ذره رسوب (mm)
شبیه سازی رسوب	۱۰	۱۰	۰/۵	۱۲/۷۶	۳۵	۲۵	۱/۹۵

واسنجی مدل برای شرایط رسوب نشان داد بهترین نتیجه زمانی حاصل شد که پارامتر شیلدز بحرانی ۰/۰۴ و زبری بستر دو برابر اندازه متوسط رسوب بستر باشد($k_s=2D_{50}$). در این حالت مدل با گام زمانی ۵ ثانیه وتعداد تکرار داخلی ۱۵ اجرا شد. به منظور تعیین مدت زمان شبیه‌سازی یا زمانی که مقادیر حداکثر فرسایش و رسوب‌گذاری حاصل می‌شود تغییرات عمق فرسایش و ارتفاع رسوب‌گذاری در مقابل تعداد تکرار محاسبات در شکل ۶ ترسیم شد. هر چند که برای صحت سنجی مدل از داده‌های مربوط به دانه‌بندی یکنواخت استفاده شده است ولی نتایج مربوط به سایر دانه بندی‌ها نیز ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بلافاصله بعد از شروع شبیه‌سازی در محل اتصال عمل فرسایش با سرعت بالایی اتفاق می‌افتد. این عمل فرسایشی که در زمان اولیه(t<1000 s) از سرعت بالایی برخوردار است با گذشت زمان سرعت کاهشی به خود می‌گیرد تا به یک حالت تعادل برسد.

با توجه به این‌که بعد از مدت ۸۵۰۰ ثانیه از شروع محاسبات الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری به حالت تعادل رسیده است مقایسه نتایج شبیه‌سازی رسوب برای دانه‌بندی یکنواخت توسط مدل با داده‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل از توانایی تقریبا قابل قبولی در پیش‌بینی بیشینه عمق چاله فرسایشی و توانایی نسبتاً خوبی در پیش‌بینی ارتفاع نهایی رسوب‌گذاری دارد.



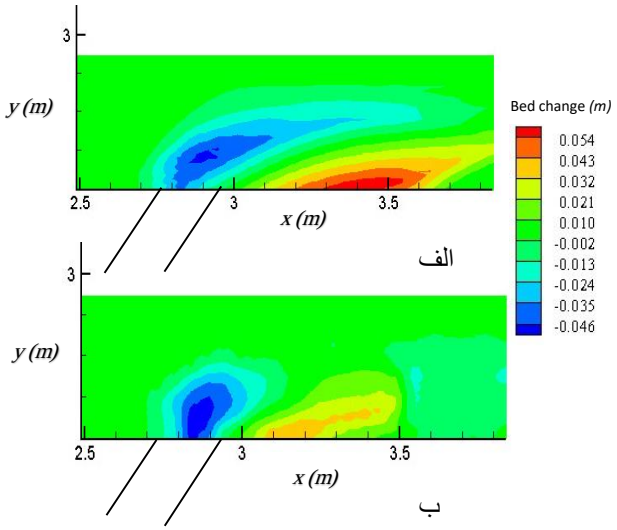
الف



ب

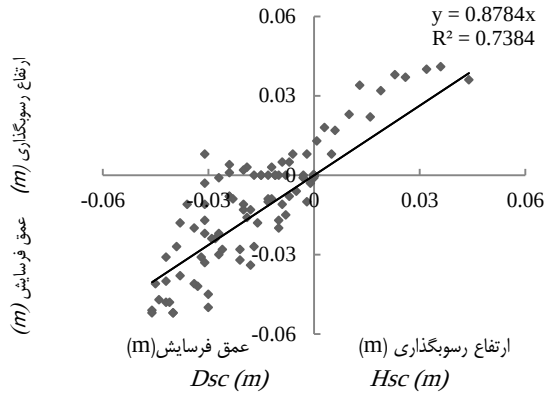
شکل۶ - تغییرات الف) عمق فرسایش و ب) ارتفاع رسوب‌گذاری نسبت به زمان.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود هم در مدل عددی و هم داده‌های اندازه‌گیری یک ناحیه فرسایش در نزدیک محل ورود جریان فرعی به اصلی و یک ناحیه رسوب‌گذاری در محدوده ناحیه چرخشی جریان در پایین‌دست گوشه اتصال را نشان می‌دهند. حداکثر عمق فرسایش اندازه‌گیری شده (۵/۲- سانتی‌متر) با مقدار محاسبه شده توسط مدل (۴/۷- سانتی‌متر) کمتر از ۱۰ درصد خطا دارد. علت اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده توسط مدل می‌تواند ناشی از ضعف رابطه وان راین(۱۹۸۴) در تخمین حمل رسوب و خطای اندازه‌گیری باشد. SSIIM1 تنها از رابطه مذکور برای انتقال بار بستر استفاده می‌کند.



