

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

رسول قبادیان<sup>۱\*</sup>، سارا قنبری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۵

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 SSIM1 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی دو کانال مستطیلی به زاویه اتصال ۶۰ درجه، 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 ( $\sigma_g$ ) متفاوت در نظر گرفته شد و نتایج آنها به هم دیگر و با دانه‌بندی یکنواخت مقایسه گردید. نتایج تحقیق حاکی از آن است که هرچه مواد بستر  $\sigma_g$  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 SSIM1

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

R Ghobadian<sup>1\*</sup>, S Ghanbari<sup>2</sup>

Received: August 23, 2017 Accepted: December 16, 2018

Associate Prof., Dept. of Water Engin., Razi University, Kermanshah.

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 ( $\sigma_g$ ) 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  $\sigma_g$  and its spatial location was closer to the downstream corner of channel confluences. Moreover, the maximum height of the sedimentation increased with increasing  $\sigma_g$ . 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

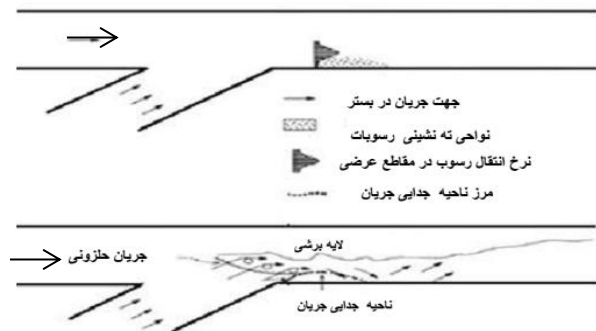
(۱۹۷۶)، با انجام آزمایش در یک فلوم کوچک آزمایشگاهی، نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی به دبی کل رسوبی بستگی دارد، به گونه‌ای که با افزایش بارکل رسوب بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. بالاچاندر و کلز (۱۹۹۸)، تغییرات زمانی آبشستگی موضعی بستر با دانه‌بندی یکنواخت را مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که بیشینه 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 دانه‌ای و سست توسط جریان آب سریع‌تر فرسایش می‌یابند در صورتی که مصالح چسبنده

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 شکل ۱ ارائه شده است. تیلور (۱۹۴۴)، به عنوان اولین محقق به صورت آزمایشگاهی و تئوری به بررسی تلاقی آبراهه‌ها با زاویه‌های 135° و 45° پرداخت. این محقق مدلی یک-بعدي 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 ارائه داد. با در نظر گرفتن همین فرضیات وبر و گریند (۱۹۶۶)، آزمایش‌هایی بر روی تلاقی کانال‌های روباز با زاویه‌های اتصال 60° و 30° انجام دادند و مدل پیشنهادی تیلور (۱۹۴۴) را اصلاح نمودند. موسلی

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 در جریان کانال اصلی بالادست تلاقی ایجاد می‌کند که خود باعث تغییر شدید در توزیع سرعت می‌شود. لیو و همکاران (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 زاویه 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 و همچنین افزایش نسبت دبی عمق چاله فرسایشی افزایش می‌یابد. برقی و همکاران (۱۳۸۱) با بررسی الگوی رسوب و فرسایش روی یک اتصال ۹۰ درجه نشان دادند که بیشینه عمق آبشستگی در ابتدای ناحیه جداسازی جریان اتفاق می‌افتد و بیشینه عمق آبشستگی با کاهش قطر متوسط مصالح بستر، افزایش می‌یابد. محمدی (۱۳۹۰)، به بررسی تأثیر گردشگری 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 و همکاران

مقاومت بیشتری در مقابل فرسایش از خود نشان می‌دهند (ملویل و چيو 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 می‌افتد. گایلن- لودنا و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل آزمایشگاهی توسعه فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی کانال‌های روباز شیب‌دار غیرهم‌کف را بررسی نمودند. در آزمایش 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 جداسازی 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 جداسازی و مقطع انقباض جریان با تغییر شکل مقطع کانال تغییر می‌کند. در تحقیقی دیگر شیندفسل و همکاران (۲۰۱۵-ب) در شرایطی که دبی کانال فرعی غالب و بیش از ۹۰ درصد

در مدل مذکور معادلات ناویراستوکس برای جریان آشفته در یک فضای سه بعدی به منظور محاسبه سرعت جریان با روش حجم محدود، منفصل و حل می‌شوند:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

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

$j = 1, 2, 3$

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  $x$  بعد عمومی مسافت است. آخرین جمله در معادله ۲ تنش رینولدز است که اغلب با تقریب بوزینسک مدل می‌شود:

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

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:

$$v_t = C'_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad [4]$$

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

### شرایط مرزی جریان

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

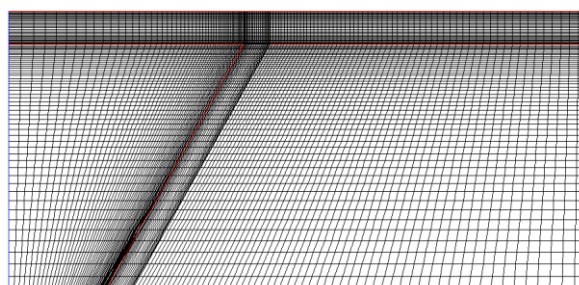
در مرز خروجی شرایط گردایان صفر برای تمام پارامترها به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. همچنین از قانون دیوار برای مرزهای زبر به عنوان شرط مرزی در بستر و دیوارها استفاده شد.

(۱۳۹۲) با استفاده از مدل عددی CCHE2D نشان دادند که عمده فرسایش رخ داده در کانال اصلی مربوط به محدوده تلاقی و پایین دست آن می‌باشد که به سمت کناره مقابل محل تلاقی تمایل دارد. عدیوی و همکاران (۱۳۹۳) با مطالعه آزمایشگاهی پایداری مصالح سنگچین بستر در محل تلاقی رودخانه‌ها رابطه‌ای را برای برآورد عدد پایداری استخراج کردند. نتایج آنها نشان داد با افزایش نسبت دبی و کاهش اندازه سنگچین عدد پایداری کاهش می‌یابد.

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

### مواد و روش‌ها

هندسسه میدان مورد مطالعه که در شکل ۲ نشان داده شده، به‌گونه‌ای می‌باشد که در نواحی نزدیک به دیواره گردایان‌ها 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.

**معادلات حاکم بر انتقال رسوب**

مدل عددی SSIIM1 مقدار بار معلق را با استفاده از معادله جابجایی پخش برای غلظت رسوب (c) محاسبه می کند.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad [5]$$

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  $k - \epsilon$  بدست می آید.

رابطه ه روی همه سلولها بجز نزدیکترین سلول بستر حل می شود. سلولهایی که در آن غلظت در شرایط تعادل باشد از رابطه وانراین بدست می آید:

$$c_{bed} = 0.015 \frac{d}{a} \frac{(\tau_b - \tau_c)^{1.5}}{a \left( d \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \right)^{1/3} \right)^{0.3}} \quad [7]$$

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 شیلدنز،  $\rho_s$  و  $\rho_w$  جرم حجمی آب و رسوب، U ویسکوزیته آب، g شتاب گرانش و  $c_{bed}$  غلظت بار بستر می باشند. 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 میان یابی یا برون یابی می شود:

$$\frac{c_z}{c_{bed}} = \left( \frac{h-z}{z} - \frac{a}{h-a} \right)^z \quad [8]$$

که در آن h: عمق جریان، Z فاصله از کف تا مرکز سلول کف و  $c_z$  غلظت رسوب در فاصله Z از کف می باشد. برای محاسبه بار بستر نیز از رابطه وانراین استفاده می شود:

$$\frac{q_b}{d^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{d^{0.3} \left[ \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \right) \right]^{0.1}} \quad [8]$$

که در آن:  $q_b$  بار بستر و سایر پارامترها قبلاً در رابطه ه معرفی شده اند.

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

$$\rho_s \frac{\partial c}{\partial t} + \rho_s U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + \rho_s W_s \frac{\partial c}{\partial x_3} + \frac{\partial q_{b,x_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial q_{b,x_2}}{\partial x_2} = \quad [9]$$

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

برای بدست آوردن m، از معادله ۹ بر روی همه سلولهای کف و با استفاده از روش حجم کنترل انتگرال گرفته می شود. نهایتاً با تقسیم m بر  $\rho_s$  تغییر حجم رسوب سلول کف در هر گام زمانی محاسبه می شود.