شکل ۷- الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری الف) شبیه سازی توسط مدل ب) اندازه‌گیری آزمایشگاهی(σ =۱).

در شکل۸ دقت مدل در شبیه سازی فرسایش و رسوب بررسی شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر ۰/۷۳۸ و ۰/۸۷۸ بدست آمده است که نشان می‌دهد مدل دقت نسبتاً مناسبی دارد.

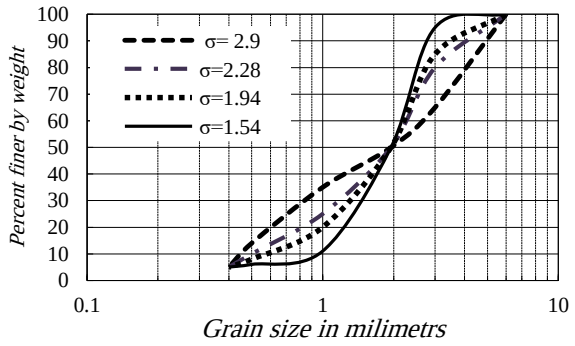


شکل ۸- تغییرات بستر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده.

پس از واسنجی مدل رسوب برای دانه‌بندی یکنواخت، اثر چهار نوع دانه‌بندی غیریکنواحت با مشخصات ارائه شده در جدول۳ که منحنی دانه بندی آن‌ها نیز در شکل ۹ نشان داده شده است بر الگوی فرسایش و رسوب-گذاری مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است D_{50} یا اندازه میانگین برای تمامی دانه بندی‌ها برابر با D_{50} دانه بندی یکنواخت(۱/۹۵ میلی متر)در نظر گرفته شد.

جدول۳ - مشخصات دانه‌بندی رسوبات غیریکنواخت.