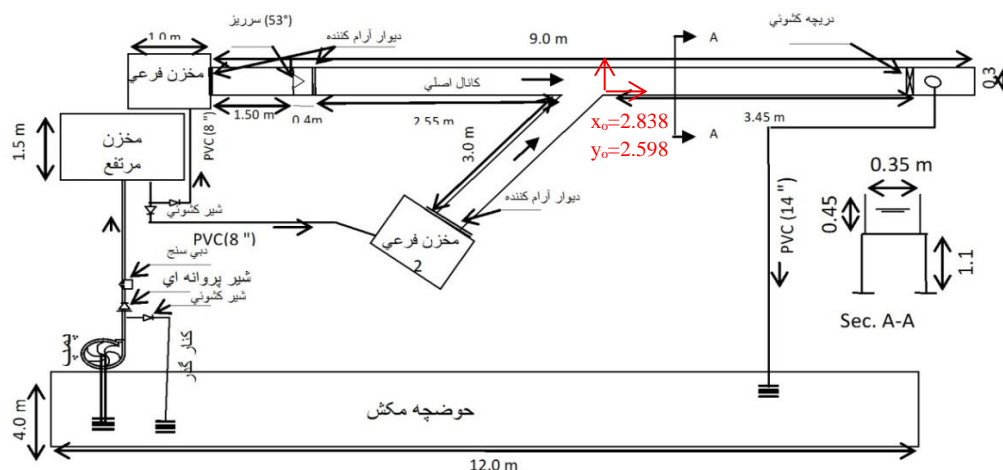
**شرایط مرزی رسوب**

غلظت رسوب در حالت تعادل از رابطه ۸ برای نزدیکترین 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 شبیه سازی فرسایش و رسوب گذاری موضعی در محل تلاقی مورد توجه بوده و هیچ گونه تزریق رسوب از مرزهای بالادست لحاظ نشده است.

**مدل آزمایشگاهی**

در این تحقیق از داده های 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 می باشد. در ۲ متر اول ارتفاع مفید فلوم اصلی ۰/۷۵ متر و در بقیه طول آن ۰/۴۵ متر می باشد. کانال فرعی دارای طول ۳ متر، پهنای ۰/۲۵ متر و ارتفاع مفید ۰/۴۵ متر می باشد. هر دو فلوم بدون شیب و افقی هستند. دبی ورودی کل سیستم توسط یک دستگاه

سرعت سنج با دقت  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. کانال فرعی با زاویه ۶۰ درجه به کانال اصلی متصل شده است.



شکل ۳- نمایی از مدل آزمایشگاهی قبادیان (۱۳۸۵).

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 (۸ × ۵۵ × ۱۱۵)، شبکه ۲ (۱۲ × ۸۱ × ۱۳۱) و شبکه ۳ (۱۵ × ۹۱ × ۱۶۱) 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 شبیه سازی عددی کانال اصلی بعد از دیوار آرام کننده جریان در نظر گرفته شد. بدین ترتیب طول کانال اصلی و فرعی به ترتیب ۶/۲۸۸۶ و ۳ متر می‌باشد. کانال فرعی در ۲/۵۵ 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 پایین دست اتصال می‌باشد.

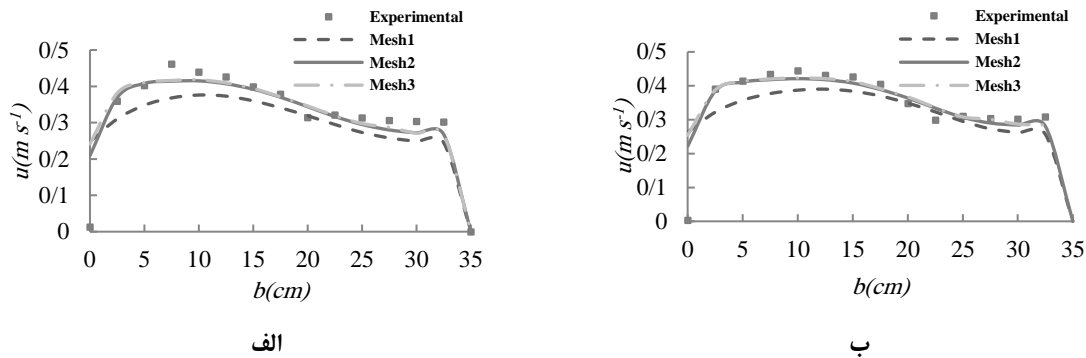
### نتایج و بحث

#### واسنجی مدل جریان

اطلاعات استفاده شده در مرحله واسنجی مدل جریان در جدول ۱ 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

جدول ۱- اطلاعات استفاده شده در مرحله واسنجی مدل جریان.