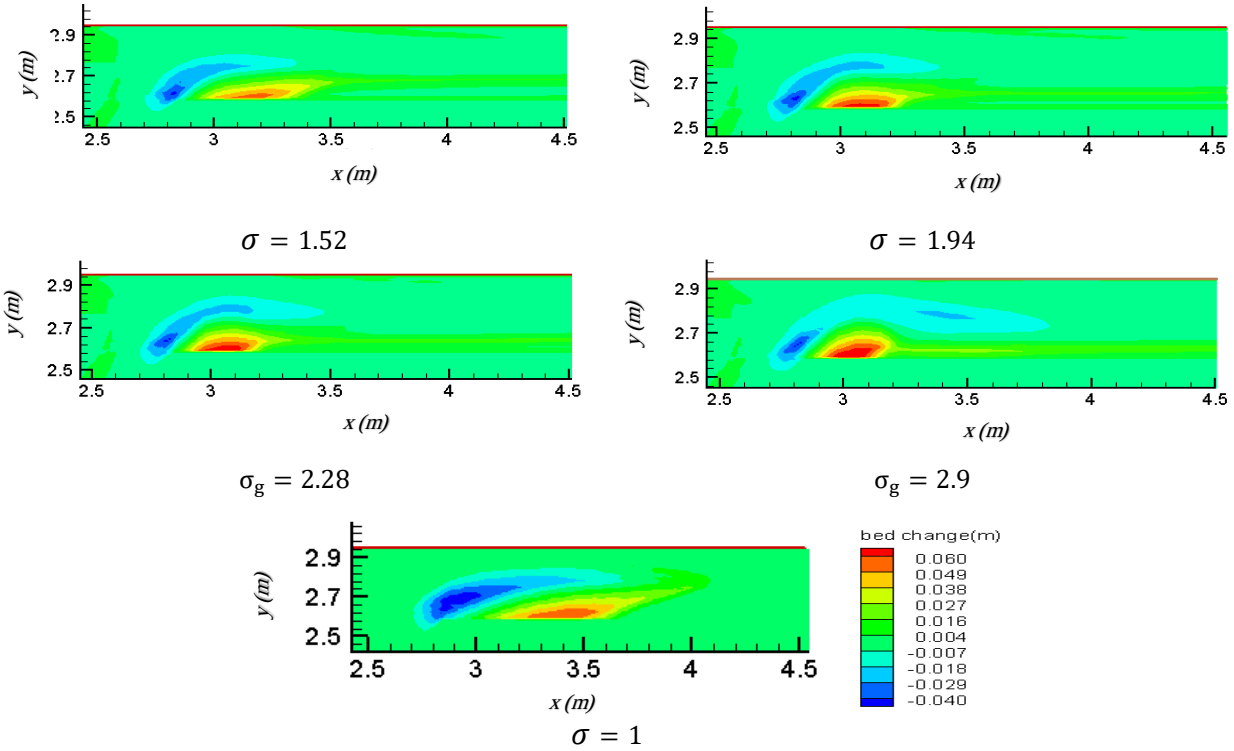
نوع دانه بندی	D_{16}	D_{50}	D_{84}	σ	ρ_s
	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[-]$	$[\mathrm{Kg}\,m^{-3}]$
۱	۱/۲	۱/۹۵	۲/۸	۱/۵۲	۲۶۵۰
۲	۰/۸۲	۱/۹۵	۳/۱	۱/۹۴	۲۶۵۰
۳	۰/۶۷	۱/۹۵	۳/۵	۲/۲۸	۲۶۵۰
۴	۰/۵۲	۱/۹۵	۴/۴	۲/۹۰	۲۶۵۰



شکل ۹-دانه‌بندی رسوبات بستر.

در شکل ۱۰ الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری نهایی به‌ازای انحراف معیارهای مختلف نشان داده شده است.

در حالت کلی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری یکسانی برای انحراف معیارهای مختلف در محل تلاقی رخ داده است. این الگو شامل یک چاله فرسایشی و یک تپه رسوب‌گذاری می‌باشد. با این وجود هرچه دانه‌بندی مواد بستر یکنواخت‌تر است (σ کوچک‌تر) وسعت ناحیه با حداکثر فرسایش بیش‌تر است و از نظر شکل به باله نزدیک‌تر است، و انتهای آن قبل از انتهای تپه رسوب-گذاری به اتمام می‌رسد. برای σ بزرگ‌تر ناحیه فرسایشی بیشتر کشیده شده و حتی بعد از ناحیه رسوب‌گذاری نیز در امتداد محور مرکزی کانال اصلی ادامه یافته است.

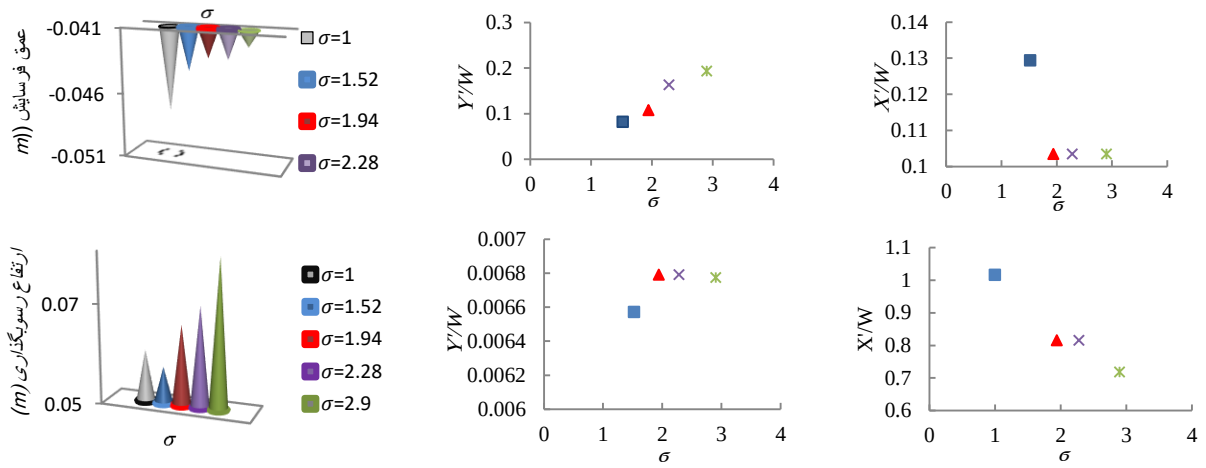


شکل ۱۰- تاثیر σ بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی.

در شکل ۱۱ موقعیت و مقادیر حداکثر عمق فرسایش و ارتفاع رسوب‌گذاری نشان داده شده است. در حالت کلی با افزایش غیریکنواختی مواد بستر مقدار حداکثر عمق فرسایش و به تبع آن بیشینه ارتفاع رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد. در مقایسه با مواد بستر یکنواخت، درصد کاهش عمق چاله فرسایش برای σ=۱/۵۲ برابر ۶/۷۳٪ و برای σ=۲/۹ برابر۱۱/۱۵٪ است. همچنین با افزایش σ موقعیت محل بیشینه عمق فرسایش و ارتفاع رسوب گذاری به سمت گوشه پایین دست اتصال و به طرف محور مرکزی کانال اصلی جابه‌جا می‌شود.

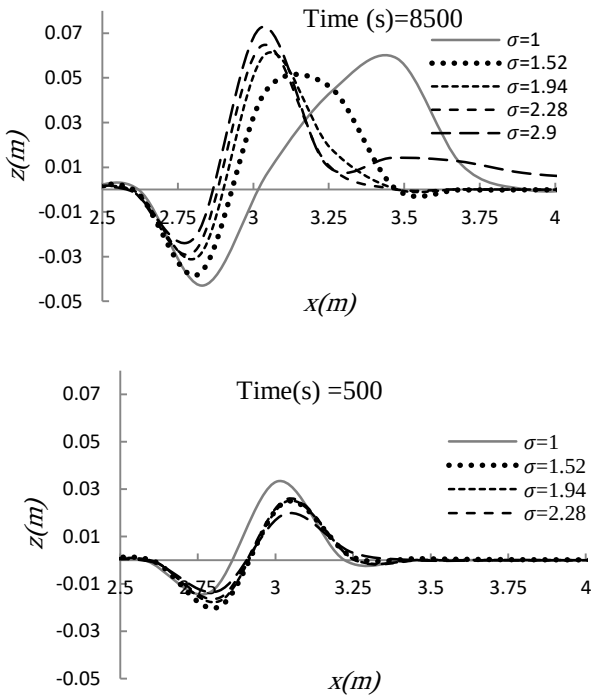
همان‌گونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، در زمانهای اولیه در رسوبات غیریکنواخت ذرات کوچک‌تر با سرعت بیشتری فرسایش یافته بنابراین عمق چاله فرسایشی افزایش می‌یابد. با گذشت زمان و شسته شدن ذرات ریز به تدریج بستر زبر شده و با تجمع مواد غیرقابل‌انتقال بر روی بستر در نهایت لایه‌ای از مواد زبر روی بستر را می‌پوشاند که وجود آن از ادامه عمل فرسایش جلوگیری می‌کند. به عبارتی حداکثر عمق فرسایش برای دانه‌بندی یکنواخت در مقایسه با دانه‌بندی غیریکنواخت بیشتر است. در زمان‌های اولیه پس از شروع شبیه سازی از آنجائی‌که ذرات ریزتر در دانه بندی غیریکنواخت خیلی سریع فرسایش می‌یابند، این ذرات عمدتا توسط جریان حمل می‌شوند و تپه رسوب-گذاری قابل ملاحظه‌ای تشکیل نمی‌دهند. با گذشت زمان

از آنجائی‌که قسمت عمده فرسایش ناشی از ذرات با قطر بزرگ‌تر است، این ذرات به دلیل وزن بیشتر و عدم توانایی جریان برای حمل در فاصله کم‌تری از گوشه پایین دست تلاقی رسوب می‌کنند و به همین دلیل سرعت پیشروی کندتری نسبت به زمان به سمت پایین دست در دانه‌بندی با σ بزرگ‌تر به چشم می‌خورد و هم‌چنین ارتفاع تپه رسوب‌گذاری با غیریکنواخت‌تر شدن دانه‌بندی مواد بستر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- تاثیر σ بر مقدار و محل وقوع بیشینه عمق فرسایش و رسوب‌گذاری.