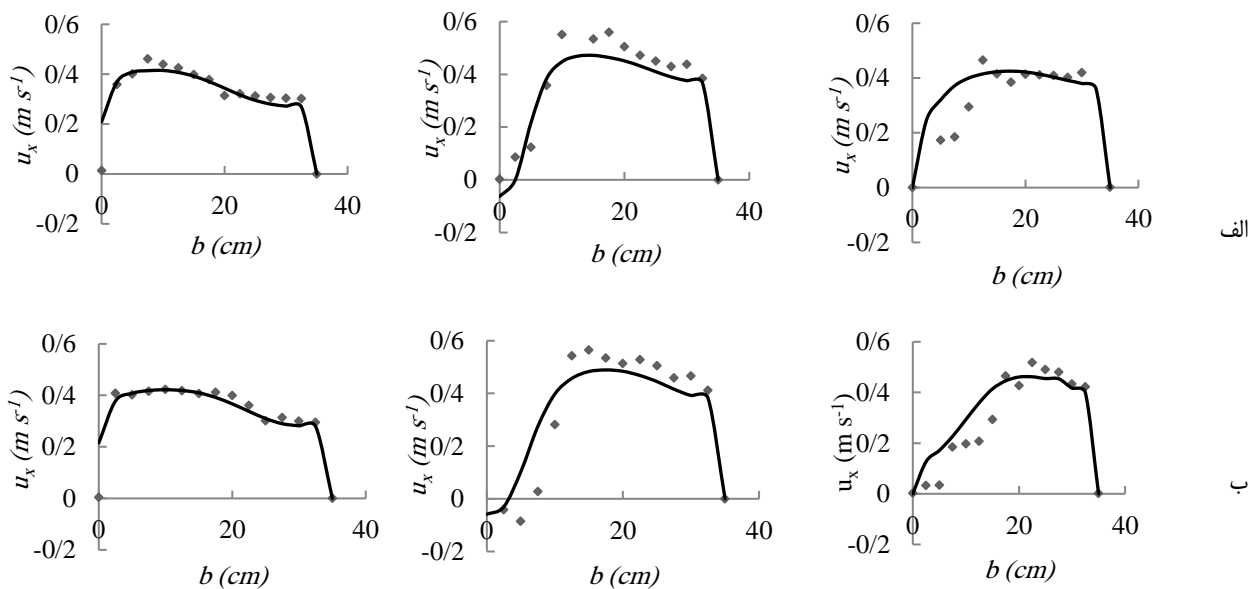
شرایط آزمایشگاهی	دبی کانال اصلی ( $LS^{-1}$ )	دبی کانال فرعی ( $LS^{-1}$ )	نسبت دبی	عمق پایاب (cm)	عرض کانال اصلی (cm)	عرض کانال فرعی (cm)
شبیه سازی جریان	۸/۸۳	۱۶/۶۷	۰/۶۶	۰/۲	۳۵	۲۵



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

ضعف مدل  $k - \epsilon$  در شبیه سازی جریان در نواحی چرخشی باشد. ضعف عمومی این مدل اغتشاش ناشی از همگن در نظر گرفتن ادی ویسکوزیته می باشد. ویراگون (۱۹۹۱) 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.

در شکل ۵ مقایسه پروفیل‌های 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، هر چند که مدل اندازه ناحیه جداشدگی جریان (ناحیه ای با سرعت منفی) را تا حدودی کوچکتر از مقدار اندازه گیری نشان می دهد. این اختلاف می تواند ناشی از



گوشه پایین دست اتصال

۲۰ سانتی متری گوشه پایین دست اتصال

۷۵ سانتی متری گوشه پایین دست اتصال

شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت طولی در مقاطع مختلف کانال اصلی الف) ۱/۵ سانتی متری از کف ب) ۶/۵ سانتی متری از کف (نقاط توپر اندازه گیری، خط ممتد محاسباتی با مدل).



### واسنجی رسوب

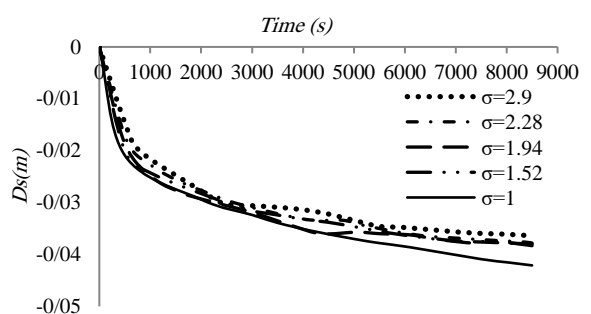
پس از حصول اطمینان از توانایی مدل برای شبیه سازی جریان، شبیه سازی رسوب برای تلاقی مذکور

انجام شد. مشخصات دبی و رسوب در کانال‌های اصلی و فرعی برای واسنجی مدل رسوب در جدول ۲ ارائه شده است.

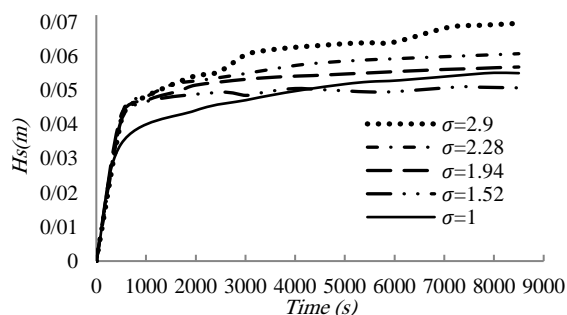
جدول ۲- اطلاعات استفاده شده در مرحله واسنجی رسوب.

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

فرسایشی و توانایی نسبتاً خوبی در پیش‌بینی ارتفاع نهایی رسوب‌گذاری دارد.



الف



ب

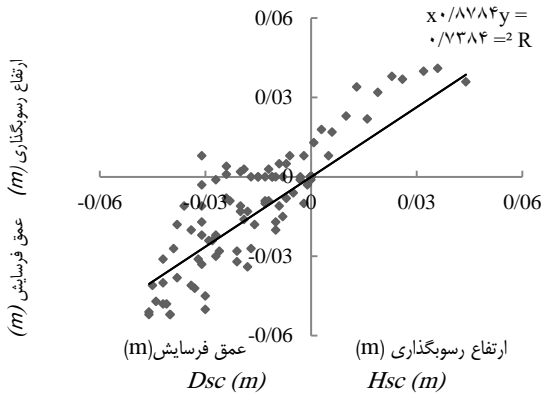
شکل ۶- تغییرات (الف) عمق فرسایش و (ب) ارتفاع رسوب‌گذاری نسبت به زمان.

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

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 ۵ ثانیه و تعداد 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 تقریباً قابل قبولی در پیش‌بینی بیشینه عمق چاله



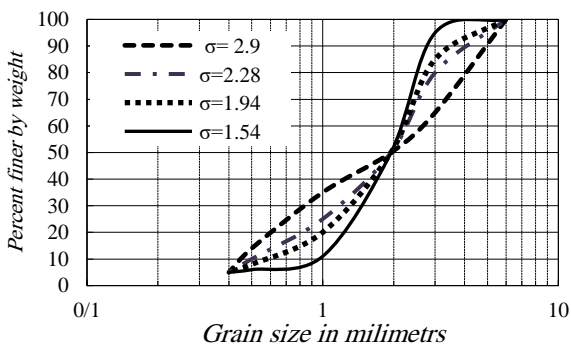


شکل ۸- تغییرات بستر محاسبه شده و اندازه گیری شده.

پس از واسنجی مدل رسوب برای دانه بندی یکنواخت، اثر چهار نوع دانه بندی غیریکنواخت با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ 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.

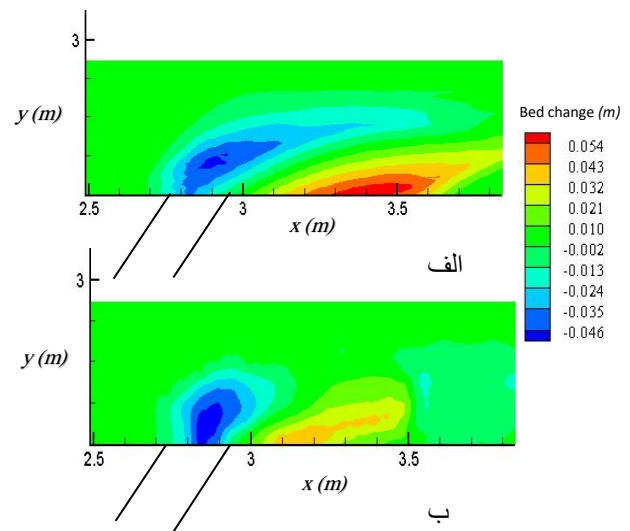
جدول ۳- مشخصات دانه بندی رسوبات غیریکنواخت.

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



شکل ۹- دانه بندی رسوبات بستر.