(x' : فاصله از گوشه پایین دست اتصال در جهت جریان کانال اصلی، y' : فاصله از گوشه پایین دست در امتداد عمود بر جریان کانال اصلی)



شکل ۱۲-تغییرات عمق چاله فرسایش و ارتفاع تپه رسوب‌گذاری در زمان‌های مختلف.

شکل ۱۳ تغییرات عرضی غلظت رسوب در دو مقطع عرضی نشان داده شده که همواره بیشترین مقدار غلظت برای انحراف معیار $\sigma = 2.9$ مشاهده شد. به عبارتی با افزایش σ مقدار غلظت مواد رسوبی در حال حرکت بیشتر شده است. همان‌گونه که محاسبات انجام شده در جدول ۴ نشان می‌دهد برای ذرات با قطر حدود ۰/۷ میلی‌متر و کمتر پارامتر $\left[z = \frac{w_s}{\beta k u^*}\right]$ کمتر از ۵ می‌باشد به عبارتی این ذرات معلق می‌شوند. در مقطع عرضی با فاصله (x'/w= 0.623) بیشترین مقدار غلظت رسوب و در پهنای کمتری از عرض کانال انتقال می‌یابد.

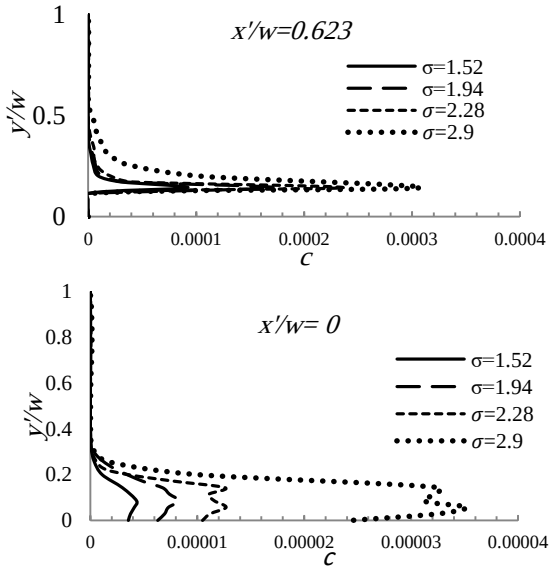
بررسی تأثیر انحراف معیار بر روی عمق جریان

مطالعات قبلی (تیلور۱۹۴۴، برقعی و همکاران ۱۳۸۱، قبادیان۱۳۸۵ و بصیری۱۳۹۲) نشان داده است، عمق جریان در کانال فرعی و اصلی قبل از تلاقی به دلیل

انسداد جریان کانال اصلی ناشی از وجود ناحیه جداشدگی دچار بالا زدگی شده و پدیده برگشت آب در بالادست تلاقی رخ می‌دهد.

جدول۴- مقادیر پارامترz برای تعیین تعلیق دانه‌های رسوبی.

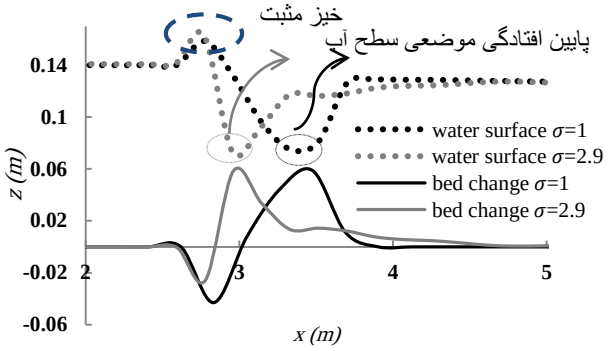
قطر ذره(mm)	σ			
	۲/۹	۲/۲۸	۱/۹۴	۱/۵۲
۵/۵	۱۲/۹۷۰	۱۳/۷۵۲	۱۴/۷۴۶	۱۷/۱۹۸
۴/۵	۱۱/۵۳۳	۱۲/۲۲۸	۱۳/۱۱۳	۱۵/۲۹۳
۳/۵	۱۰/۲۱۹	۱۰/۸۳۶	۱۱/۶۱۹	۱۳/۵۵۱
۲/۵	۸/۵۳۷	۹/۰۵۱	۹/۷۰۶	۱۱/۳۲۰
۱/۵	۶/۲۵۹	۶/۶۳۶	۷/۱۱۶	۸/۲۹۹
۰/۷	۳/۵۳۳	۳/۷۴۶	۴/۰۱۷	۴/۶۸۵
۰/۴	۲/۴۰۱	۲/۵۴۵	۲/۷۲۹	۳/۱۸۳



شکل۱۳-تأثیر انحراف معیار بر روی توزیع عرضی غلظت رسوب.

(x' : فاصله از گوشه پایین دست اتصال در جهت جریان کانال اصلی، y' : فاصله از گوشه پایین‌دست در امتداد عمود بر جریان کانال اصلی)

در این تحقیق پس از به تعادل رسیدن الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری نیمرخ سطح آب ترسیم شد که در شکل۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در کانال‌های اصلی و فرعی قبل از تلاقی عمق جریان حدود ۱۴ سانتی‌متر است و در پایین دست این عمق به حدود ۱۲ سانتی‌متر تقلیل یافته است و این شرایط برای σ =1 وσ =2.9 تقریبا یکسان است ولی دقیقا در محل تلاقی اوضاع متفاوت است. پروفیل سطح آب همان‌گونه که در شکل ۱۲ نیز نشان داده شده است، بلافاصله در محل تشکیل چاله فرسایشی خیز مثبت برداشته است و مقدار آن برای σ = 2.9 حتی بیشتر است. از طرفی در محل تشکیل تپه رسوب‌گذاری افت شدیدتر سطح آب ملاحظه می‌شود و بیشترین کاهش رقوم سطح آب دقیقاً در بالاترین رقوم بستر اتفاق می‌افتد.



شکل۱۴- تاثیر انحراف معیار بر روی نیمرخ سطح آب در مجاورت ساحل سمت راست.

نتیجه‌گیری کلی

الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در شرایط دانه‌بندی غیریکنواخت مصالح بستر در زمان های اولیه عمق آبشستگی به شدت افزایش می‌یابد و رسوبات حمل شده در پایین دست حفره آبشستگی ته نشین می‌شود و تشکیل یک برآمدگی را می‌دهد. با این وجود عمق نهایی چاله فرسایشی در حالت دانه‌بندی یکنواخت مواد بستر نسبت به دانه‌بندی غیریکنواخت بیشتر است. زیرا در دانه بندی غیریکنواخت ذرات ریزدانه خود را لابه لای ذرات درشت‌تر پنهان می‌کنند به عبارتی با تشکیل لایه مسلح، ذرات عدد شیلدز بحرانی بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند و در نتیجه مقاومت ذرات در مقابل جریان افزایش یافته و فرآیند عمیق‌تر شدن چاله فرسایش کاهش می‌یابد. به عبارتی غیریکنواختی اندازه مصالح باعث می-شود که فرآیند فرسایش ذرات، به صورت گزینشی انجام می‌شود که با تجمع مواد به تدریج این ذرات لایه‌ای

محافظ روی بستر ایجاد می‌کنند و از ادامه روند فرسایش جلوگیری می‌کند. با توجه به قطر ذرات رسوبی مورد استفاده در این شبیه‌سازی(۰/۴ تا ۶ میلی‌متر)، نتایج نشان داد رسوبات عمدتا بصورت بار بستر جابه جا می-شود و بیشترین میزان تعلیق مربوط به ذرات ریزدانه با قطر کمتر از ۰/۷ میلی‌متر است. با افزایش انحراف‌معیار وهم‌چنین افزایش ذرات ریزدانه موجود در دانه‌بندی، میزان غلظت در عرض کانال افزایش می‌یابد.