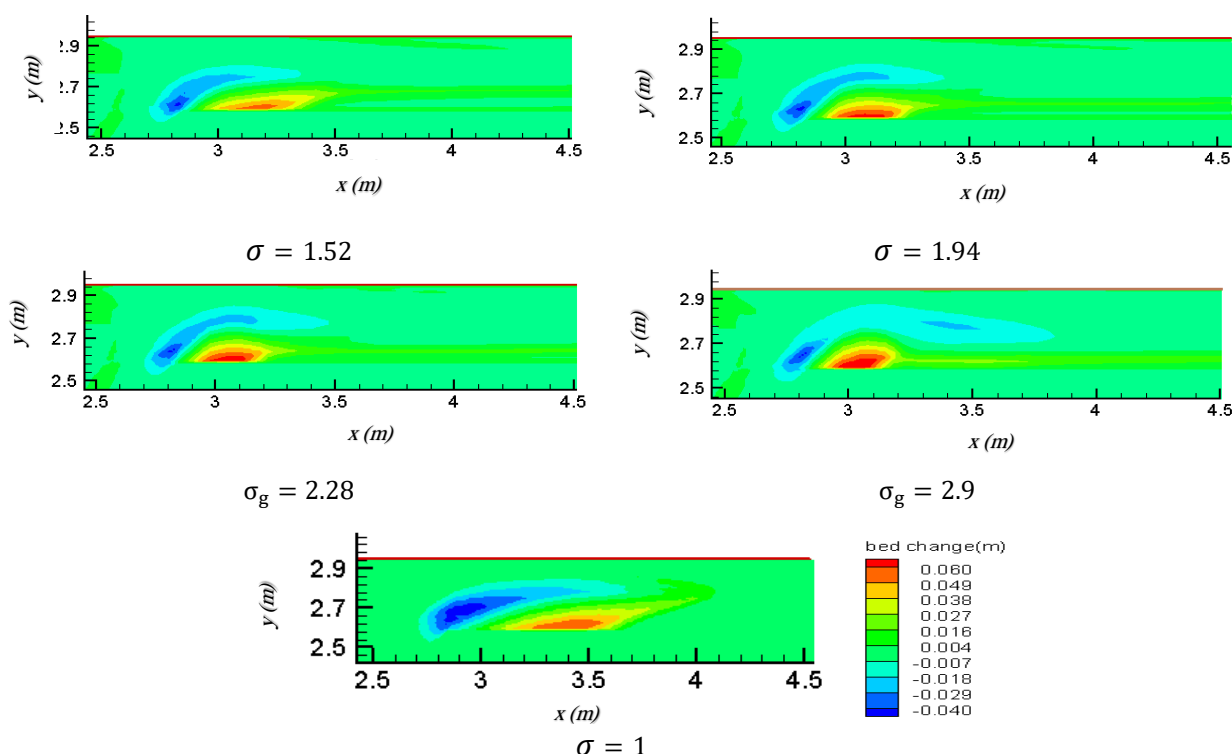
در محدوده ناحیه چرخشی جریان در پایین دست گوشه اتصال را نشان می دهند. حداکثر عمق فرسایش اندازه گیری شده (۵/۲- سانتی متر) با مقدار محاسبه شده توسط مدل (۴/۷- سانتی متر) کمتر از ۱۰ درصد خطا دارد. علت اختلاف بین مقادیر اندازه گیری و محاسبه شده توسط مدل می تواند ناشی از ضعف رابطه وان راین (۱۹۸۴) در تخمین حمل رسوب و خطای اندازه گیری باشد. SSIIM1 تنها از رابطه مذکور برای انتقال بار بستر استفاده می کند.



شکل ۷- الگوی فرسایش و رسوب گذاری (الف) شبیه سازی توسط مدل (ب) اندازه گیری آزمایشگاهی ( $\sigma = 1$ ).

در شکل ۸ دقت مدل در شبیه سازی فرسایش و رسوب بررسی شده است. همان گونه که ملاحظه می شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر ۰/۷۳۸ و ۰/۸۷۸ بدست آمده است که نشان می دهد مدل دقت نسبتاً مناسبی دارد.

بستر یکنواخت‌تر است ( $\sigma$  کوچک‌تر) و سعت 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  $\sigma$  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  $\sigma$  بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی.