منابع مورد استفاده

Adivi EG, Bajestan SM and Saghi M, 2013. Laboratory study of stability in the riprap materials of bed at the confluence of rivers. Water and Soil Science- University of Tabriz 24(1): 69-83. (In Fasi)

Balachandar R and Kells JA, 1998. Instantaneous water surface and bed scour profiles using video image analysis. Canadian Journal of Civil Engineering 25(4): 662-667.

Balouchi B, 2014. The Effect of sediment load from main canal on maximum scour depth at river confluence. M Sc. thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Fasi)

Basiri M, 2011. Three- Dimensional Simulation of local scouring and sedimentation at rectangular channel-confluences by CFD modeling. M Sc. thesis, Razi University, Kermanshah, Iran. (In Fasi)

Best JL, 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. Sedimentology 35: 481-498.

Biron PM, Ramamurthy AS and Han S, 2004. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. Journal of Hydraulic Engineering 130: 243 – 253.

Borghei SM. Sakhaeifar SM and Daemi A, 2001. Laboratory study of open channel Junction. 6th International River Engineering Conference, Ahvaz, Iran, pp. 538-542. (In Fasi)

Ghobadian R and Bajestan, MS, 2007. Investigation of sediment patterns at river confluence. Journal of Applied Sciences 7: 1372-1380.

Ghobadian R, 2006. Investigation of flow, scouring and sedimentation at river-channel confluences. PhD thesis, Shahidchamran University, Ahwaz, Iran. (In Fasi)

Guillen-Ludena S, Franca MJ, Cardoso AH and Schleiss AJ, 2015. Hydro-morphodynamic evolution in a 90° movable bed discordant confluence with low discharge ratio. Earth Surface Processes and Landforms 40(14): 1927-1938.

Li C and Tao Y, 2013. Study on sediment deposition characteristics at river confluences in reservoir area. Journal of Sichuan University 45: 1-6.

Liu T, Fan B and Lu J, 2015. Sediment–flow interactions at channel confluences: a flume study. Advances in Mechanical Engineering 7(6): 168- 178.

Melville BW and Chiew YM, 1999. Time Scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(1): 59-65.

Mohamadi S, 2011. Local scour at curved edge of open-channel junctions. . M Sc. thesis, Shahidchamran University, Ahwaz, Iran. (In Fasi)

Mosavi A, Rostami M and Habibi S, 2014. Numerical simulation of flow and sediment structure in confluence of rivers. Iran-Watershed Management Science & Engineering 8(4): 19-29. (In Fasi)

Mosley M P, 1976. An experimental study of channel confluences. Journal of Geology 84: 535-562.

Rouse, H (1937). Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. Transactions, ASCE 102(1965): 463-543.

Schindfessel L, Creëlle S, De Mulder T, 2015. Flow patterns in an open channel confluence with increasingly dominant tributary inflow. Water 7(9): 4724-4751.

Schindfessel L, Creëlle S, De Mulder T, 2015. Influence of cross-sectional shape on flow patterns in an open-channel confluence. Pp.2412-2422, Proc.36, IAHR Congress, 28 June – 3 July, The Hague, the Netherlands, http://hdl.handle.net/1854/LU-6864873.

Taylor EH, 1944. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. American Society of Civil Engineers - Proceedings 70: 119-121.

Tonghuan L, Beilin F and Jinyou L, 2015. Sediment flow interaction at channel confluences. Advances in Mechanical Engineering 7(6): 1-9.

Van Rijn LC, 1984. Sediment transport, part I: bead load transport. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 110(11): 1431–56

Webber NB and Greated CA, 1966. An investigation of flow behavior at the junction of rectangular channels. Pp.321-334, Proc.34, Institute Civil Engineers, London.

Weerakoon SB, Kawahara Y and Tamia N, 1991. Three-dimensional flow structure in channel confluences of rectangular section. Pp.373-380, Proc.24, IAHR Congress, 9-13 Sept., Madrid, Spain.