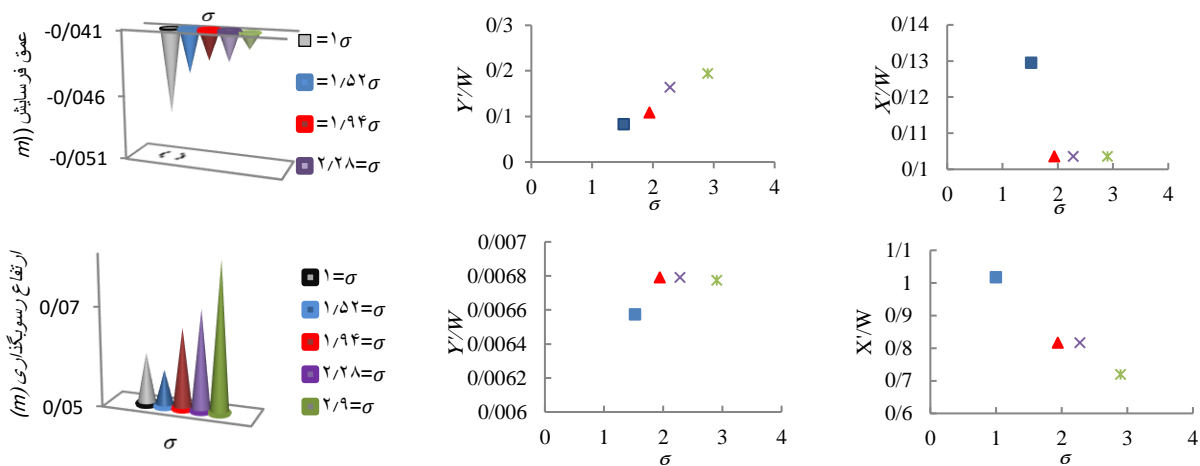
همان‌گونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، در زمانهای اولیه در رسوبات غیریکنواخت ذرات کوچک‌تر با سرعت بیشتری فرسایش یافته بنابراین عمق چاله فرسایشی افزایش می‌یابد. با گذشت زمان و شسته شدن ذرات ریز به تدریج بستر زبر شده و با تجمع مواد غیرقابل انتقال بر روی بستر در نهایت لایه‌ای از مواد زبر روی بستر را 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

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

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  $\sigma = 1/52$  برابر  $6/73\%$  و برای  $\sigma = 2/9$  برابر  $11/15\%$  است. همچنین با افزایش  $\sigma$  موقعیت محل بیشینه عمق فرسایش و ارتفاع رسوب‌گذاری به سمت گوشه پایین دست اتصال و به طرف محور مرکزی کانال اصلی جابه‌جا می‌شود.

پایین دست تلاقی رسوب می کنند و به همین دلیل سرعت پیشروی کندتری نسبت به زمان به سمت پایین دست در دانه بندی با  $\sigma$  بزرگتر به چشم می خورد و همچنین ارتفاع تپه رسوب گذاری با غیریکنواخت تر شدن دانه بندی مواد بستر افزایش می یابد.

بندی غیریکنواخت خیلی سریع فرسایش می یابد، این ذرات عمدتاً توسط جریان حمل می شوند و تپه رسوب گذاری قابل ملاحظه ای تشکیل نمی دهند. با گذشت زمان از آنجائی که 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

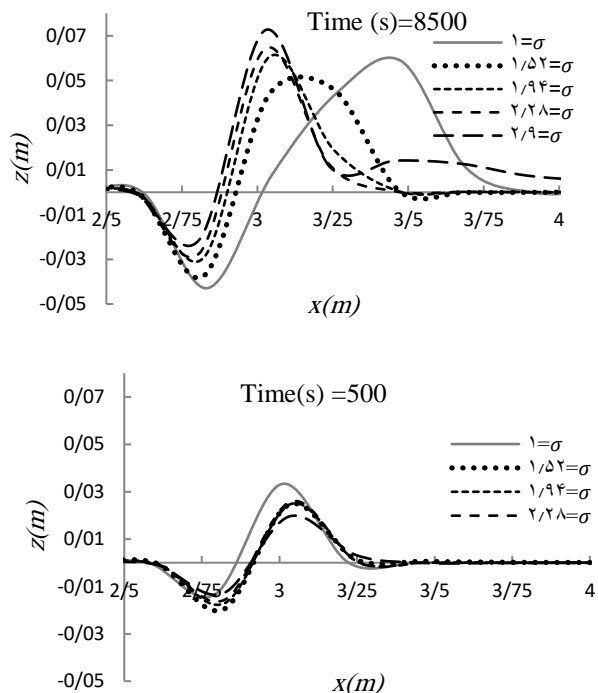


شکل ۱۱- تاثیر  $\sigma$  بر مقدار و محل وقوع بیشینه عمق فرسایش و رسوب گذاری.

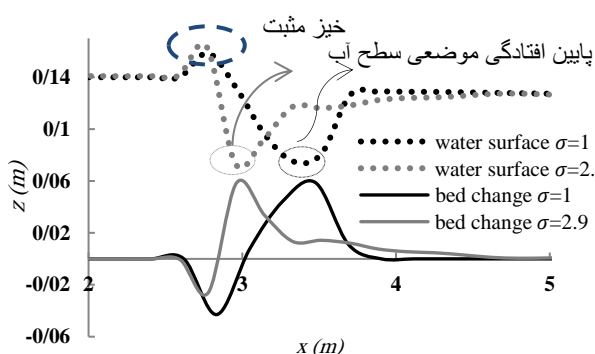
( $x'$ : فاصله از گوشه پایین دست اتصال در جهت جریان کانال اصلی،  $y'$ : فاصله از گوشه پایین دست در امتداد عمود بر جریان کانال اصلی)

شکل ۱۲- تغییرات عمق چاله فرسایش و ارتفاع تپه رسوب گذاری در زمان های 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  $\sigma$  مقدار غلظت مواد رسوبی در حال حرکت بیشتر شده است. همان گونه که محاسبات انجام شده در جدول ۴ نشان می دهد برای ذرات با قطر حدود  $0.7$  میلی متر و کمتر پارامتر  $[Z = \frac{w_s}{\beta k u_*}]$  کمتر از ۵ می باشد به عبارتی این ذرات معلق می شوند. در مقطع عرضی با فاصله  $(x'/w = 0.623)$  بیشترین مقدار غلظت رسوب و در پهنای کمتری از عرض کانال انتقال می یابد.



رسیدن الگوی فرسایش و رسوبگذاری نیمرخ سطح آب ترسیم شد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان گونه 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  $\sigma = 1$  و  $\sigma = 2.9$  تقریباً یکسان است ولی دقیقاً 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  $\sigma = 2.9$  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.



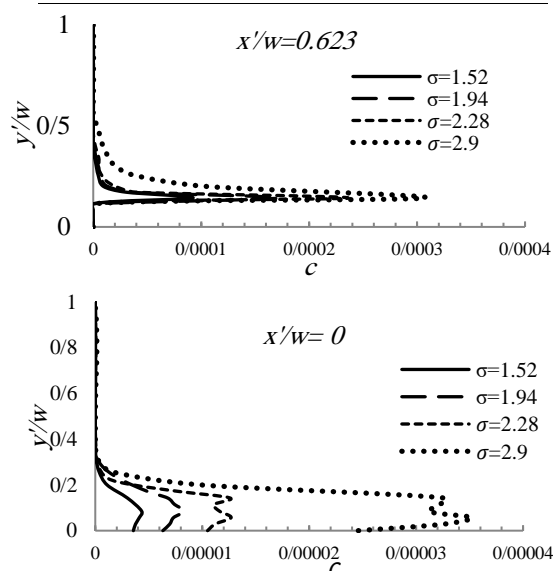
شکل ۱۴- تأثیر انحراف معیار بر روی نیمرخ سطح آب در مجاورت ساحل سمت راست.

### نتیجه‌گیری کلی

الگوی فرسایش و رسوبگذاری در شرایط دانه‌بندی غیریکنواخت مصالح بستر در زمان‌های 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 لایه لای ذرات درشت‌تر پنهان می‌کنند به عبارتی با تشکیل لایه مسلح، ذرات عدد شیلدز بحرانی بیشتری را به خود اختصاص

جدول ۴- مقادیر پارامتر Z برای تعیین تعلیق دانه‌های رسوبی.

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



شکل ۱۳- 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 پایین دست در امتداد عمود بر جریان کانال اصلی)

### بررسی تأثیر انحراف معیار بر روی عمق جریان

مطالعات قبلی (تیلور ۱۹۴۴، برقی و همکاران ۱۳۸۱، قبادیان ۱۳۸۵ و بصیری ۱۳۹۲) نشان داده است، عمق جریان در کانال فرعی و اصلی قبل از تلاقی به دلیل انسداد جریان کانال اصلی ناشی از وجود ناحیه جداسازی دچار بالا زدگی شده و پدیده برگشت آب در بالادست تلاقی رخ می‌دهد. در این تحقیق پس از به تعادل

استفاده در این شبیه‌سازی (۰/۴ تا ۶ میلی‌متر)، نتایج نشان داد رسوبات عمدتاً بصورت بار بستر جابه‌جا می‌شود و بیشترین میزان تعلیق مربوط به ذرات ریزدانه با قطر کمتر از ۰/۷ میلی‌متر است. با افزایش انحراف‌معیار و هم‌چنین افزایش ذرات ریزدانه موجود در دانه‌بندی، میزان غلظت در عرض کانال افزایش می‌یابد.

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 می‌شود 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

#### 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.
- Borghesi SM, Sakhaeifar SM and Daemi A, 2001. Laboratory study of open channel Junction. 6<sup>th</sup> 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: bed 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.